

ГІРНИЧА
ЕЛЕКТРО-
МЕХАНІКА
та **АВТОМАТИКА**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЗБІРНИК**

Заснований у 1965 р.

99

**Дніпро
2017**

Засновник – Національний гірничий університет

**Рекомендовано до видання вченою радою
Державного вищого навчального закладу
"Національний гірничий університет"**

(протокол № 20 від 26 грудня 2017 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Півняк Г.Г. **Головний редактор,**
академік НАН України, ректор ДВНЗ "НГУ"

Шкрабець Ф.П. **Заступник головного редактора,**
професор, ДВНЗ "НГУ"

Ципленков Д.В. **Відповідальний секретар,**
к.т.н., доцент, ДВНЗ "НГУ"

EDITORIAL BOARD

Pivniak G.G. **Chief Editor,**
Academician of NAS of Ukraine, Rector of
NMU

Shkrabets F.P. **Deputy Editor,**
Professor, NMU

Tsyplenkov D.V. **Executive Managing Editor,**
PhD, Associate Professor, NMU

Члени редакційної колегії

Бешта О.С. чл.-кор. НАН України, ДВНЗ "НГУ"

Блюсс Б.О. професор,
ІГТМ НАН України ім. Н.С. Полякова

Випанасенко С.І. професор, ДВНЗ "НГУ"

Заболотний К.С. професор, ДВНЗ "НГУ"

Іванов О.Б. професор, ДВНЗ "НГУ"

Колосов Д.Л. професор, ДВНЗ "НГУ"

Маліновський А.А. професор, НТУ "Львівська політехніка"

Мілих В.І. професор, НТУ "ХПІ"

Муха А.М. професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна

Плешков П.Г. професор, Кіровоградський НТУ

Розен В.П. професор, НТУ "КПІ"

Самуся В.І. професор, ДВНЗ "НГУ"

Сивокобиленко В.Ф. професор, ДонНТУ

Сиченко В.Г. професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна

Сінчук О.М. професор, КНУ

Слесарєв В.В. професор, ДВНЗ "НГУ"

Ткачов В.В. професор, ДВНЗ "НГУ"

Нойбергер Н. професор, Есслінгенський університет
прикладних наук, Німеччина

Резизант В. професор, Вроцлавський технічний
університет, Польща

The members of Editorial Board

Beshta O.S. Corresponding Member of NAS of
Ukraine, NMU

Bliuss B.O. Professor,
M.S. Polyakov IGTM of NAS of Ukraine

Vypanasenko S.I. Professor, NMU

Zabolotniy K.S. Professor, NMU

Ivanov O.B. Professor, NMU

Kolosov D.L. Professor, NMU

Malinovskiy A.A. Professor, NTU "Lviv Polytechnic"

Milykh V.I. Professor, NTU "KhPI"

Mukha A.M. Professor, Academician V. Lazarjan DNURT

Pleshkov P.G. Professor, Kirovograd NTU

Rozen V.P. Professor, NTU "KPI"

Samusia V.I. Professor, NMU

Sivokobylenko V.F. Professor, DonNTU

Sychenko V.G. Professor, Academician V. Lazarjan DNURT

Sinchuk O.M. Professor, KNU

Slesarev V.V. Professor, NMU

Tkachev V.V. Professor, NMU

Noiberger N. Professor, Esslingen University of Applied
Sciences, Germany

Rebizant V. Professor, Wroclaw University of
Technology, Poland

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України (наказ Міністерства освіти і науки України від 16.05.2016 № 515), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

Адреса редакції

Кафедра "Відновлювані джерела енергії", ДВНЗ "НГУ",
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна
Тел: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Факс: (056) 370-13-92
E-mail: ShkrabetsF@nmu.org.ua. gea@nmu.org.ua
Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>

Editorial office adress

Department of Renewable Energy Sources, NMU,
19 D. Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine
Tel: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Fax: (056) 370-13-92
E-mail: ShkrabetsF@nmu.org.ua. gea@nmu.org.ua
Website: <http://gea.nmu.org.ua>

Збірник зареєстрований у Міністерстві інформації України.
Реєстраційний номер КВ № 7498 від 03.07.2003.

©ДВНЗ "НГУ", 2017

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 62-83:621-313.333

В.А. Бородай, канд. техн. наук, О.Р. Ковальов

(Україна, Днепропетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")

РЕЗУЛЬТАТИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРОРОБКИ АВАРІЙНО-РЕЗЕРВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Анотація. Запропоновано комплексне рішення перетворення напруги кислотних акумуляторних батарей у напругу змінного типу, що відповідає промисловим стандартам та потужності джерела рівня мінімальних вимог одиничного споживача, яке відрізняється від відомих потенційною можливістю зниження капітальних витрат на його виготовлення.

Ключові слова: система підвищення напруги гальванічних батарей, однофазний автономний інвертор напруги із жорсткою фіксацією частоти, автоматична система стабілізації вихідної напруги.

Аннотация. Предложено комплексное решение преобразования напряжения кислотных аккумуляторных батарей в напряжение переменного типа, которое соответствует промышленному стандарту и мощности источника уровня минимальных требований единичного потребителя, отличающийся от известных, потенциальной возможностью снижения капитальных затрат на его изготовление.

Ключевые слова: система повышения напряжения гальванических батарей, однофазный инвертор напряжения с жёсткой фиксацией частоты, автоматическая система стабилизации выходного напряжения.

Abstract. A complex solution is proposed for converting the voltage of acid storage batteries into a voltage of a variable type, which corresponds to the industry standard and the power of the source of minimum requirements level of a single consumer, which differs from the known ones by the potential possibility of reducing the capital expenditures for its production.

Keywords: a system for increasing the voltage of galvanic batteries, a single-phase voltage inverter with a hard fixing frequency, an automatic system for stabilizing the output voltage.

Наявність територій України із нестабільною роботою систем промислової енергетики вимагає використання в приватній сфері джерел незалежного живлення. Аналіз побутових споживачів енергії, які забезпечують мінімум життєвих потреб, при знеструмленні від промислової мережі, ставить обладнання за пріоритетами – холодильники, освітлення, телевізійні та радіоприймачі. Необхідна потужність для зазначеного комплексу споживачів, за умови використання енергозберігаючих технологій, може коливатись у межах 0,3...0,8 кВт.

У якості первинних аварійних систем живлення такої потужності можуть використовуватись генератори із приводом від двигунів внутрішнього згоряння з орієнтовною вартістю 4...14 тис. грн., повітряні генератори - 6...15 тис. грн., комплекти сонячних систем від 50 тис. грн. Вартість окремого інвертора такого класу складає приблизно 3,5...17 тис. грн. Виходячи із огляду цін мобільного електрообладнання можливо стверджувати, що існуючі системи є мало доступними для середнього споживача. Тому розробка більш дешевих та надійних систем незалежного електропостачання є актуальною науковою та практичною задачею.

Вирішити проблему електропостачання, за таких умов, пропонується при використанні автомобільних акумуляторних батарей із поновленням заряду, або від промислової мережі із простим адаптером, або від бортової автомобільної системи енергоживлення. Зважаючи на те, що побутові прилади розраховані на змінну напругу 220 В частоти 50 Гц, структура нової системи живлення (рис.1) повинна містити блоки ПН підвищення напруги від 12 до 220 В, інвертор ІН, який створює із отриманої постійної напруги змінну, та блок Р стабілізації вихідної координати при хаотичній зміні навантаження.

Перший етап - створення моделей блока підвищення напруги акумуляторної батареї до рівня напруги промислової мережі та блока її інвертування [1]. Для вирішення цієї задачі використано компонент електронної лабораторії Multisim із складу пакету National Instruments. Результуючу модель перетворювача напруги наведено на рис.2.

До складу модуля 1 (рис.2 а) входить генератор прямокутних імпульсів із вихідною частотою 100 Гц. Його побудовано на RS - тригері із постійною часу 0,0075 с., яка визначається вхідними ємностями і резисторами зворотного зв'язку. Правильність роботи перезаряду ємностей визначається зворотними діодами, які увімкнено паралельно до резисторів зворотного зв'язку.

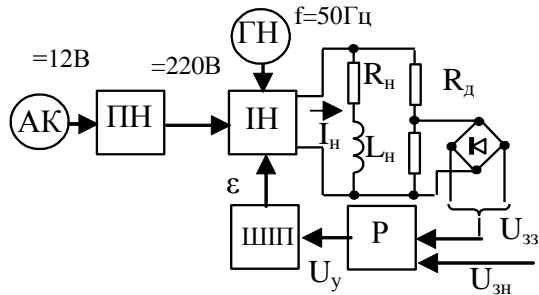
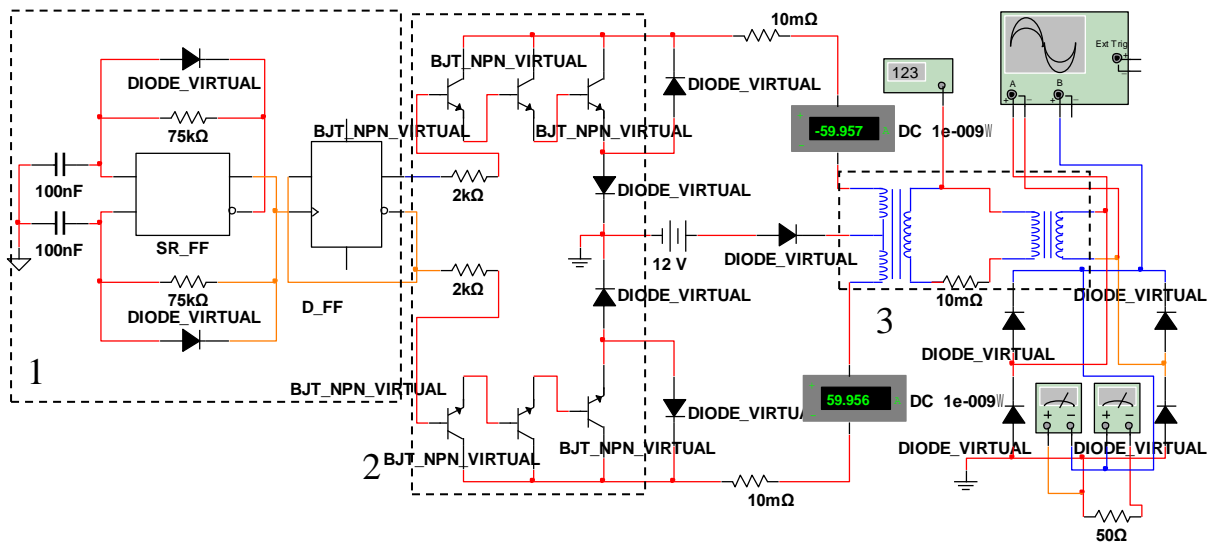
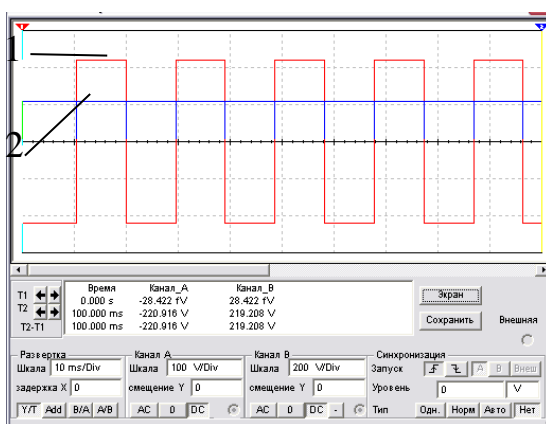


Рис.1. Функціональна схема системи живлення

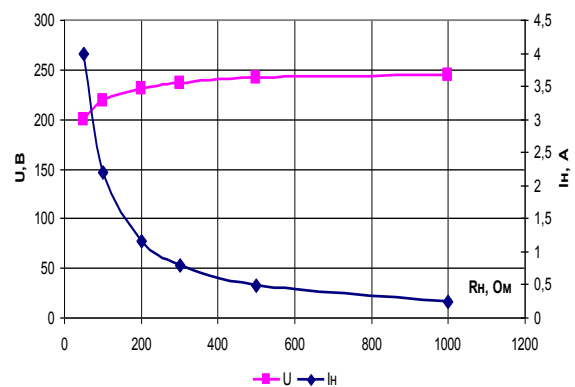
- АК – джерело постійної напруги (акумулятор);
- ПН – перетворювач напруги;
- ІН – інвертор напруги;
- ГН – генератор визначення частоти напруги;
- ШПП – широтно-імпульсний перетворювач;
- Р – регулятор напруги;
- R_n, L_n – параметри навантаження;
- R_d – параметри давача напруги



а



б



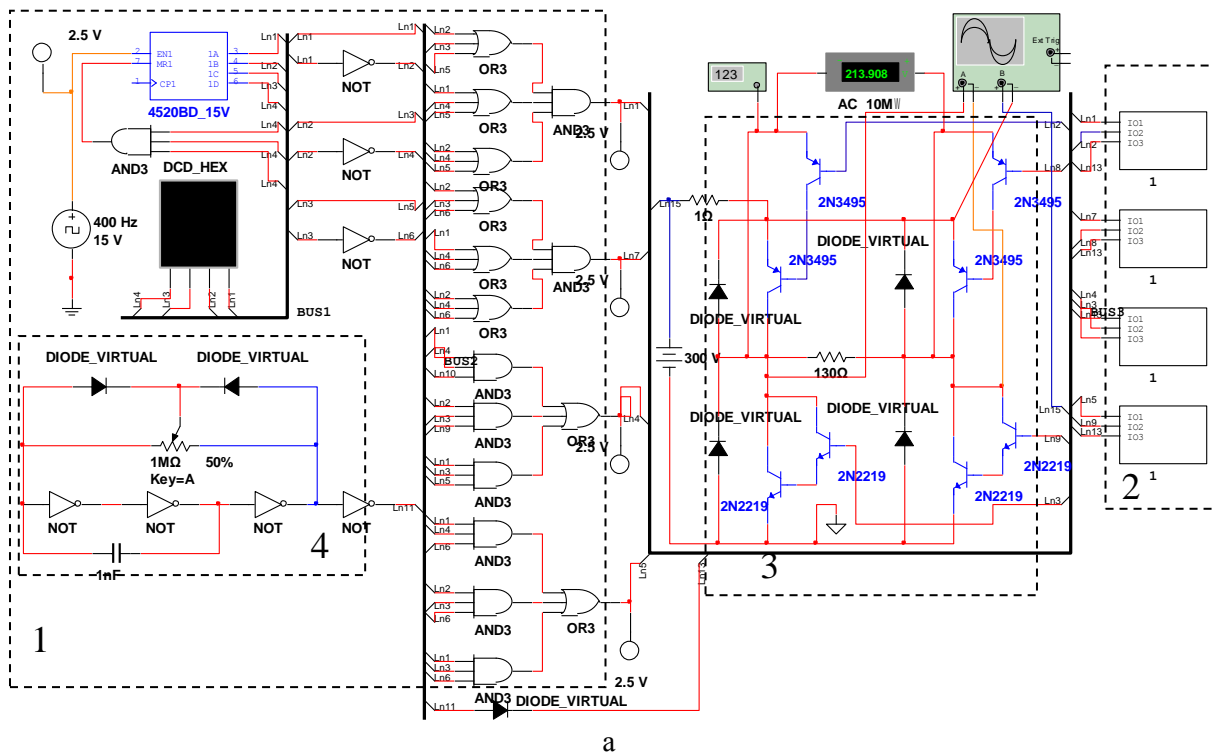
в

Рис.2. Модель блоку підвищення напруги.
а) схема моделі; б) часові діаграми на виході, масштаб 1 – 100 В/діл., 2 – 200 В/діл.;
в) зовнішні характеристики

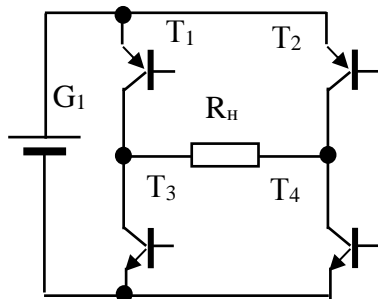
Сигнали керування на канали двохтактного підсилювача потужності пропускаються через ділянку частоти на два, побудований на D-тригері. Необхідний рівень струму через первинну обмотку трансфор-

матора вдалось отримати завдяки побудові підсилювачів потужності за схемою складового увімкнення транзисторів. У зв'язку із тим, що підсилювачі працюють на активно-реактивне навантаження колекторно-емітерний перехід охоплено зворотнім діодом. Додатково первинне джерело підключено через діоди для зменшення впливу на всі елементи кола первинної обмотки трансформатора. Коефіцієнт передачі першого каскаду трансформації дорівнює 8, а другого 6. Для захисту силових кіл першого і другого каскаду трансформації послідовно з навантаженням увімкнено резистори номіналом 0,1 Ом. Результуюча напруга на виході трансформаторного блоку 3 представлено міандром 1 рис.2 б, а кінцева випрямлена напруга лінією 2. Вигляд зовнішніх характеристик при зміні навантаження ілюструють можливість отримання при даному схемному рішенні потужності близько 0,8 кВт. Зниження напруги джерела при навантаженні не виходить за межі встановлені стандартами для промислових мереж. Моделювання блоку перетворювача напруги на жаль не відображає впливу частоти на елементи трансформації. Як наслідок, зорієнтуватись щодо масо-габаритних показників для реальної системи неможливо. Є очевидним, що цю задачу слід вирішувати на подальших етапах розробки.

Другий етап досліджень - розробка блоку інвертора однофазної напруги розрахункової потужності (рис.3). Компоненти, що входять до складу інвертора розділено таким чином: розподільник імпульсів – 1 (рис.3 а); проміжні підсилювачі – 2 для узгодження потужності між розподільником і силовим блоком; підсилювач потужності – 3; генератор прямокутних імпульсів із змінною шпаруватістю – 4.



а



б

| № п.п. | Вхідні сигнали | | | Вихідні сигнали | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | X ₀ | X ₁ | X ₂ | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |

в

Рис.3. Модель блоку інвертування напруги.
а) схема моделі; б) силова схема інвертора; в) таблиця істинності розподільника

Розподільник імпульсів містить генератор прямокутної напруги 4, вихід з якого заведено на чотирьох розрядний лічильник із непарним модулем та скидом у початковий стан при наявності коду бінарної вісімки. Такий код лічильника потрібен для створення умов відпрацювання таблиці істинності (рис.3 в). Запропонована послідовність імпульсів надає співвідношення 1:3 тривалості нульового стану або раціональної більшої вихідної напруги інвертора на навантаженні при одночасному уникненні режиму короткого замкнення (КЗ) силових ключів 3 при перехресному перемиканні плечей моста. Частота тактового генератора розподільника визначена на рівні 400 Гц, оскільки лічильник виконує функцію дільника частоти на 8, що забезпечує на виході інвертора стабільну частоту у 50 Гц. Схема узгодження 2, крім передачі імпульсів керування потрібного рівня напруги, виконує функцію широтно-імпульсної модуляції роботи силових ключів 3. Ця функція зарезервована для подальшого створення системи автоматичної стабілізації вихідної координати інвертора. Силовий блок 3 побудовано на складаних схемах транзисторів різної провідності, що відповідає особливостям стикування схем узгодження і підсилення потужності. Усі силові ключі охоплено зворотними діодами захисту від перенапруги.

Вигляд часових діаграм (рис. 4) наглядно показує працездатність однофазного інвертора напруги.

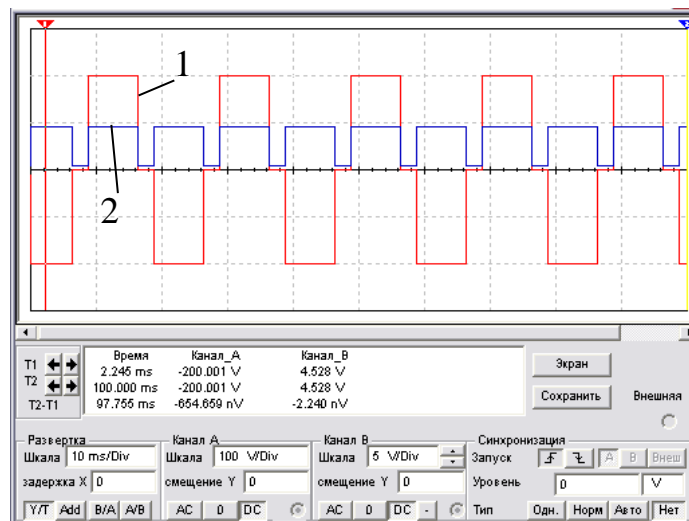


Рис.4. Часові діаграми інвертора

1 – напруга навантаження (масштаб 100 В/діл.); 2 – струм навантаження (масштаб 5 А/діл.)

При його роботі на активне навантаження отримана потужність складає приблизно 0,9 кВт. Розподільник імпульсів спроектовано так, що система одночасно забезпечує раціональний рівень напруги на навантаженні при умові уникнення режиму КЗ при переході із позитивного на негативний напівперіод вихідної величини.

Наступний етап – розробка системи стабілізації вихідної координати на виході інвертора напруги, яка у більшому ступені залежить від величини навантаження.

Як згадувалось вище однофазний інвертор ІН (рис.1) має зарезервовану можливість регулювання вихідної напруги за допомогою широтно-імпульсної модуляції сигналів керування. Для реалізації такого способу в системі управління джерелом живлення пропонується задіяти широтно-імпульсний регулятор ШПІ [2] із координатно-фазовою зміною шпаруватості ε . Тобто регулюючи шпаруватість імпульсів керування інвертора та контролюючи зворотній зв'язок за напругою $U_{зз}$ формується управляючий вплив на ШПІ з боку регулятора Р. Синтез Р і ε головним питанням при побудові автоматичної системи стабілізації напруги малопотужного джерела живлення.

Розглядаючи функціональну схему рис.1 перехідні функції ІН та ШПІ, як відомо, представляють собою аперіодичні ланки із постійною часу та коефіцієнтом передачі відповідно:

$$T_{\mu} = 0,005; \quad k_u = \frac{I_H}{\varepsilon}; \quad T_{\mu} = 0,005; \quad k_{ш} = \frac{\varepsilon}{U_y} .$$

Передбачено, що навантаження для джерела живлення є активно-індуктивним опором R_H, L_H . Відповідно його постійна часу визначається рівнянням $T_a = \frac{L_H}{R_H}$, а його перехідна функція також є аперіодичною.

дичною ланкою. Виходячи із отриманої структурної схеми рис.5 та бажаної перехідної функції системи, яка налагоджена на модульний оптимум, $W_{\text{баж}} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}$, регулятор повинен мати пропорційно-інтегрально-диференціальну структуру (ПІД). При синтезі регулятора отримані рівняння для визначення коефіцієнтів передачі для всіх його складових:

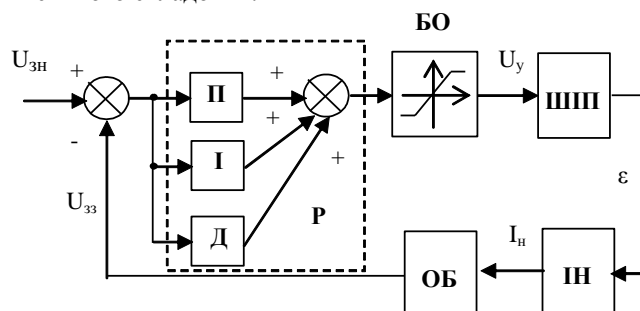


Рис.5. Структурна схема автоматичної системи джерела живлення.

БО – блок обмеження сигналу; **ОБ** – об’єкт управління; **П** – пропорційна частина регулятора;
І – інтегральна частина регулятора; **Д** – диференціальна частина регулятора

Пропорційна частина:

$$P = \frac{1}{2/R_n k_u k_{us}} + \frac{T_a}{2/R_n k_u k_{us} T_{\mu}};$$

Інтегральна частина:

$$I = \frac{1}{2/R_n k_u k_{us} T_{\mu} p};$$

Диференціальна частина:

$$D = \frac{T_a}{2/R_n k_u k_{us}} p.$$

Автоматична система керування зазвичай оперує напругою в 10 В. При цьому слід пам’ятати, що вихід регулятора може бути перевантажений сигналом корегування. Тому зазвичай його вихід обмежують на рівні ± 10 В за допомогою блоку обмеження.

Фактична реалізація регулятора при аналоговому відтворенні передбачає послідовне увімкнення П та ПІД ланок. При цифровій побудові достатньо введення в систему управління коефіцієнтів передачі, які наведені вище.

Розробляема система електропостачання не має високих вимог щодо швидкодії та точності підтримки стабілізованої координати так, як промислова мережа допускає зміну напруги в межах ± 15 % від номінальної напруги, а зміна навантаження процес не швидкий.

З комплексу проведених дослідів слід зробити наступні висновки:

- недоступність для пересічного споживача існуючих мобільних джерел живлення вимагає розробки систем електропостачання потужності близько 0,8 кВт вартості меншої за існуючі;
- запропоноване схемне рішення блоку підвищення первинної напруги до рівня промислової мережі забезпечує потужність 0,8 кВт, а зниження напруги на виході блока трансформації при зміні навантаження не виходить за межі встановлених стандартами;
- модель перетворювача напруги не відображає вплив частоти на елементи трансформації, як наслідок, зорієнтуватись щодо масо-габаритних показників та базової частоти реальної системи утруднено і цю задачу планується вирішити на подальших етапах розробки;

- при проектуванні розподільника імпульсів інвертора напруги встановлено, що для отримання раціонального значення на виході, співвідношення тривалості нульового і максимального значення вихідної величини повинно складати 1:3 забезпечуючи також уникнення умов КЗ джерела при перемиканні ключів силового блоку;
- для схеми рис.5 регулятор автоматичної системи стабілізації має ПІД структуру;
- вимоги до швидкодії та точності автоматичної системи стабілізації напруги джерела електропостачання не значні із-за не швидкої зміни навантаження та можливого обмеження перепаду напруги у межах $\pm 15\%$ від номіналу.

Список використаних джерел

1. Бородай В.А. Моделирование систем импульсно-фазового управления преобразовательных устройств /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 94. – С 64 – 69.
2. Бородай В.А. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 95. – С 54 – 58.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доц. Галушко О.М.

УДК 622.64:621.318.4

В.М. Прокуда, канд. техн. наук.

(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШАХТНОГО КОНВЕЄРА
З РЕЗИНОТРОСОВОЮ СТРІЧКОЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЙОГО
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

Анотація. У статті запропоновано спосіб визначення завантаження конвеєрної стрічки за допомогою індукційного датчика, що може бути використано при впровадженні частотно-регульованого приводу, а також для отримання інформації щодо енергоефективності конвеєрних ліній. Розроблено аналітичну модель, котра дає можливість знаходити масу завантаженої або порожньої стрічки конвеєра за ЕРС індукції, що наводиться у котушці індуктивності, залежно від вимушених коливань тросу. Виконано моделювання процесу завантаження конвеєра та відповідних коливань тросу у середовищі MATLAB Simulink. Виконано аналіз спектру вимушених коливань тросу, та отримано що, за період завантаження конвеєра зростають коливання стрічки на нижчій частоті, а при сході з нього вантажу – на частоті більшій у два рази, що відповідає теоретичним міркуванням.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, енергоефективність, індукційний датчик, коливання тросу.

Аннотация. В статье предложен способ определения загрузки конвейерной ленты с помощью индукционного датчика, что может быть использовано при внедрении частотно-регулируемого привода, а также для получения информации об энергоэффективности конвейерных линий. Разработана аналитическая модель, которая дает возможность находить массу загруженной или пустой ленты конвейера по ЭДС индукции, которая наводится в катушке индуктивности, в зависимости от вынужденных колебаний троса. Выполнено моделирование процесса загрузки конвейера и соответствующих колебаний троса в среде MATLAB Simulink. Выполнен анализ спектра вынужденных колебаний троса, и получено, что за период загрузки конвейера растут колебания ленты на более низкой частоте, а при сходе с него груза - на частоте большей в два раза, что соответствует теоретическим рассуждениям.

Ключевые слова: ленточный конвейер, энергоэффективность, индукционный датчик, колебания троса.

Abstract. A method for determining the loading of a conveyor belt by means of an induction sensor is proposed. Its can be used for the introduction of a frequency-controlled drive, as well as for obtaining information on the energy efficiency of conveyor lines. An analytical model is developed, which makes it possible to find a lot of loaded or empty conveyor belt for EMF induction, given in inductor, depending forced oscillations rope. The simulation of the process of loading the conveyor and the corresponding oscillations of the conveyor cable in the MATLAB Simulink environment is performed. The analysis of the spectrum of the forced oscillations of the rope is made, but it is found that during the loading of the conveyor the fluctuations of

the tape at the lower frequency increase, and at the approach of the cargo - at a frequency more than twice that corresponds to the theoretical reasoning.

Keywords: belt conveyor, energy efficiency, induction sensor, rope fluctuations.

Постановка задачі Магістральний конвеєрний транспорт є одним з найбільш енергоємних споживачів вугільних шахт [1, 2]. Визначення питомого електроспоживання поодиноких магістральних конвеєрів для підвищення енергоефективності становить суттєву задачу, адже системи обліку електроенергії у підземних споживачів як правило відсутні, або не відкалібровані належним чином [3-5]. Можливо визначити електроспоживання за непрямим показником – масою вугілля на стрічці. Для реалізації названого методу існують такі технічні засоби:

- конвеєрні ваги. У процесі зважування відбувається постійний механічний зніс деталей ваг, і як наслідок – необхідність їх доволі частого обслуговування та заміни [6];
- оптичний датчик. Вимірювання об'єму вугілля (зважуючи на відому щільність відповідно також і маси), яке транспортується за допомогою випромінювача і фотодатчика, встановленого над конвеєрним ставом. Існує складність їх застосування у запылених середовищах, таких як шахтні виробки, навіть при малій довжині хвилі випромінювання (радіоактивні випромінювачі), оскільки при вивантаженні рудничної маси на конвеєр в атмосферу надходить значна кількість дрібних металевих частинок [7];
- акустичний датчик. Маса вугілля, що вивантажується, визначається за інтенсивністю акустичного випромінювання поблизу. Датчик знаходиться у стані розробки, про його переваги та недоліки говорити поки що рано [8].

Зважаючи на вищесказане, можна резюмувати, що надійних засобів для непрямого визначення питомого електроспоживання у літературних джерелах не було знайдено.

Метою роботи є розроблення способу визначення завантаження шахтного конвеєра з резинотросовою стрічкою за допомогою індуктивного датчика коливань.

Завданням роботи є розробка математичної та імітаційної моделей для визначення індуктивним датчиком завантаження конвеєрної стрічки, моделювання фізичного процесу коливань конвеєрної стрічки у програмному середовищі MATLAB.

Основний матеріал. Стрічка магістрального конвеєра підтримується вздовж ставу на роликкоопорах. Як правило, на початку або у кінці ставу розміщується двигун, що передає обертове зусилля на відповідний барабан. Між роликкооперами, що розміщені з інтервалом 0,5 – 1,5 м, стрічка рухається вільно, її поперечні коливання зумовлені випадковими рухами вугілля та його інтегральною масою між двома роликкооперами. Між роликкооперами у місці завантаження, окрім зусилля від наявності маси на стрічці, виникає також зусилля, зумовлене падінням вугілля (рис. 1):

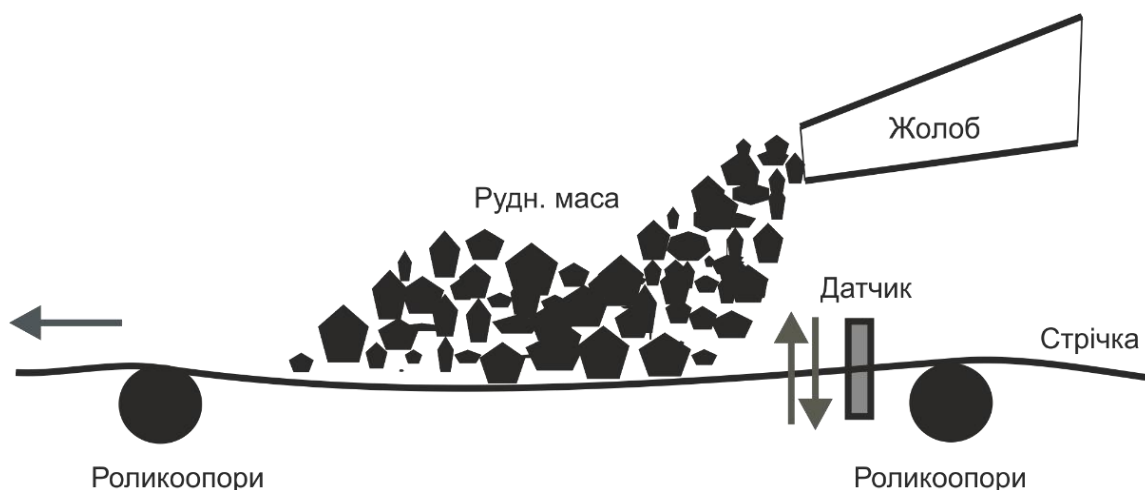


Рис 1. Схема надходження вугілля на конвеєрну стрічку

Ідея отримання даних про масу вугілля на стрічці полягає у використанні індукційного датчика знімання коливань каната, на зразок звукознімача електрогітари. Датчик, що наведений на рис. 2 біля правої роликкоопори, являє собою котушку індуктивності з постійним магнітом замість серцевини (рис 2).

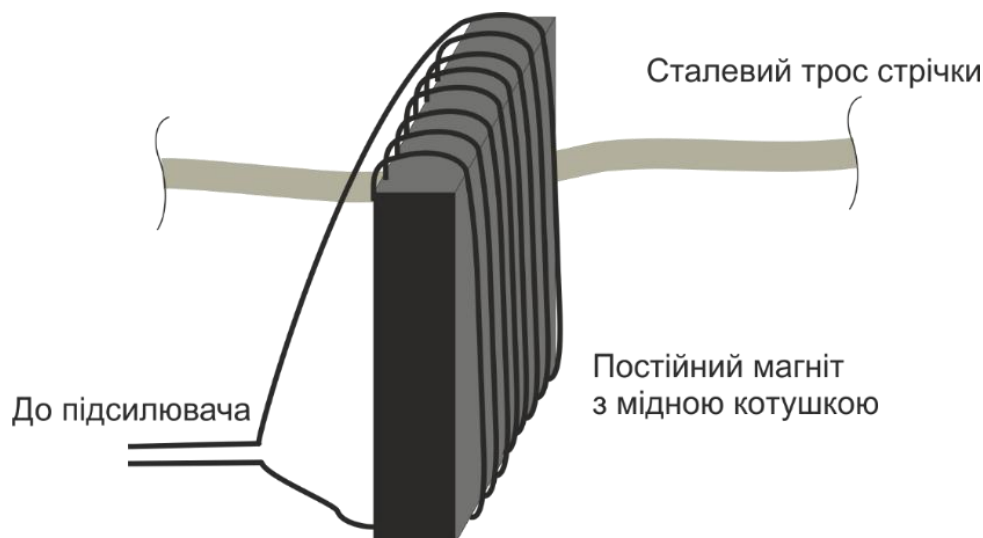


Рис 2. Схема датчика зміння коливань троса

ЕРС індукції, що наводиться у котушці датчика змінним магнітним полем, при коливаннях металевого тросу поблизу нього, визначається згідно закону так:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -K \frac{dA}{dt}, \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань; dA/dt – швидкість коливань; K – коефіцієнт пропорційності, різний для кожної системи. Згідно із законом збереження енергії

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mV^2}{2}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт натягу троса; A – амплітуда коливань; m – маса вантажу зі стрічкою; V – швидкість коливань (те саме, що й dA/dt). Звідси маса, яку необхідно знайти :

$$m = \frac{kA^2}{V^2} \text{ або } m = \frac{kA^2}{(dA/dt)^2} \quad (3)$$

Використовуючи формулу (1), запишемо

$$m = \frac{k \int Edt^2}{(E/K)^2} = \frac{K^2 k \int Edt^2}{E^2}. \quad (4)$$

Маса вантажу розраховується як різниця між визначеною за формулою (4) величиною та масою стрічки, котра фактично відома. Обробка отриманого за допомогою датчика сигналу (тобто змінної ЕРС) відбувається таким чином (рис 3):

1. З датчика коливань сигнал надходить на посилювач амплітуди струму;
2. За допомогою датчика струму сигналу надається цифрове відображення;
3. З отриманого цифрового сигналу на вході контролера формується в кожен дискретний момент часу значення амплітуди і частоти коливань;
4. Формується масив даних поздовжнього розподілення маси на конвеєрній стрічці, визначається інтегральна маса на стрічці.
5. Залежності від поточного стану вивантаження рудничної маси на конвеєр, формується інформація щодо електроспоживання двигуна конвеєра.

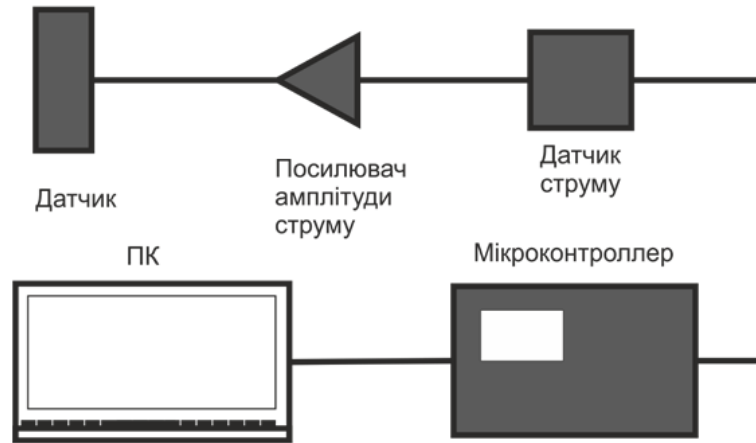


Рис 3. Принципова схема зв'язку між датчиком коливань та ПК для обробки результатів енергомоніторингу

Для перевірки математичної моделі була розроблена імітаційна у програмному середовищі MATLAB Simulink. Вигляд розробленої моделі наведено на рис. 4.

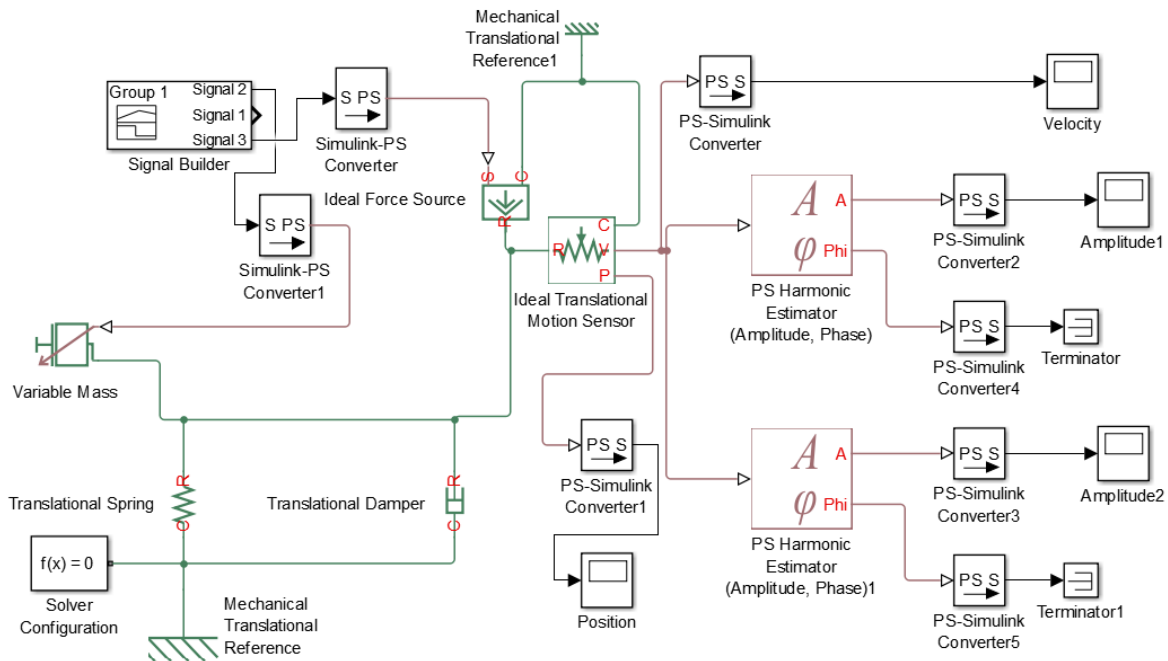


Рис. 4. Вигляд розробленої моделі у програмному пакеті MATLAB Simulink

Механічні коливання конвеєрної стрічки описуються за допомогою блоків translational spring (пружина, що моделює поступальний рух), translational damper (поступальний демпфер), variable mass (змінна маса), ideal force source (джерело ідеальної сили). За допомогою блока signal builder (моделювання сигналу) подаються значення змінної маси та змінної сили, що відповідають режимам роботи холостого та навантаженого конвеєра. Блок Signal 2 задає масу (в кг), а signal 3 – силу (в кН) навантаження (рис. 5).

Як видно з рис. 5, до 4-ї секунди конвеєр транспортує лише масу стрічки (у прикладі 200 кг), а протягом проміжку навантаження (до 12-ї секунди) приймає вантаж масою 300 кг/с. Після проміжку навантаження маса конвеєра знову набуває значення 200 кг.

За допомогою блока ideal translational motion sensor (ідеальний датчик поступального руху) розраховується швидкість коливань та положення маси у кожен момент часу. Згідно з вище наведеним методом визначається амплітуда та частота коливань – що виконується за допомогою блоків ps harmonic estimator (оцінка гармонійних коливань), котрі відрізняються заданим номером гармоніки для виміру: для першого блока (знаходяться вище на моделі) визначається амплітуда коливань 0,25 Гц (1-ша гармоніка), а для другого блока – 0,5 Гц (2-га гармоніка). На рис. 6, а) та б) наведено графік значення амплітуд відповідно для гармонік 0,25 та 0,5 Гц коливання конвеєрної стрічки.

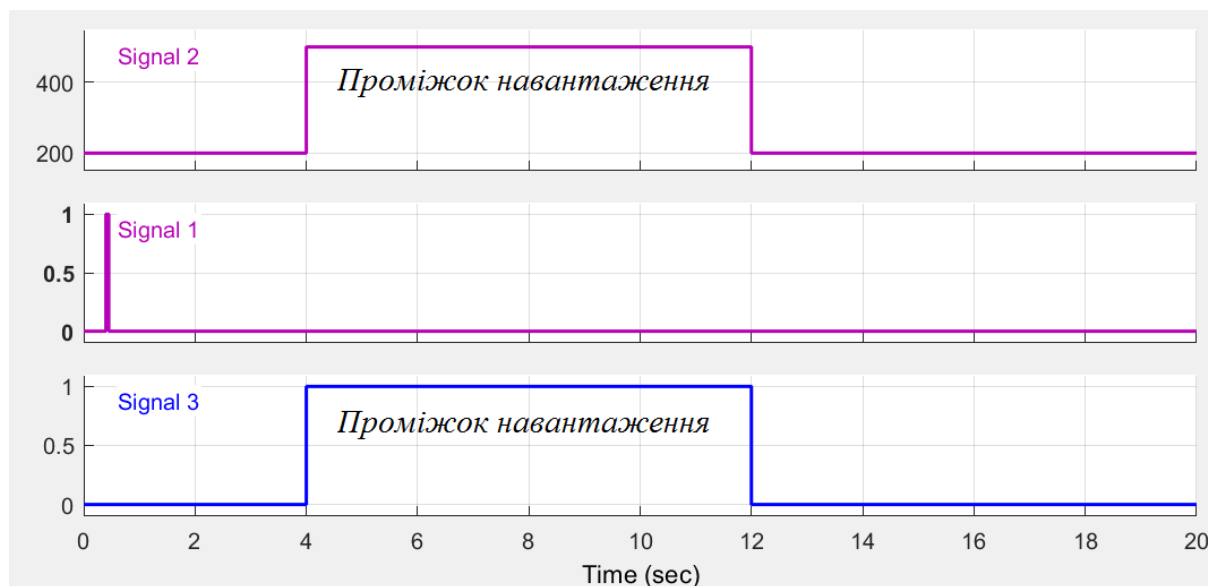


Рис. 5. Сформовані вхідні сигнали у блоці signal builder

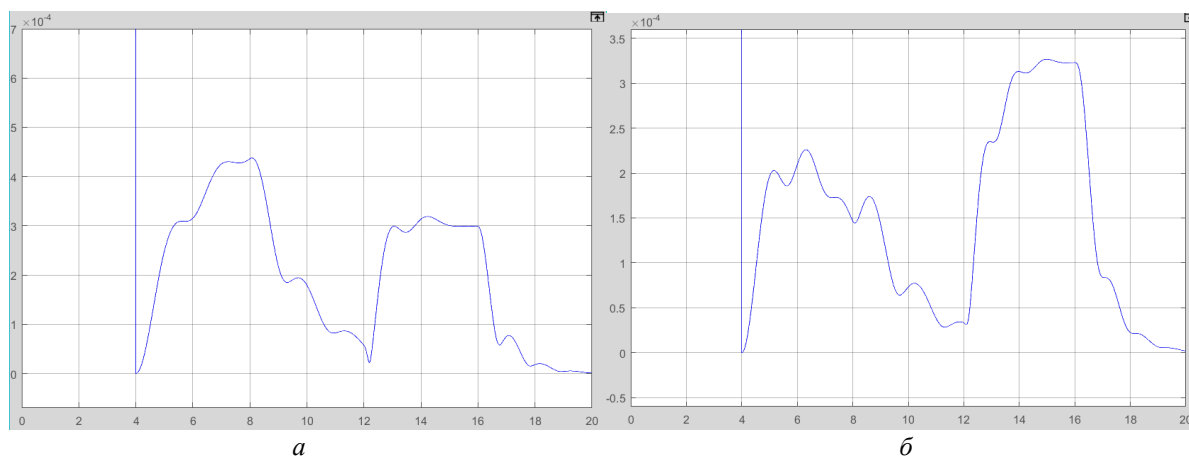


Рис. 6. Амплітуда сигналу гармонік 0,25 Гц (а) та 0,5 Гц (б) коливання конвеєрної стрічки

З виконаного моделювання можна зробити висновок, що за період завантаження конвеєра зростають коливання стрічки на нижчій частоті (в даному разі 0,25 Гц), а при сході з нього вантажу – на частоті 0,5 Гц, що відповідає теоретичним міркуванням.

Висновки: за допомогою запропонованого способу використання індукційного датчика визначення коливань конвеєрної стрічки можливо отримувати інформацію щодо завантаження конвеєра для керування частотно-регульованим приводом, а також для визначення вихідної інформації подальшого аналізу енергоефективності конвеєрів.

Список літератури

1. Пивняк, Г.Г. Новые способы и проекты повышения эффективности электроэнергетического комплекса угольной шахты / Пивняк Г.Г., Разумный Ю.Т., Заика В.Т. // Науковий вісник НГА України. - Дніпропетровськ: [НГА України] – 1999. – № 6. – С. 95–104.
2. Прокуда, В.Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» / В.Н. Прокуда, Ю.А. Мишанский, С.Н. Проценко // Гірничі електромеханіка. – 2012. – № 88. – С. 107-111..
3. Типовое руководство по оборудованию и эксплуатации унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами (УТАС) в угольных шахтах (для Украины). Руководящий нормативный документ Министерства топлива и энергетики Украины. - Донецк: 2004. -100 с.

- 4 Научно-производственное предприятие Рудпромавтоматика [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.gpa.ua/html/ru/products/index.php>
- 5 Система автоматизированного управления разветвленными конвейерными линиями САУКЛ [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.instroyservis.com/index.php?page=saukl&lang=4>
- 6 Загорулько, А.Д. Методика выполнения измерений массы твердого топлива, поступающего на тепловые электростанции, автоматическими конвейерными весами / А.Д.Загорулько, В.А.Кравчук, В.А.Катунин. – М.: СПО «Союзте-хэнерго», 1990. – 9 с.
- 7 Кондрахин, В. П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съёмного тензоизмерительного устройства с учётом натяжения ленты / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 1. – С. 79–87. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npdntu_gir_2013_1_11.pdf
- 8 Гаврилов, П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / Гаврилов П.Д., Носков А.П.// Электротехника, №5, –2009 с. 17–21.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Корсуном В.І.

УДК 681.523:621.22

В. В. Радченко, канд. техн. наук., доцент
(Україна, Запорізька державна інженерна академія)

СЕМАНТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИГНАЛУ

***Анотація.** Наведена основа семантичної моделі перетворення трифазного сигналу, що дозволяє формувати впливи відповідно до змістовного наповнення контрольованого процесу. Розглянуті особливості формування основних компонентів моделі та їх взаємодії. Відображені впливи основних складових і компонентів процесу перетворення. Отримані характеристики перетворення відхилення параметрів сигналу і організації відповідних впливів. Показані основні можливості й шляхи організації ефективного енергоінформаційного обміну керованого технічного об'єкту.*

***Ключові слова:** Семантическая модель, преобразование трехфазного сигнала*

***Аннотация.** Приведена основа семантической модели преобразования трехфазного сигнала, позволяющая формировать влияния в соответствии с содержательным наполнением контролируемого процесса. Рассмотрены особенности формирования основных компонентов модели и их взаимодействия. Отражены влияния основных составляющих и компонентов процесса преобразования. Получены характеристики преобразования отклонения параметров сигнала и организации соответствующих влияний. Показаны основные возможности и пути организации эффективного энергоинформационного обмена управляемого технического объекта.*

***Ключевые слова:** Семантична модель, перетворення трифазного сигналу*

***Abstract.** Basis of semantic model of three-phase signal signal shaping, allowing to form influencing in accordance with the rich in content filling of process, is resulted. The features of forming of basic components of model and their co-operation are considered. Influencing of basic constituents and components of process of transformation is reflected. Descriptions of transformation of rejection of parameters of signal and organization of the corresponding influencing are got. Basic possibilities and ways of organization of effective energyinformation exchange of the guided technical object are shown.*

***Key words:** Semantic model, transformation of three-phase signal*

Існуючі моделі перетворення змінних сигналів переважно зорієнтовані на виділення вихідних величин без урахування семантичних складових процесів, що алгоритмічно надає їм ознак інерційності, [1, 2]. Тому розроблено відповідний метод динамічного визначення відхилення змінної величини від встановленого рівня, вільний зазначених недоліків, [1]. Основа його дії полягає у формуванні керуючого фазового впливу, пропорційного семантиці відхилення контрольованого синусоїдального сигналу, яка визначається порівнянням відповідно формованих інтегральних величин, [3]. Однак, семантика трифазних сигналів має особливості виділення й використання.

Залежно від варіанту реалізації перетворювача за одною з трифазних схем, сигнал на його виході може містити три пульсації або – шість впродовж періоду. Проте формування сигналу управління здійснюється ідентично. Тому адекватним є розгляд формування сигналу управління по одному каналу, рис. 1. На наведеній моделі другий робочий цикл, відповідний рівню u_1 , умовно суміщений з відповідним пе-

ршим півперіодом першого робочого такту. Умовно також змінена полярність сигналів оскільки ці допущення, практично не відбиваючись на адекватності, істотно спрощують співвідношення моделі.

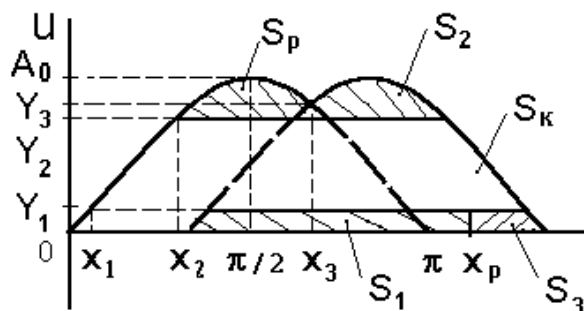


Рис. 1. Поєднання робочих тактів при визначенні рівнів

Особливістю такої моделі є необхідність визначення координат зміни фази (x_3, y_3) й початку регулюючого півперіоду. Алгоритм формування сигналу управління трифазного регулятора напруги (РН) по одному каналу приведений на рис. 2. Як видно з рисунка, діапазон управління при зміні амплітудного значення напруги від A до A_1 складає 180° і частково охоплює другу пульсацію випрямленої напруги. При визначенні кута регулювання початок координат зміщується в т. 0. В процесі розрахунку амплітудне значення напруги A змінюється в межах $[A_0, u_2]$ із заданим кроком.

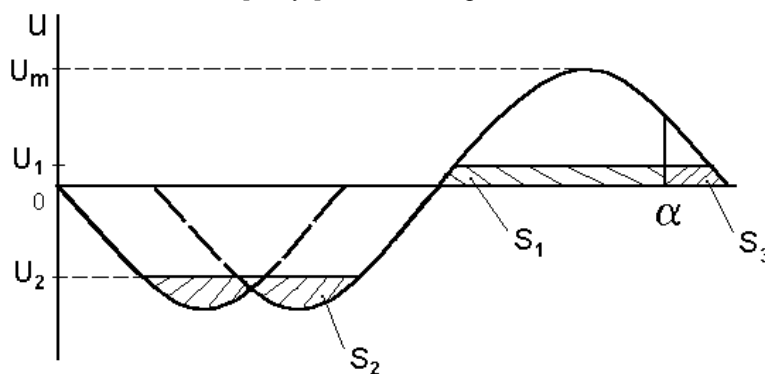


Рис. 2. Формування сигналу управління трифазного РН

Площа одного півперіоду синусоїдального сигналу складає

$$S = 2 A. \quad (1)$$

Діюча умова

$$S_2 = k S. \quad (2)$$

Площа для другого такту обчислюється за формулою:

$$S_1 = 2S_C + S_{\Pi}. \quad (3)$$

Складові визначаються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} S_C &= A (1 - \cos x_1); \\ S_{\Pi} &= 2 y_1 (\pi/2 - x_1). \end{aligned} \quad (4)$$

Площа пропорційна сигналу відхилення

$$S_3 = S_1 - S_2. \quad (5)$$

На кожному кроці для значення A визначаються нові координати рівнів обмеження

$$\begin{aligned} x_1 &= \text{Arcsin}(y_1/A); \\ x_2 &= \text{Arcsin}(y_2/A). \end{aligned}$$

При розрахунку фазового кута, залежного од семантики, визначаються відповідні різниці координати – C_3, C_4, C_5 .

При цьому C_3 і C_5 знаходяться в межах обернених S_C , а C_4 – в межах S_{II} .

Для підвищення точності різниці координати фазових кутів визначаються з наступних умов:

- $S_3 \leq S_C$

$$C_3 = \text{Arccos}(1 - S_3/A); C_4 = 0; C_5 = 0.$$

- $S_3 \leq S_1 - S_C$

$$C_3 = x_1; C_4 = \frac{S_3 - S_C}{y_1}; C_5 = 0.$$

- $S_3 > S_1 - S_C$

$$C_3 + C_4 = \pi - x_1; C_5 = \text{Arccos}\left(\frac{S_3 - (S_C + S_D)}{A} - 1\right)$$

Тоді загальний кут впливу складає

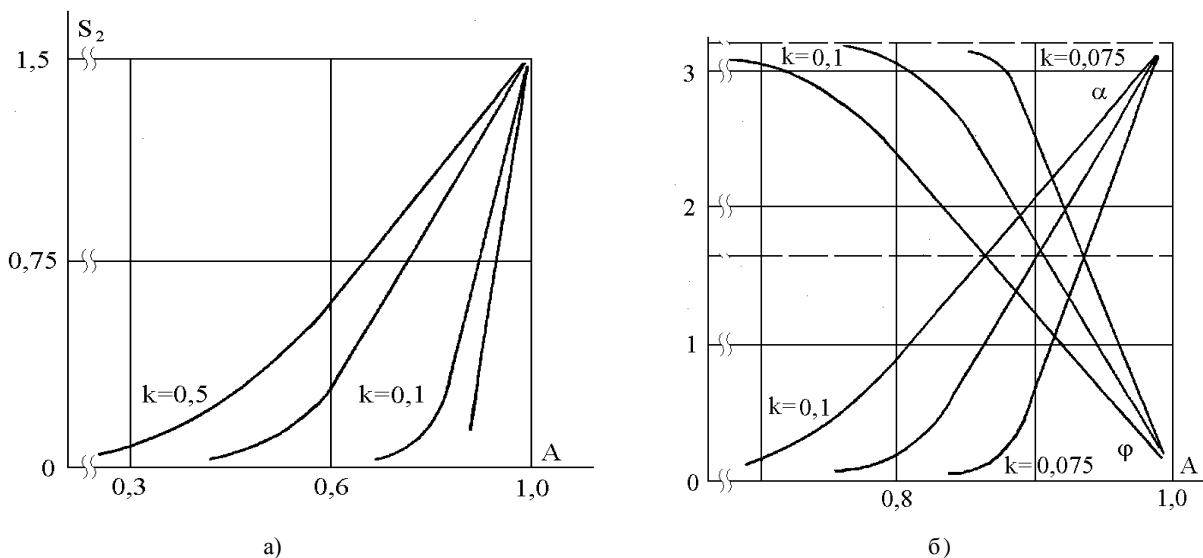
$$\varphi = C_3 + C_4 + C_5. \tag{6}$$

Початковий кут впливу складає

$$\alpha = \pi - \varphi. \tag{7}$$

За результатами моделювання отримані залежності $S_2 = f(A)$, $\varphi = f(A)$, $\alpha = f(A)$, рис. 3.

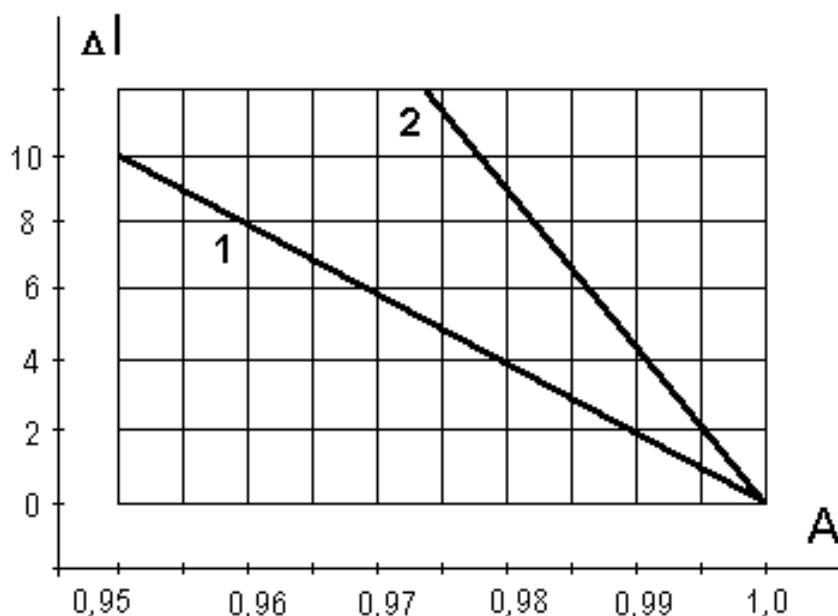
Приведені характеристики відображають достатню крутизну і лінійність на рівні робочої ділянки. Вони дозволяють динамічно реалізувати необхідний рівень якості сигналу управління.



**Рис. 3. Характеристики перетворення:
а – інформативної області; б – вихідні**

Аналіз отриманих характеристик показує, що при трифазній реалізації методу вимірювань, частина лінійної ділянки характеристик декілька збільшується, а в трифазному РН зростає коефіцієнт посилення і значення випрямленої напруги на його виході. Аналіз математичних співвідношень моделі також показує, що вони містять періодичні функції однакового характеру для кожного з робочих тактів, що також забезпечує нові якості. Так, зміна частоти контрольованої напруги спричиняє за собою пропорційну зміну площ S_1 і S_2 , а також і S_3 , зміна якої забезпечує постійність сформованого кута α .

Інформаційні можливості розроблених методів і вимірювальних перетворювачів змінної напруги на їх основі представлені на рис. 4.



**Рис. 4. Інформаційні характеристики вимірювальних перетворювачів:
1 – однофазний варіант виконання; 2 – трифазний**

Слід зазначити, що дані залежності мають аналітичне й практичне значення, приведені у відносних одиницях амплітуди A , що відображають відносну семантику вимірювань щодо зміни поточного амплітудного значення контрольованої напруги гідрогенератора. З приведеного також витікає, що трифазний варіант, використовуючи семантику двох фаз, що чергуються, здатний усереднено здійснювати точніше й оперативніше перетворення сигналів контролю змінного сигналу.

Таким чином, практичне виділення істотної семантичної складової трифазного процесу дозволяє забезпечити необхідний рівень і виключити інерційність каналу вимірювання.

Основні висновки

Наведені характеристики моделювання відображають продуктивність семантичного підходу в формуванні досить високого енергоінформаційного потенціалу впливів, безпосередньо залежного від налаштувань первинного трифазного перетворювача.

Список літератури

1. Радченко В. В. Спосіб визначення відхилення змінної величини від встановленого рівня. G01 R 19/22, Пат. України, № 68900, від 10. 04. 2012, Бюл. №7. – 7 с.
2. Радченко В. В. Безінерційне виміювання відхилень змінних процесів. // Наук.-техн. збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”. – Д.: РВК НГУ. – 2013. – № 91. – С. 73 – 78.
3. Радченко В. В. Семантична модель перетворення змінного сигналу. //// Наук.-техн. збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”. – Д.: РВК НГУ. – 2017. – № 98. – С. 57 – 59.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

С. В. Дибрін, О. В. Толстов, А. О. Буряк
(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

ВИБІР ТИПУ АКУМУЛЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧИСЛА ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Анотація. Запропоновано провадити аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії для шахтного безконтактного транспорту на прикладі існуючих рішень для автомобільного транспорту. Виявлено, що найбільші компанії-виробники гібридних автомобілів найчастіше обирають нікель-металогідридні та літій-йонні типи акумуляюючих елементів гібридної силової установки. Встановлено також, що світові виробники виявляють все більший інтерес до такого типу накопичувача енергії, як йоністор (суперконденсатор). Існуючі переваги дозволяють вважати суперконденсатор одним з найбільш перспективних автономних джерел додаткового живлення на рудниковому безконтактному електровозі для вирівнювання графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції та можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів.

Ключові слова: рудниковий безконтактний електровоз, вторинні джерела енергії, вирівнювання графіка навантаження.

Аннотація. Предложено осуществлять анализ и выбор перспективных вторичных источников энергии для шахтного бесконтактного транспорта на примере существующих решений для автомобильного транспорта. Выявлено, что крупнейшие компании-производители гибридных автомобилей чаще всего выбирают никель-металлогидридные и литий-ионные типы аккумулирующих элементов гибридной силовой установки. Установлено также, что мировые производители проявляют все больший интерес к такому типу накопителя энергии, как ионистор (суперконденсатор). Существующие преимущества позволяют считать суперконденсатор одним из самых перспективных автономных источников дополнительного питания на рудниковом бесконтактном электровозе для выравнивания графика нагрузки тяговой преобразовательной подстанции и возможности увеличения числа эксплуатируемых на горизонте электровозов.

Ключевые слова: рудничный бесконтактный электровоз, вторичные источники энергии, выравнивание графика нагрузки.

Abstract. The sources of electric power in hybrid motor transport are analyzed. It is established that nickel-metal hydride and lithium-ion batteries are most often used, thus interest in supercapacitors is increasing. Supercapacitors have advantages that allow to effectively increase the number of non-contact electric locomotives operating on the horizon.

Key words: mine non-contact electric locomotive, secondary energy sources, load curve alignment.

Постановка проблеми. Завдання можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту за незмінних інших умов пов'язане з вирівнюванням графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4. На перших етапах дослідження цього питання здійснено: аналіз складових навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту [1] і аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту; пошук і аналіз можливого технічного рішення зі збільшення числа використовуваних електровозів (В14-900). Як результат: запропоновано зменшити значення потужності, що передається двигунам, встановивши для цього на кожному електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності); розраховано значення необхідної енергоємності автономного джерела енергії; зроблено висновок щодо доцільності подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії та схеми його підключення на електровозі для збільшення кількості одночасно задіяних одиниць рухомого складу на горизонті.

Мета роботи. Вибір типу акумуляюючого елемента накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів.

Аналіз досліджень і публікацій. Шахтний транспорт з безконтактною передачею енергії й досі залишається досить унікальною розробкою з рядом специфічних особливостей. У відомих літературних джерелах не знайдено методик вибору типу накопичувача енергії з урахуванням умов і особливостей експлуатації такого виду транспорту.

Результати дослідження. Сьогодні інтенсивно розвивається ідея застосування декількох видів джерел енергії в галузі автомобільного транспорту. Вже існує безліч комерціалізованих рішень різних автомобільних компаній світу. Режим роботи накопичувача енергії на автомобільному та електровозному транспорті (в аспекті вирівнювання графіка навантаження) не має принципових відмінностей, тому аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії на прикладі автомобільного транспорту можна вважати обґрунтованим.

Вибір типу акумуляюючого елемента для гібридного транспортного засобу досить складне науково-технічно-економічне завдання. Результат його вирішення безпосередньо пов'язаний з подальшою доступністю і конкурентоспроможністю самого транспортного засобу. До певної міри це завдання може бути спрощене за допомогою аналізу ринку гібридних машин і джерел електроенергії, встановлених на них.

Найбільші виробники витрачають значні кошти на дослідження і проектування, очікуючи отримати прибуток, а це можливо лише за умови подальшої затребуваності продукції. Попит забезпечується й оптимальними технічними та експлуатаційними характеристиками компонентів продукції.

Проаналізуємо типи акумуляюючих елементів гібридних автомобілів, пропонованих у 2012 році (і деяких планованих до випуску) найбільшими (у 2010 році [2]) компаніями-виробниками (див. табл. 1).

Таблиця 1

| Модель 1 | Тип акумулятора 2 |
|--|--|
| Toyota Prius Five (Two, Three, Four) | Герметичний нікель-металогідридний (Ni - MH), 6.5 А·ч, 201,6 В [3] [4] |
| Toyota Prius Plug - in Hybrid, Toyota Prius Plug - in Hybrid Advanced Prius | Літій-йонний [5] |
| Toyota Prius V Five (Two, Three) | Герметичний нікель-металогідридний [6] |
| Toyota Prius c Four (One, Two, Three,) | Герметичний нікель-металогідридний [7] |
| Toyota Camry Hybrid | Герметичний нікель-металогідридний [8] |
| Toyota Highlander Hybrid | Герметичний нікель-металогідридний [9] |
| Toyota RAV4 EV | Літій-йонний (Li - Ion) 41,8 кВт·ч [10] |
| General Motors Chevrolet Volt | Т-подібний літій-йонний 16,5 кВт·ч [11] |
| General Motors Cadillac Escalade Hybrid | Нікель-металогідридний [12] |
| Volkswagen Touareg Hybrid | Нікель-металогідридний [13] |
| Volkswagen Golf TDI Hybrid | Нікель-металогідридний [14] |

Продовження таблиці 1.

| 1 | 2 |
|-----------------------|--|
| Volkswagen Jetta 2013 | Літій-йонний 1,1 кВт·ч [15] |
| Hyundai Sonata Hybrid | Літій-йонний [16] |
| Ford C - Max Hybrid | Літій-йонний 1,4 кВт·ч [17] |
| Ford C - MAX Energi | Літій-йонний 7,6 кВт·ч [17] |
| Ford Fusion SE Hybrid | Гібридний літій-йонний [18] |
| Ford Focus Electric | Літій-йонний з рідинним охолодженням 23 кВт·ч [19] |
| Ford Escape Hybrid | Нікель-металогідридний [20] |
| Honda Civic Hybrid | Літій-йонний [21] |
| Honda CR - Z | Нікель-металогідридний (Ni – MH), 5,75 А·ч, 100,8 В [22] |
| Honda Insight | Нікель-металогідридний (Ni – MH), 5,75 А·ч, 100,8 В [23] |
| Kia Optima Hybrid | Літій-полімерний [24] |
| KIA Forte LPI Hybrid | Літій-йонний з полімерним електролітом [25] |
| Kia Ray | Літій-йонний [26] |
| BMW ActiveHybrid 3 | Літій-йонний [27] |

Як видно з табл. 1: вибір найбільших компаній-виробників на даний момент розподіляється приблизно порівну між нікель-металогідридним і літій-йонним типами акумуляюючих елементів гібридної силової установки. Подальший аналіз при виборі кращого типу серед вторинних хімічних джерел струму доцільно проводити, порівнюючи саме нікель-металогідридний та літій-йонний акумулятори.

Порівняння основних показників вибраних типів акумуляторів (див. табл. 2 [32, 33]) свідчить, що практично за всіма основними показниками літій-йонні акумулятори кращі за нікель-металогідридні, окрім ціни.

Проте за деякими прогнозами [28], вартість літій-йонних акумуляторних батарей, використовуваних в електромобілях, знизиться приблизно на третину вже до 2017 року. Це станеться за рахунок подальшого вдосконалення технології виробництва, підвищення обсягів поставок літію і зростанню об'єму продажів. Такого висновку дійшли аналітики компанії Pike Research, які резюмували свої висновки в опублікованому звіті.

ваній на початку 2012 року доповіді. Аналізуючи дані, що стосуються нових розробок відносно літій-йонних акумуляторів, на ринку варто чекати пристрої зі значно кращими енергетичними й експлуатаційними показниками: збільшення числа робочих циклів до порядку 7000 [29], питомої потужності – до 100 кВт/кг [30] та питомої енергоємності – до 525 Вт·год/кг [31].

Таблиця 2

| Параметри акумуляторної батареї | NI/MH | Li - ion |
|---|--|--|
| Вартість | Середня | Висока |
| Питома енергетична місткість, Вт·год/кг | 60—110 | 110-260 |
| Внутрішній опір, Ом | 0,5—0,2 | 0,15—0,25 |
| Питома потужність, Вт/кг | 500 | 800—3000 |
| Число циклів заряд/розряд | 300—500 | 500—1000 |
| Чугливість до перезаряду | Середня | Висока |
| Час швидкого заряду, год | 14 | 60—70 хв. |
| Макс. струм розряду, А | 20 С | 20 С |
| Саморозряд за місяць при 20°C, % | 20 | 2-5 |
| Напруга максимальна в комірці, В | 1,85 | 4,18—4,20 |
| Напруга мінімальна, В | 1,37 | 2,5—2,75 |
| Діапазон робочих температур, °С | -60 +55 | -20 - +60 |
| ККД, % | 60–90 [34] | |
| Виробник (приклад) | Sanyo, Rayovac, Fujicell, AccuPower, Maha, Yuasa, Gold Peak, CDR King, Turnigy | Sony, HYPERION, Эконт, Walkera, A123 Systems |

Значно менш розвинений альтернативний підхід до вибору акумуляючого елемента гібридного транспорту – використання йоністорів (суперконденсаторів).

Серед продукції провідних світових виробників автотранспортних засобів зустрічаються поодинокі рішення із застосуванням суперконденсаторів, як, наприклад, Honda FCX Clarity [35], в яких у підсистемі «Розгін–гальмування» застосовано йоністор власної розробки (суперконденсатор без традиційних «обкладинок»).

Фірмами Hyundai Motor і «Тролза» випускаються автобуси з живленням від йоністорів [36].

У 2011 році компанією Solaris представлено автобус Urbino 18 DIWA з прогресивною дизель-електричною гібридною силовою установкою паралельного типу на суперконденсаторах [37].

У Російській Федерації розробляється проєкт автомобіля (Е-мобіль), в якому використовується суперконденсатор як основний засіб для накопичення електричної енергії. Самі ці суперконденсатори поки не виготовляються серійно і розробляються паралельно з автомобілем [38].

Основні показники сучасних суперконденсаторів наведені в табл. 3 [39, 40].

Таблиця 3

| Характеристики йоністорів | Значення |
|---|---|
| Вартість | висока |
| Питома енергетична місткість, Вт·год/кг | 2 – 12 |
| Внутрішній опір, Ом | 0,006 – 0,35 |
| Питома потужність, Вт/кг | 1500 – 12000 |
| Число циклів заряд/розряд | більше 100000 |
| Час заряду, хв | від 15 до 40 |
| Макс. струм розряду, А | до 5000 |
| Саморозряд | дуже високий – близько 1 мкА |
| Діапазон робочих температур, °С | -50... +70 |
| Ефективність, % | >90 |
| Виробник (приклад) | ЭСМА, ИНКАР-м, Epcos, Maxwell Technologies, NessCap, Panasonic, Evans Capacitor |

Порівняємо характеристики суперконденсаторів і літій-йонних акумуляторів. Обидва типи досить дорогі.

До суттєвих переваг літій-йонних акумуляторів можна віднести:

– дуже високу питому енергоємність;

– низький саморозряд,

а суперконденсаторів:

– висока питома потужність;

- дуже велика кількість циклів «заряд–розряд»;
- низький внутрішній опір;
- висока ефективність;
- мінімальний час заряду.

Відмітний недолік суперконденсаторів – досить високий саморозряд. За усіма іншими показниками принципових відмінностей практично нема.

Оцінити такі енергетичні параметри сучасних суперконденсаторів, як питома енергетична місткість, питома потужність та порівняти їх з вторинними хімічними джерелами струму можна за допомогою діаграми, зображеної на рисунку.

На діаграмі область «Літій-йонні дуже великої потужності» описує пристрої, розроблені останнім часом, що тільки починають виходити на ринок.

Слід зазначити, що прогрес у розвитку суперконденсаторів також існує, але не такий інтенсивний, як у хімічних джерел струму. В 2011 році групою вчених на чолі з Бором Джангом (Bor Jang) з американської компанії Nanotek Instruments на основі графенової плівки створено новий тип суперконденсатора, що має щільність зберігання енергії 85,6 Вт·год/кг – при кімнатній температурі та 136 Вт·год/кг – при температурі 80 °C [42].

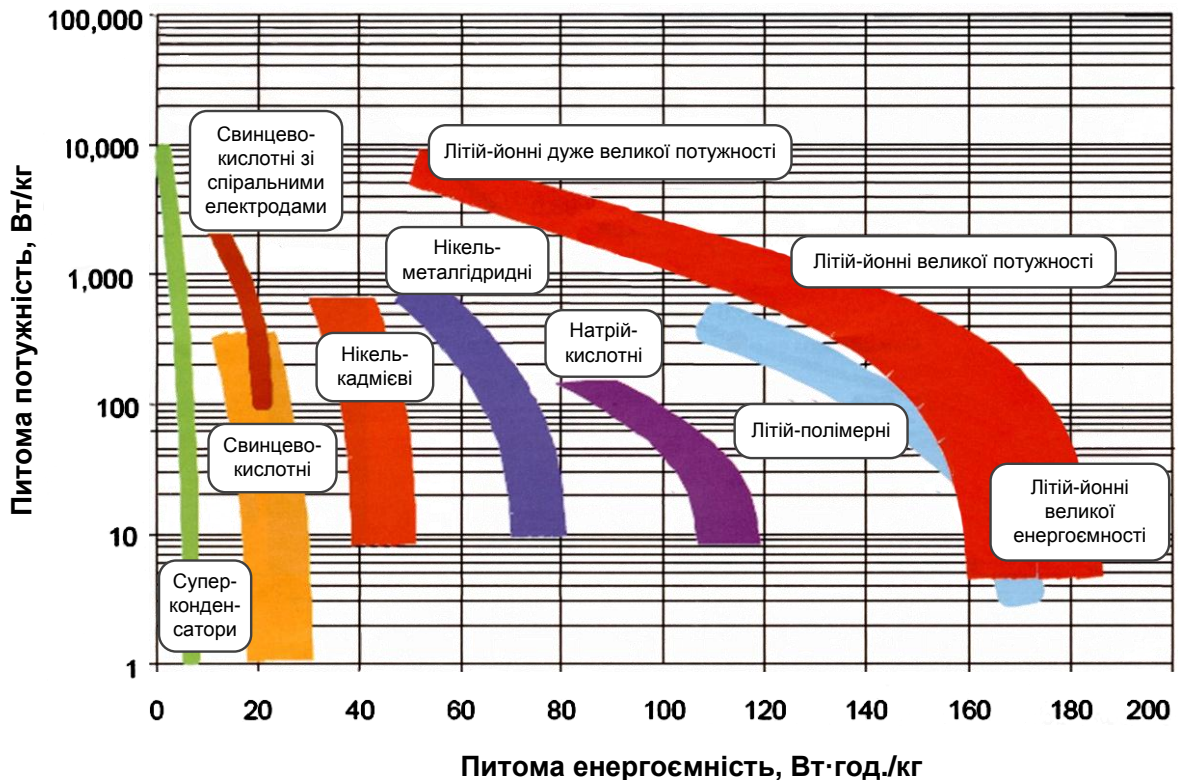
Таким чином, у найближчому майбутньому передбачається деякий паритет між йоністорами і літій-йонними акумуляторами.

Якщо робити вибір між суперконденсаторами і електрохімічними джерелами струму для застосування на шахтному транспорті, то слід взяти до уваги такий параметр, як вибухозахист.

Для забезпечення вибухобезпечності електрохімічних акумуляторів необхідні спеціальні заходи, що підвищує вартість їх експлуатації, вимагає високого рівня культури обслуговування. Експлуатовані на вугільних шахтах країни акумуляторні електровози вимагають значних щорічних витрат на поповнення кількості акумуляторних батарей та їх заміну. При зарядці батарей цих електровозів задіяний значний людський ресурс.

Йоністори, на відміну від хімічних джерел струму, мають ширший температурний діапазон експлуатації (зберігають працездатність при негативних температурах). У них практично необмежена кількість циклів заряд/розряд, вони здатні видати в імпульсі велику потужність з високим коефіцієнтом корисної дії та при цьому не розігріваються.

Пошук виробників засвідчив, що багато компаній з далекого і ближнього зарубіжжя виготовляють конденсатори з подвійним електричним шаром (див. табл. 3).



Діаграми енергетичних показників для різних типів батарей [41]

Суперконденсатори як накопичувачі мають високу питому потужність, вибухобезпечні, прості в експлуатації. Всі відзначені вище переваги дозволяють вважати їх одним з найбільш перспективних автономних джерел живлення для рудникового безконтактного електровоза.

Висновки

1. Режим роботи накопичувача енергії на автомобільному й електровозному транспорті (в аспекті вирівнювання графіка навантаження) не має принципових відмінностей, тому аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії на прикладі існуючих рішень для автомобільного транспорту можна вважати обґрунтованим.
2. Вибір найбільших компаній-виробників гібридних автомобілів ділиться приблизно порівну між нікель-металогідридним і літій-йонним типами акумулюючих елементів гібридної силової установки. Практично за всіма основними показниками літій-йонні акумулятори кращі за нікель-металогідридні.
3. При виборі акумулюючого елемента гібридного транспорту світові виробники виявляють все більший інтерес до такого типу накопичувача енергії, як йоністор (суперконденсатор).
4. Такі переваги, як висока питома потужність, вибухобезпечність, простота в експлуатації, дуже велика кількість циклів заряд/розряд, низький внутрішній опір, висока ефективність, мінімальний час заряду дозволяють вважати суперконденсатор одним з найбільш перспективних автономних джерел додаткового живлення (відносно невеликої енергоємності) на рудниковому безконтактному електровозі для вирівнювання графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції та можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровоїв.

Список літератури

1. Составляющие нагрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного шахтного транспорта / Сиверин И.С., Дыбрин С.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- Дніропетровськ: РВК НГУ, 2014.- Вип.92. – С. 37-40.
2. WORLD MOTOR VEHICLE PRODUCTION (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://oica.net/wp-content/uploads/ranking-2010.pdf>. Загол. з екрана.
3. Toyota Prius 2010 Performance & Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/prius-hybrid/specs.html>. Загол. з екрана.
4. Toyota Prius - купить экономичный автомобиль (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.toyota.ru/cars/new_cars/prius/index.tmex. Загол. з екрана.
5. Toyota Prius Plug-in Interior, Exterior & Safety Features (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/prius-plug-in/specs.html>. Загол. з екрана.
6. Toyota Prius v Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/priusv/specs.html>. Загол. з екрана.
7. Toyota Prius c Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/priusc/specs.html>. Загол. з екрана.
8. Toyota Camry Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/camry/specs.html>. Загол. з екрана.
9. Toyota Highlander Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/highlander/specs.html>. Загол. з екрана.
10. Toyota Highlander Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/rav4ev/specs.html>. Загол. з екрана.
11. Volt Models & Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.chevrolet.com/volt-electric-car/features-specs/options.html>. Загол. з екрана.
12. General Motors Cadillac Escalade Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://auto.ru.msn.com/article.aspx?cp-documentid=156587137>. Загол. з екрана.
13. Volkswagen Touareg Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.volkswagen.ru/models/touareg/features.s9_trimlevel_detail.suffix.html/the_touareg_hybrid~2Fhybrid.htm#/#/tab=e1c1d9e3d4a95dd4d68077fdd39f7b20. Загол. з екрана.
14. Volkswagen Golf TDI Hybrid (Фольцваген Гольф) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://volkswagen.hcars.ru/golf_tdi. Загол. з екрана.
15. VOLKSWAGEN JETTA 2013 - САМЫЙ БЫСТРЫЙ ГИБРИД (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://energysafe.ru/environment/electric_vehicles/1011/. Загол. з екрана.
16. SONATA HYBRID SUPREME PERFORMANCE, EXTREME EFFICIENCY (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://worldwide.hyundai.com/WW/Showroom/Cars/Sonata-Hybrid/PIP/index.html>. Загол. з екрана.

17. C-MAX Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.ford.com/cars/cmax/specifications/engine/>. Загол. з екрана.
18. Model: Fusion Hybrid SE (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.ford.com/cars/fusion/trim/?trim=hybrid&showCategoryTab=viewAll#categoryPower_and_Handling. Загол. з екрана.
19. The Focus is available in 8 fuel-efficient models (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.ford.com/cars/focus/models/>. Загол. з екрана.
20. Photo Tour of Hybrid Batteries (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.hybridcars.com/gallery/22070/photo?page=2>. Загол. з екрана.
21. Civic Hybrid Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/civic-hybrid/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
22. CR-Z Engineering (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/cr-z/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
23. Insight Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
24. Eco-technology - Kia Motors (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.kiamotors.com/vehicles/optima-hybrid/eco-technology.aspx>. Загол. з екрана.
25. KIA Forte LPI Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://kia.kiev.ua/auto.php/model.picanto_new/topic.info/interesnoe_ob_jetoj_modeli/. Загол. з екрана.
26. Kia представила гібрид (фото) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://dengi.ua/news/59508_Kia_predstavila_gibrid_foto.html. Загол. з екрана.
27. BMW ACTIVE HYBRID (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficientdynamics/phase_2/bmw_activehybrid/index.html. Загол. з екрана.
28. К 2017 году цены на литий-ионные аккумуляторы сократятся на треть (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ecoconceptcars.ru/2012/03/k-2017-godu-ceny-na-litij-ionnye-akkumulyatory-sokratyatsya-na-tret.html>. Загол. з екрана.
29. Литий-ионное будущее: Аккумуляторы нового поколения (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.popmech.ru/article/3505-litij-ionnoe-budushee/>. Загол. з екрана.
30. Создана литий-ионная ячейка с очень высокой плотностью мощности и энергии (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://science.compulenta.ru/629667/>. Загол. з екрана.
31. Новая Li-Ion батарея: емкая и дешевая (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://iee.org.ua/ru/prog_info/21903/. Загол. з екрана.
32. Развитие рынка источников тока новых электрохимических систем (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://kit-e.ru/articles/powersource/2007_4_131.php. Загол. з екрана.
33. Проектирование гибридного транспортного средства на основе современных накопителей энергии (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://sibac.info/index.php/2009-07-01-10-21-16/4361-2012-10-25-06-55-09>. Загол. з екрана.
34. Анализ и сравнение характеристик аккумуляторов основных типов (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/khity/analiz_i_sravnenie_kharakteristik_akkumulyatorov_osnovnykh_tipov/14-1-0-21. Загол. з екрана.
35. Honda FCX Clarity (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Honda_FCX_Clarity. Загол. з екрана.
36. Ионистор (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ионистор>. Загол. з екрана.
37. Solaris представил гибрид на суперконденсаторах (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.autocentre.ua/news/komavto/39124.html>. Загол. з екрана.
38. Ё-мобиль (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ё-мобиль>. Загол. з екрана.
39. Суперконденсаторы для электротранспорта (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://sdisle.com/battery/ultracap/>. Загол. з екрана.
40. Супер конденсаторы (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm>. Загол. з екрана.
41. Концепция развития электрического транспорта в России. (Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт. Федеральное государственное унитарное предприятие НАМИ) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://nami.ru/uploads/news/presentation.pptx>. Загол. з екрана.
42. Суперконденсатор на основе графена устанавливает новый рекорд электрической емкости (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.dailytechinfo.org/nanotech/1883-superkondensator-na-osnove-grafena-ustanavlivaet-novyyj-rekord-yelektricheskoy-emkosti.html>. Загол. з екрана.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК: 621.3.078.4: 621.512

A.V. Bobrov, *cand.tech.sci, PhD*, Nesterova O.Y, *cand. fil.sci*
(Ukraine, Dnipro, State higher Educational Institution "National mining university")

SUBSTANTIATION OF CONTROLLED VARIABLES FOR ENERGY MANAGEMENT SYSTEM OF PISTON COMPRESSOR UNITS

Анотація. В роботі визначені вимоги і перелік контрольованих параметрів системи двопозиційного управління з детермінованим верхнім рівнем тиску повітряних поршневих компресорних установок. Ці параметри визначені з урахуванням необхідності визначення втрат енергії в елементах електромеханічної системи "електрична мережа - привід - компресор - пневмомережа". Також вказані і описані заходи попереднє проведення яких необхідно для визначення втрат енергії в пневматичних мережах як на ділянці підвищення тиску, так і на ділянці його зниження. З викладеного матеріалу можливо зробити висновок про те, що втрати енергії у всіх елементах електромеханічної системи можливо визначити знаючи один параметр тиск в пневмосистемі і відстежуючи швидкість його зміни.

Ключові слова: електропривод, регулювання, компресор, електромеханічна система.

Аннотация. В работе определены требования и перечень контролируемых параметров системы двухпозиционного управления с детерминированным верхним уровнем давления воздушных поршневых компрессорных установок. Эти параметры определены с учетом необходимости определения потерь энергии в элементах электромеханической системы "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть". Также указаны и описаны мероприятия предварительное проведение которых необходимо для определения потерь энергии в пневматических сетях как на участке повышения давления, так и на участке его снижения. Из изложенного материала возможно сделать вывод о том, что потери энергии во всех элементах электромеханической системы возможно определить зная один параметр давление в пневмосистеме и отслеживая скорость его изменения.

Ключевые слова: электропривод, регулирование, компрессор, электромеханическая система.

Abstract. The paper defines the requirements and the list of controlled variables of the on-off control system with the deterministic upper level of pressure of air piston compressor units. These parameters are determined taking into account the need to determine the energy losses in the elements of the electromechanical system "electric grid - drive - compressor - pneumatic system". Also, the measures are determined and described, the preliminary carrying out of which is necessary to determine the energy losses in pneumatic networks both at the pressure increase section and at the site of its reduction. From the above material, it can be concluded that the loss of energy in all elements of the electromechanical system can be determined by knowing one parameter the pressure in the pneumatic system and monitoring the rate of its change.

Keywords: electric drive, control, compressor, electromechanical system.

Introduction. Nowadays on-off control system is common for piston compressors delivery. The control system is applied in case there is no technological need in maintaining the stable pressure level in pneumatic system and there are no dramatic changes of compressed air consumption. Its advantages are described in terms of simplicity of implementation and reliability. The principle of on-off control system operation is based on setting of predetermined pressure limits. Reaching the upper level of pressure the compressor is switched off and it is switched in reaching the lower level.

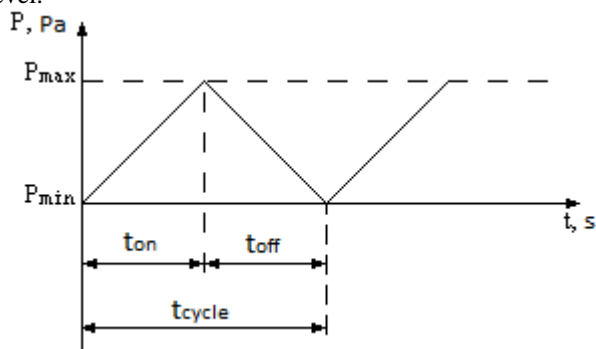


Fig.1. Principle of on-off control system operation.

This occurs under the condition of single variable change control (intake pressure) in the system (fig.1.) by means of sensor, which is installed. The regular operation of compressed air consumers is provided by means of pneumatic system pressure maintaining in the predetermined range.

Purpose statement. The main disadvantage of the system is its negligibility as for the factors influencing the general energy efficiency of «grid – compressor – pneumatic circuit» complex. It does not consider such substantial parameters as losses in power for grid, compressor, and pneumatic circuit. Hence, there is a need in describing the parameters to be changed by control system for losses determining and thus working in the proper regime of their minimizing for maintaining the regular operation of compressed air consumers.

Problem solution. To answer the question it is required that we consider the losses in power for various components of the system.

The active power losses in electric grid:

$$\Delta N_1 = 3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot l = 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \left(\frac{N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \right)^2, \quad (1)$$

where I stands for line phase current, A; r_0 stands for active electrical resistivity in the line, Ohm per km; l stands for line length, km; N stands for active power consumed by asynchronous compressor drive form the grid, kW; U stands for supply line voltage, kV.

The losses in asynchronous drive and compressor unit may be shown as follows:

$$\Delta N_2 = N - P_2 \cdot Q_{komp}, \quad (2)$$

where N stands for active power consumed by asynchronous motor, kW; P_2 stands for pressure of compressed air in the receiver, Pa; Q_{komp} stands for compressed air flow at the receiver output, m³/sec.

The losses in the compressed air pipelines:

$$\Delta N_3 = P_2 \cdot \frac{(V_{res} + V_{pipes})}{RT} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (3)$$

where $\frac{dp}{dt}$ is the speed of pressure change in the pneumatic circuit, Pa/sec, is determined using regression equations [5, 6]; T is gas temperature, K; $R = 287$ J/(kg·K) is gas constant for air; $\rho = 1,29$ kg/m³ is standard air density; t is time, sec; V_{res} is receiver volume, m³; V_{pipes} is pneumatic circuit volume, m³.

Considering the abovementioned issues, to enable the control system being sensitive to losses in all units of «grid – compressor – pneumatic circuit» system it is need to install:

- ammeter, A
- flow rate meter for compressed air, m³/sec
- pressure sensor in the receiver.

If compared to on-off control system, the two devices, ammeter and flow rate meter for compressed air, are added. Thus, the cost of a control system and its assembly complexity increase, its reliability decreases. Let us consider the possibility of quantity reduction for indicators of controlled variables with maintaining the control system ability to monitor the losses in different units and thus to work in energy efficient modes.

The losses in electric grid may be linked to the active power consumption for asynchronous drive of air piston compressor unit considering its dependence on pressure rate in the pneumatic circuit and some allowances:

- power supply voltage of asynchronous motor does not depend on consumed power $U = \text{const}$;
- efficiency coefficient of asynchronous motor is independent from load $\eta_{mot} = \text{const}$;
- the influence of temperature of intake air on consumed power is neglected. The calculations should be carried out for $T_l = 20$ °C parameters, as the intake air temperature decrease for stable pressure reduces the quantity of moisture vapour resulting in its performance improvement [2].

Then we obtain the following expression for air piston compressor unit with two compression stages:

$$N = 2 \frac{n}{n-1} P_1 Q_{komp} \frac{\left(\varepsilon^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right)}{\eta_{mex} \eta_{pot}}, \quad (4)$$

where P_1 stands for atmospheric pressure, Pa; Q_{komp} stands for volumetric capacity for indraft conditions m^3/sec ; n stands for polytropic index for air piston compressor units, $n = 1,2 \dots 1,35$; η_{pol} stands for compression efficiency related to compression polytropic process, equals to $0,8 \dots 0,9$; η_{mex} stands for mechanical efficiency considering friction losses of crank mechanism and compressor piston, $0,85 \dots 0,95$; $\varepsilon = \frac{P_2}{P_1}$, P_2 stands for pressure in the pneumatic circuit, Pa.

Then current consumed by electric drive from the grid is

$$I = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \phi} \quad (5)$$

The value of ΔN_1 may be calculated as based on the value of current.

The losses in compressor are calculated from formula (2) as the difference between the consumed power and product of pressure by its efficiency.

To determine the real performance of compressors and pneumatic circuit the trial run is needed. The trial run is carried out at off hours and for compressed air consumers switched off. For determining of dependence between compressor delivery and pressure the following operation procedure is needed:

- gate valves after the receivers are closed;
- one compressor is started, once it starts working in the standard operating mode the gate valve of the pump is opened, stop clock is started;
- the pressure change in the receiver is recorded for the stated pitch with stop clock up to maximum pressure.

To measure pneumatic circuit leakage:

- compressed air is pumped into the pneumatic circuit up to the maximum value (if needed, several compressors are on);
- the compressing units are turned off with simultaneous starting of stop clock, then the rate of pressure decline in the receiver is determined.

Let us show the calculations of volume flow m^3/min for normal conditions as the following expression:

$$V_{ras} = \frac{(Q_{res} + Q_{pipes})}{R \cdot T} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{d\tau} \quad (6)$$

where P , Q , T stand for pressure, Pa, volume m^3 , temperature, K of the gas respectively; $R=287$ J/9kg K) stands for air gas constant; $\rho=1,29$ kg/ m^3 is air density for normal conditions; Q_{res} and Q_{pipes} stand for receiver volumes and feed pipelines of circuit.

Conclusions. As based on the empirical data from the expression (6) we can obtain the dependences of compressors delivery, m^3/min from pressure, Pa, and air leaks, m^3/min from pneumatic circuit pressure, Pa [4, 6]. Knowing the volume of pressure for every timepoint the volume compressor delivery may be determined, and, thus, having calculated the power consumed by asynchronous drive we may obtain power losses for compressor.

The power losses in the pneumatic circuit may be determined by controlling only a single variable – pressure, and knowing the dependence of air leakages from pressure in pneumatic circuit (3).

From the mentioned above it is clear that monitoring of a single variable, pressure, is needed, as we may calculate power losses for all elements of the electric grid – compressor – pneumatic circuit system as based on it. This means that it is possible to develop on-off control system for air piston compressor units with asynchronous drive by means of using the only one pressure controller in the air collector. And this enables modernization of existing systems being under exploitation by means of substitution of compressor controllers with programmed logic sensor with energy efficient control algorithm.

References:

1. Compressed air. A.I.Karabin.- M. Mashynostrojenije – 1964.- 342 p.
2. Power Economizing for Production and Use of Compressed Air. U.P.Nazarenkoo.- M. Energija – 1976.- 103 p.
3. Mining Pneumatic Units. D.L. Garbuz.- M. Gosgortehizdat – 1961.- 359 p
4. Shehter Yu. L., Director L.B., Pruger V.I. Simplified Methodology for Determining of Real Features of Air Piston Compressors and Pneumatic Circuit at the Enterprises // Promyshlennaja Energetika № 8, 2003.- P.18-19.

5. Bobrov O.V. Optimization of Operation Mode for Electromechanic System of Production and Distribution of Compressed Air: dis. ... cand. tech. sci : speciality. 05.09.03 "Electrotechnical Complexes and Systems"/ Ministry of Education and Science of Ukraine, SHEI "Nat. mining. univer".- Dnipropetrovsk, 2015.- 166 p.

6. Bobrov A.V. Drive Control for Compressor Unit as based on Efficiency Coefficient Determining for Electrotechnical Complex: Vol. 1. Materialy mezhdunarodnoj molodezhnoj konferencii "Energisistema I aktivnyje Adaptivnyje Electricheskiye Seti: Projectirovanie, ekspluatatsija, obrazovaniye", 21–25 November 2011. – Samara: SamGTU, 2011. – 423 p.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.311.004

А. А. Колб, канд. техн. наук, Ант. А. Колб, канд. техн. наук

(Україна, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

К РАСЧЕТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

***Анотація.** Електромеханічні процеси замкнутого асинхронного електроприводу, які характеризують його енергетичні показники в сталому режимі, можуть бути досліджені без урахування модуляційних пульсацій струму статора. Виконано розрахунок параметрів асинхронного електроприводу для найбільш поширеного закону управління з постійним потокозчеплення ротора в обертової системі координат, орієнтованої по потокозчепленню ротора. Отримані вирази для розрахунку енергетичних показників частотно-регульованого асинхронного електроприводу в сталому режимі.*

***Ключові слова:** енергозбереження, асинхронний електропривод, закон управління.*

***Аннотация.** Электромеханические процессы замкнутого асинхронного электропривода, которые характеризуют его энергетические показатели в установившемся режиме, могут быть исследованы без учета модуляционных пульсаций тока статора. Выполнен расчет параметров асинхронного электропривода для наиболее распространенного закона управления с постоянным потокосцеплением ротора во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора. Получены выражения для расчета энергетических показателей частотно-регулируемого асинхронного электропривода в установившемся режиме.*

***Ключевые слова:** энергосбережение, асинхронный электропривод, закон управления.*

***Abstract.** Electromechanical processes of a closed asynchronous electric drive, which characterize its energy parameters in the steady state, can be investigated without taking into account the modulation pulsations of the stator current. The calculation of the parameters of an asynchronous electric drive for the most common control law with constant rotor flux coupling is performed in a rotating coordinate system oriented along the rotor's flux linkage. Expressions were obtained for calculating the energy parameters of a frequency-controlled asynchronous electric drive in the steady state.*

***Keywords:** energy saving, asynchronous electric drive, control law.*

Актуальность работы. В настоящее время асинхронный двигатель является наиболее распространенными и составляют около 90% от всего парка машин и приблизительно 55% от установленной мощности [1]. Это объясняется рядом существенных преимуществ асинхронных двигателей в сравнении с двигателями постоянного тока.

Появление надежных экономических преобразователей частоты с ШИМ, открывает широкие возможности для замены регулируемого электропривода постоянного тока частотно-регулируемым асинхронным.

Целью работы является исследование характера изменения электромагнитных параметров асинхронного электропривода в зависимости от закона управления.

Матеріали и результати дослідження. Електромеханічні процеси замкнутого асинхронного електропривода, які характеризують його енергетичні показники в установившійся режимі, можуть бути досліджені без урахування модуляційних пульсацій струму статора.

В одній системі координат (неподвижной или вращающейся) уравнения асинхронного двигателя в обобщенных (пространственных) векторах имеет вид [1,2]:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_1; \quad (1)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{I}_2 R'_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_k - Z_n \omega) \bar{\Psi}_2; \quad (2)$$

$$\bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{I}_1 + L_m \bar{I}_2; \quad (3)$$

$$\bar{\Psi}_2 = \Psi_2 \bar{I}_2 + L_m \bar{I}_1; \quad (4)$$

где $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ - обобщенные вектора напряжений, токов и потокосцеплений статора и ротора; Z_n - количество пар полюсов; ω - угловая скорость ротора; ω_k - угловая скорость вращения координатных осей.

Момент двигателя определяется как векторное произведение любой пары векторов. Наиболее часто используют выражение

$$M = \frac{3}{2} Z_n K_2 \Psi_{2x} I_{1y}, \quad (5)$$

где $K_2 = L_m/L_2$ - коэффициент связи обмоток ротора; $L_m = 1,5L_{12}$ эквивалентная индуктивность статора и ротора от действия трех фаз, которая в полтора раза больше взаимной индуктивности L_{12} отдельно взятой фазы; $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$ - полная индуктивность ротора; $L_{2\sigma}$ - индуктивность рассеяния обмоток ротора; Ψ_{2x} - проекция потокосцепления на синхронно вращающуюся ось x ; I_{1y} - проекция тока статора на ось y .

Характер изменения электромагнитных параметров зависит от закона управления асинхронным двигателем. Расчет параметров асинхронного электропривода для наиболее распространенного закона управления $\Psi_2 = const$ удобно производить во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора. В этом случае для установившегося режима все переменные будут постоянными, а их производные равняются нулю т.е.:

$$\begin{aligned} i_{1x} = I_{1x} = const; \quad i_{1y} = I_{1y} = const; \\ \Psi_{2x} = const; \quad \Psi_{2y} = 0; \\ u_{1x} = U_{1x} = const; \quad u_{1y} = U_{1y} = const. \end{aligned}$$

С учетом этого после преобразований (1) - (4) получим [1]:

$$U_{1x} = I_{1x} R'_1 - I_{1y} L_{1n} \omega_1 - \frac{K_2}{T_2} \Psi_{2x}; \quad (6)$$

$$U_{1y} = I_{1y} R'_1 + I_{1x} L_{1n} \omega_1 + K_2 Z_n \omega \Psi_{2x}; \quad (7)$$

$$\Psi_{2x} = I_{1x} L_{1x} \text{ или } \Psi_{2x} = I_{1y} R'_2 K_2 / (\omega_1 - Z_n \omega); \quad (8)$$

$$\Psi_{1x} = I_{1x} L_{1n} + K_2 \Psi_{2x}; \quad \Psi_{1y} = I_{1y} L_{1n}; \quad (9)$$

где $L_{1n} = L_1 - L_m^2/L_2$ - переходная индуктивность; $R'_1 = R_1 + K_2^2 R'_2$; $K_2 = L_m/L_2$;

Согласно (9) имеем:

$$I_{1x} = \frac{\Psi_{2x}}{L_m}; \quad I_{1y} = \frac{\Psi_{2x}(\omega_1 - Z_n \omega)}{R'_2 K_2} = \frac{\omega_2 \Psi_{2x}}{R'_2 K_2}; \quad (10)$$

Из совместного решения (9) и (10) находим:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1x} &= \Psi_{2x} \left(K_2 + \frac{L_{1n}}{L_m} \right); \\ \Psi_{1y} &= \frac{\Psi_{2x} L_{1n} \omega_2}{R'_2 K_2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где ω_2 - угловая частота тока ротора.

Проекция напряжения статора находится из первых двух уравнений системы. Без учета активного сопротивления обмотки статора имеем

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= \frac{-\Psi_{2x}\omega_1\omega_2 L_{1n}}{R'_2 K_2} - \frac{K_2}{T_2} \Psi_{2x} ; \\ U_{1y} &= K_2 \Psi_{2x} \left(\frac{L_{1n}}{L_m K_2} \omega_1 + Z_n \omega \right), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Амплитудное значение напряжения статора $U_{\text{фmax}} = \sqrt{U_{1x}^2 + U_{1y}^2}$

Амплитудное значение тока статора $I_{1\text{max}} = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2}$.

Используя приведенные выражения, можно рассчитать основные показатели регулирования при $\Psi_2 = \text{const}$ в функции абсолютного скольжения ω_2 (частоты тока ротора) и частоты напряжения питания, что характеризует ω_1 , при различных значениях Ψ_2 или М.

При заданном моменте М и потокосцеплении Ψ_{2x} предварительно из (5) находится составляющая тока I_{1y} , а затем из (10) определяется ω_2 и далее остальные переменные.

Аналогичные выражения можно получить и для других законов частотного управления асинхронным двигателем, например, $\Psi_1 = \text{const}$

Выводы.

1. Получены выражения для расчета энергетических показателей частотно-регулируемого асинхронного электропривода в установившемся режиме.

2. Расчет параметров асинхронного электропривода для наиболее распространенного закона управления $\Psi_2 = \text{const}$ удобно производить во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора.

Список использованных источников

1. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-ге вид., перероб. і доп. - Д., Національний гірничий університет, 2011. – 565 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с нем. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 622.489:658.012.011

С.В. Козир, А.В. Малієнко

(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИДОБУВАННЯ ВУГІЛЛЯ В КОМБАЙНОВІЙ ЛАВІ

Анотація. Розглянуто можливість застосування візуального моделювання для впровадження процесно-орієнтованого підходу до управління вуглевидобувним підприємством. Розроблено модель процесу видобування вугілля в комбайновій лаві з використанням інструментарію AllFusion Process Modeler. Обґрунтовано доцільність застосування візуального імітаційного моделювання процесу видобування вугілля.

Ключові слова: візуальне моделювання, імітаційне моделювання, модель процесу, видобування вугілля, процесно-орієнтований підхід.

Аннотация. Рассмотрена возможность применения визуального моделирования при внедрении процессно-ориентированного подхода для управления угледобывающим предприятием. Разработана модель процесса добычи угля в комбайновой лаве с использованием инструментария AllFusion Process Modeler. Обоснована целесообразность применения визуального имитационного моделирования процесса добычи угля.

Ключевые слова: визуальное моделирование, имитационное моделирование, модель процесса, добыча угля, процессно-ориентированный подход.

Abstract. The possibility of visual modeling application when you implement process-based approach for the management of the coal enterprise. A model for process of coal mining in the techniques of LaVey by using tools AllFusion Process Modeler. The expediency of application of Visual simulation of coal mining process.

Keywords: Visual Modeling, simulation, model, process, coal mining, process-oriented approach.

Вступ

Для успішного функціонування вуглевидобувних підприємств у складних ринкових умовах необхідно приймати ефективні та обґрунтовані управлінські рішення. На більшості підприємств використовуються традиційні ієрархічно-бюрократичні форми управління основані на функціональному підході; недоліки даних форм управління досить добре висвітлені в роботах [1, 2]. Над проблемою підвищення ефективності якості управління працювали Г. Г. Вендров, В. Г. Еліферов, Г. Н. Калянов, Р. А. Фатхутдінов, А. В. Шеєр та інші вчені. Дослідження в області процесно-орієнтованих підходів у управлінні підприємствами досить повно проводяться за кордоном; у нашій країні вони поки не одержали належного поширення. Однак, як свідчить закордонний досвід, незважаючи на складність практичного втілення подібних підходів, їх застосування дозволяє в повній мірі використовувати переваги структурного аналізу бізнес-процесів підприємств і формалізацію їх інформаційних моделей для побудови оптимальної системи бізнес-процесів організації.

Постановка задачі

Завдяки сумісності моделей, що використовуються для процесно-орієнтованого аналізу із сучасними засобами розробки інформаційних систем, процесно-орієнтований підхід у управлінні підприємствами є одним з найбільш перспективних з точки зору використання засобів автоматизації. За наявних технологій та методологій сьогодні існує можливість більш ретельного та детального дослідження впровадження процесно-орієнтованого підходу до управління гірничим підприємством на базі візуального та імітаційного моделювання бізнес-процесів як найбільш ефективних методів такого впровадження. [3, 4]. Тому вважаємо, що розроблення моделі процесу видобування вугілля в комбайновій лаві з використанням інструментарію AllFusion Process Modeler є актуальним. Задачами роботи є визначення технологічної послідовності процесу видобування вугілля, розроблення образу очисного вибію та описання дескриптивної моделі процесу.

Матеріали дослідження

Загальноприйнятим визначенням поняття «процес» вважається таке, яке наведено в стандартах ISO 9001:2001: "Процес – це стійка, цілеспрямована сукупність взаємопов'язаних видів діяльності, яка за визначеною технологією трансформує входи у виходи, які мають цінність для споживача" [5]. Водночас саме поняття технології має розбіжності з поняттям оператора системи, яке, наприклад, використовується в системному аналізі. Таким чином, застосування системного підходу до визначення системи бізнес-процесів приводить до необхідності більш детального тлумачення бізнес-процесу (БП) як продукту самої організації та як об'єкта управління з точки зору типів трансформацій і видів ресурсів, які в них використовуються для отримання результату БП. Для управління процесом або БП потрібно визначити мету, керівника згідно зі стандартом БП, ресурси, входи, які перетворюються у виходи, та інформаційні потоки (рис.1).

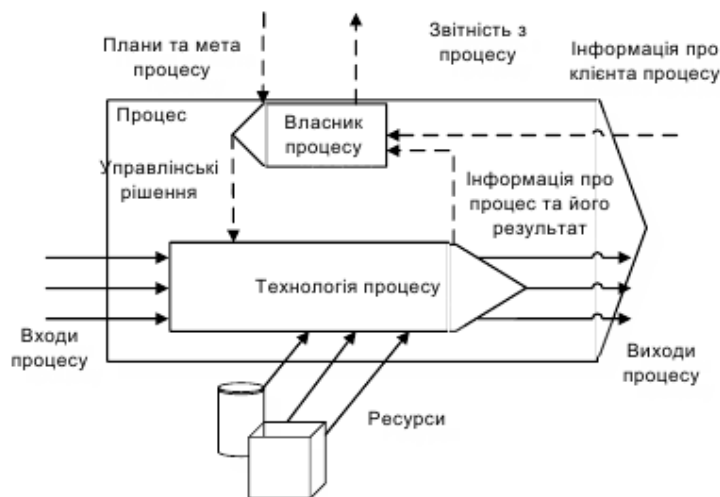


Рис. 1. Типова схема управління процесом

Іншим поширеним поняттям процесів підприємства є наскрізні або міжфункціональні. Наведемо найбільш розгорнуте, на погляд авторів [4], поняття такого БП: "Наскрізний бізнес-процес – це такий, який повністю або частково включає діяльність, яка виконується структурними підрозділами організації, що мають різну функціональну та адміністративну підлеглисть".

При моделюванні процесів відбувається відображення суб'єктивного бачення потоку робіт у вигляді формальної моделі, що складається з взаємозалежних операцій. Для повсякденного застосування привабливою здається можливість користуватися природною людською бізнесовою мовою для "співпраці" з математичними моделями економічних об'єктів, які в свою чергу працюють у комп'ютерному середовищі. Бізнес-процеси в значній ступені є процесами інтелектуальними, і застосування підходів штучного інтелекту, природної людської мови для вирішення економічних завдань є доречним. Оскільки основним каналом сприйняття інформації у людини є зоровий, то цілком справедливо в першу чергу використовувати саме його для створення бізнесових моделей, які визначені у бізнесових термінах і являють собою графічні структури. Вся математика формується програмно і її складність має бути скритою від користувача. Тому будемо використовувати програмні інструментальні методи моделювання, які ґрунтуються на графічному представленні бізнес-процесів.

Щодо процесного підходу вугільне підприємство – це набір процесів для отримання результату. Таким чином, кожен наскрізний процес на вугільному підприємстві проходить через всі підрозділи та служби підприємства. Більш того, всі процеси орієнтовані на кінцевий результат. Впровадження процесного управління потребує проведення попереднього ретельного аналізу існуючих БП гірничого підприємства. Для цього використовуємо стандарти з нотації БП, які дозволяють формалізувати діяльність підприємства та його основні функції. Наприклад, нотація з моделювання БП на основі стандарту Business Process Modeling Notation (BPMN), який є новим для моделювання бізнес-процесів і мережевих послуг. BPMN автоматизує і упорядковує БП, які є базовими для збільшення продуктивності [6]. BPMN при використанні в гірничій галузі має сприяти реструктуризації, контролю та управлінню технологічними процесами (ТП) підприємства, персоналом задіяним в ТП підприємства, для більш ефективного виконання робіт. Щоб ефективно використовувати BPMN, підприємство повинно зосередитися на підсумках процесів, організації усіх ТП для виконання планових показників.

На шахті існують робочі місця і види діяльності, які вимагають витрат, і дуже мало процесів, здатних давати прибуток. Лише очисні вибої дають реальну продукцію для шахти і формують прибуток,

всяка інша діяльність залежить від цього прибутку. Таким чином, основним компонентом гірничого виробництва є очисні вибої і значна частка відповідальних рішень, які приймаються керівництвом шахти, пов'язана саме з цим технологічним ланцюгом процесу виробництва.

Автоматизоване вирішення завдання моделювання та виконання бізнес-процесу має за мету розробити образ очисного вибою та виконати імітаційне моделювання його роботи. Розглянемо методику визначення складу та характеристик процесів вугільного підприємства для їх описування й моделювання. Кожен рівень моделювання характеризується певним набором показників, які доцільні для відповідного рівня. Така стандартизація має сенс в умовах не тільки формалізації процесів, а і їх практичної програмної реалізації.

Перший рівень описання процесів призначений для формалізованого подання ТП гірничого підприємства на етапі вдосконалення його роботи. Даний рівень описання відокремлений від інструменту CASE-засобу опису процесу.

Як предметна сфера для формування шаблонів БП, що розглядаються, було обрано ТП очисних робіт 4 південної лави ВП «Шахта «Капітальна». Видобуток вугілля в лаві здійснюється механізованим комплексом ІМКД-90 у такій послідовності:

- виймання та навантаження вугілля комбайном;
- кріплення лави секціями;
- монтування конвеєра;
- кінцеві операції.

У видобувну зміну задіяно 23 особи, з них: 15 гірничих робітників очисного вибою (ГРОВ), 4 гірники, 3 механіки пневматичної установки (МПУ), 1 черговий електрослюсар.

На початку кожної зміни машиніст комбайна та його помічник оглядають комбайн: перевіряють стан електродвигуна, забійного конвеєра, гідросистеми механізованого кріплення, стопорних пристроїв, справність дистанційного керування, рівень мастила в редукторах, відбійні шнеки, а у разі необхідності замінюють кулачки, усувають дрібні несправності. Якщо стан обладнання незадовільний, то інформують диспетчера про неможливість виконання планового завдання бригадою. Далі перевіряється ступінь зношення різців комбайна, риштаків та ціпків конвеєра. Після перевірки і усунення помічених несправностей, пошкоджень приступають до виймання вугілля.

Виймання вугілля в лаві здійснюється за двосторонньою схемою, одним видобувним комбайном

РКУ-10 в комплексі з механізованим кріпленням ІКД-90 і забійним конвеєром СП-26. Відразу за вийманням вугілля комбайном відбувається пересування секцій кріплення. З відставанням від комбайна на 25 -30 м проводиться монтування забійного конвеєра. При цьому шнек, що йде попереду зрубує верхню пачку вугілля, а шнек, що йде позаду зрубує нижню пачку вугілля і проводить його навантаження на конвеєр.

Перед початком кожного нового циклу виймання вугілля знову здійснюється профілактичний огляд комбайна, перевірка ступеня зношення його різців та за необхідності змінюються різці.

Тоді моделювання бізнес-процесів видобування вугілля вище зазначеного алгоритма та наведеного опису предметної сфери буде представлено процесом "Видобування вугілля" як відображення суб'єктивного бачення потоку робіт у вигляді формальної моделі, що складається із взаємозалежних операцій, виконується за допомогою CASE-засобу AllFusion Process Modeler. Постановка завдання подається у вигляді набору процесів або іншими словами:

- перевірка стану комбайна;
- виймання вугілля;
- навантаження вугілля на конвеєр;
- укріплення кінцевої ділянки лави.

Вхідними даними процесу є: план видобутку вугілля за добу, вугільний пласт, що розробляється, допоміжне обладнання для укріплення кінцевої ділянки лави. Вихідними даними БП : є об'єм відбитої гірської маси.

Для структурного описання складу завдань ТП очисних робіт 4-ї південної лави ВП «Шахта «Капітальна», де видобування вугілля в лаві здійснюється механізованим комплексом ІМКД-90, розроблено модель процесу "видобування вугілля" в стандарті IDEF0 за допомогою CASE-засобу AllFusion Process Modeler (рис. 2, 3).

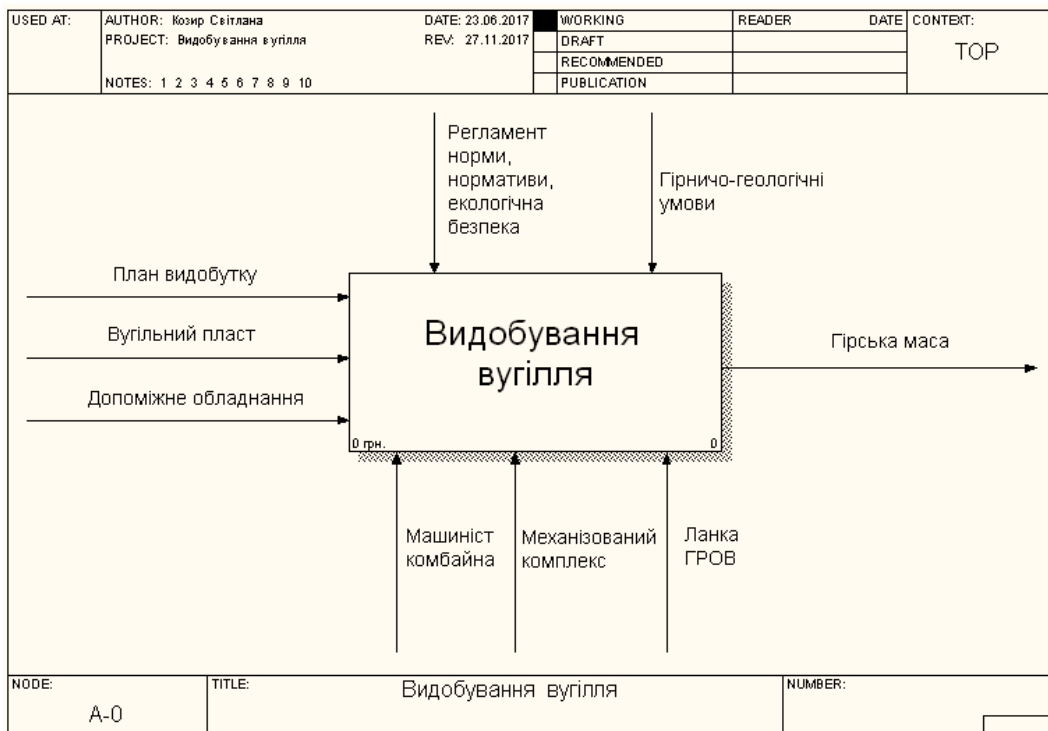


Рис. 2. Контекстна діаграма процесу «видобування вугілля»

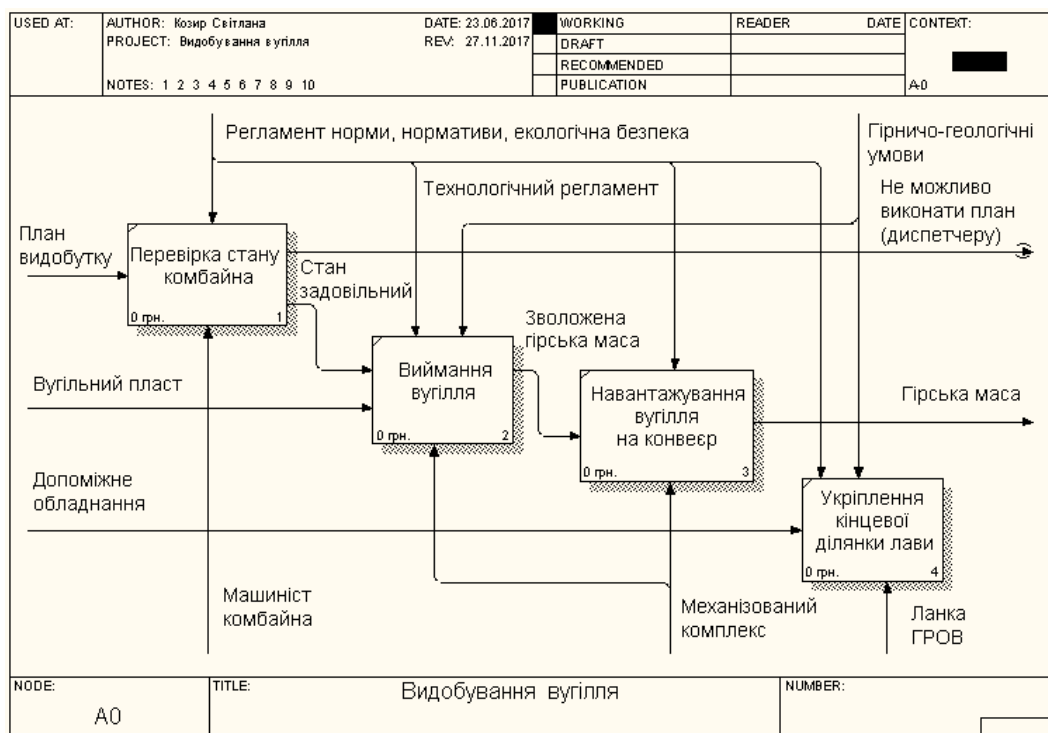


Рис. 3. Діаграма декомпозиції процесу «видобування вугілля»

Розроблена модель БП в нотатії BPMN за допомогою графічного дизайнера в першу чергу надає єдину мову описання діяльності, що доступна і зрозуміла всім учасникам процесу, а також можливість простого та наочного графічного трактування діяльності. Сюди ж можна віднести те, що при такому процесному підході відбувається виділення робочих зон, які полегшують формулювання вимог та постановку завдань до персоналу, залученого до конкретних підпроцесів. По-друге, процесний підхід до управління – це просте і надійне визначення показників контролю в результаті розбиття основного процесу на підпроцеси.

Висновки

На базі досліджень можна зробити такі висновки:

- визначено технологічну послідовність процесу виконання очисних робіт 4-ї південної лави ВП «Шахта «Капітальна», в якій видобування вугілля в лаві здійснюється механізованим комплексом 1МКД-90;
- розроблено образ очисного вибію та сформовано дескриптивну модель процесу;
- розроблено модель процесу "видобування вугілля" в міжнародному стандарті IDEF0 за допомогою CASE-засобу AllFusion Process Modeler з метою керування сучасними процесно-орієнтованими підприємствами вугільної галузі.

Дана методика дозволяє стандартизувати оцінки діяльності вугільної шахти з погляду процесного підходу. Все це дозволить підвищити рівень керування гірничим підприємством, особливо в умовах конкурентоспроможної економіки й використання інформаційних систем керування підприємством.

Наступним етапом дослідження буде імітаційне моделювання, щоб мати можливість регулювати можливий розвиток подій і впливати на результати виконання процесу, приймати різні рішення відносно організації процесу.

Список літератури

1. Слесарев В.В. Процесний підхід до управління вугледобувними підприємствами. /В.В. Слесарев ,С.В. Козир.; Сборник научных трудов международной конференции «Современные информационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта-2017» – Д.:НГУ, 2017.– с.475-480.
2. Елиферов В. Г. Бизнес-процессы. Регламентация и управление / В. Г. Елиферов, В. В. Репин. – М. : ИД "ИНФРА-М", 2009. – 320 с.
3. Новицкий И.В. Алгоритм работы имитационной модели системы принятия решений диспетчером угольной шахты. / И.В. Новицкий., А.В. Малиенко; Національний гірничий університет. Науково-технічний збірник. Гірнична електромеханіка та автоматика. Випуск № 97 . Дніпропетровськ, 2016, с.28 – 35.
4. Пономаренко В. С. Теорія та практика моделювання бізнес-процесів : монографія / В. С. Пономаренко, С. В. Мінухін, С. В. Знахур. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 244 с.
5. ДСТУ ISO 9001:2001. Системи управління якістю. Вимоги. [Текст]. – Офіційний вісник України. – 2006 – N 20. – 1435 с. – (Національні стандарти України).
6. Ули Вали. Управление бизнес-процессами от моделирования до мониторинга с использованием продуктов WebSphere V6 [Текст]: Поддержка IBM Supporttie / Ули Вали, Л. Лейбович, Э. Превоств, и др.; пер. с англ. А. Закис. 1-е изд. IBM® Redbook, 2007. – 423 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Ткачовим В.В.

УДК 004.45; 004.77

И.Е. Таланин, д-р физ.-мат. наук, В.И. Таланин, канд. физ.-мат. наук, С.А. Сабанов
(Украина, г. Запорожье, Запорожский институт экономики и информационных технологий)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОКУМЕНТНЫХ БАЗ ДАННЫХ В НАГРУЖЕННЫХ СЕТЯХ

Аннотация Рассмотрены особенности баз данных. Разработан тестовый стенд для выполнения тестирования и анализа полученной статистики. Предложена методика тестирования и сравнения баз данных различных архитектур с использованием клиент-серверной архитектуры тестового стенда с множественным количеством клиентов, каждый из которых в несколько потоков атакует сервер баз данных запросами и собирает статистику по определенным параметрам, на основе которых впоследствии и выполняется сравнение различных баз данных.

Ключевые слова: анализ, база данных, тестирование

Анотация Розглянуто особливості баз даних. Розроблено тестовий стенд для виконання тестування і аналізу отриманої статистики. Пропонується методика тестування і порівняння баз даних різних архітектур з використанням клієнт-серверної архітектури тестового стенду з багатьма клієнтами, кожен з яких кількома потоками атакує сервер баз даних запитами та збирає статистику за певними параметрами, на базі яких після цього виконується порівняння різних баз даних.

Ключові слова: аналіз, база даних, тестування

Abstract Features of databases are considered. A test stand was developed to perform testing and analysis of the statistics obtained. A technique for testing and comparing databases of different architectures using a client-server architecture of a test stand with multiple clients, each of which in several threads attacks the database server with requests, and collects statistics on certain parameters, on the basis of which subsequently a comparison of different databases is performed.

Key words: analysis, database, testing

Актуальность работы. В современном мире информация является одним из важнейших видов товара. При этом часто более значимыми являются не те данные, что хранятся где-нибудь, а результаты обработки этих данных. Поскольку данных много, а, соответственно, и пользовательских запросов к ним, то чрезвычайно важным условием становится повышение скорости обработки информации. Сегодня люди стараются максимально автоматизировать любой вид своей деятельности, насколько это возможно, поэтому данные в основном обрабатываются специальным программным обеспечением.

Разработчикам приложений, направленных на работу с базами данных в свою очередь важно уметь правильно определять требования, выставляемые их приложением к хранилищу и иметь возможность подбора оптимального варианта из всех представленных на рынке. От этого будет зависеть то, насколько надежным будет их продукт и станет ли он успешным. И помогают им в этом специальные системы, которые позволяют в автоматическом режиме быстро выполнять сравнение различных вариантов и, таким образом, помогают принять наиболее верное решение на основе поставленных условий.

Поскольку большинство программ сегодня работают с базами данных, то разработчикам необходимо иметь удобный и гибкий инструмент для тестирования и сравнения различных решений с целью выбора подходящего варианта. Это будет ускорять процесс разработки, упростит процесс поддержки приложения в будущем, поскольку от изначально правильно подобранных технологий, при возможном увеличении нагрузки на приложение в дальнейшем будет зависеть общая надежность и уровень доверия к системе.

Целью работы является исследование поведения нереляционных баз данных в нагруженных сетях и их сравнение с реляционной моделью для определения выбора наиболее оптимальной в конкретных условиях.

Общие вопросы организации хранения данных. Структурирование – это процесс расположения в определенном порядке, или по определенной схеме [1]. Такой порядок может быть определен по-разному. Самый простой вариант – это расположение информации в хронологическом порядке. Так, например, информацию о некотором событии, взятую из разных источников, располагают последовательно от более раннего к более позднему или наоборот. Таким образом, получаем структуру с данными, расположенными в соответствии со временем, которое описывается данным блоком информации. Другим способом структурирования информации является расположение каждого блока информации в разные разделы в зависимости от того элемента, который описывает данный информационный блок. Существует несколько способов структурирования информации. В основном отличия состоят в том, по какому принципу происходит структурирование [1].

Модель данных. В классической теории баз данных, модель данных есть формальная теория представления и обработки данных в системе управления базами данных (СУБД), которая включает, по меньшей мере, следующие аспекты:

- аспект структуры: методы описания типов и логических структур данных в базе данных;
- аспект манипуляции: методы манипулирования данными;
- аспект целостности: методы описания и поддержки целостности базы данных.

Аспект структуры определяет, что из себя логически представляет база данных, аспект манипуляции определяет способы перехода между состояниями базы данных (то есть способы модификации данных) и способы извлечения данных из базы данных, аспект целостности определяет средства описаний корректных состояний базы данных.

Модель данных – это абстрактное, самодостаточное, логическое определение объектов, операторов и прочих элементов, в совокупности составляющих абстрактную машину доступа к данным, с которой взаимодействует пользователь. Эти объекты позволяют моделировать структуру данных, а операторы – поведение данных [2].

Каждая база данных и СУБД строится на основе некоторой явной или неявной модели данных. Все СУБД, построенные на одной и той же модели данных, относят к одному типу. Например, основой реляционных СУБД является реляционная модель данных, сетевых СУБД – сетевая модель данных, иерархических СУБД – иерархическая модель данных и т.д.

Иногда встречается использование термина "модель данных" в смысле "схема базы данных" ("модель базы данных"). Такое использование является некорректным. Модель данных есть теория, или инструмент моделирования, в то время как модель базы данных (схема базы данных) есть результат моде-

лирования. По выражению К. Дейта соотношение между этими понятиями аналогично соотношению между языком программирования и конкретной программой на этом языке [2].

М. Р. Когаловский поясняет эволюцию смысла термина следующим образом [3]. Первоначально понятие модели данных употреблялось как синоним структуры данных в конкретной базе данных. В процессе развития теории систем баз данных термин "модель данных" приобрел новое содержание. Возникла потребность в термине, который обозначал бы инструмент, а не результат моделирования, и воплощал бы, таким образом, множество всевозможных баз данных некоторого класса. Во второй половине 1970-х годов во многих публикациях, посвященных указанным проблемам, для этих целей стал использоваться все тот же термин "модель данных". В настоящее время в научной литературе термин "модель данных" трактуется в подавляющем большинстве случаев в инструментальном смысле (как инструмент моделирования) [4].

Модель данных определяется как комбинация трех компонентов [5]:

- Коллекции типов объектов данных, образующих базовые строительные блоки для любой базы данных, соответствующей модели.
- Коллекции общих правил целостности, ограничивающих набор экземпляров тех типов объектов, которые законным образом могут появиться в любой такой базе данных.
- Коллекции операций, применимых к таким экземплярам объектов для выборки и других целей.

Основные параметры при оценке эффективности работы базы данных. Для примера возьмем приложение, построенное на какой-либо базе данных (на данном этапе его архитектура не имеет значения). Предположим, что изначально программой (сайтом) пользуется небольшое количество людей и там хранятся незначительные наборы данных. При таком раскладе приложение работает корректно, а сервер баз данных пока еще хорошо справляется с нагрузкой. Обобщим и скажем, что, практически любая разработка должна подразумевать дальнейшее развитие и популяризацию, а если так, то наше приложение уже скоро потребует больше ресурсов на качественную обработку запросов от вдруг увеличившегося числа пользователей.

Таким образом, мы приходим к тому, что эффективность сервера баз данных напрямую зависит от возможности спокойно реагировать на резкое увеличение нагрузки, без потери производительности. Тут следует также обратить внимание на тот факт, что мы не учитываем "личностные" характеристики отдельно взятой базы данных, то есть степень ее технологического развития. Такое обобщение позволяет полностью оценивать различные базы данных в пределах определенных ограничений среды и конфигурации. Ограничения могут быть, например, в мощности физических компонентов сервера, основными из которых являются центральный процессор, объем оперативного запоминающего устройства, скорость работы подсистемы ввода/вывода. Также при оценке базы данных учитывается скорость обработки пользовательских запросов в зависимости от динамики изменения нагрузки. При этом должно учитываться качество сетевого соединения, если тестирование проводится, например, в пределах одной организации.

Разработка тестового стенда. Целью разработки собственного тестового стенда является исследование возможности сравнивать различные базы данных по определенным статистическим данным, полученным в результате выполнения отдельных тестовых случаев. Общая схема стенда представлена на рис. 1.

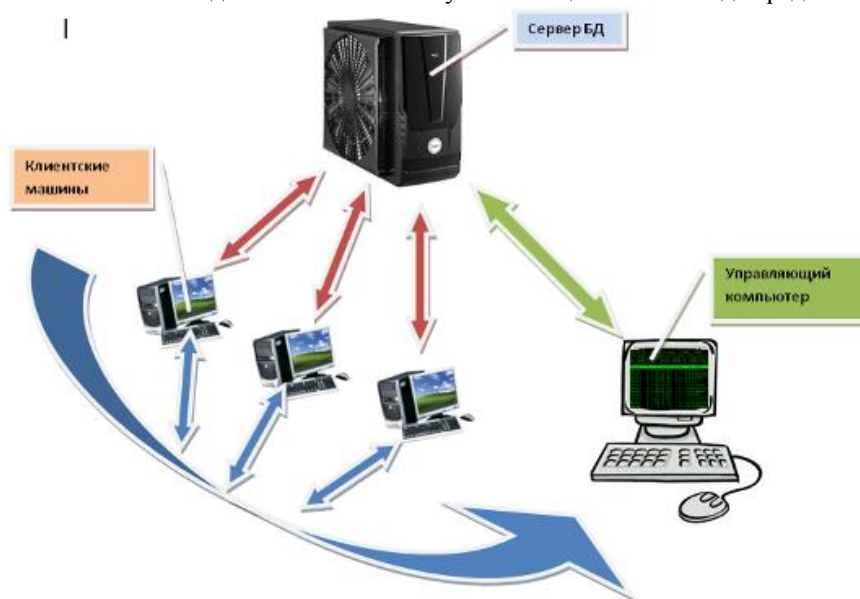


Рис. 1. Общая структура тестового стенда

Вся система тестирования состоит из 3 ключевых частей (система управления, эмуляторы клиентов, монитор ресурсов на сервере баз данных).

Каждый тестовый случай имеет следующие уникальные в своем случае данные:

- 1) параметры, определяющие уникальность теста (рис. 2): тип базы данных; имя; описание;
- 2) параметры для подключения к базе данных (рис. 3): имя пользователя; пароль; адрес сервера баз данных; порт; имя базы данных;
- 3) изменяемый набор тестовых запросов (рис. 4): наборы для категорий запросов INSERT, SELECT, UPDATE, DELET;
- 4) параметры теста: количество потоков(подключений) на клиенте (рис. 5); количество запросов в одном потоке; категории запросов участвующие в текущем тесте; результаты тестирования (рис. 6).

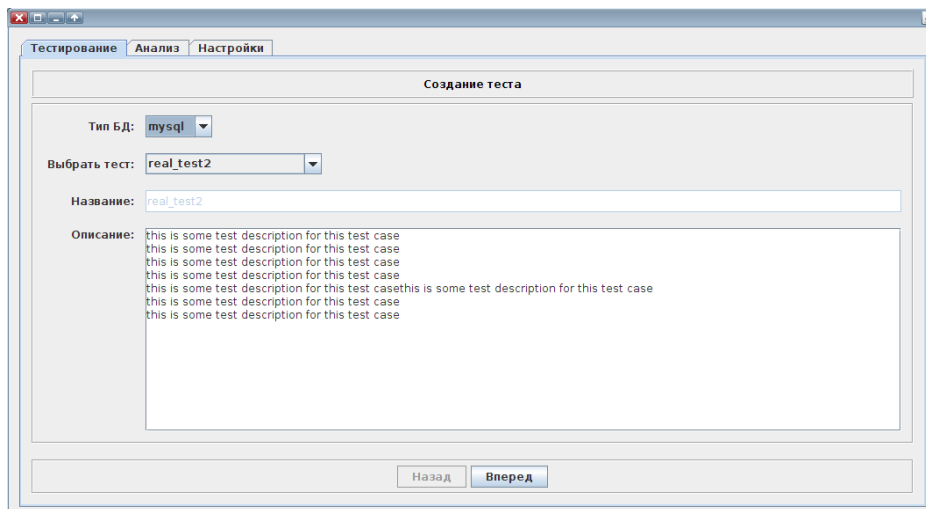


Рис. 2. Первый экран процесса тестирования

Выбирать можно пока только между двумя типами баз данных (mongo и MySQL). При выборе ранее созданного теста загружаются все данные выбранного теста и затем их можно редактировать, но следует учесть, что все предыдущие результаты и настройки данного теста будут затерты. Подключение осуществляется через JDBC драйвер к MySQL и через библиотеку mongo.jar к mongoDB. База данных для тестирования должна быть создана заранее через какую-нибудь СУБД. При добавлении нового теста проводится его валидация путем попытки выполнения данного запроса сразу на сервере баз данных, и если запрос выполняется без ошибок, то он попадает в соответствующий список запросов, иначе выводится сообщение об ошибке. После завершения тестирования можно заняться сравнением результатов. Для этого необходимо выбрать тесты для анализа на вкладке “Анализ” (рис. 6), после чего появится окно с графиками (рис. 7). Если необходимо более детально рассмотреть результаты в какой-нибудь конкретной категории запросов, то можно выбрать соответствующую вкладку, например, SELECT, как показано на рис. 8.

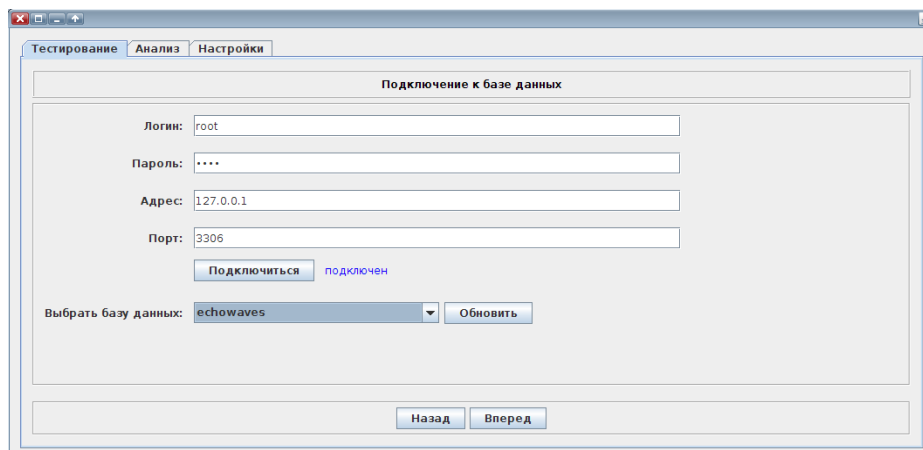


Рис. 3. Настройка подключения к БД

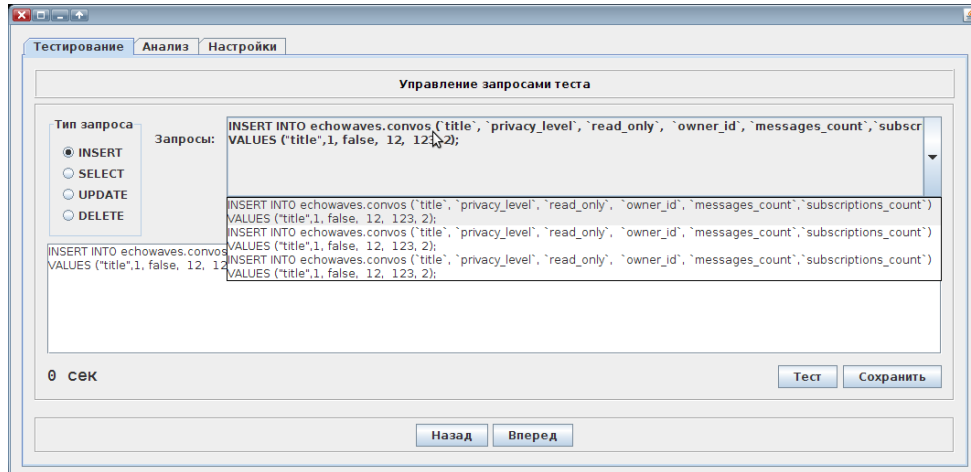


Рис. 4. Управление запросами теста

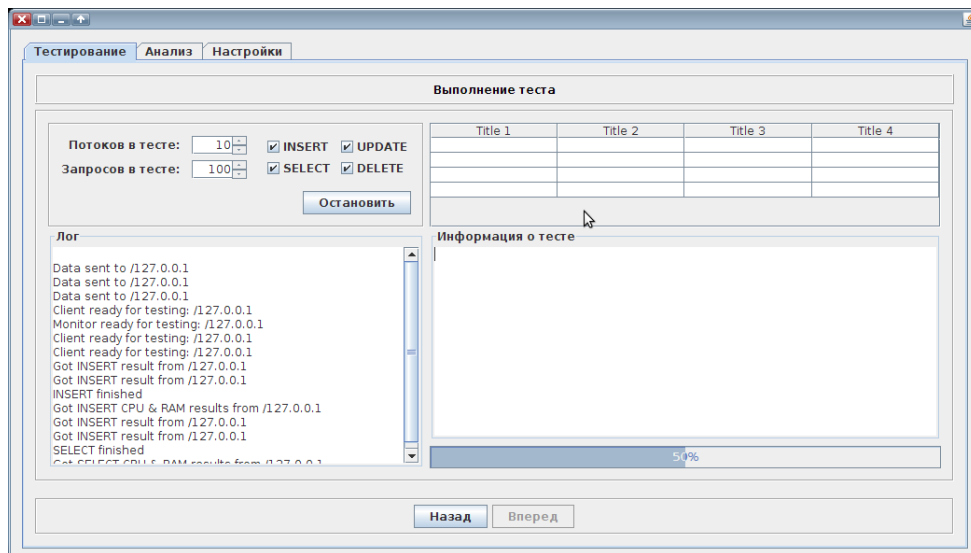


Рис. 5. Окно процесса тестирования

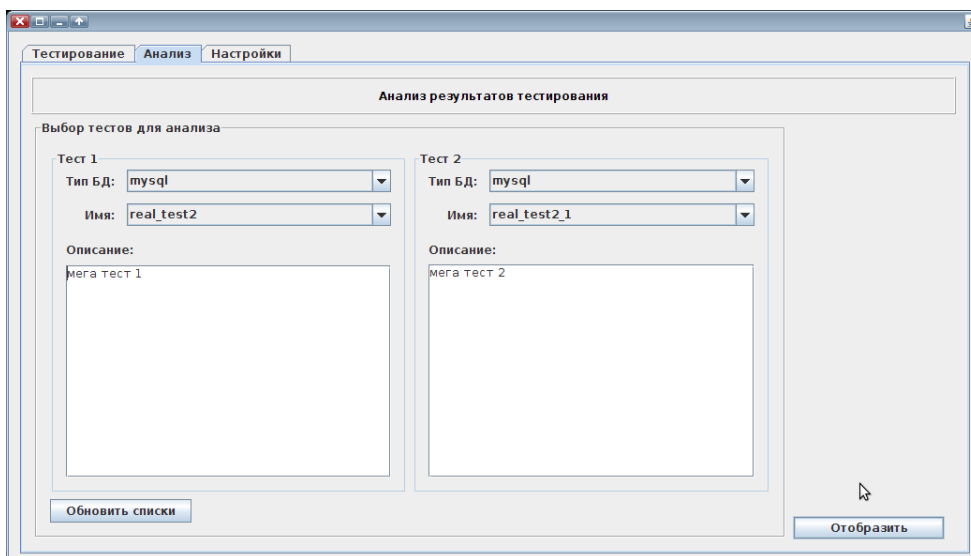


Рис. 6. Выбор результатов тестирования для сравнения



Рис. 7. Сводные результаты сравнения

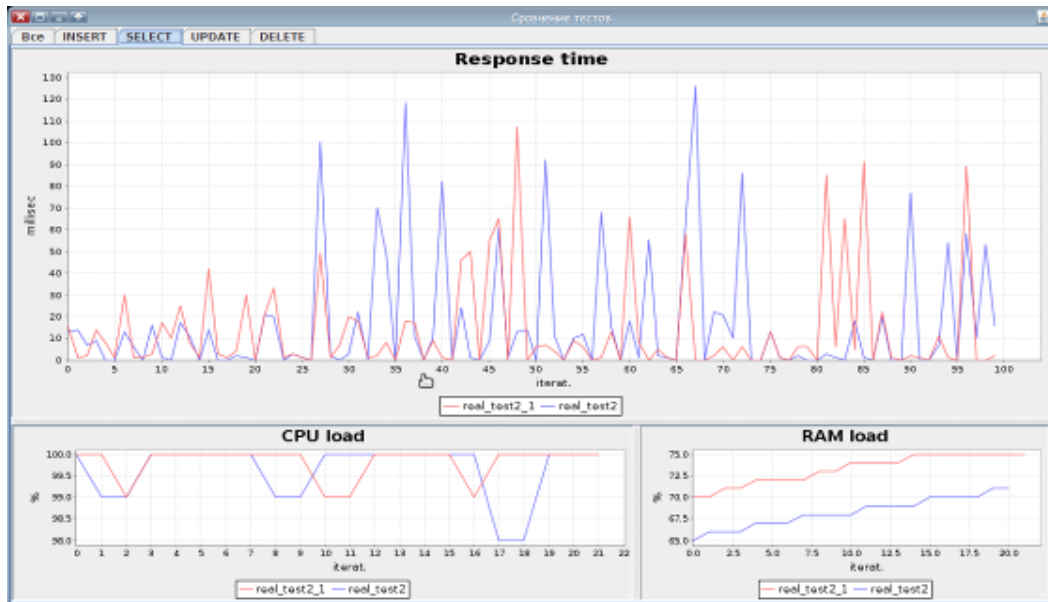


Рис. 8. Результаты сравнения по определенной категории

Каждый тестовый случай может быть сохранен в файл и продолжен или выполнен повторно с новыми изменениями в любое удобное время. После успешного прохождения тестирования результаты всех тестов становятся доступными для сравнения на вкладке “Анализ”.

В задаче клиентской части системы входит выполнение по команде отправки множества запросов на сервер баз данных в соответствии с конфигурацией, полученной с управляющего компьютера и вычисление среднего времени ответов сервера, после чего производится отправка результатов на управляющий компьютер. Программа-монитор работающая на сервере баз данных на протяжении выполнения каждого этапа тестирования фиксирует уровень загрузки центрального процессора и оперативного запоминающего устройства сервера, и затем по запросу отправляет информацию на главный компьютер, где уже и формируется конечный результат. Как и клиентская часть, программа-монитор реализована в виде консольного приложения. На главном компьютере, сразу после получения всех статистических данных со всех клиентских машин и монитора производится объединение, сохранение результатов и вывод графиков проведенного теста. Вся система реализована с использованием языка Java, благодаря чему может работать на любой платформе, где установлен Java версии не ниже 1.6.

Детальный алгоритм работы тестового стенда показан на рис. 9. Взаимодействие сервера с клиентом и монитором показано на рис. 10. Модель данных показана на рис. 11.

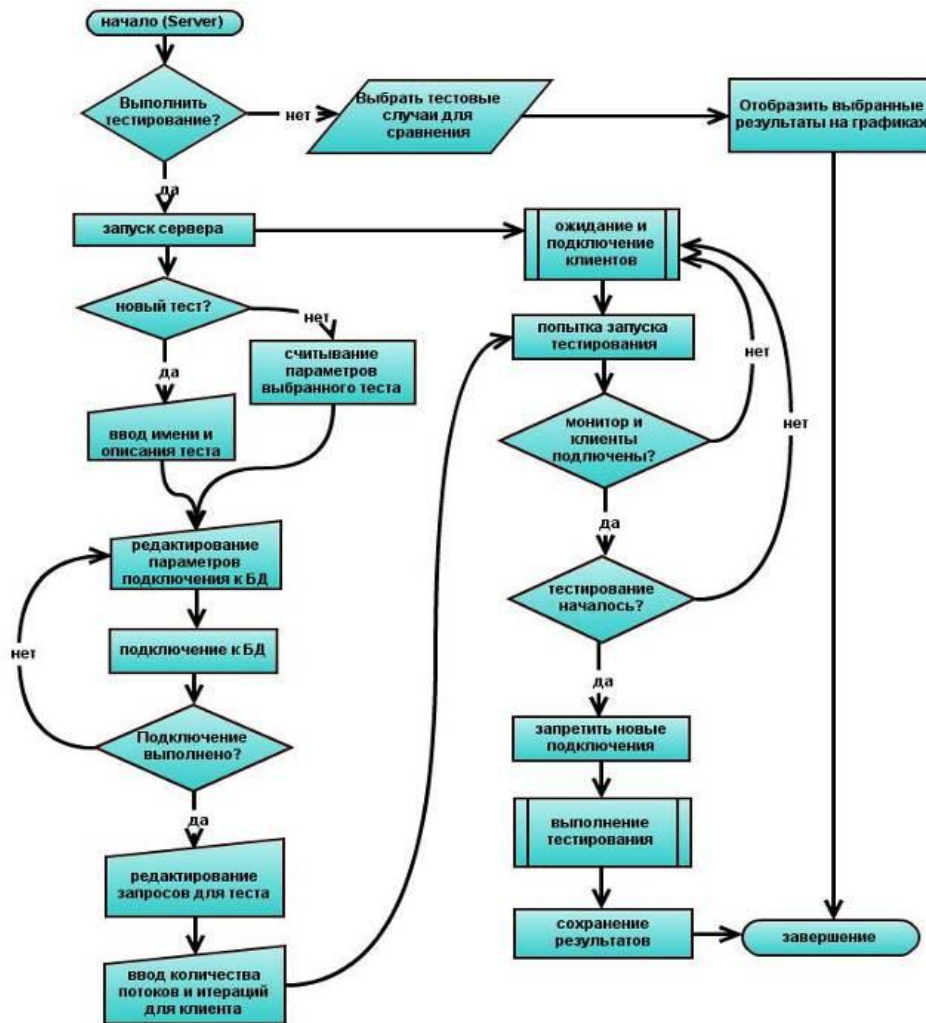


Рис. 9. Схема работы тестового стенда

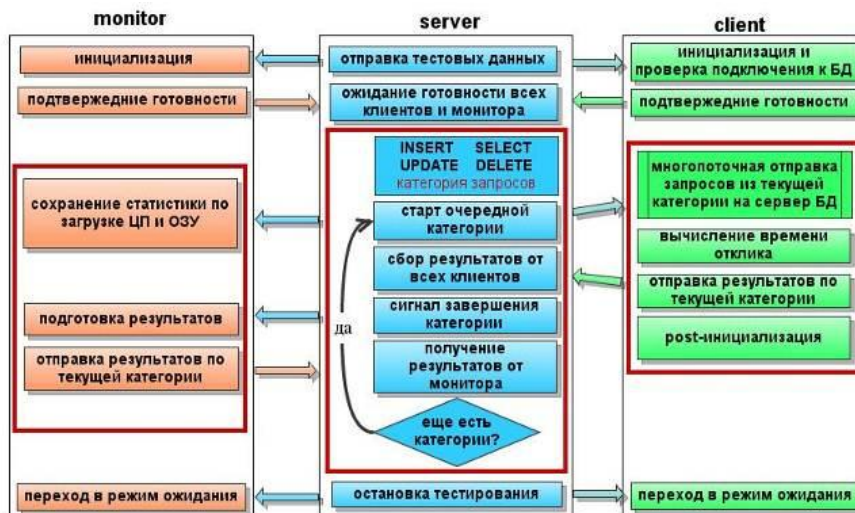


Рис. 10. Взаимодействие сервера с клиентами и монитором

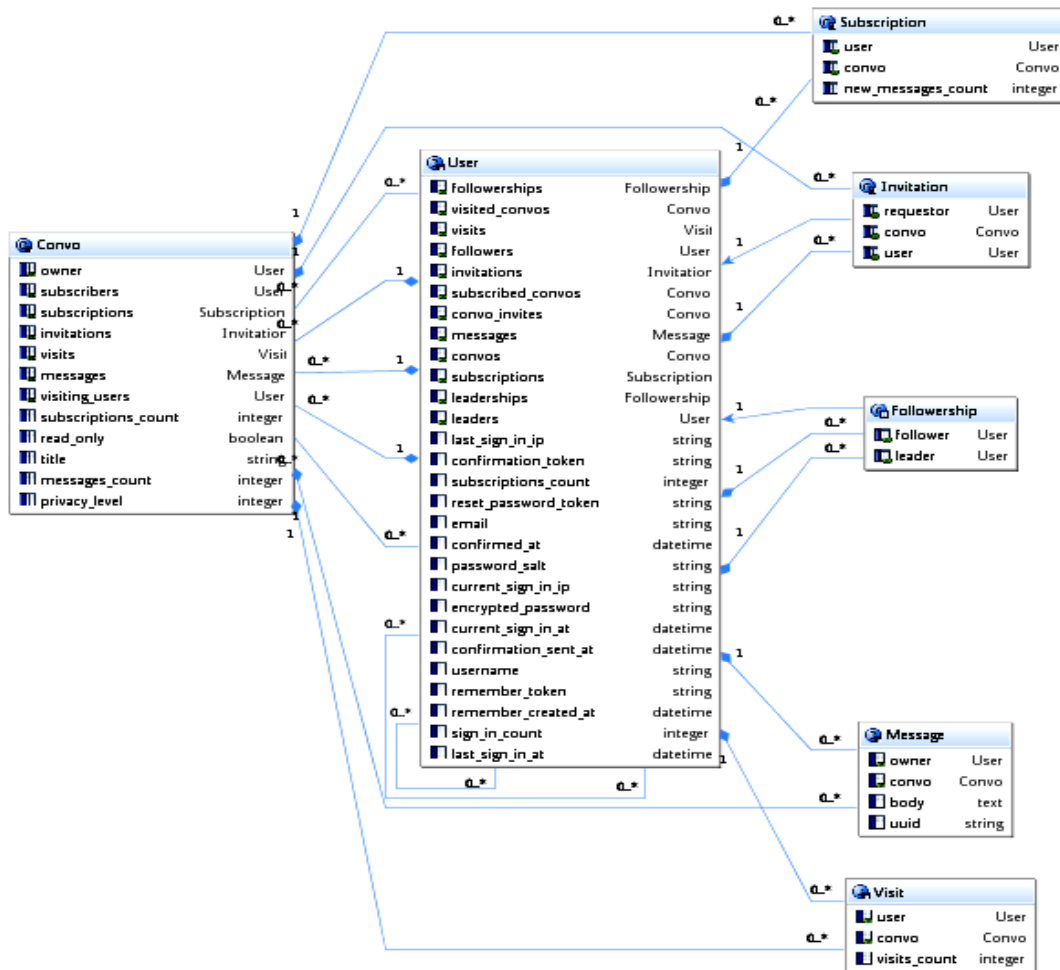


Рис. 11. Модель данных БД для тестирования

Выводы. Предложена методика тестирования и сравнения баз данных различных архитектур с использованием клиент-серверной архитектуры тестового стенда с множеством клиентов, каждый из которых в несколько потоков атакует сервер баз данных запросами и собирает статистику по определенным параметрам, на основе которых впоследствии и выполняется сравнение различных баз данных.

Для демонстрации данной методики был разработан тестовый стенд для сравнения реляционной (MySQL) и noSQL (mongo) баз данных, состоящий из управляющего приложения (сервера), множества клиентских программ и программы монитора, которая работает на сервере баз данных и фиксирует динамику изменения загрузки аппаратной части сервера в процессе тестирования. Система позволяет выводить сравнительные графики разных тестов для дальнейшего анализа.

Разработанная система подтверждает актуальность использования распределенной методики нагрузочного тестирования баз данных, поскольку она позволяет моделировать и прогнозировать работу реального многопользовательского приложения на какой-либо базе данных. Это в свою очередь позволяет правильно координировать процесс его разработки, помогает в выборе хранилища и его оптимальной конфигурации.

Проведенные испытания показали, что тестовый стенд позволяет выполнять нагрузочное тестирование, получает достаточно точные и наглядные результаты, которые помогают выполнять сравнение баз данных в ограниченных условиях будущего использования.

Практическая ценность предложенной методики тестирования в виде разработанного программного комплекса заключается в следующем:

- тестирование происходит в среде максимально приближенной к той, в которой будет работать приложение;
- одновременно тестируется влияние сети на взаимодействие с базой данных;
- гибкость модели – можно создать любое количество клиентов, использовать определенные запросы, применять различные конфигурации сервера баз данных;
- при небольшой доработке может быть использована для тестирования других любых реляционных/noSQL.

В качестве перспективы развития приложения можно добавить параметризацию запросов; более гибкое управление параметрами тестирования и клиентами; систему критериального выбора для результатов тестирования, которая бы позволяла выбирать оптимальную базу данных по заданным критериям отбора (например, специфические базы в различных отраслях промышленности, в том числе в горной промышленности). Такие доработки сделают инструмент более удобным и универсальным.

Список использованных источников

1. Мирошниченко Е.А. К формальному определению понятия “база данных” / Е.А. Мирошниченко // Журн. Проблемы информатики – 2011 – №2. – С. 83-87.
2. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных / К. Дж. Дейт. – М.: Вильямс, 2005. – 1328 с.
3. Когаловский М. Р. Энциклопедия технологий баз данных / М.Р. Когаловский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 800 с.
4. Кузнецов С. Д. Основы баз данных / С.Д. Кузнецов. – М.: БИНОМ, 2007. – 484 с.
5. Кригель А. SQL. Библия пользователя. Язык запросов SQL / А. Кригель, Б. Труханов. – М.: Диалектика, 2009. – 752 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Переверзевим А.В.

УДК 621.396.4

*Ю.А. Паламарчук, Є.М. Сніжко, канд. техн. наук, Н.П. Боцьва, канд. біол. наук
(Україна, Дніпро, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара)*

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ РОБОТИ АВТОНОМНИХ ВУЗЛІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ ДОВКІЛЛЯ

***Анотація.** Вирішення актуальної для гірничої сфери задачі підтримки безпечних умов праці персоналу можливо на базі бездротових сенсорних мереж автоматизованого контролю фізичних параметрів середовища в підземних виробках. Розглянуто побудову моделі та моделювання бездротової мережі з кластерною організацією у складі сенсорних вузлів, координаторів кластерів та базової станції. Розраховані параметри роботи мережі залежно від кількості вузлів та розташування базової станції. На основі проведених досліджень однорангових структур мереж з багатокроковими алгоритмами передачі даних показано, що кластерна організація мережі є більш ефективною за енергозбереженням та тривалістю роботи завдяки додатковому стисненню інформації при об'єднанні інформаційних потоків від елементів одного кластера.*

***Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, кластер, автоматизований контроль.*

***Аннотация.** Решение актуальной задачи поддержки безопасных условий труда персонала шахт возможно на базе беспроводных сенсорных сетей автоматизированного контроля физических параметров в подземных выработках. Рассмотрено построение модели и моделирование беспроводной сети с кластерной организацией в составе сенсорных узлов, координаторов кластеров и базовой станции. Рассчитаны параметры работы сети в зависимости от количества узлов и расположения базовой станции. На основе проведенных исследований одноранговых структур сетей с многошаговыми алгоритмами передачи данных показано, что кластерная организация сети является более эффективной по энергосбережению и продолжительности работы благодаря дополнительному сжатию информации при объединении информационных потоков от элементов одного кластера.*

***Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть, кластер, автоматизированный контроль.*

***Abstract.** Solving the urgent task of the mining industry to support safe working conditions of personnel may be based on wireless sensory networks for automated control of physical parameters in underground workings. The construction of the model and wireless network modeling with cluster organization consisting of sensor nodes, cluster coordinators and base station are considered. The network parameters are calculated based on the number of nodes and the location of the base station. Based on peer-reviewed peer-to-peer network structures, it has been shown that network cluster organization is more effective in terms of energy saving and the duration of work due to the additional compression of information when combining information flows from elements of the same cluster.*

***Keywords:** wireless sensory network, cluster, automated control.*

Вступ

Для гірничої сфери сьогодні дуже актуальними залишаються створення та підтримка безпечних умов праці персоналу, що передбачає автоматизований контроль та поточний моніторинг у підземній виробці параметрів навколишнього середовища: тиску, температури, вібрації, газового складу повітря, сейсмічної активності, – а також своєчасне виявлення відмов промислового обладнання, систем сигналізації, вентиляції, освітленості та ін. Вирішення вказаних задач можливо на базі бездротових сенсорних мереж, які сьогодні є єдиною бездротовою технологією реального часу для забезпечення систем спостереження та контролю, критичних до часу роботи датчиків.

Галузі застосування бездротових мереж весь час розширюються завдяки декільком факторам: збільшенню номенклатури, покращенню характеристик та доступності нових типів датчиків для реєстрації у широких діапазонах фізичних величин у розподілених системах геофізичних, сейсмологічних досліджень, характеристик довкілля, концентрації газів на підприємствах гірничої та металургійної промисловості.

Об'єднані у бездротову мережу, датчики утворюють територіально-розподілену, здатну до самоорганізації систему збирання, обробки та передачі інформації, яку, окрім спостереження за параметрами фізичних середовищ, можна також використати для визначення місцезнаходження та пересування об'єктів, оскільки до складу таких мереж входять як статичні елементи, розташовані на певних місцях, так і динамічні, що переміщуються в залежності від поставлених задач. Такі мережі допомагають уникнути нещасних випадків та попередити про потенційно небезпечні події, вони корисні у складі шахтних комплексів аварійного зв'язку та під час організації та проведення аварійно рятувальних робіт.

Бездротові сенсорні мережі цілком працездатні у підземних умовах, але їх ефективність залежить від багатьох факторів, пов'язаних з часом роботи від автономних джерел живлення, оптимального розміщення на розподілених об'єктах, визначення точного абсолютного та взаємного розташування елементів, синхронізації всіх елементів, визначення алгоритмів передачі (маршрутизації) пакетів між окремими елементами, тому робота таких систем потребує оптимізації.

Основними елементами бездротових сенсорних мереж є вузли, які складаються з датчиків, мікрокомп'ютера, каналу радіозв'язку та системи автономного живлення. Вузли передають інформацію від датчиків на базову станцію, яка накопичує та передає дані для подальшої обробки. Одним із основних параметрів таких мереж є час автономної роботи вузлів, який залежить від декількох факторів: інтервалу реєстрації параметрів з датчиків, ступені обробки та стиснення інформації, відстані між вузлами, потужності радіопередавача, який визначається відстанню між вузлами та протоколами передачі даних у мережі. Встановлення оптимальної організації такої мережі може суттєво вплинути на час її автономного життя.

Бездротові сенсорні мережі використовують в основному радіозв'язок в діапазоні 2,4 ГГц, а саме протоколи ZigBee або малопотужний BLE (Bluetooth Low Energy). Організація мережі може бути однорідною, коли кожний вузол передає інформацію на базову станцію, або ієрархічною (кластерною), коли вузли об'єднані в групи та обмінюються інформацією через виділені вузли групи (координатори) (рис. 1).

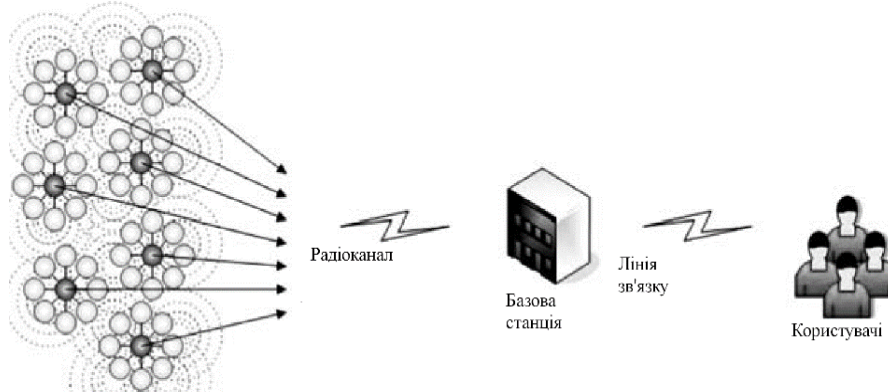


Рис. 1 Загальна схема передачі інформації від сенсорів до користувача [1]

В більшості випадків кластерна організація мережі дає значні переваги з точки зору часу її автономної роботи завдяки додатковому стисненню інформації, отриманої від вузлів одного кластера. Крім того, спрощується задача маршрутизації при багатокроковій передачі інформації від віддалених кластерів (рис. 2).

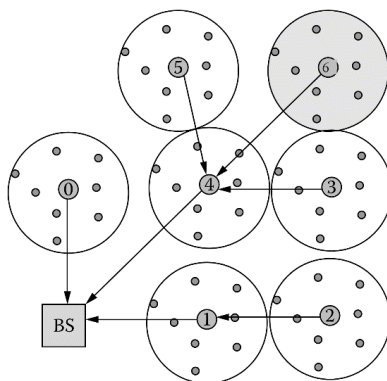


Рис. 2 Спрощена схема бездротової мережі з кластерною організацією, координаторами кластерів та базовою станцією (BS)

У діапазоні 2,4 ГГц радіохвилі розповсюджуються, в основному, в межах прямої видимості, тому багатокрокова передача є необхідною при невеликих розмірах антен та обмеженій потужності передавача, а також для економії витрат енергії. Для обчислення витрат енергії на радіозв'язок наведемо основні формули. Втрати електромагнітної енергії в умовах вільного простору описується відомою формулою

$$L_{free}(d) = \frac{1}{G_t G_r} \cdot \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2,$$

де G_t , G_r – коефіцієнти підсилення передавача та приймача, λ – довжина хвилі, d – відстань між приймачем та передавачем.

На жаль, припущення вільного простору не завжди виконується, тому що відбиття від ґрунту та окремих предметів, інтерференція хвиль можуть значно змінити картину. Такі явища будуть помітні, коли розмір перешкод перевищує 10 см на частоті радіоканалу 2,4 ГГц. Перешкоди не будуть значно впливати, коли вони розташовані поза зоною Френеля для даного каналу зв'язку. Втрату потужності сигналу в залежності від відстані звичайно описують степеневим законом (за шкалою у децибелах)

$$L_0(d) = k_0 + 10\alpha \log_{10} d,$$

де k_0 – втрати на відстані 1 м, α – коефіцієнт, який залежить від характеристик довкілля та звичайно лежить в межах від 2 до 4. Для діапазону 2,4 ГГц часто застосовується модель

$$L_0(d) = \begin{cases} 40.2 + 20 \log(d), & d \leq 8 \text{ m}, \\ 58.3 + 33 \log(d/8) & d > 8 \text{ m} \end{cases}$$

Така модель передбачає, що вузли знаходяться у зоні видимості перші 8 м [2].

Постановка задачі

Розглянуто побудову моделі та моделювання бездротової мережі з кластерною організацією, яка містить сенсорні вузли, координатори кластерів та базову станцію, що збирає інформацію від координаторів. Розраховані параметри роботи мережі, зокрема кількість переданих пакетів, час закінчення роботи першого вузла мережі, час закінчення роботи останнього вузла, сумарна енергія вузлів мережі, залежно від кількості вузлів та розташування базової станції.

Методика виконання роботи

На сьогодні відомо досить багато мережевих симуляторів. Одними з популярних продуктів є OPNET, OMNET++, NS2, NS3 [3-6]. Також існують вузькоспеціалізовані симулятори, створені лише для моделювання певного обладнання [7-10]. Як правило, подібне програмне забезпечення випускається виробниками телекомунікаційного обладнання. Серед спеціалізованих симуляторів можна відзначити симулятори Packet Tracer, створений компанією Cisco для емуляції маршрутизаторів Cisco, і GNS3, який є графічним інтерфейсом для симулятора Dynamics. Для дослідження моделей без прив'язки до конкретного обладнання доцільно використовувати відомий пакет Матлаб, який дозволяє провести кластерний аналіз мережі з виділенням координаторів кластерів, статистичне моделювання та аналіз результатів як у вигляді статистичних таблиць, так і графіків.

Програма створення моделі та імітації мережі розділена на декілька класів, що спрощує розуміння роботи алгоритмів:

- «start» – клас, що зберігає основні параметри для побудови мережі;
- «newNetwork» – клас, що описує алгоритм створення мережі заданої області;
- «newNodes» - клас, що описує алгоритм створення вузлів у заданій області;
- «newCluster» – клас, що описує алгоритм розрахунку нового кластеру;
- «clusterOptimum» – клас, що описує алгоритм вибору вузлів нового кластеру;
- «dissEnergyNonCH» – клас, що здійснює розрахунок витрат енергії звичайного вузла;
- «dissEnergyCH» – клас, що здійснює розрахунок витрат енергії координатора;
- «createfigure» – клас побудови вікна для графічного зображення параметрів мережі;
- «plotResults» – клас, що заносить дані до вікна графічного зображення параметрів.

Основні результати

При виконанні модельних експериментів вибрані такі вхідні параметри, які можна змінювати:

- область мережі, задається двома параметрами – довжиною та шириною області; модель не враховує можливі перепади висот;
- позиція базової станції, задається координатами;
- енергія всієї мережі;
- енергія, що витрачається звичайним вузлом для отримання даних;
- енергія, що витрачається координатором на передачу інформації на базову станцію;
- довжина пакета для отримання вузлом даних з датчиків;
- довжина пакета, що відправляється на базову станцію.

Проведено більше ста експериментів з дослідження поведінки мережі з використанням як реальних даних різних моделей датчиків, так і даних, основаних на припущеннях.

Основні параметри досліджуваних типів мереж наведені у табл. 1.

За результатами експериментів отримані залежності кількості пакетів, кількості непрацюючих вузлів та загальної енергії мережі (у відсотках від початкової) від кількості циклів моделювання (рис.3-5).

Таблиця 1

| Основні параметри досліджуваних моделей сенсорних мереж | | |
|--|-------------------------|---|
| Тип моделі | Кількість вузлів | Відстань базової станції від центра, м |
| A1 | 200 | 200 |
| B1 | 500 | 200 |
| C1 | 1000 | 200 |
| A2 | 200 | 141 |
| B2 | 500 | 141 |
| C2 | 1000 | 141 |
| A3 | 200 | 0 |
| B3 | 500 | 0 |
| C3 | 1000 | 0 |

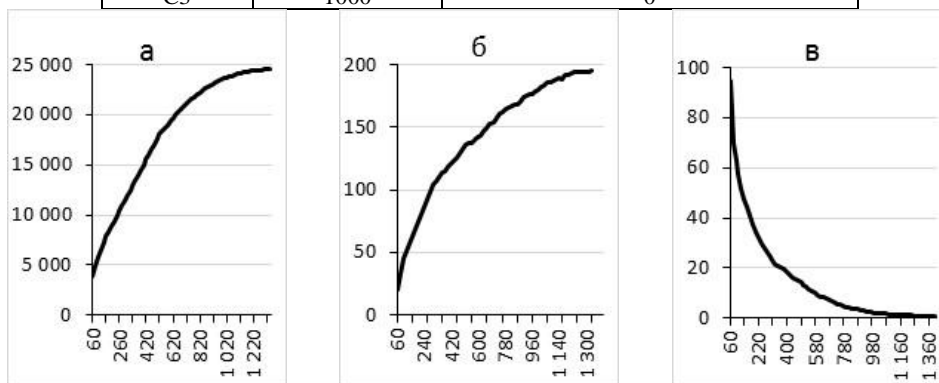


Рис. 3. Залежність кількості пакетів (а), непрацюючих вузлів (б) та загальної енергії мережі (в) від кількості циклів моделювання при кількості вузлів 200 на площі 200x200 м² з базовою станцією у центрі

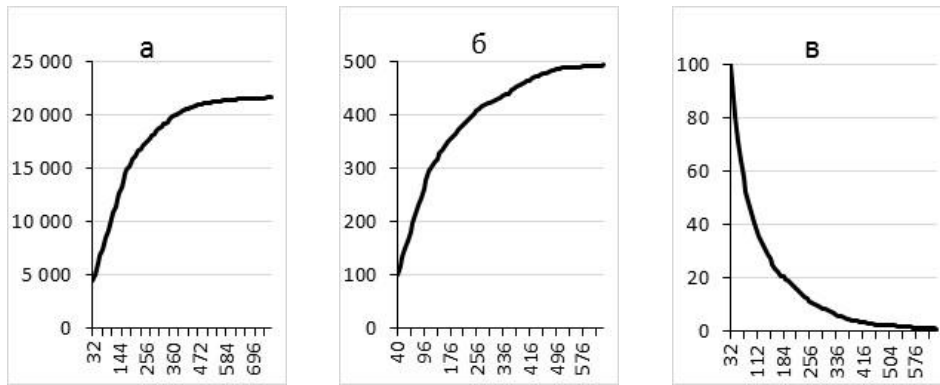


Рис. 4. Залежність кількості пакетів (а), непрацюючих вузлів (б) та загальної енергії мережі (в) від кількості циклів моделювання при кількості вузлів 500 на площі 200x200 м² з базовою станцією на відстані 200 м від центра

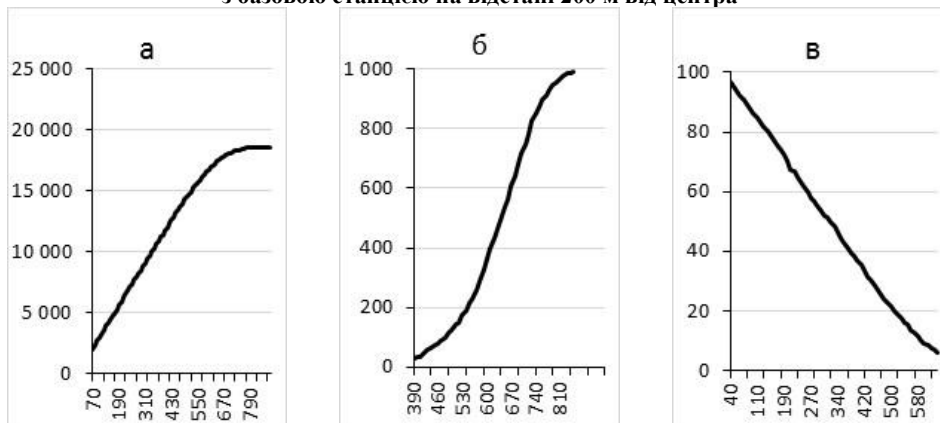


Рис. 5. Залежність кількості пакетів (а), непрацюючих вузлів (б) та загальної енергії мережі (в) від кількості циклів моделювання при кількості вузлів 1000 на площі 200x200 м² з базовою станцією на відстані 141 м від центра

Основні результати моделювання для зазначених вище параметрів наведені в табл.2

Таблиця 2

| Результати моделювання для мереж з різною кількістю вузлів | | | |
|--|--------------------|-----------------------------------|--|
| Тип моделі | Час роботи, циклів | Час відказу першого вузла, циклів | Кількість переданих пакетів *10 ³ |
| A1 | 900 | 20 | 9,6 |
| B1 | 800 | 15 | 27 |
| C1 | 600 | 19 | 44 |
| A2 | 1500 | 70 | 24,5 |
| B2 | 1400 | 50 | 54 |
| C2 | 900 | 20 | 88 |
| A3 | 1900 | 450 | 56 |
| B3 | 1500 | 400 | 112 |
| C3 | 899 | 300 | 192 |

Отримані дані показують, як змінюються енергетичні характеристики та працездатність системи за різних умов, які найбільш важливі при побудові розподіленої системи з автономними вузлами.

Висновки

За результатами проведених модельних експериментів можна зробити такі висновки:

- збільшення кількості вузлів не покращує енергетичні показники мережі, тому для конкретної задачі потрібно визначити оптимальну для виконання поставленого завдання кількість вхідних даних;
- місце розташування базової станції грає значну роль, і якщо база знаходиться найближче до центру розгортання мережі, енергетичні показники мережі покращуються у кілька разів: по перше, збільшується час життя мереж, а по друге, закінчення роботи вузлів настає пізніше, що покращує покриття мережі і дає кращі результати при аналізі вимірюваних показників;

- за графіками витрат енергії з часом видно, що при розташуванні бази у центрі спостерігається більш рівномірна залежність використання енергії з часом, що є ознакою доцільного та ефективного використання енергії передавача.

Таким чином, на основі проведених досліджень однорангових структур мереж з багатокроковими алгоритмами передачі даних через радіоканал показано, що кластерна організація бездротової сенсорної мережі для систем автоматизації контролю даних про стан середовища є більш ефективною з точки зору енергозбереження та тривалості роботи, оскільки в ній можливо додаткове стиснення інформації за рахунок об'єднання інформаційних потоків від елементів одного кластера. Але вивчення таких систем потребує додаткових припущень про характер даних, що реєструються.

Список використаної літератури

1. Sarangapani O. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks / O.Sarangapani. – CRC Press, 2007. – 486 p.
2. Verdone R. Wireless Sensor and Actuator Networks / R.Verdone, D.Dardari, G.Mazzini, A.Conti. – Academic Press, 2008. – 392 p.
3. Qing L. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor network / L.Qing, Q.Zhu, M.Wang // Computer Communications. – 2006. – Vol. 29. – P. 2230-2237.
4. Jia J. Energy-balanced density control to avoid energy hole for wireless sensor networks / J.Jia, J.Chen, X.Wang, L.Zhao // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2012. – Vol. 20. – P. 112.
5. Tang X. Optimizing lifetime for continuous data aggregation with precision guarantees in wireless sensor networks / X. Tang, J. Xu // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). – 2008. – Vol. 16, N. 4. – P. 904-917.
6. Jia J. Exploiting sensor redistribution for eliminating the energy hole problem in mobile sensor networks / J.Jia, X.Wu, J.Chen, X.Wang // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – Vol. 2, N. 1. – P. 68.
7. Zhang H. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks / H.Zhang, J.Hou // Ad Hoc & Sensor Wireless Networks. – 2005. – Vol. 1, N. 1-2. – P. 89-124.
8. Akyildiz I. A survey on sensor networks / I.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci // Communications Magazine, IEEE. – 2002. – Vol. 40, N. 8. – P. 102-114.
9. Chen G. An unequal clusterbased routing protocol in wireless sensor networks / G.Chen, C.Li, M.Ye, J.Wu // Wireless Networks. – 2009. – Vol. 15, N. 2. – P. 193-207.
10. Li J. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks / J. Li, P.Mohapatra // IEEE Vehicular Technology Conference. – 2005. – Vol. 62. – P. 2721.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Корчинським В.М.

УДК 681.518.54

Л.І. Мецераков, д-р техн. наук

(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)

ФОРМУВАННЯ БАЗОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ АГЕНТІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МУЛЬТИАГЕНТНІ СИСТЕМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ГІРНИЧИМИ АГРЕГАТАМИ

Анотація. Представлено формування різних інтелектуальних інформаційних агентів з супутніх сигналів через умовні моментні характеристики. Для розширення та поглиблення інформаційного забезпечення стратегічних та оперативних задач автоматизованих систем керування технологічних процесів гірничих електромеханічних комплексів пропонується використовувати інформаційні статистичні оцінки вимірюваних діагностичних сигналів типу умовна асиметрія та умовний ексцес. Обґрунтовано, що системи виміру при цьому за структурами “вхід-вихід” та “вхід-стан-вихід” являються у визначеній формі новими знаннями, які можуть бути використані в якості інформаційних сутностей при формуванні предметних галузей інтелектуальних мультиагентних систем підтримки прийняття рішень для задач автоматизованих систем керування в умовах невизначеності стану гірничих агрегатів.

Ключові слова: мультиагентні системи, сигнали, ідентифікація, агенти, умовна ймовірність.

Аннотация. Представлено формирование разных интеллектуальных информационных агентов из сопутствующих сигналов через условные моментные характеристики. Для расширения и углубления информационного обеспечения стратегических и оперативных задач автоматизированных систем управления технологических процессов горных электромеханических комплексов предлагается использовать информационные статистические оценки измеряемых диагностических сигналов типа условная асимметрия и условный эксцесс. Обосновано, что системы измерения при этом по структурам “вход-выход” и “вход-состояние-выход” являются в определенной форме новыми знаниями, которые могут

быть использованы в качестве информационных сущностей формирования предметных областей интеллектуальных мультиагентных систем поддержки принятия решений для задач автоматизированных систем управления в условиях неопределенного состояния горных агрегатов.

Ключевые слова: мультиагентные системы, сигналы, идентификация, агенты, условная вероятность.

Abstract. Forming is presented of different intellectual informative agents in the concomitant signals through the conditional momentnie descriptions. For expansion and deepening of the informative providing of strategic and operative tasks of the automated systems of management of technological processes of mountain electromechanics complexes it is suggested to use informative statistical estimations of the measured diagnostic signals of type conditional asymmetry and conditional excess. It is grounded, that systems of measuring on structures a "entrance-output and "вход-состояние-output" are new knowledges in the definite form, which can be used as informative essences at forming of subject domains of the intellectual multiagentnih systems of support of acceptance of decisions for the tasks of the automated systems of management in the conditions of indefinite state of mountain aggregates.

Keywords: multiagentnie systems, signals, authentication, agents, conditional probability

Вступ. Реально існуючі вимоги підвищення продуктивності в енергоємних технологіях гірничого виробництва на конструктивно складних та потужних агрегатах обумовлюють необхідність оптимізації процесів ідентифікації та управління в останніх. Одним з перспективних шляхів рішення даної задачі є розробка і використання для управління інтелектуальних систем, і зокрема інтелектуальних мультиагентних систем. В мультиагентних технологіях закладений принцип автономності окремих частин (агентів) спільно функціонуючих в розподіленій системі. Така технологія є украй доцільною при пошуку нових інтелектуальних методів виділення прихованої інформації про оперативний технічний та технологічний стан гірничих машин і механізмів. Інформацію цю містять перш за все супутні робочим режимам сигнали. І оскільки переважна більшість гірничих агрегатів є по архітектурі електромеханічними, то поза сумнівом тут на перше місце виступають енергоінформаційні сигнали.

Постановка задачі. Основною задачею досліджень являється формування і аналіз інформаційних можливостей використання моментних числових оцінок вищих порядків як інтелектуальних агентів, урахувавши особливості енергоінформаційних сигналів, їх зашумленості. Ці характеристики корінним чином впливають на інтелектуальні можливості мультиагентних систем при пошуку інформації та управлінні інформаційними потоками.

Основний зміст роботи. Формування різних інтелектуальних інформаційних агентів в супутніх сигналах веде до застосування в першу чергу умовних математичних очікувань змінної виходу Y щодо змінної входу U [1, 2, 5], а також їх зворотної характеристики, що являється усередненою характеристикою форми адресного зв'язку і відобразиться як

$$M(Y | u) = \int_{-\infty}^{\infty} yf(y | u)dy ; \quad M(U | y) = \int_{-\infty}^{\infty} uf(u | y)du \cdot \quad (1)$$

При цьому система двох варіаційних векторів випадкових сигналів входу U і виходу Y , що утворюють з експериментальних вибіркового даних двовимірне кореляційне поле з умовних математичних очікувань $M(Y | u)$ формує функцію регресії, яка зв'яже середини розподілів умовних щільностей імовірностей $f(y, | u_s)$ (рис. 1) [3].

При використанні трьох параметрів входу U , стану X і виходу Y , тобто розгляді системи з трьох величин, що складають тривимірний кореляційний простір, умовні математичні очікування $M(Y | X, u)$ утворюють просторову регресійну поверхню, що своїми вузлами зв'яже середини відповідних розподілів

$$M(Y | X, u) = M[M(Y | X) | u] = \int_{i=1}^n \int_{j=1}^m yf(y | x)xf(x | u)dx dy \cdot \quad (2)$$

Для нелінійних систем квадратичний ступінь розсіювання в системі двох випадкових величин входу і виходу щодо функції регресії визначається умовною дисперсією [5].

$$D(Y | u) = M[Y - M(Y | u)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [y - M(Y | u)]^2 f(y | u)dy \cdot \quad (3)$$

При розгляді системи величин входу U , стану X і виходу Y , що складають тривимірний кореляційний простір, квадратичний ступінь розсіювання утворить поверхню відхилення щодо поверхні глобального умовного математичного очікування

$$D(Y | X, u) = \int_{i=1}^n \int_{j=1}^m [y - M(Y | X)]^2 f(y | x) [x - M(X | U)]^2 f(x | u) dx dy \quad (4)$$

Ідентифіковані моделі нелінійних систем з постійною, умовною дисперсією $D(Y | u)$ прийнято визначати як гомоскедастичні, а моделі з змінною умовною дисперсією $D(Y | u)$ як гетероскедастичні. Найважливіше практичне значення для вирішення задач АСК ТП ГЕМК має дисперсія умовного математичного очікування $DM(Y | U)$, що знаходиться згідно виразу

$$DM(Y | U) = M[M(Y | U) - M(Y)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y f(y | u) dy - m_y]^2 f(u) du \quad (5)$$

А також середня, умовна дисперсія, що обумовлена співвідношенням

$$MD(Y | U) = \int_{-\infty}^{\infty} D(Y | u) f(u) du = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [y - M(Y | u)]^2 f(y, u) dy du \cdot$$

З робіт [6, 7] відомо, що дисперсія вихідної змінної $D(Y)$ дорівнює сумі дисперсій умовного математичного очікування $DM(Y | U)$ і математичного очікування умовної дисперсії $MD(Y | U)$

$$D(Y) = DM(Y | U) + MD(Y | U) \quad (6)$$

Останній вираз відкриває величезні можливості щодо підвищення якості діагностичної інформації, яка виділяється з енергоінформаційних сигналів. Дійсно, дисперсія умовного математичного очікування $DM(Y | U)$ характеризує ту частину із сукупних флуктуацій вихідної змінної Y , що цілком визначається тільки інформаційною динамікою вхідної змінної U .

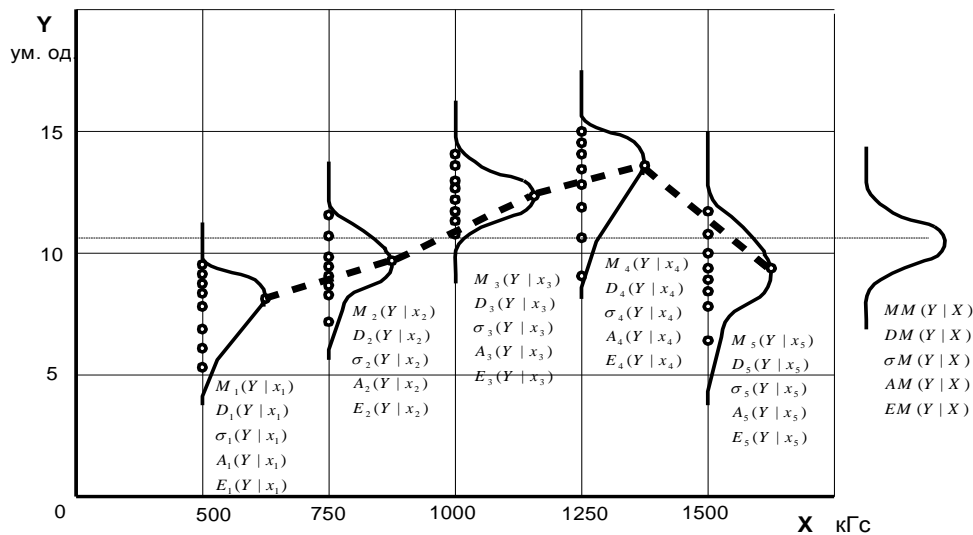


Рис. 1. Функція регресії з умовних математичних очікувань $M(Y | x)$ і закони розподілу умовних характеристик проходки на коронку від навантаження на породоруйнівний інструмент бурового комплексу

У той же час математичне очікування умовної дисперсії $MD(Y | U)$ характеризує другу складову частину загальної дисперсії вихідної змінної $D(Y)$, котра цілком визначається динамікою множини інших вхідних змінних або змінних стану, що не спостерігаються. Таким чином, при використанні інформаційних властивостей даних умовних чисельних характеристик вимірюваних сигналів в процесах керування можна здійснити глибоку цілеспрямовану фільтрацію використовуваного діагностичного сигналу, що несе в собі інформаційний вплив значної сукупності змінних. Крім того дисперсію умовного математичного очікування можливо використати і як якісну характеристику ступеня зв'язку вхідних та вихідних змінних, вхідних змінних та змінних стану, змінних стану і

вихідних змінних. А в якості характеристик ступеня невизначеності, неадекватності синтезованої інформаційної моделі розглядаємому оригіналу ГЕМК можна використовувати математичне очікування умовної дисперсії, як відображаючої оцінки множини невизначених впливаючих на об'єкт керування факторів (рис. 2).

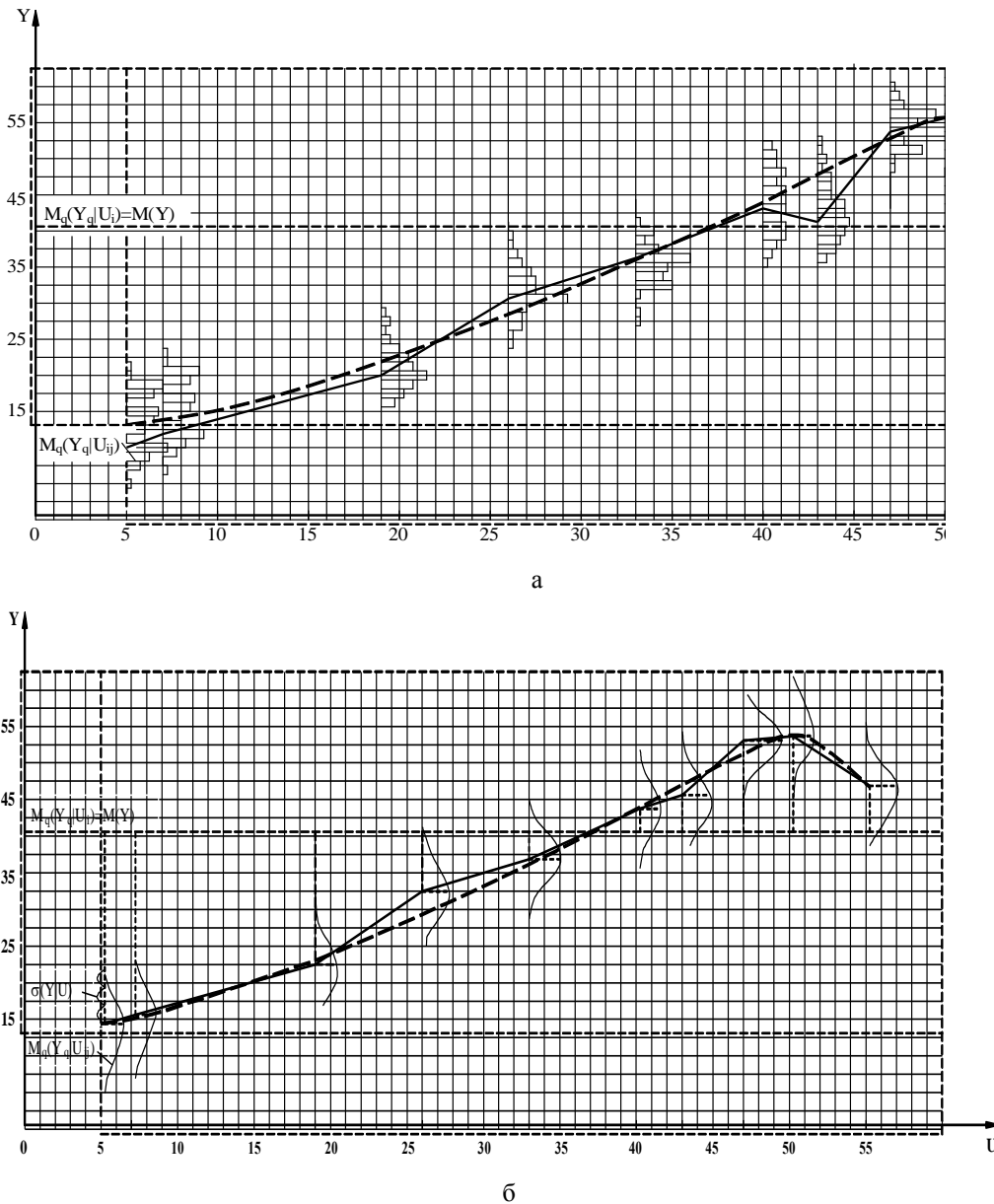


Рис. 2. Експериментальні (суцільні) і апроксимовані (пунктирні) лінії регресії, що сформовані умовними математичними очікуваннями двовимірною кореляційного поля залежності миттєвих значень потужності, що споживається привідним синхронним двигуном барабанного млина ММС 70*23 при зміні технологічного параметра заповнення барабана дрібноною рудою Y (Інгулецький ГЗК)

Поряд з вказаними вище класичними оцінками, для розширення та поглиблення інформаційного забезпечення стратегічних та оперативних задач АСК ТП ГЕМК пропонується використовувати вкрай важливі інформаційні статистичні оцінки вимірюваних діагностичних сигналів такі як умовна асиметрія $A(Y|u)$ та умовний ексцес $E(Y|u)$. Ретельний аналіз робіт по напрямку автоматизація технологічних процесів виявив повне замовчування та нехтування центральними моментами вище другого порядку, як інформаційними оцінками. Тимчасом вони, в силу свого аналітично-функціонального змісту, спроможні статистично характеризувати знакові градієнтні характеристики емпіричних умовних розподілів вибіркового вимірів інформаційних діагностичних сигналів відповідно за виразами

$$A(Y|u) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M(Y))^3 f(Y|u_i)}{\sigma_y^3}; \quad E(Y|u) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - M(Y))^4 f(Y|u_i)}{\sigma_y^4} - 3. \quad (7)$$

Умовна асиметрія $A(Y|u)$ і умовний ексцес $E(Y|u)$ емпіричного розподілу вибірових вимірів як оцінки третього та четвертого порядків обумовлюють визначення ступеня відхилення розподілу, що розглядається, від нормального відповідно по горизонталі та вертикалі (перпендикулярні координатні оцінки). А так як їх чисельні характеристики збільшення та зменшення обумовлюються аналогічними характеристиками умовної дисперсії, то на них можуть бути розповсюджені деякі інформаційні властивості останньої. Так може розглядатися модель для якої умовна асиметрія $A(Y|u)$ або умовний ексцес $E(Y|u)$ являються постійними (гомоскедастичність), чи модель для якої ці характеристики являються змінними (гетероскедастичність), і змінними в якій мірі. Відповідно асиметрія та ексцес умовного математичного очікування буде характеризувати відхилення від нормальної характеристики розподілу ту частину загальних флуктуацій, яку збуджує змінна умовності (входу або стану). Встає запитання про інформаційну чутливість $A(Y|u)$ або $E(Y|u)$ до оперативної зміни основних режимних параметрів ГЕМК та можливість застосування їх інформаційних властивостей в задачах АСК технологічних процесів [4, 5].

Використовуючи метод аналогії з безумовними моментними числовими характеристиками безперервних випадкових інформаційних сигналів можна скласти повний комплекс умовних статистичних числових характеристик енергоінформаційних оцінок ТП і ГЕМК у вигляді інтуїтивно зрозумілого формату визначених умовних статистичних числових характеристик енергоінформаційних оцінок безперервних і дискретних вибірових вимірів випадкових сигналів виходу Y об'єктів автоматизованого керування від векторів входу U і стану X через сформовану множинну оцінок, що відображаються [3, 7].

При використанні трьох параметрів – входу U , стану X і виходу Y , тобто розгляді системи з трьох випадкових величин для систем структури “вхід-стан-вихід”, що складають тривимірний кореляційний простір, асиметрії умовних математичних очікувань $AM(Y|X, u)$ і ексцеси умовних математичних очікувань $EM(Y|X, u)$ утворюють просторові регресійні поверхні, що своїми вузлами зв'язують середини відповідних розподілів [2, 3, 6].

Відповідно до загальних властивостей моментних функцій за аналогією з характеристиками дисперсії асиметрія вихідної змінної $A(Y)$ для системи структури “вхід-вихід” буде дорівнювати сумі асиметрії умовного математичного очікування $AM(Y|U)$, математичного очікування умовної асиметрії $MA(Y|U)$ та складової корекції за виразом

$$A(Y_u) = AM(Y|U) + MA(Y|U) + \frac{3M \left\{ [Y - M(Y|X)]^2 [M(Y|X) - MY] \right\}}{\sigma_y^3}, \quad (8)$$

і для системи структури “вхід-стан-вихід” за формулою

$$A(Y_{xu}) = AM(Y|X, U) + MA(Y|X, U) + \frac{3M \left\{ [Y - M(Y|X, U)]^2 [M(Y|X, U) - MY] \right\}}{\sigma_y^3}.$$

Так як четвертий центральний момент (ексцес) характеризує протяжність спадів розподілення, і може змінюватися від 1 до ∞ для різних законів розподілення, то доцільно використовувати його оцінку, яка дорівнює зворотній величині з його кореня (контрексцес) [5] і яка змінюється в межах 0 – 1. Тому під поняттям ексцесу та при розрахунках використовується його оцінка через контрексцес. При цьому моментна характеристика ексцесу вихідної змінної $E(Y)$ теж буде дорівнювати сумі ексцесу умовного математичного очікування $EM(Y|U)$, математичного очікування умовного ексцесу $ME(Y|U)$ та складових корекції для системи структури “вхід-вихід” у вигляді

$$E(Y_u) = EM(Y|U) + ME(Y|U) + \frac{4M \left\{ [Y - M(Y|X)]^3 [M(Y|X) - MY] \right\}}{\sigma_y^4} + \frac{6M \left\{ [Y - M(Y|X)]^2 [M(Y|X) - MY]^2 \right\}}{\sigma_y^4}, \quad (9)$$

і для системи структури “вхід-стан-вихід” за виразом

$$E(Y_{xu}) = EM(Y|X, U) + ME(Y|X, U) + \frac{4M \left\{ [Y - M(Y|X, U)]^3 [M(Y|X, U) - MY] \right\}}{\sigma_y^4} + \frac{6M \left\{ [Y - M(Y|X, U)]^2 [M(Y|X, U) - MY]^2 \right\}}{\sigma_y^4}$$

Остатні вирази (8) – (9) відкривають можливості щодо розширення та підвищення якості діагностичного інформаційного забезпечення, що виділяється з енергоінформаційних сигналів ГЕМК. Дійсно, асиметрія $AM(Y|U)$ та ексцес $EM(Y|U)$ умовного математичного очікування координатно характеризують ту частину із сукупних флуктуацій сигналу вихідної змінної Y , що цілком визначається тільки інформаційною динамікою вхідної змінної U . У той же час математичні очікування умовної асиметрії $MA(Y|U)$ та ексцесу $ME(Y|U)$ характеризують другу складову частину загальних асиметрії $A(Y)$ та ексцесу $E(Y)$ вихідної змінної Y , котра цілком визначається динамікою множини інших вхідних змінних або змінних стану, що не спостерігаються.

Висновки. Таким чином, при використанні інформаційних властивостей даних умовних чисельних характеристик вимірюваних сигналів можна здійснити глибоку цілеспрямовану фільтрацію використовуваного діагностичного сигналу, що несе в собі інформаційний вплив значної сукупності змінних. Крім того асиметрію $AM(Y|U)$ та ексцес $EM(Y|U)$ умовного математичного очікування можливо використати і як якісні характеристики ступеня зв'язку вхідних U та вихідних змінних Y , вхідних змінних U та змінних стану X , змінних стану X і вихідних змінних Y . А в якості характеристик ступеня невизначеності, неадекватності синтезованої інформаційної моделі оригіналу ГЕМК, що розглядаються, можна використовувати математичне очікування умовної асиметрії $MA(Y|U)$ та математичне очікування умовного ексцесу $ME(Y|U)$, як оцінки множини невизначених на об'єкт керування факторів, що суттєво впливають. В цілому розроблені та представлені нові числові оцінки тісноти статистичних моментних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів систем виміру за структурами “вхід-вихід” та “вхід-стан-вихід” являються у визначеній формі новими знаннями, що можуть бути використані в якості інформаційних сутностей при формуванні предметних галузей систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень для задач автоматизованих систем керування технологічних процесів гірничих електромеханічних процесів в умовах невизначеності стану останніх.

Список літератури

1. Мещеряков Л.И. Основные задачи энергоинформационных технологий диагностирования буровых комплексов / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 2006. – №7. – С. 71–74.
2. Мещеряков Л.И. Идентификация и диагностирование технического состояния технологических агрегатов / Л.И. Мещеряков. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – №1,2. – С. 30–31.
3. Мещеряков Л.И. Математические основы представления стохастических состояний диагностируемых горных агрегатов / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ. – Днепропетровск, 2002. – №6. – С. 95–98.
4. Мещеряков Л.И. Разработка и результаты промышленных испытаний системы ранней диагностики затираний в подшипниковых узлах барабанных мельниц / Л.И. Мещеряков, И.К. Младецкий, О.В. Модзилевский, В.П. Попов, С.Г. Рудоманова, С.В. Семенов, В.В. Кукинов, / *Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов – основа повышения качества продукции горнорудных предприятий* // *Материалы научно-технической конференции*. – Губкин. – 1988. – С. 58–59.
5. *Дисперсионная идентификация* / Под редакцией Н.С. Райбмана. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 С.
6. Мещеряков Л.И. Моделирование динамики горных электромеханических систем для оптимизации задачи их автоматического диагностирования / Л.И. Мещеряков. // *Вибрации в технике и технологиях*, 2000. №4(16). С. 68–70.
7. Мещеряков Л.И. Стан і тенденції розвитку інтегрованих комп'ютерних технологій діагностування гірничих електромеханічних систем / Л.И. Мещеряков. // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 1999. №1. – С. 113–115.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Слесаревим В.В.

УДК 004.715

И.Е. Таланин, д-р физ.-мат. наук, В.И. Таланин, канд. физ.-мат. наук, С.А. Сабанов
(Украина, г. Запорожье, Запорожский институт экономики и информационных технологий)

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МАРШРУТИЗАЦИИ НА БАЗЕ ОБОРУДОВАНИЯ CISCO

Аннотация Рассмотрены программно-аппаратные особенности коммуникационного оборудования Cisco. Создан полнофункциональный программный комплекс, позволяющий проводить интерпретацию состояния виртуальных маршрутизаторов, снятие показателей производительности центрального процессора и выполнение анализа его загрузки.

Ключевые слова: виртуализация, маршрутизация, мониторинг

Анотація Розглянуто програмно-апаратні особливості комунікаційного обладнання Cisco. Створено повнофункціональний програмний комплекс, що дозволяє проводити інтерпретацію стану віртуальних маршрутизаторів, зняття показників продуктивності центрального процесору і виконання аналізу його завантаження.

Ключові слова: віртуалізація, маршрутизація, моніторинг

Abstract The software and hardware features of Cisco communication equipment are considered. A full-featured software package has been created that allows interpreting the state of virtual routers, to take CPU performance indicators and perform analysis of its load.

Key words: virtualization, routing, monitoring

Актуальность работы. Переход к облачным технологиям является одним из лидирующих приоритетов на сегодняшний день. Одним из основных принципов облачных структур называют виртуализацию – общий термин, охватывающий абстракцию ресурсов для многих аспектов вычислений. Данный аспект облачных вычислений затронул и сетевое оборудование. Таким образом, возникает проблема трудности анализа логической структуры сети, ее усложнение по сравнению с физической архитектурой. Для решения этой проблемы следует ставить задачи по декомпозиции виртуальных компонентов сетевого оборудования, такого как роутеры, коммутаторы и т.д.

Актуальность данной работы обоснована, в первую очередь, тем, что, несмотря на обилие научной и технической литературы, посвященной описанию работы с виртуальными компонентами, их настройке и тестированию, практически все они ориентированы на работу в текстовом режиме командной строки. Существует крайне мало средств, позволяющих произвести анализ конфигурации и отобразить в удобном для восприятия виде внутреннюю логическую структуру сетевого устройства.

Для эффективной работы, специалисту необходимо получить точную структуру сети, ее логическую и физическую топологии. Это достигается путем анализа физических соединений устройств и их настроек. Однако не существует достаточно эффективных средств, позволяющих наглядно отобразить конфигурацию оборудования. Таким образом, все сводится к анализу текстовой конфигурации настроек и ручному построению карты сети в программах-эмуляторах. Данный способ приводит к высоким затратам времени и нерациональному расходованию рабочего времени специалистов с высоким уровнем квалификации.

Целью работы является разработка программной системы, обеспечивающей наглядное представление логической структуры сетевого оборудования, а также анализ наличия виртуальных компонентов, их конфигурации и взаимосвязи.

Маршрутизация на современном этапе. Наличие адресов отправителя и получателя является необходимым условием для корректной доставки пакетов по транспортной сети. Но для этого необходимо определить правила использования адресной информации с целью выбора оптимального маршрута передачи дейтаграмм. Решение вопроса маршрутизации трафика является ключевым, поскольку основными функциями транспортного уровня ВС являются обработка трафика, собранного на уровне сетевой доступности, и его распределение по сети NGN. NGN это мультисервисные сети связи, ядром которых являются опорные IP-сети, поддерживающие полную или частичную интеграцию услуг передачи речи, данных и мультимедиа [1].

При разработке принципов маршрутизации трафика в транспортных сетях NGN во всей полноте проявился принцип демократичности. Большая часть алгоритмов, протоколов и принципов маршрутизации трафика пришла из технологии Интернета, что и определило многообразие решений в этой области. Системами маршрутизации формируются адресные поля (таблицы), которые указывают направление маршрутизации.

При передаче пакетов через сети от источника к пункту назначения маршрутизатор использует таблицы, которые содержат сведения о сетях, подключенных локально, и интерфейсах, через которые осуществляется подключение. Каждый из интерфейсов подключен к разным IP-сегментам сети.

Маршрутизатор принимает решение о маршрутизации на основе информации, хранящейся в таблице маршрутизации. В таблицах маршрутизации также содержатся сведения о маршрутах или путях, по которым маршрутизатор связывается с удаленными сетями, не подключенными локально.

Эти маршруты могут назначаться администратором статически или выделяться маршрутизатору динамически, посредством другого маршрутизатора или программного протокола маршрутизации [2].

Каждый маршрутизатор принимает решения о направлении пересылки пакетов на основании таблицы маршрутизации. Таблица маршрутизации содержит набор правил. Каждое правило в наборе описывает шлюз или интерфейс, используемый маршрутизатором для доступа к определенной сети.

Чтобы переслать пакет получателю, маршрутизатор извлекает IP-адрес получателя из пакета и находит соответствующее правило в таблице маршрутизации. Затем производится поиск соответствующего получателя в таблице маршрутизации. Значения получателей в таблице маршрутизации соответ-

ствуют адресам сетей получателей. Следует обратить внимание, что IP-адрес получателя в пакете состоит из двух частей – адреса подсети и адреса узла. Чтобы определить наличие маршрута к IP-адресу получателя в таблице, маршрутизатор должен найти соответствие между IP-адресом сети и одним из значений в таблице маршрутизации. Для этого маршрутизатор должен определить, какие биты IP-адреса относятся к адресу подсети, а какие – к адресу узла.

Маршрутизатор просматривает значения маски подсети в каждом из потенциальных маршрутов в таблице. Маршрутизатор применяет каждую из масок подсети к IP-адресу получателя в пакете и сравнивает полученный адрес сети с адресами отдельных маршрутов в таблице. При обнаружении совпадающего адреса пакет пересылается на соответствующий интерфейс или к соответствующему шлюзу. Если адрес сети соответствует нескольким маршрутам в таблице маршрутизации, маршрутизатор использует маршрут с наиболее точным или наиболее длинным совпадающим фрагментом адреса сети.

Иногда для одной сети адресата существует несколько маршрутов с равной стоимостью: маршрут, используемый маршрутизатором, выбирается на основе правил протокола маршрутизации. При отсутствии совпадающих маршрутов маршрутизатор направляет сообщение на шлюз, указанный в маршруте по умолчанию, если он настроен. В других случаях пакет просто игнорируется.

В маршрутизаторах Cisco содержится таблицы маршрутизации можно просмотреть по команде IOS `show ip route`. В таблицах маршрутизации отсутствует сквозная информация обо всем пути от исходной сети к сети назначения. В этой таблице содержатся только данные о следующем переходе по этому пути. Следующим переходом обычно является непосредственно подключенная сеть, сведения о которой находятся в таблице маршрутизации [3]. При использовании статического маршрута следующий переход может быть любым IP-адресом, если он доступен для этого маршрутизатора. В итоге сообщение передается на маршрутизатор, непосредственно подключенный к узлу-адресату, после чего сообщение считается доставленным. Информация о маршрутизации между всеми промежуточными маршрутизаторами по этому пути представляется в виде сетевых адресов, а не определенных узлов. Только для последнего маршрутизатора адрес назначения в таблице маршрутизации указывает не на сеть, а на определенный узел.

Использование виртуализации в маршрутизации данных. Последовательная виртуализация сетей (некоторые производители ведут речь о «полной виртуализации сетей» – Total Network Virtualization) может помочь предприятиям сократить инвестиционные и эксплуатационные расходы [4].

Понятие «виртуализация» обозначает отделение приложений от используемого аппаратного обеспечения. В случае виртуализации сетей соответствующие службы отделяются от сетевой инфраструктуры. В локальной сети виртуализация реализуется с помощью интеллектуальных управляемых коммутаторов, функциональность которых позволяет создавать так называемые виртуальные локальные сети (Virtual Local Area Network, VLAN). В области беспроводных локальных сетей тоже имеются возможности для виртуализации, известные как Multi-Service-WLAN или Multi-SSID [4]. При последовательной виртуализации сетей и применении подходящего аппаратного обеспечения виртуализация может распространяться и на глобальную сеть, то есть охватывать маршрутизаторы, подключенные к Интернету. Технология расширенной маршрутизации и продвижения (Virtual Routing and Forwarding, VRF). С ее помощью на базе одного маршрутизатора можно создать до 64 логических (виртуальных машин).

Причины для выбора в пользу виртуализации могут быть самыми разнообразными. Если в случае с серверами основное значение придается их централизованному обслуживанию, то виртуализированные сети открывают совершенно новые возможности, недоступные в обычных сетях. Обе области объединяет одно: виртуализация позволяет предприятиям экономить дорогостоящие ресурсы, что в долгосрочной перспективе благоприятно сказывается как на инвестициях в новое оборудование, так и на текущих эксплуатационных расходах.

Главная выгода от виртуализации сетей заключается в возможности многократного использования сетевой инфраструктуры. Иными словами, на основе физической сети создается несколько логических сетей, которые используют общую аппаратную инфраструктуру, но в остальном они полностью изолированы. Такое многократное использование может касаться отдельных служб (в качестве примера часто приводится возможность предоставления клиентам гостевого доступа в корпоративную беспроводную сеть) или эксплуатации одной и той же сети несколькими компаниями – к примеру, в офисном центре.

Таким образом, благодаря виртуализации, одной физической сети, состоящей из коммутаторов, проводов, точек доступа и маршрутизаторов, оказывается достаточно для нескольких логических сетей. Потенциал экономии за счет сокращения количества оборудования огромен, значительно снижаются и текущие затраты – к примеру, на оплату электроэнергии.

Виртуализация сетей реализуется с применением двух различных методов. В случае виртуальных локальных сетей и Multi-SSID виртуализация затрагивает среду передачи, которая преобразуется в «совместно используемую среду» (Shared Medium). Точка доступа с несколькими SSID, к примеру, просто создает несколько параллельно функционирующих изолированных ячеек. Иначе говоря, виртуальные локальные сети и технология Multi-SSID реализуются на физическом уровне, втором уровне модели OSI. Такой вид виртуализации ограничивается кабельной или беспроводной локальной сетью предприятия.

Однако взаимодействие на базе IP все чаще выходит за пределы одной организации, а значит, и ее локальной сети, и постепенно перемещается в глобальную сеть. Кроме того, оно все в большей степени ориентируется на задачи, стоящие перед сотрудниками и другими участниками коммуникационного процесса. Самый простой пример выхода за пределы локальной сети – гостевой доступ к сети из помещений ее владельца. В сложных сценариях внешние поставщики услуг получают через Интернет доступ к определенным приложениям в локальной сети, и тогда одной лишь статичной виртуализации, реализуемой в сетях VLAN и Multi-SSID на втором уровне, оказывается недостаточно.

Таким образом, следующий шаг в развитии виртуализации сетей – динамическая виртуализация на третьем уровне, то есть отделение приложения от физических сред передачи: создание сетей IP и организация маршрутизации пакетов данных между этими сетями IP. При этом, как и в случае виртуализации серверов, используется аппаратное устройство – маршрутизатор, позволяющий создать множество виртуальных маршрутизаторов. Каждое виртуальное устройство может настраиваться только для своей сети.

Более высокий уровень виртуализации позволяет параллельно реализовать в имеющейся инфраструктуре разные приложения с собственными настройками для маршрутизации и правами доступа. Такие сложные сценарии виртуализации возможны благодаря ранее упомянутому механизму VRF.

Ключевая особенность этой технологии – возможность создавать для каждого приложения собственную сеть IP и делать это при помощи центрального физического маршрутизатора. Базовые параметры, такие как брандмауэр или сервер DHCP, можно настраивать отдельно для любой сети. Однако особую важность приобретает возможность соотнесения записей в таблице маршрутизации с соответствующей сетью IP с использованием специального тега. В результате на одном физическом устройстве создается множество виртуальных маршрутизаторов, и для каждого задаются настройки в соответствии с требованиями конкретной сети IP. Теги для распознавания пакетов присваиваются на основе различных критериев.

При организации гостевого доступа к беспроводной сети проводится аутентификация, на основании которой посетителям предоставляются ограниченные права (к примеру, доступ только в Интернет или к сетевому принтеру). Помимо сотрудников предприятия в виртуальную сеть могут допускаться и внешние участники коммуникативного процесса. Например, если поставщику услуг предоставляется доступ VPN для контроля над системой отопления, то этот доступ можно целенаправленно соотнести с отдельной сетью IP.

Для достижения такой формы виртуализации маршрутизаторы должны поддерживать технологию VRF и соотнесение сетей IP с интерфейсами локальной или глобальной сети, что более точно задается с помощью идентификаторов VLAN-ID. Для правильного обращения с тегами, позволяющими различать сети IP, все коммутаторы и точки доступа в локальной сети должны быть совместимы с технологиями VLAN или Multi-SSID [4].

Если требуется раздельная передача трафика перекрывающихся сетей IP через соединение глобальной сети, в ход идет дополнительный протокол туннелирования – Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) либо более новая версия L2TP-шифрования разработанная компанией Cisco совместно с рядом других корпораций. В результате, даже при передаче данных из локальной сети через Интернет, полностью сохраняется разделение сетей посредством VLAN или Multi-SSID. Максимальную степень защиты обеспечивает шифрование с помощью туннеля IPsec VPN.

Предприятия и различные учреждения выигрывают от последовательной виртуализации сетей. С одной стороны, они значительно сокращают затраты на аппаратное обеспечение, установку, эксплуатацию и побочные расходы, с другой – им открываются новые возможности взаимодействия с внешними партнерами (клиентами или поставщиками) и гораздо более высокий уровень безопасности.

Использование широко распространенных концепций виртуализации, таких как VPN, VLAN и Multi-SSID, в сочетании с виртуализацией сетей IP и маршрутизаторов посредством технологии VRF, а также распространение раздельной передачи на глобальную сеть при помощи PPTP можно назвать предпосылками достижения такого успеха. Современные коммуникационные компоненты включают эти функции по умолчанию, поэтому для виртуализации, нацеленной на экономию, не потребуются никаких дополнительных программных решений.

Мониторинг расхода ресурсов CPU маршрутизатора. На данном этапе развития сетевых технологий сетевое оборудование (маршрутизаторы и коммутаторы), особенно из разряда «интеллектуальное» (intelligent) оборудование, по сути, представляют собой серверы, аппаратно специализированные под выполнение узконаправленных задач – обработку сетевых пакетов.

Как и во всех обычных серверах, в сетевых устройствах Cisco есть центральный процессор, оперативная и постоянная память, и даже операционная система с процессами, которые эти самые процессор и память используют для своих нужд. Ресурсы центрального процессора маршрутизатора расходуются на два основных типа задач – обработку прерываний и работу процессов.

Прерывания происходят всякий раз, когда пакет выходит с консольного или AUX порта. Высокая загрузка процессора, связанная с обработкой прерываний, обычно означает, что через устройство прохо-

дит большой трафик. В нормальных условиях при полном использовании пропускной способности маршрутизатора, эта загрузка не превышает 30-40%. Однако, если допустить бесконтрольный рост сети (соответственно и увеличение объемов трафика проходящего через оборудование), то рано или поздно, через устройства начнет идти такой объем трафика, что загрузка процессоров по прерываниям превысит допустимые нормы.

Процессы, помимо простого перенаправления пакетов с порта на порт в зависимости от таблицы маршрутизации/коммутации, занимаются и более интеллектуальными задачами (OSPF, SNMP, NBAR, STP и т.д.). Ошибки, допущенные при конфигурировании оборудования, могут привести к чрезмерной загрузке процессора, связанной с обработкой процессов. Не стоит, к примеру, настраивать на маршрутизаторе 200 туннелей и включать на каждом NBAR (или иные требовательные к ресурсам протоколы маршрутизации), или задавать интервал опроса устройства средствами мониторинга меньше, чем 5 минут.

Алгоритм работы созданного программного продукта выглядит следующим образом. При запуске программа получает данные из сетевого устройства, используя введенную информацию (IP-адрес и пароли доступа). Затем происходит разбор полученной от роутера информации и преобразование ее в структуру данных удобную для дальнейшей обработки. На основании результатов разбора строится графическая модель представления конфигурации. Аналогичные операции выполняются при построении графиков загрузки. Исключением является лишь то, что для обеспечения интерактивности графиков запрос данных происходит автоматически по истечении определенного периода времени. В случае если при выводе графиков будет утеряно подключение к маршрутизатору, то будет возвращено сообщение об ошибке.

Работа приложения основана на взаимодействии с удаленным сетевым устройством посредством протокола telnet. Используя удаленное подключение, программа, получает необходимые данные для дальнейшей работы (разборки конфигурации, мониторинге загрузки CPU). После запуска приложения пользователь видит окно, представленное на рис. 1.

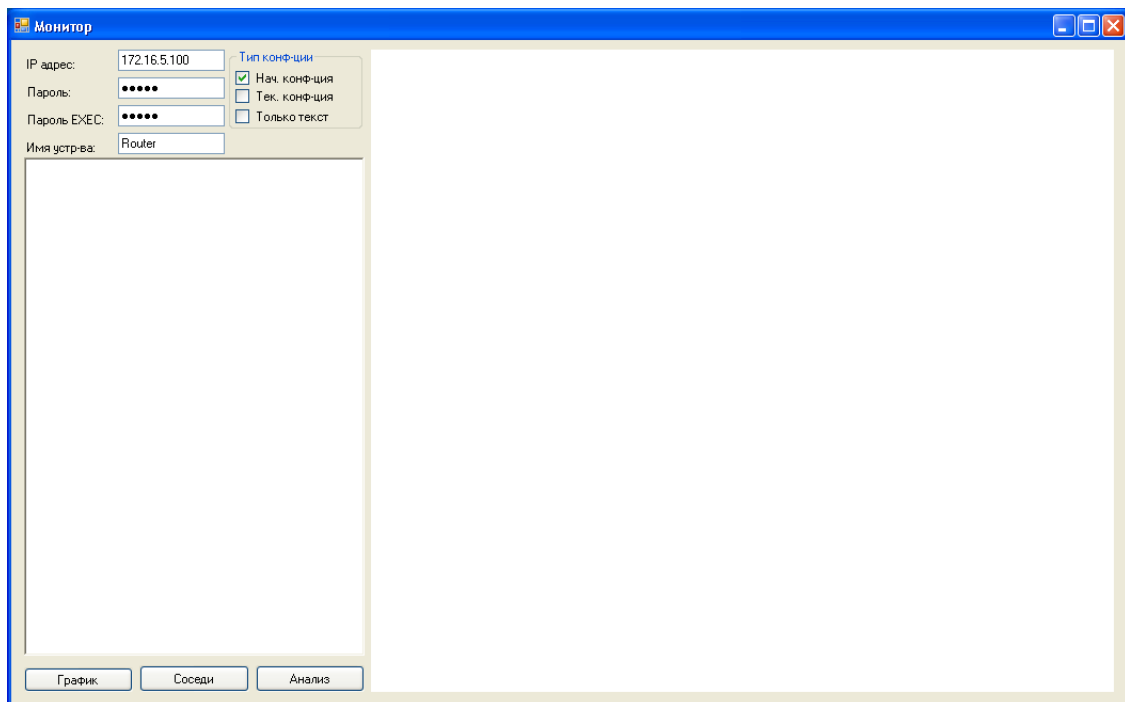


Рис. 1. Интерфейс приложения

Элементы интерфейса имеют следующее назначение:

- 1) Поля ввода служат для настроек программы (IP-адрес сетевого устройства, пароль доступа, пароль EXEC-режима, имя устройства).
- 2) При нажатии на кнопку «Анализ» происходит подключение к роутеру и производится анализ его конфигурации с дальнейшим графическим выводом результата (рис.2).
- 3) На данной схеме все «реальные», т.е. физические компоненты подкрашены зеленым цветом, а виртуальные, такие как подынтерфейсы, ACL-списки, VRF-таблицы и другие программные компоненты – синим.

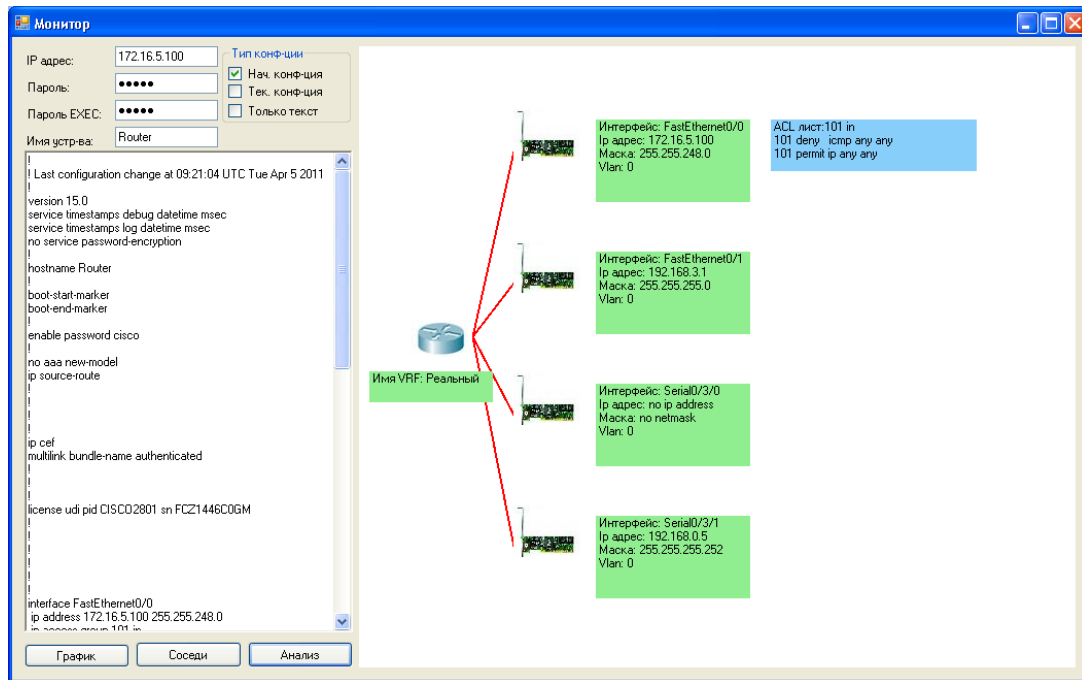


Рис. 2. Вывод результата анализа

4) Флаг «Только текст», определяет, откуда будет получена информация для анализа. Непосредственно из маршрутизатора, либо из текстового поля (необходимо на тот случай, если нет сетевого подключения к маршрутизатору, а конфигурация была заранее сохранена).

5) Флажки выбора вида конфигурации определяют, какого рода конфигурация будет получена и проанализирована. «Нач. конфигурация» – конфигурация, которая была задана роутеру при загрузке (стартовая конфигурация). «Тек. конфигурация» – конфигурация, полученная в результате изменений после загрузки роутера (иногда изменения не вносят в начальную конфигурацию).

6) «График» – производит вывод на экран графиков загрузки CPU маршрутизатора, при этом интерфейс программы несколько изменяется (рис. 3). Скролл-бар служит для установления частоты опроса системы (следует помнить, что слишком частый опрос системы повышает нагрузку маршрутизатора).

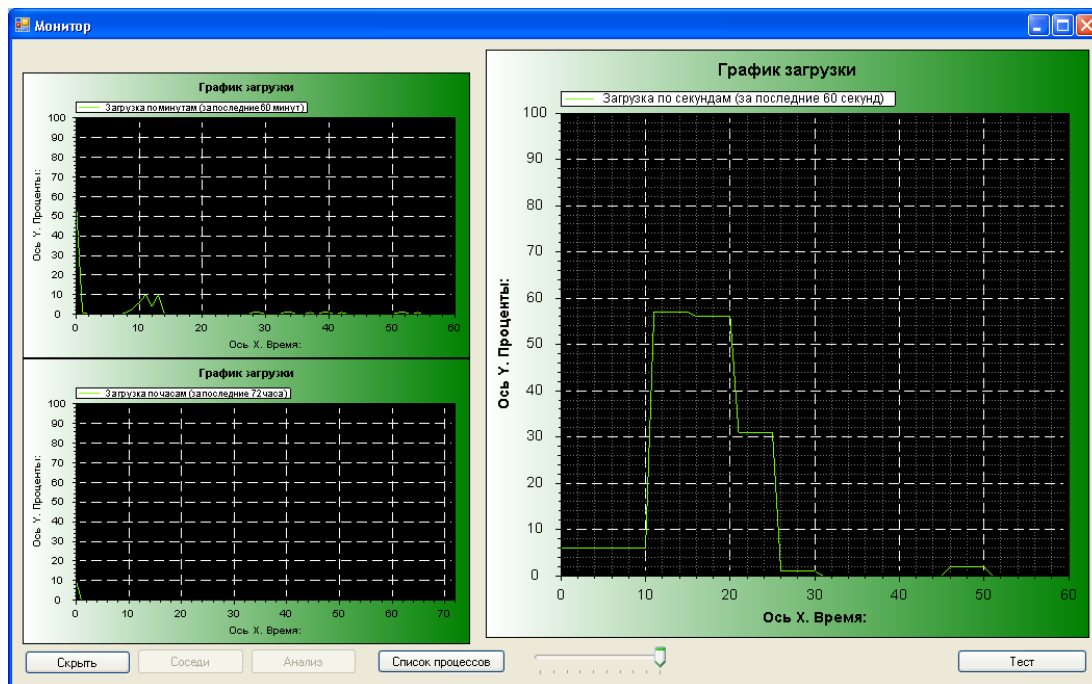


Рис. 3. Режим отображения графиков

7) Кнопка «Список процессов» служит для более подробного вывода информации по процессам запущенным на роутере (рис. 4).

8) Кнопка «Тест» служит для того, чтобы протестировать маршрутизатор, используя высокую интенсивность обращений к нему. Таким образом, возможно повысить уровень загрузки CPU более чем наполовину.

9) «Скрыть график» – производит обратные изменения в интерфейсе и возвращает программу на исходное положение (до нажатия кнопки «График»).

10) «Соседи» – возвращает информацию, полученную по протоколу CDP (фирменный протокол Cisco), о непосредственно подключенных устройствах.

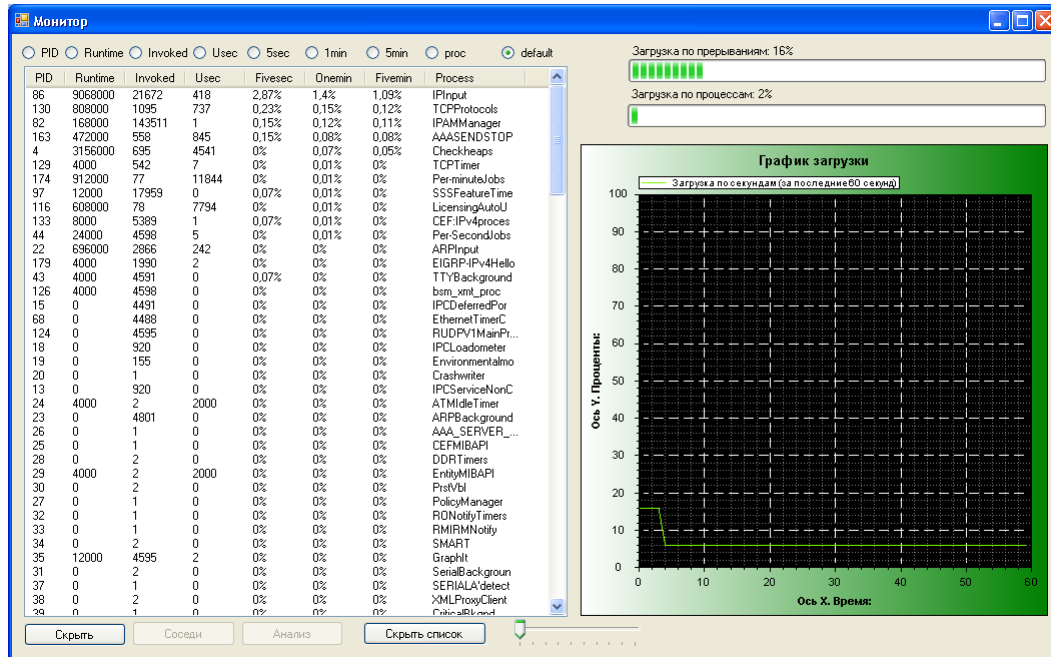


Рис. 4. Режим отображения процессов

При разработке интерфейса программы, по возможности воздерживались от создания большого количества управляющих элементов на форме (кнопок, полей ввода и флагов), а также от создания много-оконного приложения. Это позволило упростить интерфейс и сделать его доступным в обращении.

Сравнение с Cisco SDM Express по представлению информации о конфигурации. SDM Express как инструмент базовой настройки маршрутизаторов предоставляет и базовую информацию по конфигурации. Информация по сетевым интерфейсам достаточно подробна, интерфейс легкий в использовании. Однако несмотря на данные преимущества, существует некоторое количество недостатков: 1) общая конфигурация есть только в текстовом виде; 2) нет информации по виртуальным структурам; 3) нет информации по начальной конфигурации (SDM Express работает только с текущими настройками); 4) излишнее количество окон не участвующих в работе.

При анализе конфигурации с помощью программы будет возвращено краткое графическое описание текущих (или стартовых) настроек, которое включает в себя: 1) настройки таблиц VRF; 2) конфигурации сетевых интерфейсов; 3) конфигурации ACL списков доступа. Другие виды структур (такие как VPN-тоннели, фаерволы, таблицы маршрутизации, политики QoS и др.), не были реализованы по причинам их однотипности с уже созданными блоками программы, а также слишком большого объема этой задачи (с точки зрения количества программного кода).

На рис. 5 изображена часть интерфейса SDM Express, отвечающая за конфигурирование настроек сетевых интерфейсов.

Как видно на рис. 5, предоставляется информация о статусе интерфейсов, типе, настройках адреса, NAT-преобразованиях, ACL-списках доступа, и политиках QoS. Однако нет отображения VRF таблиц и принадлежности этих интерфейсов, к какой либо из них. Возможный вариант более удобного отображения был реализован нами и выглядит следующим образом (рис. 6).

На рис. 6 хорошо видно, что на данном роутере существует одна VRF-таблица с именем «testVRF», в которой определены два интерфейса: реальный – FastEthernet 0/1 и виртуальный – Loopback1. Можно увидеть, что все компоненты, которые присутствуют в аппаратном исполнении, подкрашены зеленым цветом, соответственно виртуальные (подинтерфейсы, ACL-списки, VRF) – синим. Данная схема строится на основании анализа конфигурации.

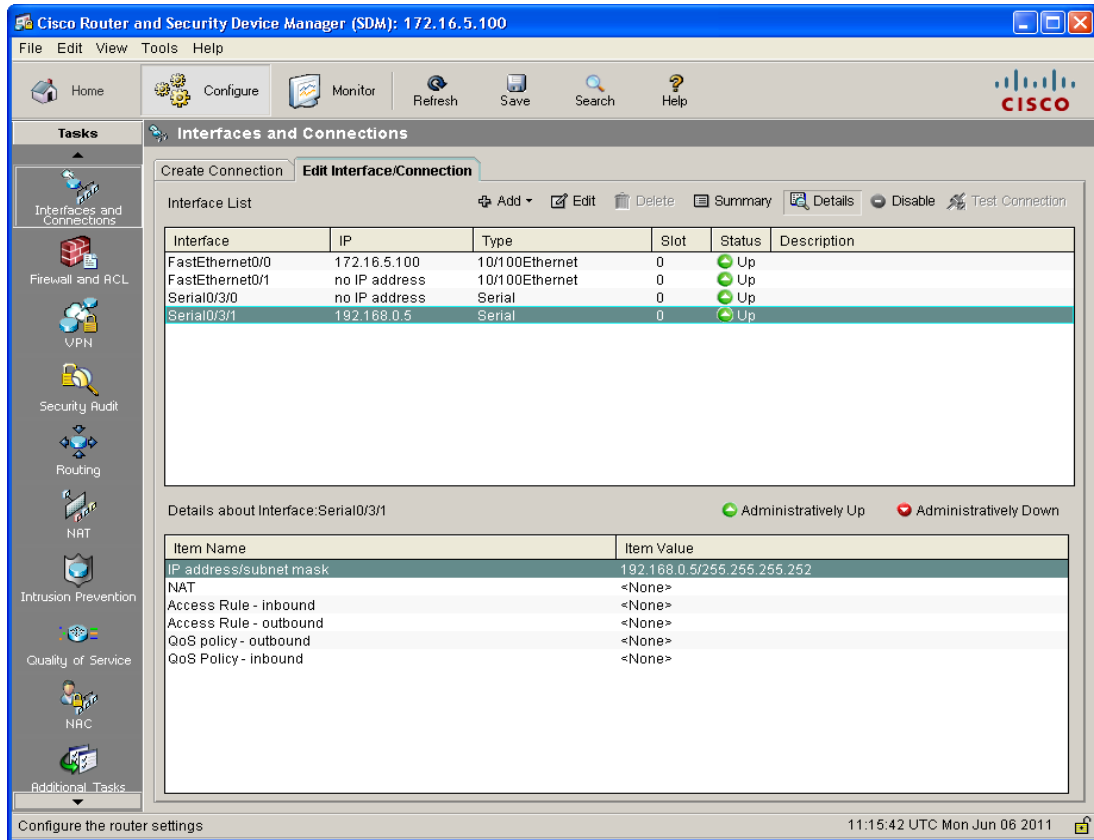


Рис. 5. Окно настройки сетевых интерфейсов в SDM Express.

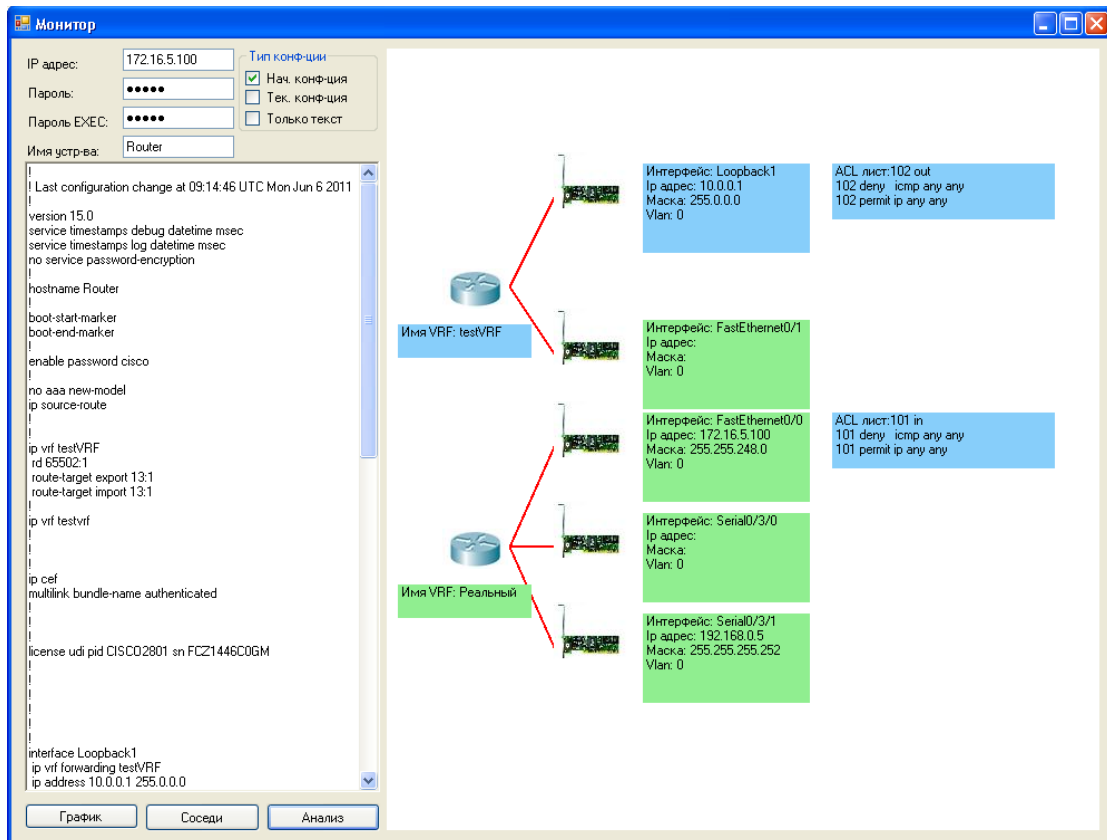


Рис. 6. Графическое отображение настроек

Таким образом, программа предоставляет структуру компонентов настроенных на роутере и дает возможность быстро проанализировать их настройки и взаимодействие. Данная концепция является первым шагом к созданию визуального моделирования структуры роутера. Что позволит свести настройку маршрутизаторов и другого сетевого оборудования к простой компоновке визуальных компонентов, вследствие которой будут сгенерированы настройки сетевого оборудования.

Приложение способно предоставить информацию о потреблении ресурсов различными виртуальными компонентами сетевого оборудования. Это становится все более необходимым при текущих уровнях виртуализации, когда уже не представляется возможным оперировать понятиями линии передачи данных. Каждый физический канал делится на несколько виртуальных, каждый маршрутизатор становится несколькими независимыми устройствами. Поэтому нужны эффективные средства по демонстрации текущих настроек и мониторингу.

Выводы. Были исследованы технологии виртуализации сетевого оборудования и рассмотрены основные возможности их применения. Разработано приложение, позволяющее дополнить стандартные программные средства Cisco SDM, в частности, касающиеся вопросов визуального представления соответствия виртуальных компонентов реальным, а также расширенного мониторинга загрузки CPU маршрутизатора. Данная программа должна обеспечить возможность системному администратору получать информацию не только об общем расходе аппаратных ресурсов сетевого оборудования, а и о некоторых его изолированных виртуальных подсистемах (например, VRF таблицах). Программа достаточно подробно отображает существующие структуры на сетевом оборудовании (ACL-списки, виртуальные подынтерфейсы и VRF таблицы).

Практическая ценность предложенных алгоритмов заключается в следующем: 1) нет необходимости во внесении дополнительных настроек в конфигурацию маршрутизатора; 2) при опросе устройства потребляется минимум ресурсов; 3) существует возможность изменения частоты опроса с заданием необходимого уровня интерактивности при отображении графиков; 4) возможен анализ структуры устройств, к которым нет подключения.

При желании блок анализа конфигурации в приложении может быть расширен до необходимого уровня, что позволит использовать программный комплекс в крупных корпоративных сетях или сетях интернет-провайдеров.

Список использованных источников

1. Леммл Т. Cisco Certified Network Associate Учебное руководство / Т. Леммл. СПб.: Лори, 2002 – 576 с.
2. Амато В. Основы организации сетей Cisco / В. Амато. – М.: Вильямс, 2004. – 512 с.
3. Хабракен Д. Как работать с маршрутизаторами Cisco / Д. Хабракен. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 320 с.
4. Боллапрагада В., Мерфи К., Уайт Р. Структура операционной системы Cisco IOS / В. Боллапрагада, К. Мерфи, Р. Уайт. – М.: Вильямс, 2006. – 735с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Перевсрзевим А.В.

УДК 681.518.54

Л.І. Мещеряков, д-р техн. наук, Н.П. Уланова, Л.В. Карманова, А.Л. Ширін канд-ти техн. Наук (Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)

СТАТИСТИЧНІ МОМЕНТНІ ЗВ'ЯЗКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ РОЗПІЗНАВАННЯ

Анотація. Показана необхідність аналізу існуючих методів представлення сигналів технологічного та технічного контролю роботи гірничих електромеханічних комплексів та формування методів розширення інформаційного забезпечення систем автоматизованого керування. Обґрунтовано множинне представлення вхідних, вихідних змінних і змінних стану здійснювати через випадкові величини та випадкові функції. Сформована схема та аналітичне представлення розподілу параметрів гірничих електромеханічних комплексів та їх щільності імовірності в системах розпізнавання.

Ключові слова: розпізнавання, сигнали, ідентифікація, умовна ймовірність.

Аннотація. Показана необхідність аналізу існуючих методів представлення сигналів технологічного і технічного контролю роботи гірних електромеханічних комплексів і формування методів розширення інформаційного забезпечення систем автоматизованого управління. Обосновано множественне представлення входних, вихідних змінних і змінних станів виконувати через випадкові величини і випадкові функції. Сформована схема і аналітичне представлення розподілення параметрів гірних електромеханічних комплексів і їх щільностей в системах розпізнавання.

Ключевые слова: розпізнавання, сигнали, ідентифікація, умовна ймовірність.

Abstract. A necessity is shown of analysis of existing methods of presentation of signals of technological and technical control of work of mountain electromechanics complexes and forming of methods of expansion of the informative providing of the systems of the automated management. The plural presentation is grounded of entrance, output variables and state variables to execute through the accidental sizes and accidental functions. A chart is formed and analytical presentation distributing of parameters of mountain electromechanics complexes and their closenesses of probability in the systems of recognition.

Keywords: recognition, signals, authentication, conditional probability.

Вступ. На гірничих підприємствах в системах автоматизації для ідентифікації та керування робочих процесів через поточні значення технічних та технологічних параметрів використовуються двовірні інформаційні сигнали по входу та виходу об'єктів, що контролюються в технологічних лініях. В основному ці об'єкти являються по суті гірничими електромеханічними комплексами (ГЕМК). При цьому в процесі промислової експлуатації, внаслідок постійного зносу конструктивних елементів, які їх складають, змінюється оперативний технічний стан останніх, що зумовлює стохастичні нелінійні зміни також і параметрів технологічних процесів. З метою підвищення точності визначення оперативних значень основних виробничих характеристик існуючих технічних та технологічних параметрів необхідно виявлення інформаційно чутливих ознак змін, що відбуваються в процесі експлуатації ГЕМК. Це може бути досягнуто за рахунок розширення інформаційного забезпечення систем автоматизованого розпізнавання та керування, що підвищить достовірність процесів ідентифікації і відповідно якість процесів керування об'єктів гірничого виробництва, які через складні умови промислової експлуатації в найбільшій мірі зазнають неврахованих впливів [1, 3].

Постановка задачі. Аналіз існуючих методів представлення сигналів технологічного та технічного контролю роботи гірничих електромеханічних комплексів та формування методів розширення інформаційного забезпечення систем автоматизованого керування.

Основний зміст роботи. Задачі структурної та параметричної діагностичної ідентифікації інформаційних характеристик технологічних процесів і гірничих електромеханічних комплексів ґрунтуються на результатах множинних вимірів вхідних і вихідних сигналів які супроводять їх роботу. З огляду на діагностичні цілі, раніше використовувана множина параметрів входу та виходу, які вказувалося вище, має потребу в доповненні параметрами сигналів поточного стану ГЕМК. При цьому використовуваний набір факторів – вхідний вплив, стан і вихідний вплив може характеризуватися якісно та кількісно. Відповідно до цього якісна характеристика забезпечується ймовірнісним описом функціонально зв'язаної множини випадкових подій, а кількісна характеристика – таким же описом випадкових величин миттєвих значень інформаційних сигналів (температурних, вібраційних, енергетичних, акустичних та ін.). Насамперед треба визначити, що при якісному описі ГЕМК базовою характеристикою в множинних позначеннях служить умовна ймовірність стану $B_{\beta,j,\dots,r}$ відносно стану $A_{\alpha,j,\dots,k}$ відповідно формулі Бейеса. Тому, якщо ідентифікується інтегрований рівень тертя в породі та породоруйнівному інструменті або в опорних вузлах ГЕМК, то у ролі станів $A_{\alpha,j,\dots,k}$ з ймовірностями $P(A_{\alpha,j,\dots,k})$ виступає множина причин зміни інтегрованого рівня тертя від рівня штатного до аварійного значення. А як сукупність інформаційного відображення станів $B_{\beta,j,\dots,r}$ з умовними ймовірностями $P(B_{\beta,j,\dots,r} | A_{\alpha,j,\dots,k})$ виступають оцінки різних способів (каналів) одержання інформації про поточний технічний та технологічний стан ГЕМК. Одним з таких способів відповідно являється широко використовуваний на гірничому виробництві вибірковий термометричний інформаційні сигнали $B_{n+1} \dots B_m$, наприклад рис. 1, де відображено аварійне тертя (скафінг) по термометрі №2 в основних підшипниках ковзання барабану млина типу ММС 90*30. В даному випадку контрольована температура перевищила максимально допустиму (56°C) по цьому конструктивному елементу і відповідно система термометричної ідентифікації аварії зупинила барабанний млин. Термометричний метод ідентифікації показав себе як один з найбільш надійних на виробництві, і тому має дуже широке застосування. Але в силу своєї фізичної природи це дуже інерційний засіб, що у важко навантажених ГЕМК досить час-

то захищає від аварій з недопустимим запізненням, як і в представленому на рис. 1 випадку. Тут в подальшому необхідно було демонтувати опору та усувати наслідки аварії. Іншими способами є використання вибірко-вих вібраційних інформаційних сигналів $B_1 \dots B_n$ (рис. 2) та енергетичних інформаційних сигналів $B_{m+1} \dots B_k$ (рис. 3), що пропонуються як базові інформаційні джерела для вирішення задач ідентифікації ГЕМК [2].

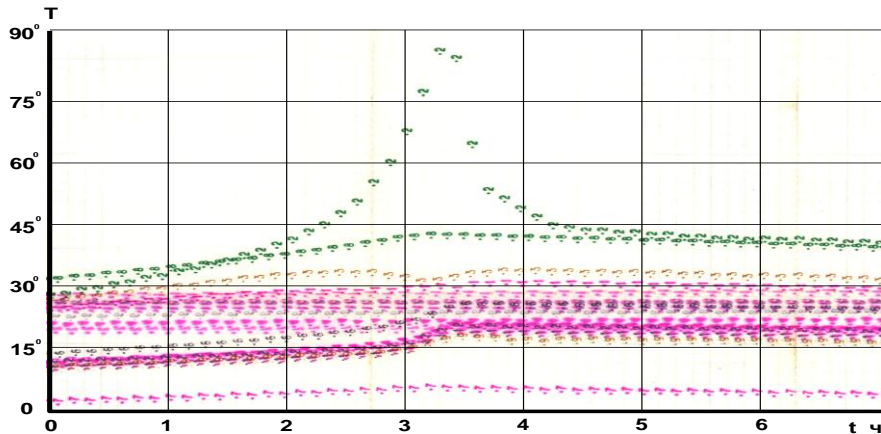


Рис. 1. Термометричні інформаційні сигнали $B_{n+1} \dots B_m$ з термопар в основних підшипниках ковзання барабану млина типу ММС 90*30 в аварійному стані скафінгу

Поява станів $B_{\beta, j, \dots, r}$ на виході вимірювальної автоматизованої системи керування (АСК) технологічними процесами (ТП) у вигляді вектора вимірів вибірки величин ймовірно визначається сукупністю входних станів $A_{\alpha, j, \dots, k}$, що складають за формулою повної ймовірності групи несумісних технологічних або технічних станів по множині причин зміни опору в породоруйнівному інструменті, або іншому робочому органі. Ці причини оперативної зміни тертя в робочих режимах до аварійного значення у найбільш типових ТП і ГЕМК можна ідентифікувати через зворотні умовні ймовірності по входу системи за допомогою апостеріорних ймовірностей повної групи подій $A_{\alpha, j, \dots, k}$ за виразом:

$$P(B_{\beta, j, \dots, r}) = \sum_{v=1}^h \dots \sum_{\alpha=1}^k P(B_{\beta, j, \dots, r} | C_{v, j, \dots, h}) P(C_{v, j, \dots, h} | A_{\alpha, j, \dots, k}) P(A_{\alpha, j, \dots, k}). \quad (1)$$

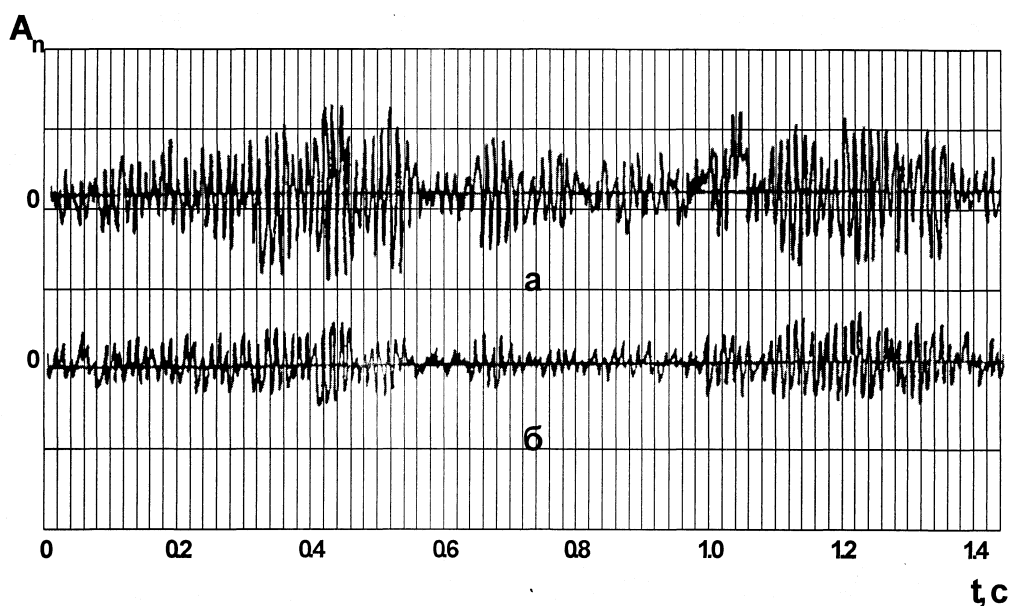


Рис. 2. Стандартні сигнали вібрацій в опорах барабану млина типу ММС 70*23, що зняті синхронно відповідно по горизонтальній осі (а) та по вертикальній осі (б) в штатному робочому режимі

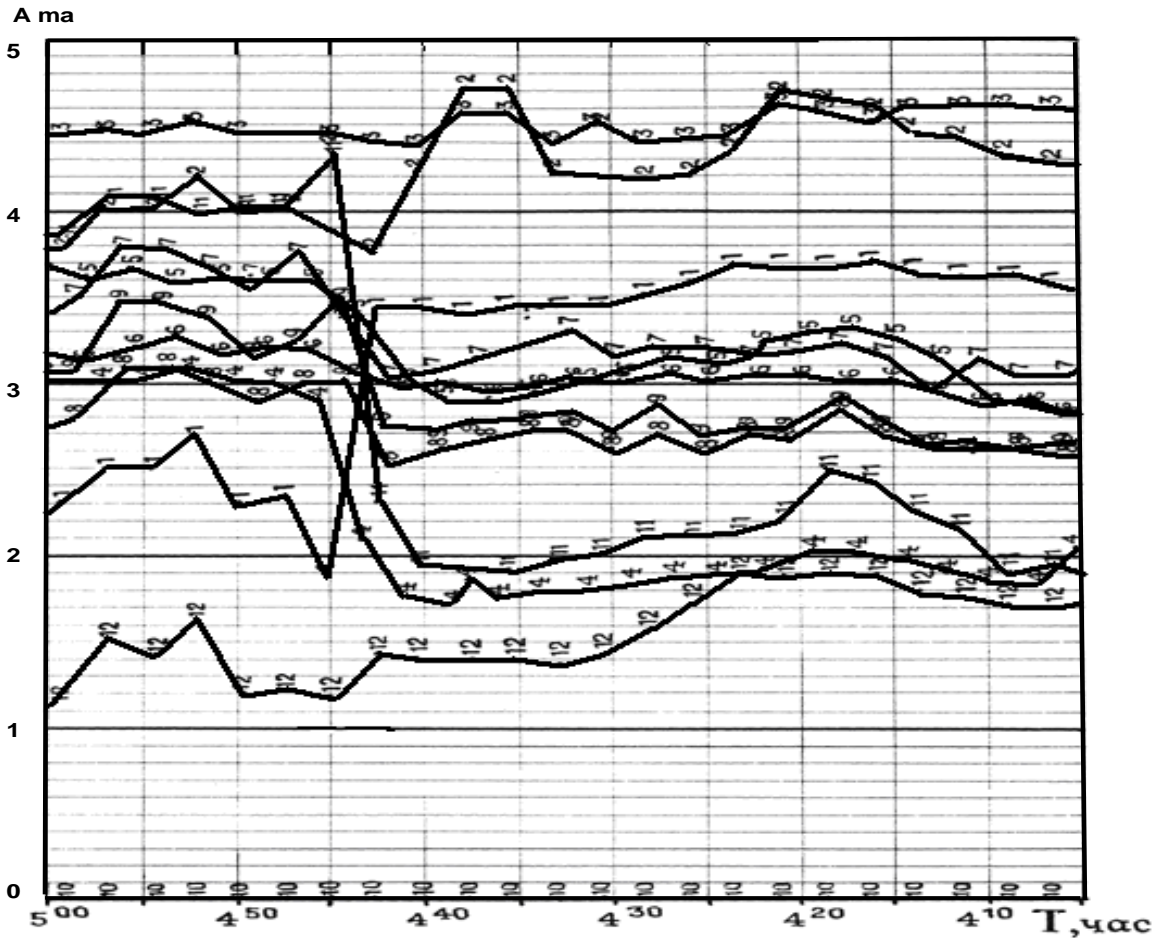


Рис. 3. Оцилограма зміни енергетичних сигналів, амплітуд частотних діагностичних параметрів потужності, що споживається приводним двигуном типу СДМ 32-24-59-80 барабанного млина ММС 90*30А в аварійному режимі по скафіngu:
 1 – 0.185 Гц, 2 – 0.55 Гц, 3 – 1.0 Гц, 4 – 1.8 Гц, 5 – 2.6 Гц, 6 – 3.4 Гц, 7 – 4.15 Гц, 8 – 5.8 Гц,
 9 – 7.7 Гц, 10 – 0.0, 11 – 0.21 Гц, 12 – 0.05 Гц

З використанням множини параметрів “стану”, для концептуального визначення технологічного і технічного відображення ТП та ГЕМК при вирішенні задач процесів керування АСК ТП, у якісному представленні відповідна вихідна подія $B_{\beta,j,\dots,r}$ визначається вхідним станом $A_{\alpha,j,\dots,k}$ та подійним станом $C_{v,j,\dots,h}$ у цей же момент часу. Внаслідок цього апостеріорні умовні ймовірності вхідних станів $A_{\alpha,j,\dots,k}$ з урахуванням стану системи $C_{v,j,\dots,h}$, можуть бути відображені тоді як

$$P(A_{\alpha,j,\dots,k} | B_{\beta,j,\dots,r}) = \frac{\sum_{v=1}^h \dots \sum_{\alpha=1}^k P(B_{\beta,j,\dots,r} | C_{v,j,\dots,h}) P(C_{v,j,\dots,h} | A_{\alpha,j,\dots,k}) P(A_{\alpha,j,\dots,k})}{\sum_{\beta=1}^r \dots \sum_{v=1}^h \dots \sum_{\alpha=1}^k P(B_{\beta,j,\dots,r} | C_{v,j,\dots,h}) P(C_{v,j,\dots,h} | A_{\alpha,j,\dots,k}) P(A_{\alpha,j,\dots,k})} \quad (2)$$

Додатковими прикладами випадкових станів $A_{\alpha,j,\dots,k}$, що прикладаються на входи ідентифікованих ТП та ГЕМК, являється перебування в заданих межах значень: осевих навантажень H і обертів ω породуруйнівних інструментів в бурових комплексах; температур T в підшипникових опорах, статорах та роторах електродвигунів; витрат Q та тиску P промивальної рідини у бурових комплексах і т.д. Стани типу $B_{\beta,j,\dots,r}$ на виході ГЕМК визначаються як реакції на виникаючі стани $A_{\alpha,j,\dots,k}$, і можуть бути представлені як задані рівні технологічних і технічних параметрів ГЕМК, як якісні та кількісні показники вихідних

параметрів для бурових комплексів механічної швидкості буріння V , проходки на коронку X , витрат промивальної рідини та ін.

Кількісне, не множинне представлення вхідних, вихідних змінних і змінних стану здійснюється через випадкові величини або випадкові функції. Для одномірної моделі при розгляді її одночасно, стохастично по каналу вхід (U) – вихід (Y), з відповідним утворенням системи двох випадкових величин повною характеристикою являється ймовірнісна модель у вигляді умовної щільності ймовірності $f(y | u)$ [3, 4, 5]

$$f(y_t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y_t | u_s) f(u_s) du_s \cdot \quad (3)$$

Вираз (1) дає можливість достовірного визначення повної характеристики вихідної змінної $f(y)$ за відомою характеристикою вхідної змінної $f(u)$ об'єкту.

Ймовірнісні моделі ТП та ГЕМК (Ω, P) вважаються знайдені, якщо визначено простір елементарних станів $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_k\}$ і кожному ω_i зі Ω знайдена ймовірність p_i . Дослідження цієї ж одномірної моделі з урахуванням оперативного стану показало, що наступний стан $f(x)$ визначається за умовною щільністю ймовірності $f(x | u)$ і повною характеристикою вхідної змінної $f(u)$ при значенні чистого запізнювання $q = k - s$ в наступному як

$$f(x_k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_k | u_s) f(u_s) dx_k \cdot \quad (4)$$

Вихідна змінна $f(y_t)$ в момент t у цьому випадку буде визначена, по-перше, за умовною щільністю ймовірності $f(y_t | x_k)$ і відомою характеристикою попереднього стану $f(x_k)$ в момент k , і, по-друге, за відомою повною характеристикою вхідної змінної $f(u_s)$ в момент s і умовною щільністю ймовірності $f(x_k | u_s)$ за виразом

$$f(y_t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y_t | x_k) f(x_k | u_s) f(x_k) f(u_s) dx_k du_s \cdot \quad (5)$$

Відповідно на рис. 4 представлена схема загального розподілу параметрів та їх щільності ймовірності в гірничих електромеханічних комплексах.

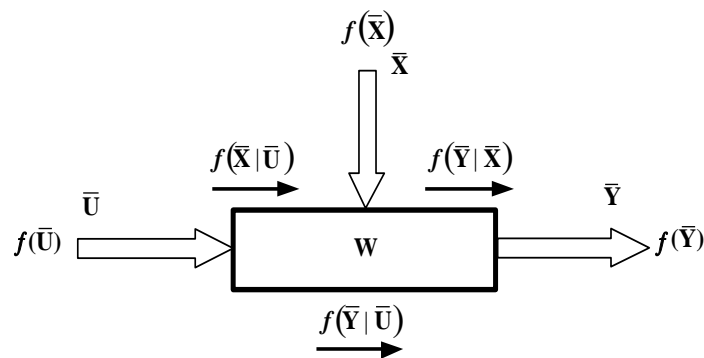


Рис. 4. Схема розподілу параметрів вхід (U), стан (X) і вихід (Y) ГЕМК і відповідних їм безумовних ($f(U)$, $f(X)$, $f(Y)$) і умовних ($f(X|U)$, $f(Y|X)$, $f(Y|U)$) щільностей ймовірності

Для випадкових сигналів виходу Y , стану X і входу U , розглянутих одночасно, з утворенням системи трьох випадкових величин, у якості їх спільної, повної характеристики приймається спільна функція розподілу ймовірностей тривимірної випадкової величини $F(y, x, u)$, що відповідно до визначення функції розподілу являється ймовірність одночасного виконання нерівностей $Y < y$, $X < x$ і $U < u$ і розглянута функціонально за аргументами y , x і u , вона забезпечується виразом

$$F(y, x, u) = P(Y < y, X < x, U < u). \quad (6)$$

Тоді щільність спільного розподілу ймовірності (тривимірна щільність імовірності) для безперервних випадкових сигналів Y , X і U буде дорівнювати

$$f_3(y, x, u) = \frac{\partial^3 F(y, x, u)}{\partial y \partial x \partial u}. \quad (7)$$

Визначення оперативних оцінок одновимірної щільності ймовірностей $f(y_t)$, $f(x_k)$ і $f(u_s)$, двовимірної щільності ймовірностей $f(y_t, x_k)$, $f(x_k, u_s)$, $f(y_t, u_s)$ та спільної тривимірної щільності ймовірності $f(y, x, u)$, а також умовних щільностей ймовірностей $f(y_t | x_k)$, $f(x_k | u_s)$, $f(y_t | u_s)$ та спільної умовної щільності ймовірності $f(y | x, u)$ виконується за допомогою експериментальних досліджень ТП і ГЕМК в реальних робочих режимах експлуатації [1, 6, 7].

Надалі за отриманими експериментальними результатами будуються відповідні двовірні та тривимірні кореляційні таблиці, за якими вже можна визначити площинні та просторові розподіли. Труднощі проведення множинних вимірів, необхідних для одержання з достатньою довірчою ймовірністю значень, що складають кореляційні таблиці, вкрай утрудняють та обмежують практичне застосування в системах ідентифікації та керування як безумовної, так і умовної щільності ймовірностей. Внаслідок цього стає перспективним виділення та застосування різних чисельних характеристик множинних реалізацій вимірюваних інформаційних сигналів різного виду. Для рішення задач ідентифікації та керування ГЕМК в АСК ТП з прогнозуванням технологічного і технічного стану гірничих комплексів у якості базових таким чином формуються відповідні умовні чисельні характеристики.

Такими умовними моментними числовими характеристиками залежностей вектора виходу від вектора входу можуть бути: $M_i(Y | u_i)$ – умовне математичне очікування двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень виходу Y від вхідної змінної u_i ; $D_i(Y | u_i)$ – умовна дисперсія двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень виходу Y від вхідної змінної u_i ; $\sigma(Y | u_i)$ – умовне середньоквадратичне відхилення двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень виходу від вхідної змінної u_i ; $E_i(Y | u_i)$ – умовний ексцес двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень виходу Y від вхідної змінної u_i ; $A_i(Y | u_i)$ – умовна асиметрія двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень виходу Y від вхідної змінної u_i ; $MM(Y | U)$ – математичне очікування умовних математичних очікувань $M_i(Y | u_i)$ двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень вектора виходу Y від вектора вхідної змінної U ; $DM(Y | U)$ – дисперсія умовних математичних очікувань $M_i(Y | u_i)$ двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень вектора виходу Y від вектора вхідної змінної U ; $\sigma M(Y | U)$ – середньоквадратичне відхилення умовних математичних очікувань $M_i(Y | u_i)$ двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень вектора виходу Y від вектора вхідної змінної U ; $EM(Y | U)$ – ексцес умовних математичних очікувань $M_i(Y | u_i)$ двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень вектора виходу Y від вектора вхідної змінної U ; $AM(Y | U)$ – асиметрія умовних математичних очікувань $M_i(Y | u_i)$ двовірної спільної щільності ймовірності $f(y, u)$ випадкових значень вектора виходу Y від вектора вхідної змінної U і так далі. Відповідно формується множина аналогічних інформаційних числових оцінок і по математичному очікуванню умовної дисперсії, дисперсії умовної дисперсії, ексцесу умовної дисперсії та асиметрії умовної дисперсії відносно вхідної змінної. Повний комплекс сформованих умовних моментних числових характеристик відображає також і залежність вектора стану від вектора входу і залежність вектора виходу від вектора стану. При цьому кожна з моментних числових характеристик має свою інформаційну вагу відображення відносно оперативних інформаційних процесів, що супроводять складні робочі процеси тяжко навантажених гірничих електромеханічних комплексів.

Висновки. Отже, реальне ускладнення технологічних процесів та конструктивно складні ГЕМК, як структурно, так і параметрично, із постійно існуючою вимогою до максимально можливої вірогідності здійсненої ідентифікації, обумовлює розгляд ГЕМК за трьома факторами-зображеннями – “вхід-стан-вихід”.

Метою технологічного процесу ідентифікації і являється рішення комплексу питань, пов'язаних з оперативним визначенням поточного стану ТП і ГЕМК, що контролюються, і характеру зміни цього стану в часі і просторі. При цьому треба підкреслити, що апіорна (логічна) та апостеріорна (вимірювана) інформації технологічних процесів, які використовуються при діагностуванні та ідентифікації, тісно пов'язані ймовірнісним описом функціонально зв'язаної множини випадкових подій.

Список літератури

1. Мещеряков Л.И. Математические основы представления стохастических состояний диагностируемых горных агрегатов / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ. – Днепропетровск, 2002. – №6. – С. 95–98.
2. Мещеряков Л.И. Разработка и результаты промышленных испытаний системы ранней диагностики затираний в подшипниковых узлах барабанных мельниц / Л.И. Мещеряков, И.К. Младецкий, О.В. Модзилевский, В.П. Попов, С.Г. Рудоманова, С.В. Семенов, В.В. Кукинов, / Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов – основа повышения качества продукции горнорудных предприятий // Материалы научно-технической конференции. – Губкин. – 1988. – С. 58–59.
3. Мещеряков Л.И. Идентификация и диагностирование технического состояния технологических агрегатов / Л.И. Мещеряков. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – №1,2. – С. 30–31.
4. Дисперсионная идентификация / Под редакцией Н.С. Райбмана. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 С.
5. Мещеряков Л.И. Моделирование динамики горных электромеханических систем для оптимизации задачи их автоматического диагностирования / Л.И. Мещеряков. // Вибрации в технике и технологиях, 2000. №4(16). С. 68–70.
6. Мещеряков Л.И. Основні задачі енергоінформаційних технологій діагностування бурових комплексів / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 2006. – №7. – С. 71–74.
7. Мещеряков Л.И. Стан і тенденції розвитку інтегрованих комп'ютерних технологій діагностування гірничих електромеханічних систем / Л.И. Мещеряков. // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 1999. №1. – С. 113–115.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Слесаревим В.В.

УДК 669.162-58

А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»)

**НАСТРОЙКА ПИД - РЕГУЛЯТОРА
ИНЕРЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНО - МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

***Анотація.** На підставі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень визначено безпошуковий метод настройки ПИД - регулятора інерційними об'єктами гірничо-металургійного комплексу з запізненням. Отримано настройки регулятора в залежності від каналу внесення обурює впливу з використанням субоптимального регулятора на мінімум інтегрального квадратичного показника якості, а також обґрунтовано рекомендації по налаштуванню безітераційної розрахункової моделі. Проаналізовано необхідні вимоги по роботі автоматичного регулятора і обґрунтований вибір єдиних налаштувань регулятора з ПИД - законом регулювання з урахуванням вимог підвищення швидкодії і показниками якості автоматичної системи регулювання.*

***Ключові слова:** ПИД - регулятор, настройка, якість регулювання, інтегральна квадратична оцінка, перехідна характеристика.*

***Аннотация.** На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований определен беспысловый метод настройки ПИД – регулятора инерционными объектами горно-металлургического комплекса с запаздыванием. Получены настройки регулятора в зависимости от канала внесения возмущающего воздействия с использованием субоптимального регулятора на минимум интегрального квадратичного показателя качества, а также обоснованы рекомендации по настройке безитерационной расчетной модели. Проанализированы необходимые требования по работе автоматического регулятора и обоснован выбор единственных настроек регулятора с ПИД - законом регулирования с учетом требований повышения быстродействия и показателям качества автоматической системы регулирования.*

***Ключевые слова:** ПИД - регулятор, настройка, качество регулирования, интегральная квадратичная оценка, переходная характеристика.*

***Abstract.** Based on the theoretical analysis and experimental studies, a non - reference method for tuning the PID regulator by inertial objects of the mining and metallurgical complex with delay is defined. Regulator settings are obtained depending on the channel of disturbance input with the use of a suboptimal regulator for a*

minimum of the integral quadratic quality index, and also recommendations for tuning the non-wasting calculation model are justified. The necessary requirements for the operation of the automatic controller have been analyzed and the choice of the only controller settings with the PID regulation law is justified taking into account the requirements for increasing the speed and quality indicators of the automatic control system.

Keywords: PID - controller, tuning, quality of regulation, integral quadratic estimation, transient response.

Введение

Объекты горно-металлургического комплекса (ГМК), в том числе добыча и обогащение руд, выплавка металла, занимают значительное место в структуре энергопотребления предприятия [1]. Поэтому, актуальным является снижение расходов на производство путем повышения показателей качества автоматической системы регулирования (АСР) при управлении ими.

С позиции управления указанные объекты являются сложными, содержащими нестационарные шумленные параметры, характеризующиеся перекрестными связями, содержащими нелинейности. Трудности управления связаны со значительной инерционностью объекта и запаздыванием [2].

Одним из составляющих факторов комплексной проблемы задачи управления является автоматическое поддержание технологических параметров на заданном уровне. С этой целью на предприятиях широко используются ПИД - регуляторы [3]. Накоплен огромный опыт эксплуатации и разработаны различные методы настройки ПИД - регуляторов. Известные методы настройки имеют определенные преимущества и недостатки, различные области применения. В связи с усложнением технологических процессов, а также наличием запаздывания в объектах управления, вопрос определения параметров настройки ПИД - регулятора, которые обеспечивали бы высокие показатели качества переходных процессов и достаточный уровень запаса устойчивости, остается актуальным [4].

Литературный обзор

В соответствии с классификации [5], существующие методы настройки, условно можно разделить на точные и приближенные. Точные методы дают качественные показатели переходного процесса и делятся на поисковые и беспоисковые. Поисковые методы позволяют получить параметры настройки с проведением итерационной процедуры поиска. Беспоисковые методы не требуют большого количества итераций поиска параметров настройки. Приближенные методы дают параметры, которые в дальнейшем подлежат уточнению. Режимы работы АСР в рассматриваемых методах: «online», «offline».

Точные методы настройки: Дудникова Е.Г., Ротача В. Я., Вишняковой Ю.Н., по номограммам [6]. Метод Дудникова Е.Г. позволяет проводить оценку запаса устойчивости системы по распределению корней характеристического уравнения для одно- и многоконтурных систем. Метод Ротача В.Я. обеспечивает оценку запаса устойчивости системы с частотными характеристиками при ограничении на показатель колебательности. Метод Вишняковой Ю.С. заключается в последовательном выборе точек в пределах параметров настройки, вычислении в каждой точке критерия оптимальности, а также в проверке запаса устойчивости системы по всем контурами. Из полученного массива выбирают значения, где достигается минимум. Метод номограмм применяется для объектов первого и второго порядка с запаздыванием и характеризуется использованием большого количества итераций для достижения оптимального результата.

Метод масштабирования относится к беспоисковым [7]. Суть этого метода заключается в использовании информации об эталонной АСР с другим объектом, но тем же регулятором что и в замкнутой системе. Недостатком метода является необходимость наличия библиотеки эталонных АСР.

Приближенные методы позволяют сравнительно простыми способами определить ориентировочные значения оптимальных настроек, которые в процессе наладки регулятора могут быть уточнены. К приближенных «online» методам относятся метод Зиглер-Никольса, метод CHR, адаптивные методы Ротача В.Я [8]. Зиглер и Никольс предложили две разновидности настройки. Один из них основан на параметрах отклика объекта на единичный ступенчатый влияние, а второй - на частотных характеристиках объекта управления. Метод Зиглер-Никольса не учитывает требований к запасу устойчивости системы, а полученные параметры настройки дают удаленный от оптимального результат. Метод CHR (Чина-Хронеса-Ресвика) является модификацией метода Зиглер-Никольса и позволяет получить больший запас устойчивости. Адаптивные методы Ротача В.Я. заключаются в процедуре адаптации по частотным характеристикам, использовании синусоидальных сигнальных воздействий или переходной характеристики системы. Недостатками этих методов является необходимость осуществления большого количества итераций и непригодность для многоконтурных АСР.

К приближенных «offline» методам относятся методы Куна, Латцеля, Кесслера [9]. Метод Куна применяется для медленных переходных процессов, а уточнение параметров настройки может выполняться на объекте в процессе ввода в эксплуатацию системы. Метод позволяет быстро получить результат, однако в системах с высоким порядком имеет место значительное запаздывание. Метод Латцеля позволяет при наличии переходной функции путем интегрирования рассчитать различные характерные коэффициенты, с

помощью которых находятся параметры регулятора. В методе Кесслера оптимизация происходит только по заданию, запаздывание объекта не учитывается, а результаты могут быть далекими от оптимальных.

Несмотря на наличие совокупности достаточно разработанных и неоднородных алгоритмов, все еще остается большой разрыв между теорией и практикой. Во многом он связан с использованием хорошо зарекомендовавших алгоритмов настройки и их модификаций. Потребности ГМК с каждым годом растут, что вызвано ростом темпов производства, изменением технологии, гибкостью. Проведенные же исследования качества работы 100 тыс. контуров регулирования на 350 предприятиях обнаружили, что от 49 до 63% контуров работают со "слабыми" (приблизненными к размыканию контура) настройками [10]. В среднем треть контуров работает с нормальными настройками, треть - с "ослабленными", треть - практически "слабыми" настройками. Это ставит задачу совершенствования методов регулирования по более сложным моделям, позволяющие оптимизировать регулирования и порождает проблему поиска алгоритмов их настройки, исследования влияния коэффициентов регулятора на переходные процессы.

Цель исследования

Совершенствование бесперебойного метода настройки ПИД - регулятора для объектов с запаздыванием, а также выдача рекомендаций по реализации алгоритма в составе автоматической системы регулирования для повышения быстродействия и качества ее функционирования.

Методологи вычислительного эксперимента

Переходные процессы в АСР при минимизации интегрального квадратичного критерия (I_2) обеспечивают высокое качество, поэтому для настройки регулятора выбран бесперебойный метод на минимум указанной оценки [11]. Вариант расчета определяется местом внесения возмущения (рис. 1).

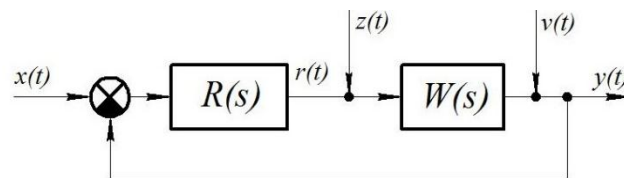


Рис. 1. Структурная схема АСР:

$x(t)$ – задающее, $z(t)$ – внутреннее, $v(t)$ – внешнее воздействие, $r(t)$ – выход регулятора, $y(t)$ – регулируемая величина

Идея метода заключается в МНК - приближении комплексной частотной характеристики (КЧХ) ПИД - регулятора к частотной характеристике оптимального регулятора в существенном диапазоне частот. Передаточная функция такого регулятора определяется по оптимальной передаточной функции замкнутой системы. Особенностью оптимального регулятора является наличие разрывов непрерывности с периодом (τ - время запаздывания) на его КЧХ. Это приводит к плохой обусловленности решения и система может потерять устойчивость даже при малых вариациях (τ). Поэтому, принят субоптимальный регулятор, обеспечивающий близкую, но гладкую переходную характеристику. Так, передаточная функция субоптимального регулятора относительно задающего воздействия имеет вид:

$$\tilde{W}_p^{opt}(p) = \frac{1}{\tilde{W}_o(p)} \cdot \frac{1}{(T_c p + 1) - e^{-p\tau}},$$

где $W_o(p)$ - передаточная функция объекта, T_c - постоянная времени сглаживателя, p - оператор Лапласа.

Сглаживатель в АСР в виде А-звена в случае объектов с экстремальной переходной характеристикой.

Процедура настройки ПИД - регулятора начинается с определения диапазона частот приближения, поскольку форма годографа КЧХ объекта управления отличается от КЧХ субоптимального регулятора. ПФ субоптимальной замкнутой системы относительно внутреннего возмущения содержит корректирующий коэффициент (k), который появляется в момент времени (2τ), для смягчения требований к динамической ошибке системы. ПФ субоптимального регулятора относительно задания и внешнего возмущения совпадают, процедура настройки ПИД - регулятора производится относительно двух каналов – задания и внутреннего возмущения. В целом, процедура настройки модели регулятора предусматривает определение: диапазона частот приближения (ω); постоянной сглаживателя (T_c); корректирующего коэффициента (k) (по каналу внутреннего возмущения).

Основная часть

В качестве объекта управления принят кожухотрубный теплообменник [12], описываемый А-звеном второго порядка и звеном запаздывания с параметрами настройки: $k_o = 1$ – коэффициент передачи объекта; $T_1 = 4c$, $T_2 = 10c$ – постоянные времени; $\tau = 4c$ – время запаздывания.

Расчет параметров настройки относительно канала задания начинается с выбора диапазона частот приближения. На Рис. 2 показаны годографы КЧХ объекта управления и субоптимального регулятора с обозначением начального диапазона частот приближения (ω).

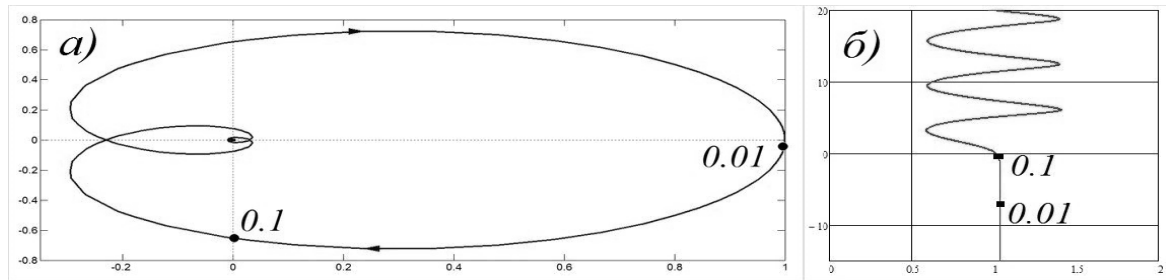


Рис. 2. Годографы КЧХ: а) – объект управления; б) – субоптимальный регулятор

Для выбора конечной частоты приближения (ω_k) на рис. 3 приведены графики переходных процессов при разных значениях конечной частоты приближения и постоянной времени $T_c = 5$ с. При расширении диапазона частот приближения происходит увеличение колебательности, при этом времени регулирования не уменьшается. Значение $\omega_k = 0.1$ рад/с обеспечивает наименьшее время достижения уставки и отсутствие перерегулирования. Т.е., выбранный диапазон частот $\omega = 0.01 \dots 0.1$ рад/с.

Для обоснования значения (T_c) проведено исследование качество переходного процесса (табл. 1).

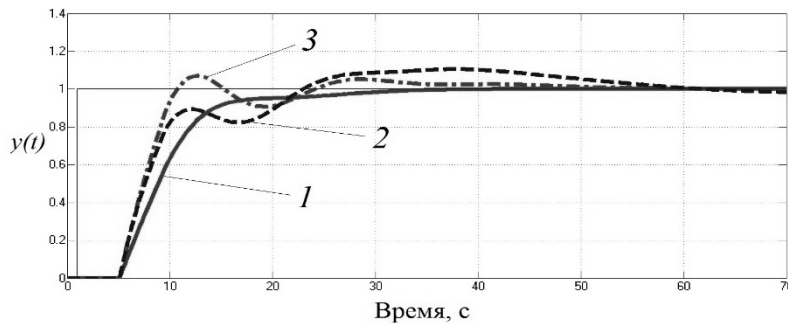


Рис. 3. Переходные характеристики АСР при ω_k , рад/с:
1 – 0.1; 2 – 0.4; 3 – 0.6

При увеличении постоянной времени сглаживателя перерегулирование снижается, время регулирования и интегральная квадратичная оценка увеличивается, т.о. принято $T_c = 3$ с.

Таблица 1

Исследование влияния постоянной времени сглаживателя на качество АСР (канал задания)

| №/№ | T_c | K_p | K_i | K_d | I_2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 2.523 | 0.166 | 9.72 | 5.76 |
| 2 | 3 | 2.141 | 0.143 | 7.951 | 5.94 |
| 3 | 5 | 1.642 | 0.111 | 5.752 | 6.70 |
| 4 | 10 | 1.036 | 0.071 | 3.394 | 9.08 |

Проведенный расчет настройки ПИД - регулятора беспоисковым методом относительно канала задания позволил сделать вывод: $k_p = 2.141$, $k_i = 0.143$, $k_d = 7.951$ (p - пропорциональная, i - интегральная, d - дифференциальная составляющая, k - коэффициент пропорциональности).

Расчет параметров настройки относительно канала внутреннего возмущения начинается с выбора значения корректирующего коэффициента (рис. 4) при $T_c = 6$ с, $\omega = 0.01 \dots 0.1$ рад/с. Перемещение КЧХ субоптимального регулятора со смещением нижней точки диапазона частот вверх, приводит к уменьшению коэффициентов настройки регулятора и повышению запаса устойчивости системы, обеспечив при это минимальное перерегулирование. Окончательно принято $k = 1.91$.

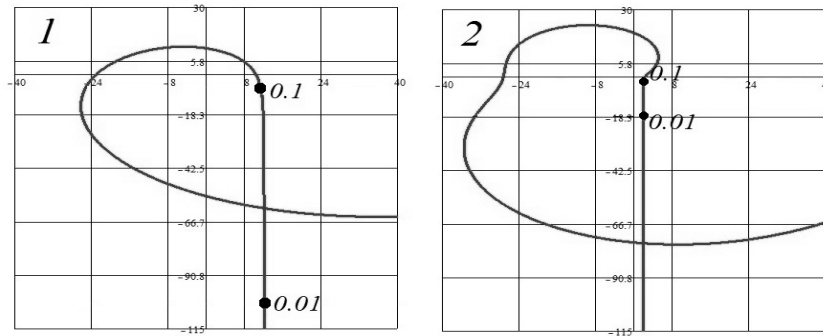


Рис. 4. Годографы КЧХ субоптимального регулятора при k : 1 – 1; 2 – 1.91

Исследования влияния постоянной сглаживателя на качество переходного процесса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исследование влияния постоянной времени сглаживателя на качество АСР (внутреннее возмущение)

| №/№ | T_c | k_p | k_i | k_d | I_2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 2.863 | 0.285 | 6.443 | 1.03 |
| 2 | 4 | 2.401 | 0.222 | 5.187 | 1.29 |
| 3 | 6 | 2.122 | 0.181 | 4.523 | 1.56 |
| 4 | 8 | 1.937 | 0.154 | 4.109 | 1.80 |

Оценка влияния постоянной сглаживателя соответствует проведенному выше соответствующему анализу по каналу задания и принято $T_c = 4c$. Параметры настройки ПИД – регулятора, полученные беспараметрическим методом относительно канала внутреннего возмущения: $k_p = 2.141$, $k_i = 0.143$, $k_d = 7.951$.

Многовариантность процедуры расчета настроек регулятора определяет необходимость поиска единых настроек, удовлетворяющих различным каналам внесения воздействия. Для этого проведем сравнительное моделирование работы регулятора при различных вариантах возмущения (рис. 5).

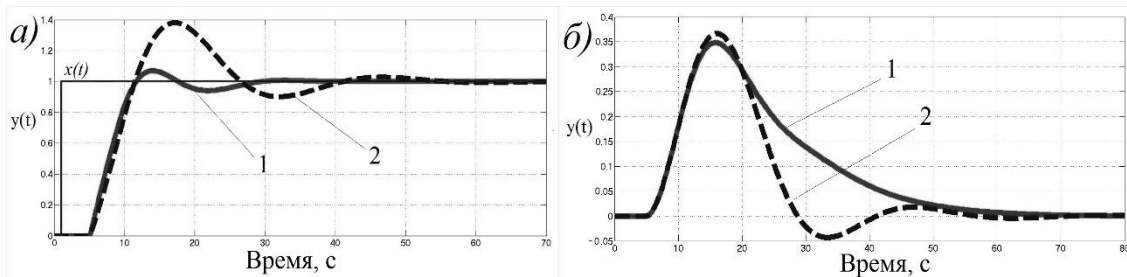


Рис. 5. Переходные характеристики при возмущении по заданию (а) и нагрузке (б) при расчете: 1 – канал задания; 2 – внутреннее возмущения

Настройки относительно задания обеспечивают повышение качества процесса регулирования при нанесении воздействия по каналу задания более, чем настройки относительно внутреннего возмущения (снижается динамическая ошибка, время регулирования). По каналу внутреннего возмущения оба варианта настройки получили примерно равные время протекания переходного процесса и динамическую ошибку. Однако, настройки относительно задания обеспечили отсутствие перерегулирования. Поэтому, рекомендуемые единственные настройки регулятора относительно задания.

Выводы

1. Показано, что управление объектами ГМК усложняется в результате наличия запаздывания. При построении АСР, оно является фактором определяющим структуру системы и оказывает влияние на устойчивость и качество. Настройка ПИД – регуляторов для данного класса систем являются актуальным.

2. Выполнено расчет настроек ПИД – регулятора по МНК - приближению КЧХ регулятора к частотной характеристике субоптимального регулятора в существенном диапазоне частот на основании критерия минимума интегральной квадратичной оценки для объекта, описываемого А-звеном и звеном запаздывания.

3. Обосновано переход к единственной настройке ПИД – регулятора в не зависимости от канала внесения воздействия, а также даны рекомендации по настройке модели расчета, позволяющей повысить качество и точность АСР.

Список литературы

1. Бородулин А.В. Домна в энергетическом измерении / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, Г.И. Орел.- Кривой Рог- 2006, 436с.
2. Швачка А.И. Развитие информационной базы АСУТП принятия решения в условиях множественного выбора / А.И. Швачка, Е.В. Титова, О.Ю. Олейник // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. –Вип. 95. – С. 41 – 46.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с., ил.
4. Wescott T. PID Without a PhD / T. Wescott. – Wescott Design Services, 2016. – 30p.
5. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
7. Бурцева Ю.С. Универсальный безпоисковый метод настройки линейных регуляторов / Ю.С. Бурцева // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. – 2014. – С. 2294-2299.
8. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. – Специальная литература: Лань, 2010. – 624 с.
9. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. –Специальная литература: Лань, 2016 г. – 200 с.
10. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a proportal-integral-differential controller with an additional controlling action / Ya. Dovhopolyi, G. Manko, V. Trishkin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. – 2017. –Vol.6/2(90). – pp. 61-66.
11. Pikina G. Searchless tuning of linear controllers for the minimum of quadratic criterion / G.A. Pikina, Yu.S. Burtseva // Thermal Engineering. - 2014. – Vol. 3(61). – pp. 198-202.
12. Довгополий Я.О. Аналіз корисних структурних схем ПІД-регуляторів з додатковою керуючою дією / Я.О. Довгополий, О.В. Лещенко, С.Д. Блонський // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 3. – С. 191-194.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 519.246.8

*А.В. Кожевніков, И.М. Удовик, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Анотація. Проведена ідентифікація стохастичної моделі енергоспоживання очисного комбайну на основі експериментальних даних. При цьому реалізована декомпозиція первинного часового ряду енергоспоживання очисного комбайна на вторинний, що відповідає безперервній роботі, і моменти простою. Показана стаціонарність вторинного часового ряду, проведені його автокорреляційний та статистичний аналізи, обґрунтовано, що вторинний часовий ряд може бути описаний AR моделлю 3-го порядку.

Ключові слова: часовий ряд, ARMA модель, автокорреляційна функція, білий шум, асиметрія, ексцес.

Аннотация. Произведена идентификация стохастической модели энергопотребления очистного комбайна на основе экспериментальных данных. При этом реализована декомпозиция первичного временного ряда энергопотребления добычного комбайна на вторичный, соответствующий непрерывной работе, и моменты простоя. Показана стационарность вторичного временного ряда, проведены его автокорреляционный и статистический анализы, обосновано, что вторичный временной ряд может быть описан AR моделью 3-го порядка.

Ключевые слова: временной ряд, ARMA модель, автокорреляционная функция, белый шум, асимметрия, эксцесс.

Annotation. Identification of a stochastic model of the cutter-loader energy consumption has been made on the basis of experimental data. The primary time series of cutter-loader power consumption was decomposed into a secondary one, which corresponding to continuous operation, and downtime. The stationarity of the secondary time series has been shown, its autocorrelational and statistical analysis was carried out, it is justified that secondary time series can be described by an AR model of 3-th order.

Keywords: time series, ARMA model, autocorrelation function, white noise, asymmetry, kurtosis.

Введение. Временные зависимости тока и напряжения питания электродвигателей горных и транспортных машин носят неперiodический и случайный характер, определяемый множеством факторов: вид и параметры двигателя, масса машины, сопротивление движению, горно-геологические условия эксплуатации, режим управления [1 – 3]. В указанных работах проводится анализ некоторых характеристик таких зависимостей, как: автокорреляционных функций, амплитудных спектров, функций мгновенных активной и реактивной мощностей. Однако в настоящее время отсутствуют аналитические или численные модели, позволяющие воспроизводить такие зависимости. Разработка и использование таких моделей применительно к энергопотреблению горных машин позволит улучшить качество управления шахтной откаткой, что приведет к: уменьшению времени простоя оборудования, затрат на добычу и повышению эффективности откатки.

Анализ существующих достижений и публикаций. Экспериментальные данные временных зависимостей величин, в большинстве случаев, представляются в виде дискретных последовательностей значений наблюдаемой величины $\{X_t\}_{t=1, \dots, N}$, следующих, как правило, через равные промежутки времени Δ . В последнем случае момент времени, соответствующий значению наблюдаемой величины X_t может быть определен как $T_t = T_0 + (t-1) \cdot \Delta$, где T_0 – начальный момент времени с которого фиксируются значения наблюдаемой величины. Такие последовательности носят название временных рядов. Методы анализа временных рядов часто делят на два класса: в частотной и во временной областях. Первый основывается на спектральном анализе и, с недавних пор, вейвлет-анализе, и может рассматриваться в качестве не использующих модели методов, хорошо подходящих для исследований на этапе разведочного анализа данных. Методы анализа во временной области также имеют безмодельное подмножество, базисуемое, преимущественно, на автокорреляционном анализе, но именно здесь наиболее развиты моде-

ли временных рядов. Наибольшее развитие аппарат моделирования временных рядов, имеющих стохастический характер, получил в эконометрике [4 – 7]. Показано, что произвольный стационарный временной ряд может быть представлен в виде ARMA (Auto Regression Moving Average), а определённые нестационарные – ARIMA (Auto Regression Integrated Moving Average), моделей. Разработаны методы идентификации моделей, определения их параметров, критерии оценки качества.

Формулировка цели и задач исследований. Целью работы является идентификация стохастической модели энергопотребления очистного комбайна. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи исследований: осуществлена декомпозиция первичного временного ряда энергопотребления добычного комбайна на вторичный, соответствующий непрерывной работе, и моменты простоя, показана стационарность вторичного временного ряда, проведен его автокорреляционный и статистический анализ. Обосновано, что вторичный временной ряд может быть описан AR моделью 3-го порядка.

Изложение основного материала исследований. Ключевым моментом, который определяет круг возможных моделей временного ряда, является его стационарность. Под строго стационарным понимают временной ряд все свойства которого (т.е. вероятностное распределение) не изменяются при изменении начала отсчёта времени. Другими словами вероятностные распределения наблюдаемой величины рядов $\{X_t\}_{t=1,\dots,N}$ и $\{X_t\}_{t=1+\tau,\dots,N+\tau}$ совпадают для произвольного лага τ . Проверка строгой стационарности ряда на основании результатов эксперимента, как правило, затруднительна и на практике используется понятие слабой стационарности процесса. Оно предполагает независимость от длины N временного ряда $\{X_t\}_{t=1,\dots,N}$ среднего значения наблюдаемой величины \bar{X}_t , её дисперсии $D(X_t)$, чётность автоковариационной функции $Cov(X_t, X_{t+\tau})$ и зависимость её только от временного лага τ [4, 6]:

$$\begin{cases} \bar{X}_t = const \\ D(X_t) = const \\ Cov(X_t, X_{t+\tau}) = f(\tau) \end{cases} . \quad (1)$$

Слабая стационарность является необходимым условием строгой. Временной ряд является гауссовым, если вероятностное распределение его элементов нормальное. Для гауссового ряда понятия строгой и слабой стационарности эквивалентны. В дальнейшем под стационарностью временного ряда мы будем подразумевать выполнение условий (1).

В качестве исходных данных были использованы два экспериментальных временных ряда (рис. 1) тока двигателя режущей части очистного комбайна УКД-400. Электродвигатель ЭКВ4-200В трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором, рассчитан на напряжение питания 1140 В и имеет номинальный ток статора 133 А. Временные ряды были получены на шахте “им. Героев Космоса” ГТЭК “Павлоградуголь” для одного оборудования, которое эксплуатировалось в смены со смежными датами. Период дискретизации ряда по времени составлял $\Delta=1$ с.

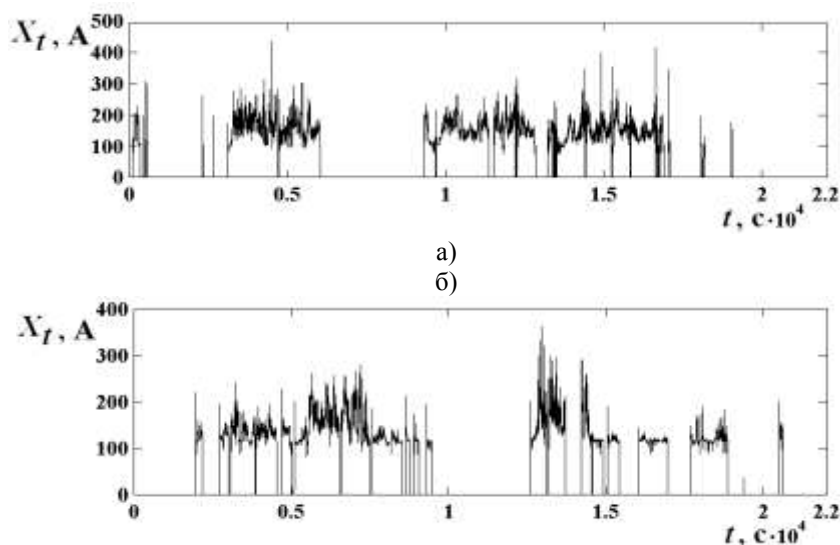


Рис. 1 Экспериментальные временные ряды тока двигателя режущей части очистного комбайна

Рис.1 свидетельствуют о наличии в составе анализируемых временных рядов значительного количества нулевых отсчётов наблюдаемой величины. Такие ряды в дальнейшем называются первичными. Нулевые отсчёты соответствуют моментам простоя комбайна и носят как детерминированный технологический, так и случайный характер. Последние являются случайными, как по моменту своего возникновения, так и по длительности простоя и вызываются различными причинами, основными из которых являются перегрев оборудования и истощение угольного пласта в направлении разработки. С точки зрения динамики временного ряда нулевые отсчёты вносят в ряд нестационарность случайного характера, что значительно затрудняет построение математической модели. В связи с этим целесообразна декомпозиция первичного ряда на временные отсчёты, соответствующие непрерывной работе комбайна, которые образуют вторичный временной ряд и отсчёты, соответствующие простоям. В дальнейшем в работе анализируются и моделируются только вторичные временные ряды. Наложение моментов простоя на вторичный ряд и получение первичного ряда в рамках исследуемой статистической модели не представляет сложностей, но возможно лишь при наличии достоверной статистики простоев и выходит за рамки статьи.

Рассматриваемые далее процессы имеют нулевое математическое ожидание. Для обеспечения этого условия и представления временных рядов в виде удобном для анализа, вторичные временные ряды были стандартизованы, при этом новые нормированные значения элементов ряда определялись как:

$$x_t = \frac{X_t - \bar{X}_t}{\sqrt{D(X_t)}}. \quad (2)$$

После стандартизации наблюдаемая величина временного ряда и все её статистические параметры являются безразмерными величинами. На рис. 2 приведены стандартизованные вторичные временные ряды, соответствующие первичным экспериментальным.

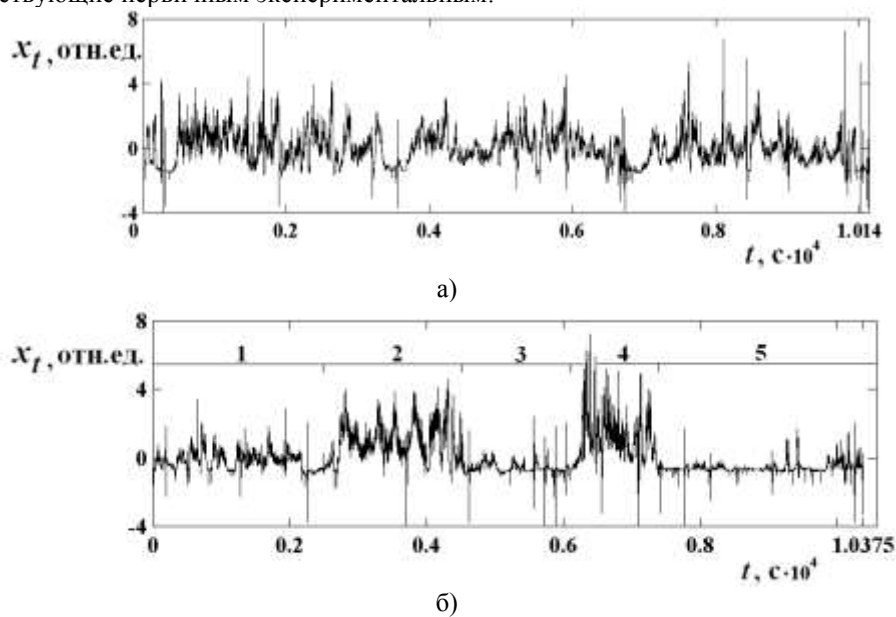


Рис. 2 Стандартизованные вторичные временные ряды, соответствующие экспериментальным

Визуально ряды а) и б) различаются значительно – ряд а) представляется относительно однородным, в то время как ряд б) имеет несколько фрагментов (1 – 5), существенно отличающихся по характеру временной зависимости наблюдаемой величины. По-видимому эти различия могут быть объяснены горно-геологическими условиями эксплуатации комбайна и особенностями режима управления им в разных сменах. Однако основные статистические параметры этих рядов и отдельных фрагментов ряда б), приведённые в табл. имеют много общего. Стандартизация (2) фрагментов ряда б) проводилась с использованием оценок среднего и дисперсии этих же фрагментов, а не ряда в целом, поэтому все фрагменты имеют нулевое среднее и единичную дисперсию. Для всех рядов и их фрагментов характерно отклонение вероятностного распределения наблюдаемой величины от нормального с преобладанием положительных значений асимметрии и эксцесса, что по-видимому обусловлено пусковыми бросками тока. Для ряда а) и фрагментов 1, 2 и 4 ряда б) имеет место сравнительно небольшое отклонение наблюдаемой величины от нормального распределения, в то время как для фрагментов 3 и 5 ряда б) более характерны её отдельные броски на фоне равномерной временной зависимости, что обуславливает большие значения эксцесса вероятностного распределения.

Таблица 1.

Основные статистические параметры вторичных временных рядов и их отдельных фрагментов

| Временной ряд | а | б | б1 | б2 | б3 | б4 | б5 |
|----------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Параметр ряда | | | | | | | |
| Длина $\Delta \cdot N$, с | 10140 | 10375 | 2700 | 1900 | 1500 | 1300 | 2975 |
| Асимметрия, $A(X_t)$ | 0,697 | 1,656 | 0,628 | 0,239 | -0,437 | 0,914 | 0,784 |
| Экцесс, $E(X_t)$ | 1,543 | 3,557 | 2,977 | -0,108 | 29,13 | 1,480 | 25,14 |
| <i>IDW</i> -статистика | 0,235 | 0,147 | 0,366 | 0,158 | 1,313 | 0,215 | 0,730 |

Простейшим критерием стационарности временного ряда является интеграционная статистика Дарбина – Уотсона (*IDW*-статистика) [7]:

$$IDW = \frac{\sum_{t=2}^N (x_t - x_{t-1})^2}{\sum_{t=2}^N (x_t - \bar{x}_t)^2} . \quad (3)$$

При значениях *IDW* близких к 0 процесс является нестационарным, а близких к 2 – стационарным. Однако *IDW*-статистика имеет значительную область неопределённости и, как правило, не даёт однозначного ответа на вопрос о стационарности. Так, при больших длинах временного ряда $N > 150$ и уровнях значимости теста $\alpha = 0,01 \div 0,1$ нулевая гипотеза о нестационарности отвергается при $IDW = 0,26 \div 0,14$, а нулевая гипотеза о стационарности при $IDW = 1,61 \div 1,74$. Тем не менее, статистика интересна в сравнительном плане. Так, данные табл. показывают, что все визуально однородные фрагменты ряда б) имеют значение статистики больше чем ряд в целом, т.е. объективно представляются более “стационарными”.

Причинами нарушения стационарности временного ряда может быть наличие детерминированного и/или стохастического трендов. Последний, в частности, может проявляться в виде циклических изменений с большим периодом, получивших название ложной периодичности. Ограниченность вторичных временных рядов в широком временном диапазоне и выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{x}_t = 0$ позволяют считать обоснованным предположение об отсутствии у них детерминированного тренда. Тест на наличие стохастического тренда будет рассмотрен далее.

Стационарный временной ряд может быть представлен в виде процесса ARMA(*p, q*) [4]:

$$x_t = \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} . \quad (4)$$

Здесь первая сумма соответствует AR процессу порядка *p*, а вторая – MA порядка *q*, $\{a_i\}_{i=1, \dots, p}$, $\{b_j\}_{j=1, \dots, q}$ – коэффициенты ряда, $\{\varepsilon_t\}_{t=1, \dots, N}$ – белый шум с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией, который может иметь произвольное (в т.ч. нормальное) распределение.

Основным инструментом идентификации ARMA моделей являются автокорреляционная функция (АКФ) (autocorrelation function (ACF)) и частная АКФ (ЧАКФ) (partial autocorrelation function (PACF)).

Для временного ряда длиной *N* АКФ двух его фрагментов, первый из которых начинается с отсчёта τ_0 , а второй следует за ним с лагом τ определяется как:

$$\rho(\tau, \tau_0) = \frac{\sum_{t=\tau+\tau_0+1}^N \left(x_t - \frac{1}{N-\tau-\tau_0} \sum_{t=\tau+\tau_0+1}^N x_t \right) \cdot \left(x_{t-\tau} - \frac{1}{N-\tau-\tau_0} \sum_{t=\tau_0+1}^{N-\tau} x_t \right)}{\sqrt{\sum_{t=\tau+\tau_0+1}^N \left(x_t - \frac{1}{N-\tau-\tau_0} \sum_{t=\tau+\tau_0+1}^N x_t \right)^2 \cdot \sum_{t=\tau_0+1}^{N-\tau} \left(x_t - \frac{1}{N-\tau-\tau_0} \sum_{t=\tau_0+1}^{N-\tau} x_t \right)^2}} . \quad (5)$$

В случае белого шума:

$$\rho(\tau, \tau_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau = 0 \\ 0 & \text{при } \tau \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

В дальнейшем, если АКФ определяется для ряда в целом, т.е. $\tau_0 = 0$, будет использовано обозначение $\rho(\tau) = \rho(\tau, 0)$.

Частная АКФ для лага τ определяется как:

$$\rho_p(\tau) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho(1) & \rho(2) & \dots & \rho(\tau-2) & \rho(1) \\ \rho(1) & 1 & \rho(1) & \dots & \rho(\tau-3) & \rho(2) \\ \rho(2) & \rho(1) & 1 & \dots & \rho(\tau-4) & \rho(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho(\tau-2) & \rho(\tau-3) & \rho(\tau-4) & \dots & 1 & \rho(\tau-1) \\ \rho(\tau-1) & \rho(\tau-2) & \rho(\tau-3) & \dots & \rho(1) & \rho(\tau) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho(1) & \rho(2) & \dots & \rho(\tau-2) & \rho(\tau-1) \\ \rho(1) & 1 & \rho(1) & \dots & \rho(\tau-3) & \rho(\tau-2) \\ \rho(2) & \rho(1) & 1 & \dots & \rho(\tau-4) & \rho(\tau-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho(\tau-2) & \rho(\tau-3) & \rho(\tau-4) & \dots & 1 & \rho(1) \\ \rho(\tau-1) & \rho(\tau-2) & \rho(\tau-3) & \dots & \rho(1) & 1 \end{vmatrix}} \quad (7)$$

АКФ и ЧАКФ вторичных временных рядов приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

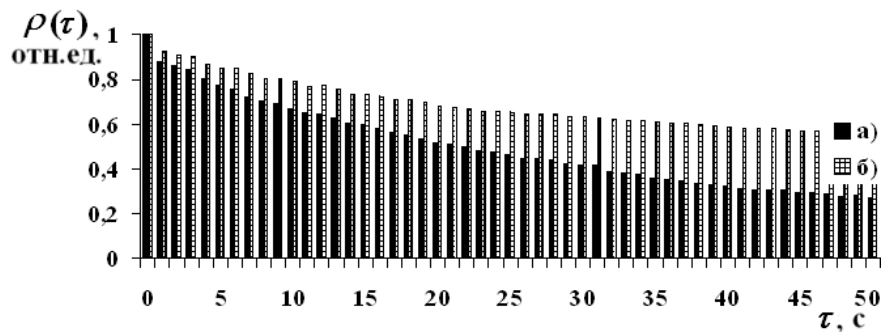


Рис. 3 АКФ вторичных временных рядов

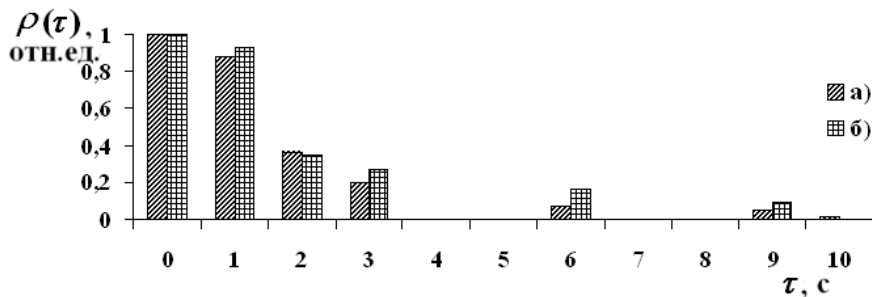


Рис. 4 ЧАКФ вторичных временных рядов

Идентификация ARMA модели осуществляется по следующим признакам процессов [6]:

- MA(q): $\rho(\tau) = 0$ при $\tau > q$;
- AR(p): $\rho_p(\tau) = 0$ при $\tau > p$;
- ARMA(p,q): функции $\rho(\tau)$ при $\tau > q$, $\rho_p(\tau)$ при $\tau > p$ имеют прямое или осциллирующее убывание.

Исходя из приведённых критериев и коррелограмм временных рядов, их можно идентифицировать как AR процессы порядка не выше 3-го.

Для оценки коэффициентов модели $AR(p)$ $\{a_i\}_{i=1,\dots,p}$ может быть применён метод наименьших квадратов (МНК). При этом будет минимизироваться величина:

$$f(a_1, \dots, a_p) = \sum_{t=p+1}^N \left(x_t - \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} - \varepsilon_t \right)^2, \quad (8)$$

а система нормальных уравнений для поиска коэффициентов будет иметь вид:

$$\begin{cases} \sum_{t=p+1}^N \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} x_{t-1} = \sum_{t=p+1}^N (x_t - \varepsilon_t) x_{t-1} \\ \vdots \\ \sum_{t=p+1}^N \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} x_{t-p} = \sum_{t=p+1}^N (x_t - \varepsilon_t) x_{t-p} \end{cases}, \quad (9)$$

Другим способом оценки коэффициентов модели $AR(p)$ является решение системы линейных уравнений Юла-Уокера, связывающие их с АКФ:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 \rho(1) + \dots + a_p \rho(p-1) = \rho(1) \\ \vdots \\ a_1 \rho(p-1) + a_2 \rho(p-2) + \dots + a_p = \rho(p) \end{cases}. \quad (10)$$

Определение порядка p модели $AR(p)$ производится с использованием следующих сходных информационных критериев, минимизирующих оценки дисперсии $\hat{\sigma}_p^2$ белого шума ε_t :

$$\hat{\sigma}_p^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{t=p}^N \left[x_t - \bar{x}_t + \sum_{i=1}^p a_i (x_{t-i} - \bar{x}_t) \right]^2. \quad (11)$$

Критерий Акаике минимизирует функцию:

$$AIC(p) = \ln \hat{\sigma}_p^2 + \frac{2p}{N}, \quad (12)$$

а критерий Шварца:

$$SIC(p) = \ln \hat{\sigma}_p^2 + p \frac{\ln N}{N}. \quad (13)$$

Применительно к рассматриваемым временным рядам функции $AIC(p)$ и $SIC(p)$ дают весьма близкие значения для моделей 1-го – 3-го порядков, однако, с учётом отмеченных выше особенностей их коррелограмм, ряды окончательно следует идентифицировать как $AR(3)$ процессы. Окончательно $AR(3)$ модели рассматриваемых вторичных временных рядов а) и б) с коэффициентами, оцененными с помощью МНК соответственно имеют вид:

$$x_t = 0,49x_{t-1} + 0,25x_{t-1} + 0,19x_{t-3} + \varepsilon_t, \quad (14)$$

$$x_t = 0,54x_{t-1} + 0,18x_{t-1} + 0,26x_{t-3} + \varepsilon_t, \quad (15)$$

Используя тот же подход было установлено, что все фрагменты ряда б) также могут быть идентифицированы как AR процессы порядка не выше 4-го.

Возвращаясь к вопросу о наличии у исследуемых рядов стохастического тренда, следует отметить, что наиболее эффективным инструментом для его решения является семейство критериев Дики – Фуллера, которые также получили название тестов на наличие единичного корня [6]. Такое название

обусловлено тем, что характеристическое уравнение процесса $AR(p)$ имеет вид $1 - \sum_{i=1}^p a_i z^i = 0$, а условием стационарности процесса является расположение всех его корней за пределами единичного круга $|z| \leq 1$ на комплексной плоскости. В частности, тест для процесса $AR(1)$ выглядит следующим образом:

- нулевая гипотеза теста состоит в том, что $a_1 = 1$, т.е. процесс нестационарен и имеет стохастический тренд;
- с использованием МНК определяется оценка величины:

$$a_1 = \frac{\sum_{t=2}^N (x_t - \varepsilon_t) x_{t-1}}{\sum_{t=2}^N (x_{t-1})^2}. \quad (16)$$

Контрольная величина теста определяется как $a_1 - 1$ и имеет распределение Фуллера, которое близко к распределению Стьюдента с $N-1$ степенями свободы для величины $t = \frac{a_1 - 1}{s(a_1)}$. Здесь $s(a_1)$ – стандартная ошибка оценки a_1 , вычисляемая как:

$$s(a_1) = \frac{s_{res}}{\sqrt{N-1} \cdot s(x)} = \frac{\sum_{t=2}^N (x_t - a_1 x_{t-1} - \varepsilon_t) x_{t-1}}{\sqrt{N-1} \cdot \sum_{t=1}^N (x_{t-1})^2}, \quad (17)$$

где s_{res}^2 , $s^2(x)$ – оценки остаточной дисперсии регрессии, построенной МНК и дисперсии наблюдаемой величины временного ряда соответственно;

- задавая величиной уровня значимости теста α , определяется критическое значение теста $t_{\alpha, N-1}$;
- в случае $|t| > t_{\alpha, N-1}$ нулевая гипотеза о наличии единичного корня отвергается.

Приведённый выше тест легко обобщается на AR процесс произвольного порядка. Его применение к идентифицированным моделям временных рядов показывает отсутствие у них стохастических трендов и, следовательно, их стационарность.

В заключение следует отметить, что наибольшую сложность для дальнейшего развития качественных AR моделей рассматриваемых процессов является негауссов характер присутствующего в них шума. Об этом свидетельствуют оценки асимметрии и эксцесса данных табл., которые в случае нормального распределения шума должны были бы быть близки к 0. Сами по себе процедуры идентификации произвольного вероятностного распределения и генерации псевдослучайных чисел с заданным вероятностным распределением не представляют проблем. Для решения первой задачи может быть использована система кривых Пирсона, которая по оценкам асимметрии и эксцесса вероятностного распределения наблюдаемой величины позволяет установить вид распределения. Для генерации псевдослучайных чисел чаще всего используется метод отбора при известной дифференциальной функции вероятностного распределения и метод обратной функции – в случае заданной кумулятивной [8]. Однако исходными данными для построения модели является экспериментальный временной ряд, по которому может быть определено вероятностное распределение наблюдаемой величины. Последнее может существенно отличаться от заранее неизвестного распределения шумовой составляющей, необходимого для её генерации указанными выше методами. Альтернативой проанализированных в статье рекуррентных AR моделей рассматриваемых процессов могут быть численные модели, основанные на методах Монте-Карло. Такие модели, используя марковский подход, позволяют генерировать непосредственно временной ряд, исходя из

эмпирических вероятностных распределений наблюдаемой величины, которые в свою очередь могут быть получены из экспериментального временного ряда.

Выводы. Таким образом, в настоящей работе:

Произведена идентификация стохастической модели энергопотребления очистного комбайна на основе экспериментальных данных. При этом реализована декомпозиция первичного временного ряда энергопотребления добычного комбайна на вторичный, соответствующий непрерывной работе, и моменты простоя. Показана стационарность вторичного временного ряда, проведены его автокорреляционный и статистический анализы, обосновано, что вторичный временной ряд может быть описан AR моделью 3-го порядка. Отличительной особенностью модели является негауссов характер шумовой составляющей с преобладанием положительных значений асимметрии и эксцесса, что по-видимому обусловлено пусковыми бросками тока двигателя. Определены проблемы, возникающие на дальнейших этапах оценивания и диагностики модели, и возможные пути их решения.

Список литературы

1. Федорейко В.С. Методы вейвлет обработки сигналов в электромеханических системах [Текст] / Федорейко В.С., Худoley С.С., Блахонцев А.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – Вып.72 – С. 142 – 148
2. Саблин О.И. Интергармоники тягового тока и напряжения на токоприёмнике электрического транспорта постоянного тока [Текст] / О.И. Саблин // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – Вып.76 – С. 112 – 120
3. Костін М.О. Миттєва реактивна потужність у системах електричного транспорту постійного струму [Текст] / М.О. Костін, О.І. Саблін, О.Г. Шейкіна та ін. // Гірнична електромеханіка та автоматика: научн.-техн. сб. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – Вып.79 – С. 3 – 8
4. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов [Текст] / Г.Г. Канторович // Экономический журнал ВШЭ: – М.: ВШЭ, 2002. – № 1 – С. 85 – 116
5. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов [Текст] / Г.Г. Канторович // Экономический журнал ВШЭ: – М.: ВШЭ, 2002. – № 2 – С. 251 – 273
6. Носко В. П. Эконометрика: введение в регрессионный анализ временных рядов [Текст] / В. П. Носко – М.: ЛОГОС, 2004. – 312 с.
7. Елисеєва І. І. Економетрика [Текст] / І. І. Елисеєва, С.В. Курьшева, Т.В. Костеева – М.: «Финансы и статистика», 2007. – 575 с.
8. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев – М.: «Наука», 1973. – 312 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, Ткачовим В.В.

УДК: 621.3.078.4: 621.512

О.В. Бобров, Д.В. Ципленков канд-ти техн. наук
(Україна, Дніпро, ДВНЗ "Національний гірничий університет")

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА – ПРИВІД – КОМПРЕСОР – ПНЕВМОМЕРЕЖА»

Анотація. Обґрунтовано оптимальні параметри математичної моделі, що дозволяє визначити оптимальний режим роботи системи вироблення і розподілу стислого повітря, до складу якої входять наступні елементи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа". Визначено інтервали циклу «нагнітання – зниження» тиску в пневмосистемі при фіксованому значенні витрат стислого повітря, а також залежність оптимального ККД від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря. Отримано залежності споживання енергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями.

Ключові слова: електропривід, регулювання, компресор, електромеханічна система.

Аннотация. Обоснованы оптимальные параметры математической модели, позволяющие определять оптимальный режим работы системы производства и распределения сжатого воздуха, состоящей из следующих элементов "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть". Определены

интервалы цикла «нагнетание – снижение» давления в пневмосистеме при фиксированном значении расхода сжатого воздуха, а также зависимость оптимального КПД от расхода сжатого воздуха, потребляемого приемниками сжатого воздуха. Получены зависимости потребления энергии электромеханической системой за один час при классическом двухпозиционном методе управления; при двухпозиционном методе управления с оптимальным верхним уровнем давления; при двухпозиционном методе управления с оптимальным верхним уровнем давления и установленными ограничениями.

Ключевые слова: электропривод, регулирование, компрессор, электромеханическая система.

Abstract. The optimal parameters of the mathematical model that allow to determine the optimum operating mode of the compressed air production and distribution system consisting of the following elements "electric network - drive - compressor - pneumatic network" are substantiated in the work. The intervals of the pump pumping-down cycle in the pneumatic system are determined at a fixed value of compressed air consumption, and the dependence of the optimum efficiency on the compressed air consumption consumed by the compressed air receivers is determined. The dependences of energy consumption by an electromechanical system for one hour are obtained for the classical two-position control method; with a two-position control method with an optimum upper pressure level; with a two-position control method with the optimum upper pressure level and the established limitations.

Keywords: electric, control, compressor, electromechanical system.

Вступ. Система двопозиційного регулювання тиску широко застосовується в поршневих компресорних установках. Нормальна робота споживачів стислого повітря забезпечується завдяки підтримці в системі тиску в заданому інтервалі ($P_{min} \div P_{max}$).

Підвищення енергоефективності системи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа" в цілому можна досягти, виконавши "плаваючим" верхній рівень тиску. В роботі [1] введено критерій економічності для системи керування і визначення значення верхнього рівня тиску на одному циклі нагнітання, зниження тиску – ККД. Обґрунтування цього енергетичного показника базується на з'ясуванні залежностей між різними показниками елементів всієї системи, визначенні найбільш вагомих, з точки зору втрат енергії, елементів електромеханічної системи, а також взаємозв'язку між ними.

Для вирішення раніше [2] сформульованої задачі оптимізації розроблена цифрова математична модель. Розглянемо особливості реалізації цієї математичної моделі. При створенні моделі були прийняті допущення, описані в роботі [3], що враховують мету моделювання – отримання оптимального значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистем $P_{max\ opt}$ і відповідного максимуму цільової функції (ККД) при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} . Отримані значення можуть бути реалізовані в системі регулювання виробництва стислого повітря з певною точністю (до 10% від розрахункових значень).

Постановка задачі. У сформульованій оптимізаційній задачі цільова функція є нелінійною, а значить має місце задача нелінійного програмування. Найчастіше при розв'язанні задач такого типу часто використовуються чисельні методи пошуку екстремуму. Для цього спочатку задають початкові значення параметрів, що оптимізуються, визначають допустиму область їх існування, використовуючи відомі алгоритми, та знаходять оптимальні значення. Існують методи нульового, першого і другого порядків. Вони відрізняються порядком використовуваної при пошуку екстремуму похідною цільової функції. На практиці широке застосування набули методи, що не враховують похідні від цільової функції, тобто нульового порядку. У цих методах спочатку розраховують значення цільової функції, а вибір напрямку руху в процесі пошуку екстремуму здійснюється за результатами порівняння цих значень на суміжних кроках ітераційного процесу.

Підставами для вибору методів пошуку екстремуму є кількість параметрів, що оптимізуються складність обчислення цільової функції та її похідних, швидкодія використовуваної комп'ютерної техніки, а також наявність відповідного програмного забезпечення.

Розв'язування задачі. Сформульована оптимізаційна задача відноситься до числа складних з великим об'ємом обчислень. Хоча у цільовій функції присутній один параметр, що оптимізується, однак її значення розраховуються за порівняно складними аналітичними залежностями. Слід зазначити також змінний характер збільшення тиску в пневмосистемі на циклі «накачування-спуску». Цей факт значно ускладнює розв'язання поставленої задачі. Крім того, в отриманих аналітичних залежностях відсутні змінні, виражені в неявному вигляді. У такому разі задача ускладнюється через те, що виникає необхідність розв'язання нелінійних трансцендентних і їм подібних рівнянь, що мають складну структуру. Особливістю сформульованої задачі є порівняно вузька область припустимих значень параметра, що оптимізується; це обумовлено наявністю встановлених обмежень. Обмежена область існування параметра, що оптимізується, $P_{max\ opt}$ і порівняно незначні вимоги до точності його визначення (для інженерних розра-

хунків, пов'язаних з проектуванням пристроїв, їх налагодженням, допустима похибка дорівнює 10%) дозволили вибрати варіант пошуку екстремуму цільової функції безпосереднім перебором параметра $P_{\max opt}$ при фіксованому значенні витрати стислого повітря пневмоприймачем Q_{potr} (метод сканування) і обчисленням відповідних значень $F_{opt}(X)$. Оптимальний параметр відповідає максимальному значенню цільової функції. При виборі кроку зміни $P_{\max opt}$ необхідно дотримуватися необхідної точності розрахунку цих параметрів. Особливо важливо, що метод сканування дозволяє здійснити пошук глобального екстремуму цільової функції. Це є досить важливою перевагою в певних випадках, пов'язаних з наявністю декількох екстремумів.

Для обґрунтування параметрів базової моделі пояснимо необхідність її застосування. Оскільки в електромеханічній системі присутні елементи, які використовують різні види енергії: електричну, механічну і енергію стислого повітря, то звести усі їх параметри до єдиного знаменника в загальному вигляді буде важко. І таке рішення не буде адекватно відображати енергетичні процеси, що відбуваються в електромеханічній системі через необхідність введення додаткових обмежень і припущень. Тому пропонується використовувати базову модель з параметрами, описаними в роботі [5]. Надалі це спростить задачу порівняльного аналізу енергетичних показників електромеханічних систем з різними типами повітряних поршневих компресорів, подаючи результати досліджень у відносних одиницях.

Розрахунок параметрів режимів роботи базової моделі електромеханічної системи проводиться при заданих вихідних даних, враховуючи, що раніше були визначені елементи з найбільшими ваговими втратами енергії – «привід – компресор» і пневмомережа. В роботі [5] наведені і описані залежності, покладені в основу базової моделі.

Вираз для ККД залежно від тиску P_2 з урахуванням проведених випробувань і певних припущень має такий вигляд:

$$\eta = \frac{t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} - t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} + \left(-t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}} - \sum_{i=0}^m P_{2+i} \cdot \left(B_0 + B_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{B_2}}\right)\right)}{\left(2 \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot P_1 \cdot Q_{komp1} \cdot \left(\left(\frac{P_{2+i}}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{mex} \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{priv}}\right)^2 + t_1 \cdot \sum_{i=0}^m 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}} + \frac{-t_1 \cdot \sum_{i=0}^m P_{2+i} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{C_2}}\right) - t_2 \cdot \sum_{i=m}^k P_{2+i} \cdot \left(C_0 + C_1 \cdot e^{-\frac{P_{2+i}}{C_2}}\right)}{\frac{1}{t_{pusk}} 3r_0 l \int_0^{t_{pusk}} I_n^2(t) dt}$$
(1)

де r_0 - питомий опір провідника Ом/км; l - довжина лінії, км; t_1 - тривалість увімкненого стану компресора, год; P_1 – атмосферний тиск, Па; Q_{komp1} – об'ємна продуктивність за умов всмоктування, м³/с; n – показник політропи, для поршневих компресорів; η_{priv} – ККД двигуна; η_{pol} – індикаторний ККД, політропного процесу стиснення; η_{mex} – механічний ККД, що враховує втрати тертя кривошипно-шатунного механізму і поршня компресора; U – напруга мережі живлення; P_2 – тиск у пневмомережі, Па; m – кількість ітерацій при збільшенні тиску; B_0, B_1, B_2 – розрахункові коефіцієнти продуктивності компресора; C_0, C_1, C_2 – розрахункові коефіцієнти втрат стислого повітря в пневмомережі; t_2 – тривалість вимкненого стану компресора, год; k – загальна кількість ітерацій.

Наступним етапом розрахунку є визначення часу циклу «нагнітання – зниження» тиску в пневмосистемі при фіксованому значенні витрати стислого повітря. Знати тривалість інтервалу «ниження – нагнітання» тиску T_{hc} необхідно для знаходження значення кількості пусків в годину приводу поршневої компресорної установки, оскільки в математичній моделі введено обмеження за кількістю запусків на годину, виходячи з температурного режиму роботи асинхронного приводу.

Далі визначаються залежності максимального оптимального верхнього рівня тиску від витрати споживаного приймачами стислого повітря $P_{max\ opt} (Q_{potr})$, оптимального ККД від витрати стислого повітря $ККД_{opt} (Q_{potr})$, а також часу циклу і кількості пусків в годину від витрати стислого повітря. Ці залежності наведені на рис. 1, 2. Необхідність таких розрахунків обумовлена тим, що витрата стислого повітря, споживаного пневмоприймачами Q_{potr} , є незалежною змінною величиною.

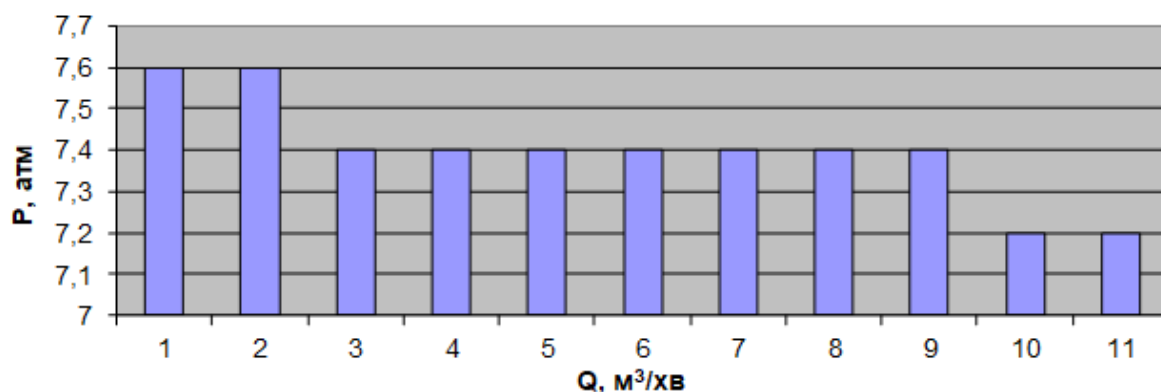


Рис. 1 Залежність оптимального верхнього рівня тиску від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря

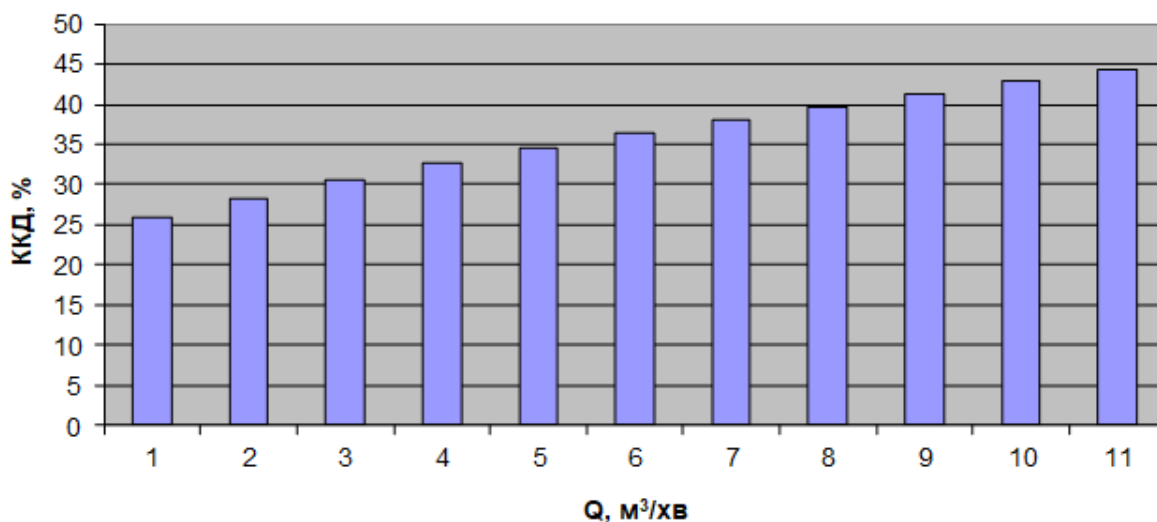


Рис. 2 Залежність оптимального ККД від витрати стислого повітря, споживаного приймачами стислого повітря

У результаті моделювання параметрів режиму роботи електромеханічної системи отримано три залежності: споживання енергії електромеханічної системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску; при двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями. Ці залежності розглянуті на рис. 3 – 5 для витрати стислого повітря 7 м³/хв. Необхідно підкреслити, що всі залежності побудовані для однієї, спочатку заданої витрати стислого повітря Q_{potr} .

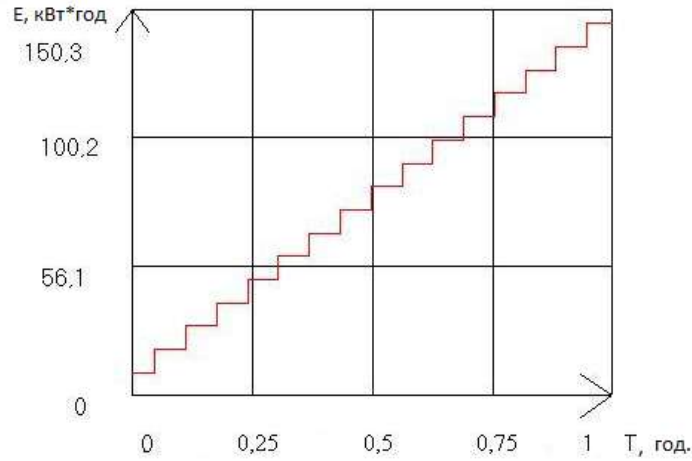


Рис. 3 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування

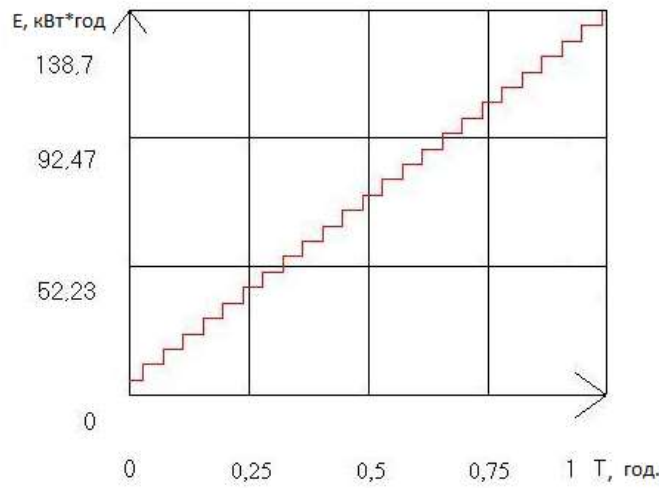


Рис. 4 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску

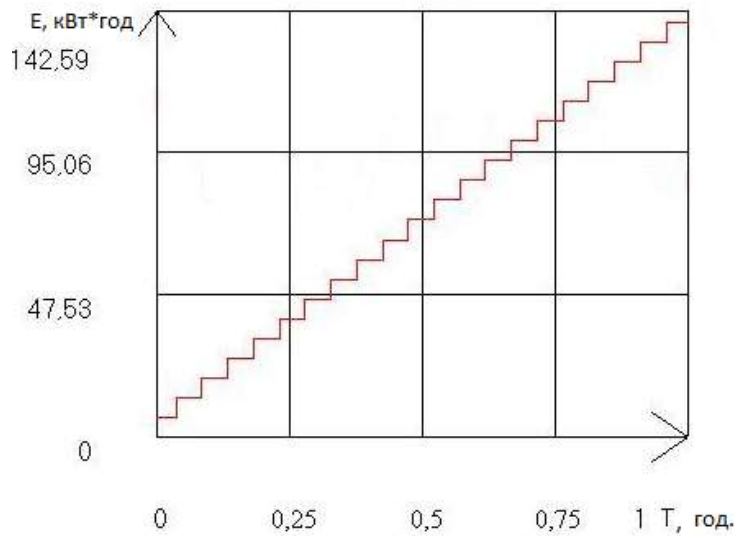


Рис. 5 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину при класичному двопозиційному методі керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і встановленими обмеженнями

При порівнянні значень (Таб. 1) кількості електроенергії, споживаною електромеханічною системою за одну годину, з класичним двопозиційним керуванням і двопозиційним керуванням з оптимальним верхнім рівнем тиску бачимо, що економія електроенергії становить від 0,76% до 13,50% для різних витрат стислого повітря. Чітко простежується тенденція: зі збільшенням споживання стислого повітря пневмоприймачами зростає різниця між цими двома методами керування. Це пояснюється тим, що інтервал нагнітання при великих витратах стислого повітря набагато (до 10 разів) більше періоду зниження тиску в пневмосистемі, а тому велика частина втрат енергії в електромеханічній системі відбувається саме на інтервалі нагнітання тиску. Отже, при використанні оптимального верхнього рівня тиску істотно знижуються як тривалість підвищення тиску в пневмосистемі, так і втрати енергії в електромеханічній системі.

Таблиця 1 Залежність споживання електроенергії електромеханічною системою за одну годину, при різних методах керування

| Класичне двопозиційне керування, кВт·год | Двопозиційне керування з оптимальним верхнім рівнем тиску, кВт·год | Різниця у відсотках | Класичне двопозиційне керування, кВт·год | Двопозиційне керування з оптимальним верхнім рівнем тиску і обмеженнями за кількістю пусків, кВт·год | Різниця у відсотках |
|--|--|---------------------|--|--|---------------------|
| 94,7 | 86,5 | 8,66% | 94,7 | 94,7 | 0,00% |
| 100,3 | 95,9 | 4,39% | 100,3 | 100,3 | 0,00% |
| 105 | 96,4 | 8,19% | 105 | 104,2 | 0,76% |
| 111,2 | 101,2 | 8,99% | 111,2 | 109,8 | 1,26% |
| 116,8 | 108,7 | 6,93% | 116,8 | 113,5 | 2,83% |
| 122,1 | 113,5 | 7,04% | 122,1 | 117,5 | 3,77% |
| 128,1 | 118,2 | 7,73% | 128,1 | 121,5 | 5,15% |
| 134,1 | 123,6 | 7,83% | 134,1 | 125,5 | 6,41% |
| 140,5 | 129,2 | 8,04% | 140,5 | 129,2 | 8,04% |
| 147,7 | 130,7 | 11,51% | 147,7 | 132,8 | 10,09% |
| 157 | 135,8 | 13,50% | 157 | 135,8 | 13,50% |

При порівнянні значень кількості електроенергії, спожитої при класичному двопозиційному керуванні і двопозиційному з оптимальним верхнім рівнем тиску та обмеженнями за кількістю пусків бачимо, що при малих витратах стислого повітря в силу вступає обмеження, а при великих – збільшується економія електроенергії. Пояснюється це тим, що час циклу збільшення – зниження тиску змінний. Чим більше витрата стислого повітря, тим більше час циклу і менша кількість пусків привідного двигуна за годину. Відповідно, справедливо і зворотне твердження. Слід зазначити, що система керування електроспоживанням при використанні оптимального верхнього рівня тиску виходить за межі встановлених обмежень. Вона визначає таке значення верхньої межі тиску, при якому найбільш повно використовується допустима кількість пусків поршневої компресорної установки за годину.

У результаті реалізації розробленої математичної моделі отримані оптимальні значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистемі $P_{\max opt}$, відповідного максимуму цільової функції (ККД), при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} в встановлених обмеженнях.

Висновки. Отримані оптимальні значення максимального верхнього рівня тиску в пневмосистемі $P_{\max opt}$, відповідного максимуму цільової функції (ККД), при різних фіксованих витратах стислого повітря пневмоприймачами Q_{potr} і встановлених обмеженнях. Розрахунок значень ККД при оптимальних параметрах режиму свідчить про те, що зростання витрат стислого повітря супроводжується підвищенням ККД системи "електрична мережа – привід – компресор – пневмомережа" в цілому.

Пропонований варіант регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску забезпечує зменшення витрат електричної енергії, споживаної розглянутою електромеханічною системою. У зіставленні з класичним двопозиційним регулюванням економія досягається в межах 1 ... 13% в залежності від значень витрат стислого повітря, споживаного пневмоприймачами.

Список літератури

1. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров. Технічна електродинаміка. -№3.-2004.- с.70-71.
2. Бобров О.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса / О.В. Бобров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Наук.-виробн. журнал. – Кременчук: КНУ, 2011.-Вип. 4. (16). – С. 124.
3. Бобров А.В., Безкровный В.О. Допущения и ограничения в расчете кпд электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» / Бобров А.В., Безкровный В.О. // Молодь: наука та інновації 2016: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (6-7 грудня 2016 р., Дніпро): тез. Доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. Гірн. Ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2016. – С.11-8 – 11-10.
4. Бобров О.В. Оптимізація режиму роботи електромеханічної системи виробництва та розподілу стислого повітря: дис. ... канд. тех. наук : спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи"/ М-во освіти і науки України, ДВНЗ "Нац. гірн. ун-т".- Дніпропетровськ, 2015.- 166 с.
5. Бобров А.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса: Т.1. Материалы междунар. молодёжной науч.-техн. конф. "Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование", 21–25 ноября 2011 г. – Самара: СамГТУ, 2011. – 423 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.833

Д.О. Федін, канд. техн. наук, Б.В. Виноградов, докт. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»)

ПАРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

***Анотація.** Приведено літературний огляд математичних моделей динаміки механічних систем приводів барабаних млинів. Запропоновано загальну еквівалентну динамічну модель механічної системи приводу барабанного млина з урахуванням як крутильних, так і поперечних коливань елементів приводу. Встановлено, що загальна динамічна модель механічної системи приводу барабанного млина може бути поділена на дві парціальні моделі: високочастотну та низькочастотну. Показано, що при визначенні власних частот коливань механічної системи приводу барабанного млина необхідно враховувати поперечні коливання приводної шестерні. Показано, що похибка визначення власних частот механічної системи приводу барабанного млина при дослідженні парціальних моделей не перевищує 5%.*

***Ключові слова:** привод, барабанный млин, коливання, власна частота.*

***Аннотация.** Приведен литературный обзор математических моделей динамики механических систем барабанных мельниц. Предложено общую эквивалентную динамическую модель механической системы привода барабанной мельницы с учетом как крутильных, так и поперечных колебаний элементов привода. Установлено, что общая динамическая модель механической системы привода барабанной мельницы может быть разделена на две модели: высокочастотную и низкочастотную. Показано, что при определении собственных частот механической системы привода барабанной мельницы необходимо учитывать поперечные колебания приводной шестерни. Показано, что погрешность определения собственных частот механической системы привода барабанной мельницы при исследовании парциальных моделей не превышает 5%.*

***Ключевые слова:** привод, барабанная мельница, колебания, собственная частота.*

***Abstract.** The critical review of mathematical models of mechanical systems of tumbling mill drives is presented. The general equivalent dynamical model of mechanical systems of tumbling mill drive is suggested. It is found out that general equivalent dynamical model of mechanical systems of tumbling mill drive can be separated into low-frequency and high-frequency models. It is shown that it is necessary to consider transverse oscillations of drive pinion while natural frequencies of mechanical systems of tumbling mill drive are considering. It is shown that when partial systems are determined the error of determination of natural frequency of mechanical system of tumbling mill drive is up to 5%.*

***Keywords:** drive, tumbling mill, vibration, natural frequency.*

Введение. Барабанные мельницы, привод которых оснащен открытой зубчатой передачей, широко используются в промышленности. При этом создаются мельницы с все более мощным приводом. Однако, укрупнение единичной мощности приводит к увеличению статических и динамических нагрузок, снижающих прочность и надежность зубчатых передач. Отсутствие научно-обоснованных методов расчета, учитывающих особенности конструкции и режимов работы механических систем привода барабанных мельниц сдерживает создание машин большой единичной мощности.

Анализ исследований. Сложность описания динамических процессов в приводе барабанной мельницы заключается в том, что он представляет собой сложную механическую систему, состоящую из подсистем, в различной степени связанных между собой. Выделение и точное описание подсистем позволит создать динамическую модель, на основании анализа которой на стадии проектирования будет обеспечена большая прочность и надежность привода барабанной мельницы.

Обычно при исследовании динамики пуска и установившегося движения мельниц в качестве расчетной схемы привода используют обобщенную 2-массовую систему, где приведенные массы ротора двигателя и деталей передачи соединены эквивалентной упругой связью и совершают крутильные колебания [1, 2]. Однако известно, что вследствие податливости опор приводной узел совершает поперечные колебания, которые влияют на крутильные колебания и передаются на фундамент [3]. Кроме того, механическая система привода содержит муфты, относительно меньшая жесткость которой, обуславливает слабую связь между динамическими процессами в разделяемой ею частях системы. Все это свидетельствует о необходимости рационального выбора парциальных систем механической системы привода барабанной мельницы и точности описания их динамики.

Цель работы – выбор и обоснование динамических моделей парциальных систем механической системы привода барабанной мельницы.

Обоснование расчетной схемы. Механическая система привода открытой зубчатой передачи барабанной мельницы представляет собой сложную систему пространственно-ориентированных инерционных, упругих и диссипативных элементов. Кинематическая схема привода мельницы может быть представлена как на рис. 1.

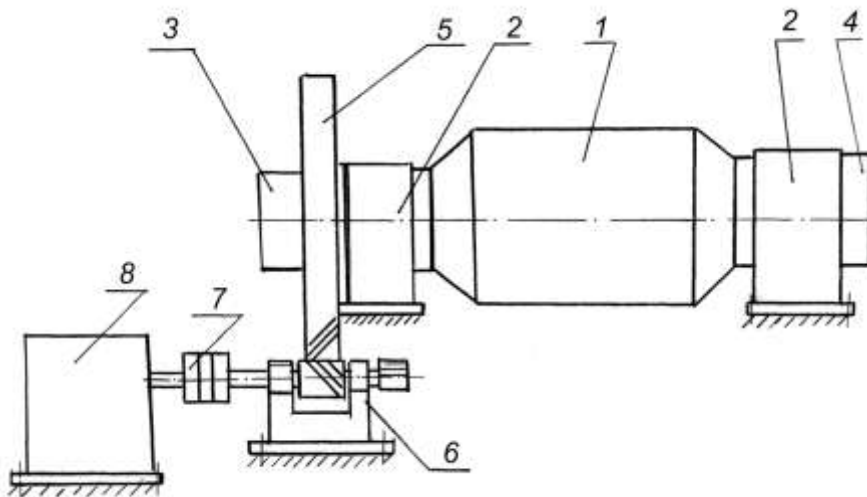


Рис. 1 Кинематическая схема механической системы привода барабанной мельницы:
1 – барабан; 2 – подшипники; 3 – разгрузочная цапфа; 4 – загрузочная цапфа; 5 – зубчатое колесо;
6 – приводной узел; 7 – упругая муфта; 8 – синхронный электродвигатель.

Электромагнитные процессы в синхронном двигателе оказывают существенное влияние на динамические процессы в механической системе привода в период пуска и установившегося режима работы [4]. Наиболее полно электромагнитные процессы в двигателе описываются уравнениями Парка-Горва:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_d}{dt} = U_m \sin \theta - i_d r_a - \Psi_q \omega \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = U_m \cos \theta - i_q r_a - \Psi_d \omega \\ \frac{d\Psi_f}{dt} = U_f - i_f r_f \\ \frac{d\Psi_{\varepsilon d}}{dt} = -i_{\varepsilon d} r_{\varepsilon d} \\ \frac{d\Psi_{\varepsilon q}}{dt} = -i_{\varepsilon q} r_{\varepsilon q} \\ M_{\varepsilon m} = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H} (M_{\varepsilon m} - M_c) \\ \frac{d\theta}{dt} = 1 - |\omega| \end{array} \right. , \quad (1)$$

где

$$i_d = \frac{\Psi_d}{X_d''} - \frac{\Psi_f}{X_{df}''} - \frac{\Psi_{\varepsilon d}}{X_{\varepsilon d}''}; \quad i_q = \frac{\Psi_q}{X_q''} - \frac{\Psi_{\varepsilon q}}{X_{q\varepsilon}''}; \quad i_f = \frac{\Psi_f}{X_f''} - \frac{\Psi_d}{X_{df}''} - \frac{\Psi_{\varepsilon d}}{X_{f\varepsilon d}''};$$

$$i_{\varepsilon d} = \frac{\Psi_{\varepsilon d}}{X_{\varepsilon d}''} - \frac{\Psi_d}{X_{d\varepsilon d}''} - \frac{\Psi_f}{X_{f\varepsilon d}''}; \quad i_{\varepsilon q} = \frac{\Psi_{\varepsilon q}}{X_{\varepsilon d}''} - \frac{\Psi_q}{X_{d\varepsilon q}''};$$

где Ψ_d, Ψ_q – потокосцепление обмотки статора продольной и поперечной оси соответственно; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения; $\Psi_{\varepsilon d}, \Psi_{\varepsilon q}$ – потокосцепление демпферной обмотки по продольной и поперечной оси соответственно; U_m – амплитуда фазного напряжения; U_f – напряжение обмотки возбуждения; ω – угловая скорость вала; H – момент инерции; $M_{\varepsilon m}$ – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления; θ – угол между вектором приведенной в статоре е.д.с. от тока возбуждения и вектором напряжения сети; $r_a, r_f, r_{\varepsilon d}, r_{\varepsilon q}$ – активные сопротивления фазы статора, обмотки возбуждения, демпферной обмотки по продольной и поперечной оси соответственно; $X_d, X_f, X_{\varepsilon d}, X_{df}, X_{d\varepsilon d}, X_{f\varepsilon d}, X_q, X_{\varepsilon q}, X_{q\varepsilon q}$ – сверхпереходные сопротивления.

Исследования динамики синхронного привода показали, что использование уравнений (1), как правило оправдано только в период пуска. При исследовании динамических процессов в установившемся режиме целесообразно синхронный двигатель представить механическим аналогом (рис. 2) [5]. Использование упрощенной модели оправдано еще и тем, что входящие в систему уравнений (1) параметры отсутствуют в справочной литературе.

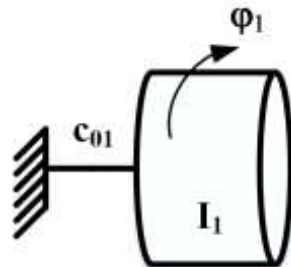


Рис. 2 Кинематическая модель синхронного двигателя

Авторами на основе уравнений Парка-Горева (1) предложен метод определения крутильной электромагнитной жесткости синхронного двигателя. В результате анализа расчетных данных показано, что

электромагнитная жесткость синхронного двигателя при исследовании малых колебаний может быть представлена в виде:

$$c_{01} = \frac{M_{НОМР}}{\theta} = \mu \frac{N}{n^3}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где N – мощность двигателя, n – частота вращения вала, μ – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, применяя метод сосредоточенных масс при рассмотрении динамики механической системе привода в установившемся режиме работы можно перейти к эквивалентной динамической модели, приведенной на рис. 3, где I_1, I_2, I_3 – момент инерции ротора, шестерни и барабана; m – масса приводного узла, совершающего вертикальные колебания; c_{01}, c_{12}, c_{23} – крутильные жесткости двигателя, вала-провода с упругой муфтой и зубчатого зацепления; c_2 – поперечная жесткость приводного узла; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – углы поворота соответствующих сосредоточенных масс; x – перемещения ешестерни в вертикальной плоскости.

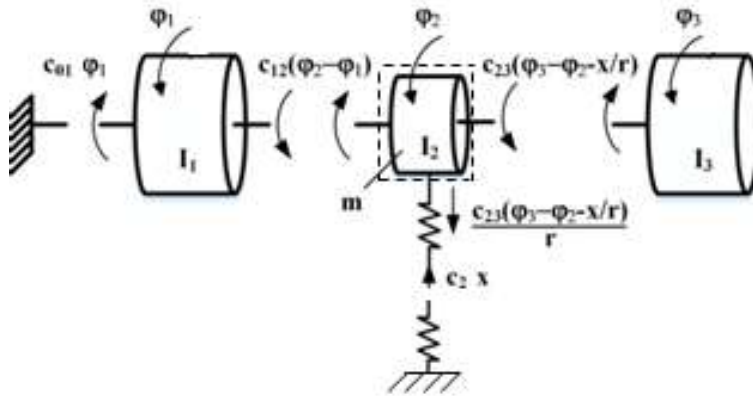


Рис. 3 Динамическая расчетная схема привода барабанной мельницы

Обоснование математической модели. Применяя метод Лагранжа последовательно к каждому элементу системы получаем систему дифференциальных уравнений свободных колебаний механической системы привода барабанной мельницы:

$$\begin{cases} I_1 \varphi_1'' = -c_{01} \varphi_1 + c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1); \\ I_2 \varphi_2'' = -c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) + c_{23} r^2 \left(\varphi_2 - \varphi_3 - \frac{x}{r} \right); \\ I_3 \varphi_3'' = -c_{23} r \left(\varphi_2 - \varphi_3 - \frac{x}{r} \right) r; \\ m x'' = -c_2 x + c_{23} r \left(\varphi_3 - \varphi_2 - \frac{x}{r} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения системы (2) позволяют определить собственные частоты механической системы привода. Для этого будем искать решение системы уравнений (2) в виде:

$$q_i = A_i \sin(kt + \alpha), \quad i=1, 2, \dots, 4; \quad (3)$$

где q_i – i -я координата; k – общая для всех координат частота; A_i – амплитуды колебаний; α – сдвиг фаз. Подставляя выражение (3) в (2) получаем систему алгебраических уравнений однородную относительно неизвестных амплитуд A_i :

$$\begin{cases} -A_1 I_1 k^2 + A_1 (c_{01} + c_{12}) - A_2 c_{12} = 0; \\ -A_1 c_{12} + A_2 c_{12} - A_2 c_{23} r^2 - A_2 I_2 k^2 + \\ \quad + A_3 c_{23} r^2 + A_4 c_{23} r = 0; \\ A_2 c_{23} r^2 - A_3 c_{23} r^2 - A_3 I_3 k^2 - A_4 c_{23} r = 0; \\ A_2 c_{23} r - A_3 c_{23} r + A_4 (c_{23} + c_2) - A_4 m k^2 = 0. \end{cases}$$

При колебаниях все амплитуды A_i не могут равняться нулю. Следовательно, согласно общему свойству однородных систем уравнений, должен равняться нулю определитель, составленный из коэффициентов системы:

$$\begin{vmatrix} (c_{01} + c_{12}) - I_1 k^2 & -c_{12} & 0 & 0 \\ -c_{12} & c_{12} - c_{23} r^2 - I_2 k^2 & c_{23} r^2 & c_{23} r \\ 0 & c_{23} r^2 & -c_{23} r^2 - I_3 k^2 & -c_{23} r \\ 0 & c_{23} r & -c_{23} r & (c_{23} + c_2) - m k^2 \end{vmatrix} = 0$$

Раскрывая определитель, получаем частотное уравнение:

$$Ak^8 + Bk^6 + Ck^4 + Dk^2 + E = 0, \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned} A &= I_1 I_2 I_3 m; \\ B &= -I_2 I_3 m c_{01} - (I_1 + I_2) I_3 m c_{12} + (I_2 m r^2 - I_2 I_3 + I_3 m r^2) I_1 c_{23} - I_1 I_2 I_3 c_2; \\ C &= (I_3 m c_{12} + (I_2 I_3 - I_2 m r^2 - I_3 m r^2) c_{23} + I_2 I_3 c_2) c_{01} + ((I_1 I_3 + I_2 I_3 - (I_1 + I_2 + I_3) m r^2) c_{23} + (I_1 I_3 + I_2 I_3) c_2) c_{12} - \\ &\quad - 2(I_2 + I_3) I_1 r^2 c_{23}^2 - (I_2 + I_3) I_1 r^2 c_2 c_{23}; \\ D &= \left(\begin{matrix} (m r^2 - I_3) c_{23} - I_3 c_2 \\ + (I_2 + I_3) (2c_{23} + c_2) r^2 c_{23} \end{matrix} \right) c_{12} c_{01} + ((2c_{23} + c_2) (I_1 + I_2 + I_3) r^2 c_{23}) c_{12}; \\ E &= (2r c_{23} + c_2) r^2 c_{12} c_{01} c_{23}. \end{aligned}$$

Аналитическое решение уравнения представляется слишком сложным, что диктует необходимость использования численных методов для нахождения его корней.

Рассмотрим возможность упрощения эквивалентной динамической модели механической системы привода барабанной мельницы разбиением ее на парциальные системы.

Известно, что жесткость зубчатой передачи c_{23} и поперечная жесткость вала-шестерни на опоре c_2 намного больше крутильной жесткости приводного вала, тем более оснащенного упругой муфтой. Это позволяет сделать допущение о слабой связи колебательных процессов в системах, разделенных этим валом, и представить эквивалентную динамическую модель механической системы привода барабанной мельницы двумя парциальными колебательными системами:

- высокочастотной, состоящей из вала-шестерни, находящейся в зацеплении с барабаном очень большой массы и совершающей совместно крутильные и поперечные колебания (рис. 4,а);

- низкочастотной, совершающей крутильные колебания, состоящей из ротора двигателя, находящегося под действием электромагнитной упругой связи, и барабана мельницы, связанных между собой упругим валом (рис. 4,б).

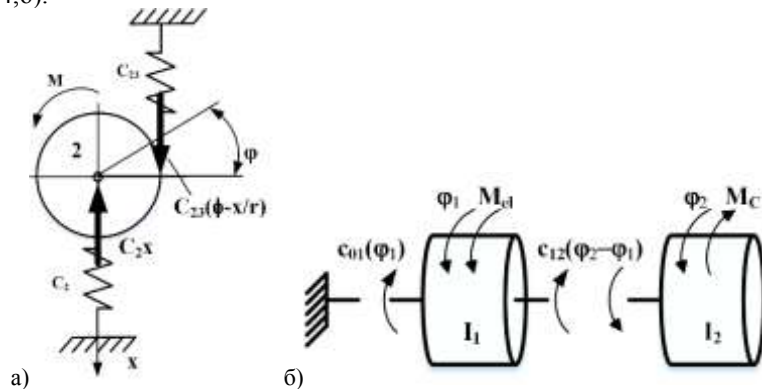


Рис. 4 Парциальные системы механической системы приводного узла

Рассмотрим высокочастотную парциальную систему. Вал-шестерня с моментом инерции I_2 находится в зубчатом зацеплении жесткостью c_{23} с венцом барабана. Вследствие того, что момент инерции барабана на несколько порядков больше момента инерции вала-шестерни, массу барабана можно принять бесконечно большой. Вал-шестерня находится на упругом основании жесткостью c_2 , эквивалентной жесткости в поперечном направлении вала, подшипников и опор с фундаментом.

Применяя метод Лагранжа получаем систему дифференциальных уравнений свободных колебаний парциальной системы привода барабанной мельницы:

$$\begin{cases} I_2 \varphi_2'' = -c_{23}r(\varphi_2 r - x) \\ m x'' = -c_2 x + c_{23}(\varphi_2 r - x) \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения системы (5) позволяют определить высокие собственные частоты механической системы привода. Однако, в отличие от системы (2), решение двухмассовой системы (5) проще, так как его частотное уравнение является биквадратным [5]. Подставляя решение в форме (3) в систему (5) и приравниваем нулю определитель полученной системы уравнений, получаем:

$$\begin{vmatrix} c_{23}r^2 - I_2 k^2 & -c_{23}r \\ -c_{23}r & c_{23} + c_2 - k^2 m \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

Раскрывая определитель (6) получаем частотное уравнение:

$$I \cdot m k^4 - (c_{23} m r^2 + I_2 c_{23} + I_2 c_2) k^2 + c_{23} c_2 r^2 = 0, \quad (7)$$

которое является биквадратным и корни которого можно определить, как:

$$k_{1,2}^2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} A &= I_2 m; \\ B &= -I_2 (c_{23} + c_2) - c_{23} m r^2; \\ C &= c_2 c_{23} r^2. \end{aligned}$$

Выражение (8) может быть использовано для определения высоких собственных частот механической системы привода в инженерных расчётах.

Рассмотрим низкочастотную парциальную систему (рис. 4, б). Ротор двигателя с моментом инерции I_1 приводится во вращение электромагнитным полем, создающим электромагнитный момент $M_{ЭМ}$. Крутящий момент передается барабану с приведенным моментом инерции $I_2 = I_1$, на который в свою очередь действует момент сопротивления M_c . Муфту, валопровод и вал-шестерни заменим упругой связью, крутильная жесткость которой равна жесткости наименее жесткой части валопровода c_{12} .

Применяя метод Лагранжа получаем систему дифференциальных уравнений свободных колебаний парциальной системы привода барабанной мельницы:

$$\begin{cases} I_1 \varphi_1'' = -c_{01} \varphi_1 + c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) \\ I_2 \varphi_2'' = -c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) \end{cases} \quad (9)$$

Подставляя решение в форме (3) в систему (9) и приравниваем нулю определитель полученной системы уравнений, получаем:

$$\begin{vmatrix} c_{01} + c_{12} - I_1 k^2 & -c_{12} \\ -c_{12} & c_{12} - I_2 k^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

Раскрывая определитель (10) получаем частотное уравнение:

$$I_1 I_2 k^4 - (I_2 c_{01} + I_2 c_{12} + I_1 c_{12}) k^2 + c_{01} c_{12} = 0, \quad (11)$$

которое является биквадратным и корни которого также можно определить из выражения (8) при:

$$\begin{aligned} A &= I_1 I_2; \\ B &= -(I_2 c_{01} + I_2 c_{12} + I_1 c_{12}); \\ C &= c_{01} c_{12}. \end{aligned}$$

Гармонический анализ механической системы привода. В табл. 1 приведены основные динамические параметры механических систем приводов мельниц МРГ 5500х7500 и МШЦ 5500х6500. Подставляя данные табл. 2 в частотное уравнение (5) и решая его любым из приведенных в [5] методов, получаем собственные частоты системы k_1, k_2, k_3 и k_4 (табл. 2).

Таблица 1

Основные динамические параметры зубчатой передачи барабанных мельниц МРГ 5500х7500 и МШЦ 5500х6500

| Параметр | Обозначение | Значение | |
|---|-----------------------------------|-------------------|--------------------|
| | | МРГ 5500х7500 | МШЦ 5500х6500 |
| Приведенный момент инерции ротора двигателя | $I_1, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ | $19,3 \cdot 10^3$ | $250,0 \cdot 10^3$ |
| Приведенный момент инерции приводной шестерни | $I_2, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 372,4 | 377,0 |
| Приведенная масса вала-шестерни | $m, \text{кг}$ | $9,0 \cdot 10^3$ | $9,0 \cdot 10^3$ |
| Приведенный момент инерции барабана | $I_3, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 19325,0 | $250,0 \cdot 10^3$ |
| Крутильная жесткость электромагнитного поля двигателя [2] | $C_{01}, \text{Н} \cdot \text{м}$ | $2,0 \cdot 10^7$ | $13,5 \cdot 10^7$ |
| Крутильная жесткость валопровода | $C_{12}, \text{Н} \cdot \text{м}$ | $2,2 \cdot 10^7$ | $1,8 \cdot 10^7$ |
| Жесткость зубчатой передачи [6] | $C_{23}, \text{Н} \cdot \text{м}$ | $6,2 \cdot 10^8$ | $6,2 \cdot 10^8$ |
| Линейная жесткость вала-шестерни и опор | $C_2, \text{Н/м}$ | $35,0 \cdot 10^9$ | $35,0 \cdot 10^9$ |

Таблица 2

Собственные частоты механической системы приводов барабанных мельниц МРГ 5500х7500 и МШЦ 5500х6500

| Частота | Значение, с^{-1} | | | | | |
|---------|---------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| | МРГ 5500х7500 | | | МШЦ 5500х6500 | | |
| | Общая модель | Высокочастотная модель | Низкочастотная модель | Общая модель | Высокочастотная модель | Низкочастотная модель |
| k_1 | 19 | - | 20 | 8 | - | 8 |
| k_2 | 53 | - | 54 | 25 | - | 25 |
| k_3 | 1177 | 1140 | - | 1159 | 1142 | - |
| k_4 | 2231 | 2231 | - | 2230 | 2231 | - |

В ряде работ по исследованию динамики зубчатого зацепления пренебрегают поперечной жесткостью шестерни, обусловленной податливостью вала шестерни и подшипникового узла. Оценку такого допущения получим, принимая $x=0$ в высокочастотной парциальной модели (рис. 4, а), описываемой уравнениями (5). Расчеты показывают, что такое допущение приводит при определении собственной частоты крутильных колебаний шестерни к ошибке, равной 10%.

Выводы. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

- эквивалентную динамическую схему привода барабанной мельницы можно представить в виде двух парциальных систем, одна из которых позволяет исследовать низкочастотные, а вторая – высокочастотные динамические процессы; сравнение значений собственных частот, определенных по общей и парциальным системам показало, что различие не превышает 5%.

- при исследовании динамики зубчатого зацепления открытой зубчатой передачи необходимо учитывать поперечные колебания шестерни, обусловленные поперечной податливостью вала, подшипников и других упругих элементов опоры вала. Расчет собственной частоты колебаний зубчатого зацепления открытой передачи барабанных мельниц без учета поперечных колебаний с одной стороны приводит к

10%-ной ошибке определения собственной частоты, а с другой – к потере одной из высоких собственных частот колебаний системы.

Список литературы

1. Сушкова О.А. Обобщенные расчетные схемы и динамика шаровых мельниц с синхронным электроприводом / О.А. Сушкова // Вестник КазНТУ. – 2011, №1(83) – С.8-13.
2. Багдасарян М.К. Математическая модель для исследования электромеханической системы мельница-двигатель / М.К. Багдасарян, С.С. Алавердян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. «Технические науки». – 2013, Т. LXVI. – №2. – С. 148-155.
3. Виноградов Б.В. Статика і динаміка барабаних млинів / Б.В. Виноградов // Дніпропетровськ: УДХТУ, 2016.– 202 с.
4. Виноградов Б.В. Механический аналог синхронного двигателя / Б.В. Виноградов, Д.А. Федин // Науковий вісник НГУ. – 2012, №1. – 78-82 с.
5. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер // под ред. Э. И. Григолюк. – М.: Машиностроение. – 1985. – 472 с.
6. Виноградов Б.В. The stiffness of the open gearing of tumbling mill / Б.В. Виноградов, Д. А. Федин // Науковий вісник НГУ, 2016, № 2 – С. 24-29.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Кузяєвим І.М.

УДК 622.271:622.236

П.Н. Щербак, С.Е. Тимченко канд-ты техн наук, Г.И. Торощев
(Украина, Днепр, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)

**УСТРОЙСТВО ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ КРЕПОСТИ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ
ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ШАРОШЕЧНОГО ИХ БУРЕНИЯ**

***Анотація.** Наведена технічна розробка і конструктивне вирішення пристрою оперативного контролю міцності і тріщиноватості гірських порід у застосуванні до системи автоматичного керування шарошечними буровими станками. Встановлений розподіл сумарної кількості імпульсів, які поступають з датчиків первинної інформації по інтервалах вимірювання, відповідно до статистичної функції буріння.*

***Ключові слова.** Міцність і тріщиноватість порід, функція, блок-схема, пристрій, імпульс.*

***Аннотация.** Представлена техническая разработка и конструктивное решение устройства оперативного контроля крепости и трещиноватости горных пород применительно к системе автоматического управления шарошечными буровыми станками. Установлено распределение суммарного количества импульсов, поступающих с датчиков первичной информации по интервалам измерения, согласно статистической функции бурения.*

***Ключевые слова.** Крепость и трещиноватость пород, функция, блок-схема, прибор, импульс.*

***Abstract.** Given paper presents a technical development and engineering solution for operational monitoring the rock strength and fracturing applied to the automatic control system of roller-bit drill. It introduces a distribution of total number of impulses that come from the raw information sensors by measurement interval accordingly to drilling statistical function.*

***Keywords:** rock strength and fracturing, function, chart, device, impulse.*

Введение. Добыча скальных полезных ископаемых открытым способом предусматривает предварительное их дробление с помощью буро-взрывных работ (БВР), т.е. подготовку горной массы требуемой кусковатости. Технично-економические показатели этой технологической операции существенно зависят от эксплуатационных затрат на бурение скважин, которое в большом объеме выполняется для каждого массового взрыва. Однако, управление шарошечными буровыми станками до настоящего времени осуществляется вручную, что не позволяет эффективно использовать их технические возможности в нестабильных горно-геологических условиях. Машинист, несмотря на определенный опыт работы, не может постоянно задавать рациональные параметры управления, так как субъективно оценивает прочностные свойства пород на каждом шаге их бурения. Отсюда следует актуальность создания устройства оперативного контроля крепости и трещиноватости пород как основного информационного блока системы автоматического управления шарошечными буровыми станками.

Анализ существующих исследований. Создание технических средств оперативного контроля прочностных свойств горных пород, залегающих на каждом взрываемом массиве, привлекает своей актуальностью научных и инженерно-технических работников. Заслуживают особенного внимания многолетние исследования, позволившие оценивать относительную крепость пород по величине удельной энергоемкости шарошечного бурения [1]. Разработана блок-схема для ее определения по показаниям измерительной аппаратуры. Однако в этом случае не предусмотрено непосредственное измерение крепости и трещиноватости пород, чем ограничивается выбор рациональных режимов эксплуатации станка.

На уровне изобретения разработано устройство для определения прочностных свойств горных пород в процессе их шарошечного бурения [2]. Изготовлен экспериментальный его образец и даны рекомендации по определению удельного заряда взрывчатого вещества (ВВ) для наиболее вероятных результатов измерений [3]. Промышленные испытания устройства позволили установить его конструктивные и эксплуатационные недоработки применительно к системе автоматического управления буровыми станками.

Задача исследований. Расширить область исследования временных затрат шарошечного бурения скважин в зависимости от крепости пород и параметров работы станка, а также по их соответствующим результатам определить число суммарных импульсов, поступающих с датчиков первичной информации в каждом конкретном случае. Установить распределение числа импульсов по интервалам крепости пород с учетом статистической функции бурения. Представить техническую разработку и конструктивное решение устройства оперативного контроля крепости и трещиноватости пород применительно к системе автоматического управления шарошечными буровыми станками.

Изложение основного материала. Методом многофакторного статистического анализа хронометражных данных о работе шарошечных буровых станков установлено, что зависимость скорости бурения скважины от факторов, наиболее на нее влияющих, реально представить следующей степенной функцией:

$$v = kf^{a_1}p^{a_2}n^{a_3}d^{a_4}, \quad (1)$$

где v – скорость бурения скважины; k – коэффициент, учитывающий влияние второстепенных факторов, например трещиноватости; f – коэффициент крепости пород по Протодяконову; p – давление в рабочем гидроцилиндре напора станка (осевое усилие); n – частота вращения буровой штанги; d – диаметр шарошечного долота; a_i ($i = 1 \dots 4$) – показатели степени при соответствующих переменных.

Репрезентативность выборки в процессе статистических наблюдений обеспечивалась применением датчиков контроля основных показателей работы станка, надежной формой записи поступающей информации специальным элементом на термочувствительную поверхность диска, а также лабораторными испытаниями на одноосное сжатие образцов, изготовленных из тех же пород, в которых бурились скважины. Значения показателей a_i определены с использованием методики, рассмотренной в [4] применительно к технологии ведения горных работ.

С помощью логарифмирования выражение (1) приведено к линейному уравнению регрессии

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4, \quad (2)$$

где y , a_0 , x_i – соответственно $\ln v$, $\ln k$, $\ln(f, p, n, d)$.

В результате корреляционного исследования уравнения (2) с последующим потенцированием получена формула для определения мгновенной скорости шарошечного бурения, т.е.

$$v = k \sqrt[4]{\frac{pn}{f^4 d}}, \quad (3)$$

Из уравнения (3) получаем что

$$f = \sqrt[4]{\frac{k^2 pn}{v^2 d}}. \quad (4)$$

Как правило, на каждом карьере применяют шарошечные долота одинакового диаметра, что позволяет рассматривать параметр d в виде постоянной величины на данном объекте. С учетом этого приведем выражение (4) к виду

$$f = k_1 \sqrt[4]{\frac{pn}{v^2}}, \quad (5)$$

где $k_1 = \sqrt[4]{\frac{k^2}{a}}$.

Практика учета крепости пород при проектировании массовых взрывов подтвердила целесообразность использования средних ее значений на отдельных участках скважины длиной l . Пусть $l = 1$ м, тогда p_{cp} , n_{cp} , v_{cp} – средние параметры работы станка в процессе бурения принятого участка скважины, а t – время бурения.

Причем

$$v_{cp} = \frac{1}{t}. \quad (6)$$

С учетом выражений (5) и (6) получим среднее значение крепости пород на участке скважины в 1 м при применяемом диаметре шарошечного долота

$$f = k_1 \sqrt[4]{p_{cp} \cdot n_{cp} \cdot t^2} \quad (7)$$

Установлено, что в момент пересечения шарошечным долотом раскрытой (даже не плотно сомкнутой) трещины имеет место скачкообразный спад давления в гидроцилиндре напора станка, причем длительность периода между двумя соседними спадами характеризует размер монолитного блока породы, а амплитуда изменения давления – степень раскрытия трещины. Для использования этой закономерности применен датчик, который с помощью дифференциального трансформатора преобразует давление в электрический сигнал. Его показания непрерывно регистрируются на круговой диаграмме, фрагмент такой записи показан на рис. 1.

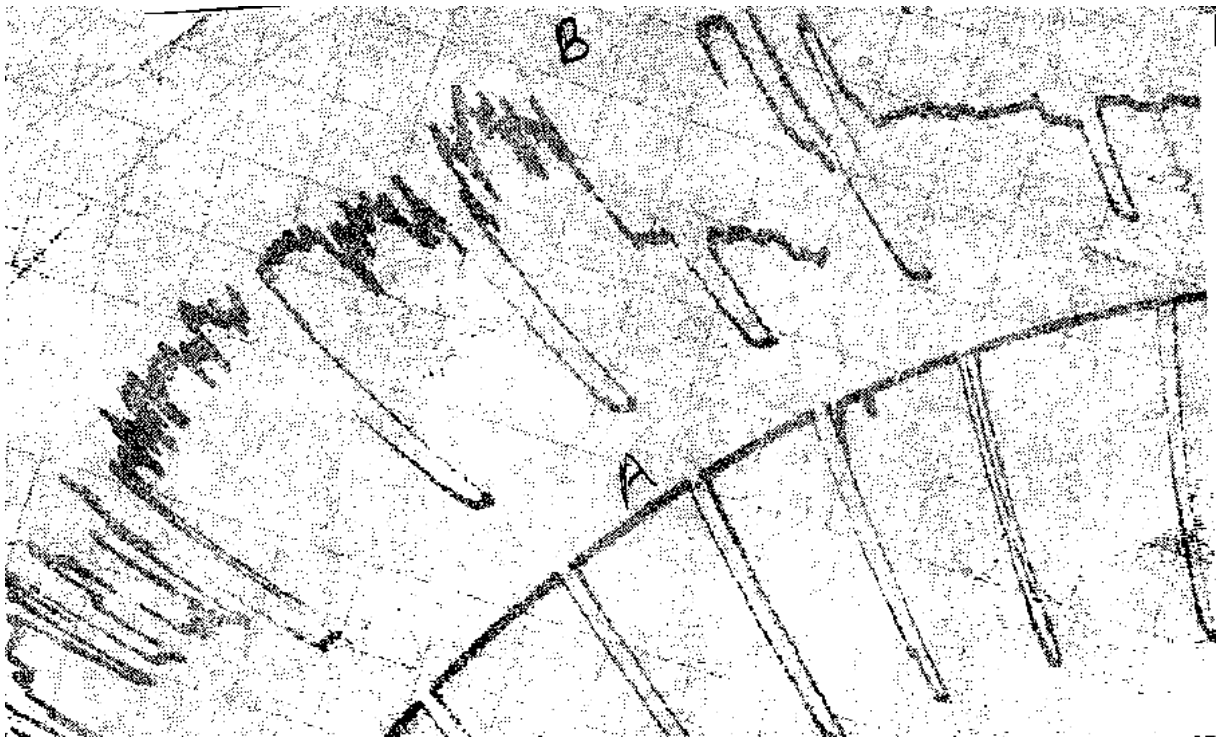


Рис. 1 Часть круговой диаграммы с регистрацией колебаний давления в гидроцилиндре станка:
А – породы выдержанной блочности; В – породы интенсивной трещиноватости

Статистическая зависимость (7) и принцип оценки естественной трещиноватости массива пород с перепадами давления в гидроцилиндре станка положены в основу работы прибора для измерения крепости и трещиноватости буримых пород на контролируемом участке скважины. Его блок-схема изображена на рис. 2.

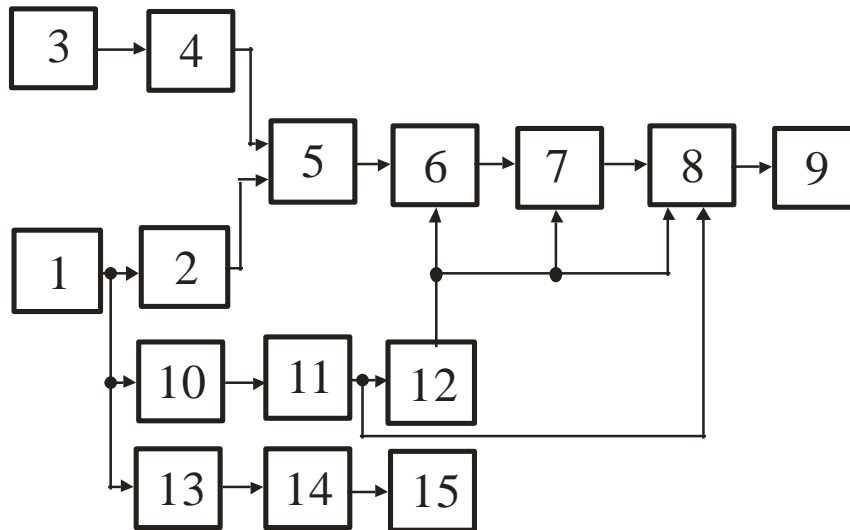


Рис. 2. Блок-схема прибора для измерения крепости и трещиноватости буримых пород

Прибор работает по принципу время-импульсного преобразования основных параметров процесса бурения контролируемого участка скважины, с последующей обработкой полученных величин по заданному алгоритму. Напряжение, пропорциональное осевому усилию на штангу, снимается с датчика 1 и подается на вход преобразователя 2 напряжения в частоту следования импульсов. Частота вращения штанги бурового станка контролируется датчиком 3, напряжение с которого поступает на вход преобразователя 4 напряжение – частота. Импульсы с преобразователей 2 и 4 поступают на вход сумматора 5, в котором происходит их суммирование. Таким образом, за время бурения исследуемого участка скважины на выходе блока 5 получаем число импульсов, пропорциональное среднему значению крепости пород на этом участке. С выхода сумматора импульсы поступают на вход 6 делителя частоты следования импульсов, где происходит их предварительное деление на такое количество, которое удобно использовать в дальнейшей обработке. При проведении измерений на участке скважины в 1 м коэффициент деления принят равным 128. Это значение обусловлено диапазоном параметров p и n , величиной выходного напряжения применяемых датчиков 1 и 3, а также выходной характеристикой преобразователей 2 и 4 напряжение-частота. После делителя 6 частоты импульсы попадают на вход блока 7 распределения импульсов по интервалам. Всего задано пять интервалов, на которые разбивается общее количество импульсов, поступающих на вход блока 7. При этом учтены особенности разрушения скальных пород взрывом.

Известно, что управление комплексом БВР с использованием оперативной информации о прочностных свойствах пород эффективно осуществлять в тех случаях, когда $12 \leq f \leq 22$. Указанный диапазон изменения коэффициента крепости принят для более точного измерения по пяти следующим интервалам: 12-14, 14-16, 16-18, 18-20, 20-22. Данное число интервалов измерения обуславливает число интервалов, на которое разбивается общее количество импульсов. Учитывая то, что зависимость коэффициента крепости пород от параметров процесса бурения имеет нелинейный характер, то количество импульсов в интервалах различно. Оно определяется с помощью блока 7 на основе формулы (7). С выхода блока 7 импульсы поступают на вход дешифратора 8, где происходит их накопление в течение времени бурения контролируемого участка скважины и дешифрация для связи с блоком 9 индикации крепости.

Напряжение, снимаемое с датчика 1 осевого усилия, поступает также на вход формирователя импульсов управления 10. Он вырабатывает управляющий импульс, передний фронт которого соответствует началу, а задний – окончанию бурения исследуемого участка скважины. По заднему фронту управляющего импульса формирователем 11 вырабатывается импульс считывания, который подается на вход разрешения дешифратора 8. При поступлении этого импульса происходит считывание информации, занесенной в дешифратор, а также вырабатывается сигнал для управления цифровыми индикаторами блока 9 отображения значений коэффициента крепости. Импульс считывания поступает также на вход формирователя 12 импульса сброса, который вырабатывает импульс очистки элементов памяти блоков 6, 7, 8. При подаче этого импульса происходит подготовка прибора к проведению измерений крепости пород последующего участка скважины.

Трещиноватость буримых пород регистрируется следующим образом. Напряжение с датчика 1 усилия поступает на вход формирователя 13 счетных импульсов. При кратковременном спаде давления в гидросистеме станка, что соответствует моменту пересечения шарошечным долотом раскрытой трещи-

ны, формирователь 13 вырабатывает импульс, соответствующий этому спаду. С выхода формирователя 13 импульсы поступают на блок 14 пересчета, который регистрирует их количество за данное время бурения и управляет цифровыми индикаторами 15 блока индикации трещиноватости. Количество импульсов, зарегистрированных этим блоком, соответствует числу трещин на измеряемом участке скважины. Сброс показателей индикаторов производится вручную после считывания результатов измерений. В приборе предусмотрена возможность проведения измерений крепости и трещиноватости пород на участке скважины протяженностью в 1 и 8 м. Последний соответствует длине одной штанги.

Принципиальная электрическая схема блока 7 распределения импульсов по интервалам показана на рис. 3. Это основной функциональный блок прибора, в котором происходит изменение коэффициента деления частоты импульсов по интервалам согласно уравнению (7). Он состоит из триггеров ($T_1 - T_5$), включенных по двоичной схеме пересчета, и логических элементов «и».

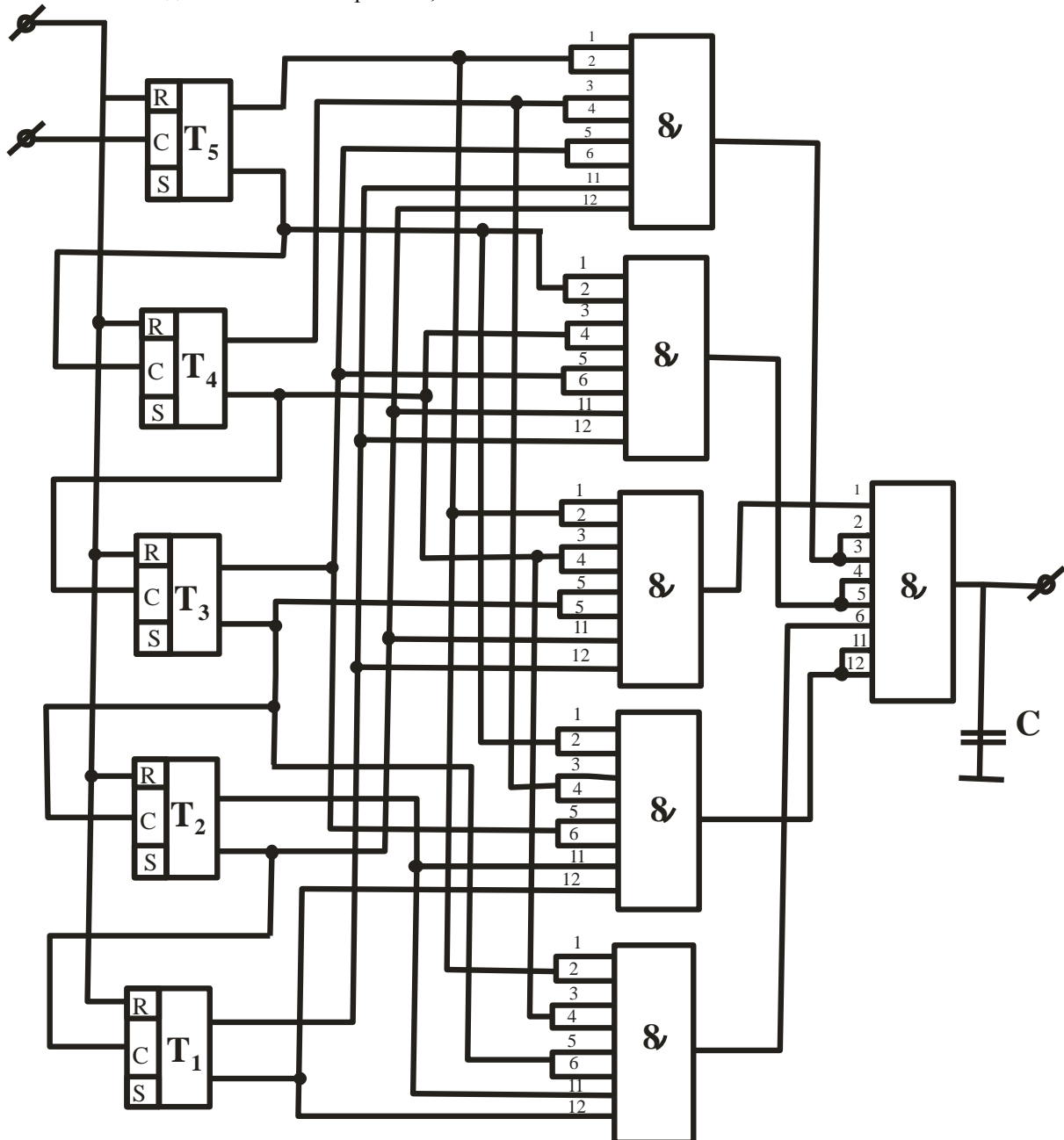


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока распределения импульсов по интервалам

Проведены многочисленные статистические исследования основных параметров работы шарошечных станков на породах различной крепости при выбранной длине участка скважины и заданной частоте преобразователей 2, 4 напряжение-частота. В результате определено суммарное количество импульсов, поступающих на вход делителя 6 частоты, а также с учетом принятого коэффициента деления

(128 на участке скважины 1 м) установлено соответствие количества импульсов, поступающих на вход дешифратора 8, величине крепости пород. Статистические исследования проводились согласно методик, изложенных в работах [4,5]. Полученные данные приведены в таблице.

Распределение суммарного количества импульсов по интервалам при бурении скважины на участке протяженностью 1 м

| Коэффициент крепости | Осевые усилия, атм | Частота вращения штанги, об/мин | Время бурения, мин | Количество импульсов, поступающих на вход | |
|----------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---|-------------|
| | | | | делителя частоты | дешифратора |
| 14 | 60 | 105 | 4,9 | 1024 | 8 |
| | | 100 | 5,1 | 1030 | 8 |
| | 65 | 100 | 4,7 | 890 | 7 |
| | | 95 | 4,8 | 920 | 7 |
| 16 | 65 | 95 | 6,5 | 1354 | 11 |
| | | 90 | 6,7 | 1359 | 11 |
| | 70 | 90 | 6,0 | 1285 | 10 |
| | | 85 | 6,3 | 1305 | 10 |
| 18 | 70 | 85 | 9,6 | 1742 | 14 |
| | | 80 | 9,8 | 1744 | 14 |
| | 75 | 80 | 8,9 | 1652 | 13 |
| | | 75 | 9,4 | 1680 | 13 |
| 20 | 75 | 75 | 10,6 | 2293 | 18 |
| | | 70 | 10,8 | 2312 | 18 |
| | 85 | 75 | 10,2 | 2153 | 17 |
| | | 70 | 10,5 | 2204 | 17 |
| 22 | 85 | 70 | 13,0 | 2924 | 23 |
| | | 65 | 13,3 | 2962 | 23 |
| | 95 | 70 | 12,4 | 2764 | 22 |
| | | 65 | 12,6 | 2793 | 22 |

Предложено конструктивное решение прибора для измерения крепости и трещиноватости пород в процессе бурения скважины, общий вид которого изображен на рис. 4. Габаритные размеры прибора 240 × 270 × 165 мм, напряжение питания 220 В, 50 Гц.



Рис. 4. Общий вид прибора для измерения крепости и трещиноватости буримых пород

Выводы

1. Получена статистическая зависимость коэффициента крепости пород от параметров работы станка шарошечного бурения. Эта зависимость положена в основу функциональных преобразований прибора.

2. Представлена блок-схема прибора и принципиальная электрическая схема функционального блока распределения импульсов по интервалам измерения.

3. Определено суммарное количество импульсов, поступающих на вход делителя частоты, установлено соответствие количества импульсов, поступающих на вход дешифратора, величине коэффициента крепости пород.

4. Предложено конструктивное решение прибора применительно к системе автоматического управления шарошечными буровыми станками.

Список литературы

1. Сухов Р.П. Установление основных взаимосвязей энергоемкости процесса шарошечного бурения с прочностными параметрами разрушаемого массива / Горный журнал Казахстана. - № 9, 2013. С.8-12.
2. Щербаков П.Н., Ткаченко В.М., Митрофанов Г.П. Устройство для измерения прочностных свойств горных пород / А.С. № 1559146, Е21 С 39/00, 1989.
3. Щербаков П.Н., Балашов С.В. Статистичний підхід до обґрунтування параметрів буро-вибухових робіт на кар'єрах / Збірник наукових праць Національного гірничого університету, № 35, том 2, Д. 2010. С. 12-21.
4. П.Н. Щербаков, Д.В. Клименко, С.Е. Тимченко Статистичні дослідження продуктивності одноковшевих екскаваторів при напруженні гірничої маси різної якості дроблення / Науковий вісник НГУ №1 2017. С. 49 – 54
P Shcherbakov, D Klymenko, S Tymchenko Statistical research of shovel excavator performance during loading of rock mass of different crushing quality / Scientific Bulletin of National Mining University, 2017
5. Ulanova N.P., Sdvyzhkova O.O., Prikhodko V.V., 2014. Optimization of room-and-pillar metod parameters under conditions of limestone rocks. Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining – Bondarenko, Kovalevs'ka& Ganushevych(end). Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-1-138-02699-5, pp. 511-516.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Корсуном В.І.

УДК 622.673.1[043.5]

І.С. Ільїна, канд. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ "СОСУД-АРМИРОВКА" В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ АВАРИЙНОМ ТОРМОЖЕНИИ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

Анотація. Метою роботи є встановлення пакету діагностичних параметрів, які описують динамічні процеси в системах «підйомна посудина - армування» при запобіжному гальмуванні шахтних підйомних установок. У статті викладена методика та окремі результати експериментальних досліджень взаємодії шахтних підйомних посудин в режимі гальмування з провідниками жорсткого армування вертикальних стволів у промислових умовах.

Ключові слова: діагностичні параметри; шахтна підйомна установка; підйомні посудини; провідники жорсткого армування вертикальних стволів.

Аннотация. Целью работы является установление пакета диагностических параметров, которые описывают динамические процессы в системах «подъемный сосуд - армировка» при аварийном торможении шахтных подъемных установок. В статье представлена методика и отдельные результаты экспериментальных исследований взаимодействия шахтных подъемных сосудов в режиме торможения с проводниками жесткой армировки вертикальных стволов в промышленных условиях.

Ключевые слова: диагностические параметры; шахтная подъемная установка; подъемные сосуды; проводники жесткого армирования вертикальных стволов.

Abstract. The aim of the work is to establish a package of diagnostic parameters that describe the dynamic processes in the systems "lifting vessel - reinforcement" during emergency braking of mine hoisting installations. The technique and result of experimental researches of interaction of mine elevating vessels in a mode of braking with conductors rigid stiff reinforcement vertical trunks in industrial conditions is submitted in the article.

Keywords: diagnostic parameters; mine lifting plant; lifting vessels; conductors of hard reinforcement of vertical trunks.

При работе шахтных подъемных установок движение скипов, клетей и контровесов в проводниках армировки вертикальных стволов в силу различных причин приводит к возбуждению их горизонталь-

ных колебаний. Эти колебания могут происходить в различных режимах динамического взаимодействия с проводниками (плавном или ударно-динамическом) [1].

При взаимодействии с армировкой подъемные сосуды совершают малое пространственное движение с шестью степенями свободы, при котором могут возникать значительные динамические нагрузки на проводники армировки, представляющие опасность для эксплуатации подъема. Причиной появления таких нагрузок являются пространственные отклонения профиля проводников от вертикали и определенные сочетания жесткостных и инерционных параметров системы «канат – сосуд - армировка», при которых возникает перекачка кинетической энергии вертикального движения сосуда в его горизонтальные колебания (поступательные перемещения центра масс сосуда в горизонтальной плоскости и повороты вокруг центра масс).

Наибольшие динамические перегрузки подъемной системы возникают при предохранительном торможении на участке ствола с максимальной скоростью движения сосуда из-за срабатывания какого-либо аппарата защиты при нарушении нормального режима работы подъема, что может произойти в любой точке ствола. В связи с этим, целесообразно провести исследования с помощью аппаратных измерений динамических параметров подъемных сосудов и барабана подъемной машины на характерных участках, расположенных в контрольных точках ствола: в его верхней, средней и нижней частях ствола при спуске и подъеме сосуда с вариацией по загрузке и начальной скорости в момент торможения.

В работе [2] были проведены теоретические исследования взаимодействия сосуда с армировкой при торможении. Из их результатов следует, что при проведении динамических инструментальных исследований информативными параметрами, дающими достаточно полное представление о характере движения подъемного сосуда в режиме торможения являются мгновенные значения следующих параметров, регистрируемых в развертке по временной координате:

- горизонтальные ускорения направляющих подъемного сосуда на его верхнем и нижнем поясах;
- вертикальное ускорение подъемного сосуда;
- угловая частота вращения (окружная скорость) барабана подъемной машины;
- сигнал включения предохранительного тормоза;
- длина головного каната в момент торможения (координата подъемного сосуда);
- натяжение головного каната;
- время с начала торможения.

Данный набор параметров обладает свойством избыточности и в условиях конкретных измерений может быть сокращен в зависимости от технических возможностей применяемой аппаратуры в части количества одновременно измеряемых динамических параметров горизонтального движения сосуда (ускорений, усилий) при соблюдении условий сохранения полноты качественной картины. Это значит, что без потери достоверности информации можно ограничиться измерениями только ускорений в лобовой и боковой плоскостях или соответствующих контактных усилий на каком-либо поясе подъемного сосуда. Информацию о вертикальном движении сосуда можно регистрировать либо с помощью датчиков ускорений, скорости или перемещения на сосуде, либо датчика натяжений каната, установленного в районе барабана, либо датчика угловой скорости барабана, либо датчика окружной скорости барабана с последующей обработкой записанных данных.

При проведении динамических измерений первый (подземный) измерительный комплекс устанавливается на подъемном сосуде.

Датчик вертикальных колебаний сосуда (датчики перемещений, скорости или ускорений) закрепляется на корпусе сосуда измерительной осью вдоль вертикальной оси сосуда. Возможно применение укороченной схемы измерений с установкой датчиков только на верхнем поясе сосуда, если его вертикальный размер не значительно больше горизонтального.

При использовании контактных силоизмерительных датчиков они монтируются взамен рабочих башмаков скольжения по три датчика в каждом (2 боковых и 1 лобовой) измерительном башмаке на верхнем или нижнем поясе сосуда [3].

Датчик-акселерометр крепится на сосуде своей измерительной осью вдоль вертикальной оси сосуда. Взамен вертикального акселерометра может использоваться датчик натяжений головного каната, навешиваемый на канат на расстоянии 0.5...1.0 м выше коуша или датчик усилий встроенный в подвесное устройство.

Второй (наземный) измерительный комплекс устанавливается в машинном здании. В его состав входит датчик (канал информационной цепи подъемной машины) окружной (угловой) скорости барабана на подъемной машине, датчик сигнала в цепи включения предохранительного тормоза (ТП), регистратор со встроенным таймером, канал ввода сигнала с указателя глубины подъемной машины.

Цель обработки и анализа данных измерений состоит в определении качественных и количественных отличий процесса динамического взаимодействия сосуда с армировкой во время торможения от того же процесса во время прохождения участка торможения с рабочей скоростью. Количественно эти отличия могут быть охарактеризованы «коэффициентом динамической перегрузки», который определя-

ется как отношение максимальных значений динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда (ускорений, контактных усилий) во время торможения к таким же значениям при прохождении данного участка ствола с постоянной скоростью.

$$K_{din,a}^{lob(bok)} = \frac{A_{max,tor}^{lob(bok)}}{A_{max,rab}^{lob(bok)}}, \quad (1)$$

$$K_{din,F}^{lob(bok)} = \frac{F_{max,tor}^{lob(bok)}}{F_{max,rab}^{lob(bok)}}, \quad (2)$$

где $K_{din,a}^{lob(bok)}$ и $K_{din,F}^{lob(bok)}$ - соответственно коэффициенты динамической перегрузки системы «сосуд - армировка» при срабатывании ТП соответственно по максимальным измеренным горизонтальным ускорениям башмаков и контактным усилиям в парах «башмак - проводник» в лобовой (боковой) плоскостях; $A_{max,tor}^{lob(bok)}$ и $F_{max,tor}^{lob(bok)}$ - соответственно максимальные горизонтальные ускорения направляющих и максимальные контактные усилия в лобовой (боковой) плоскостях за время торможения; $A_{max,rab}^{lob(bok)}$ и $F_{max,rab}^{lob(bok)}$ - соответственно максимальные значения горизонтальных ускорений и контактных усилий на участке торможения во время движения с рабочей скоростью.

Качественная характеристика процесса взаимодействия сосуда с армировкой в процессе торможения состоит в определении закона изменений максимальных амплитуд динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда во времени и того, является ли это изменений убывающей, возрастающей, возрастающе - убывающей или постоянной во времени функцией, и от каких параметров системы это зависит.

Как показано в работе [4], процесс горизонтального взаимодействия сосуда с армировкой носит случайный стационарный, эргодический характер. То есть количественные значения динамических параметров взаимодействия сосуда с армировкой на различных циклах спуска – подъема могут отличаться друг от друга, но средние показатели сохраняют приблизительно одинаковые значения от цикла к циклу. В связи с этим, в качестве базы сравнения для определения степени перегрузки армировки при торможении кроме максимальных значений можно выбирать значения показаний динамических датчиков отдельно для лобовой и боковой плоскостей проводников, усредненные по всем выборкам контрольных циклов спуска и подъема сосуда по каждому участку предохранительного торможения с соответствующей рабочей скоростью.

Обработка данных эксперимента состоит из двух основных этапов:

- подготовительная обработка данных (расшифровка записей и перевод данных в значения физических параметров, регистрируемых датчиками; нахождение максимальные значения динамических параметров для каждого спуска и подъема сосуда в контрольных точках ствола и т.д.);

- математическая обработка данных (вычисление среднестатистических значений максимальных динамических параметров; выбор максимальных значений параметров отдельно для лобовых и боковых датчиков; присвоение выбранных максимальных значений параметрам, выбранных по формулам (1) и (2)

в качестве базы сравнения: $A_{max,rab}^{lob(bok)}$ и $F_{max,rab}^{lob(bok)}$; расчет для каждой контрольной точки отдельно для спуска и подъема сосуда значения коэффициентов динамической перегрузки $K_{din,a}^{lob(bok)}$ и $K_{din,F}^{lob(bok)}$; расчет мгновенного и среднего (до остановки) окружных замедлений барабана подъемной машины; анализ зависимости коэффициентов динамичности от координаты контрольной точки срабатывания предохранительного тормоза отдельно для лобовой и боковой плоскостей спуска и подъема сосуда и т.д.).

На основе разработанной методики проведения экспериментальных исследований взаимодействия шахтных подъемных в режиме торможения с проводниками жесткой армировки вертикальных стволов были проведены эксперименты по измерению горизонтальных ускорений колебаний контровеса при торможении в стволе «Вспомогательный» шахты «Эксплуатационная» Запорожского железорудного комбината. Измерения проводились с использованием аппаратуры «МАК» ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. Применялась схема расположения датчиков ускорений на верхнем и нижнем поясах сосуда. Подъемная машина имела следующие характеристики: высота подъема – 940 м; масса сосуда – 17610 кг; высота контровеса от верхнего до нижнего пояса – 12.63 м; рабочая скорость движения – 6 м/с; наибольшая скорость при срабатывании предохранительного тормоза – 6 м/с; два проводника коробчатого типа двустороннего расположения; торможение производилось при спуске и подъеме контровеса в верхней, средней и нижней частях ствола на уровне отметок 100 м, 440 м и 690 м, при этом среднее замедление достигало 4 м/с².

Данные измерений показали, что при аварийном торможении происходит значительное нарастание амплитуд горизонтальных колебаний сосуда. Из анализа полученных при торможении осциллограмм следует, что колебания сосуда при торможении носят сложный полигармонический характер.

Спектральный анализ осциллограмм на рис. 1-2 показывает, что для данной системы «контровес - армировка» при реализации ударно-динамического режима доминируют колебания с частотой вибраций сосуда 10 Гц в боковой плоскости и частота 11 Гц в лобовой плоскости проводников.

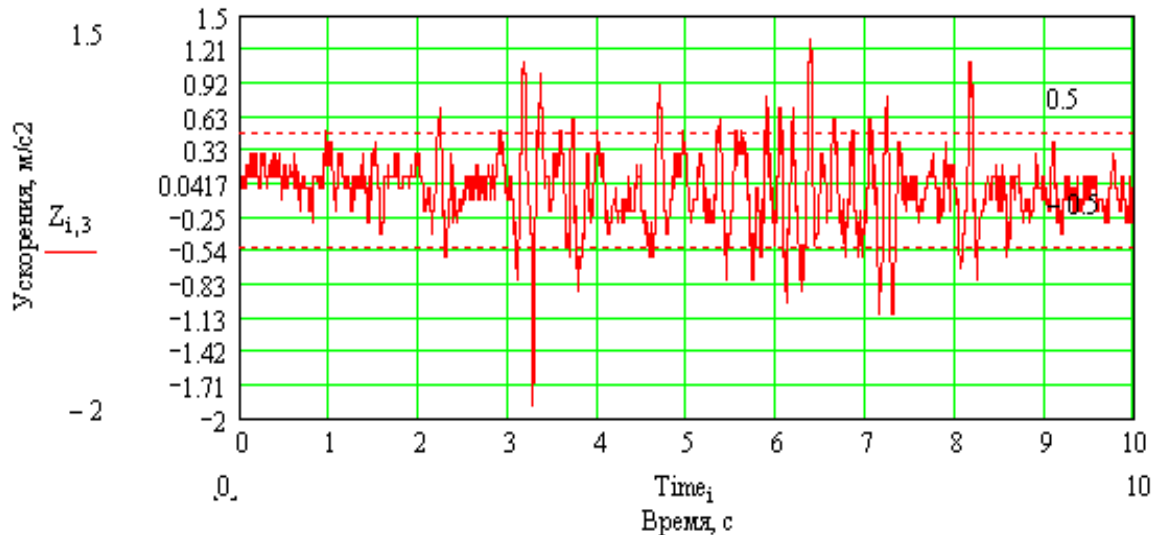


Рис. 1 Горизонтальные ускорения сосуда в лобовой плоскости верхнего пояса при торможении на подъеме в районе отметки 440 м

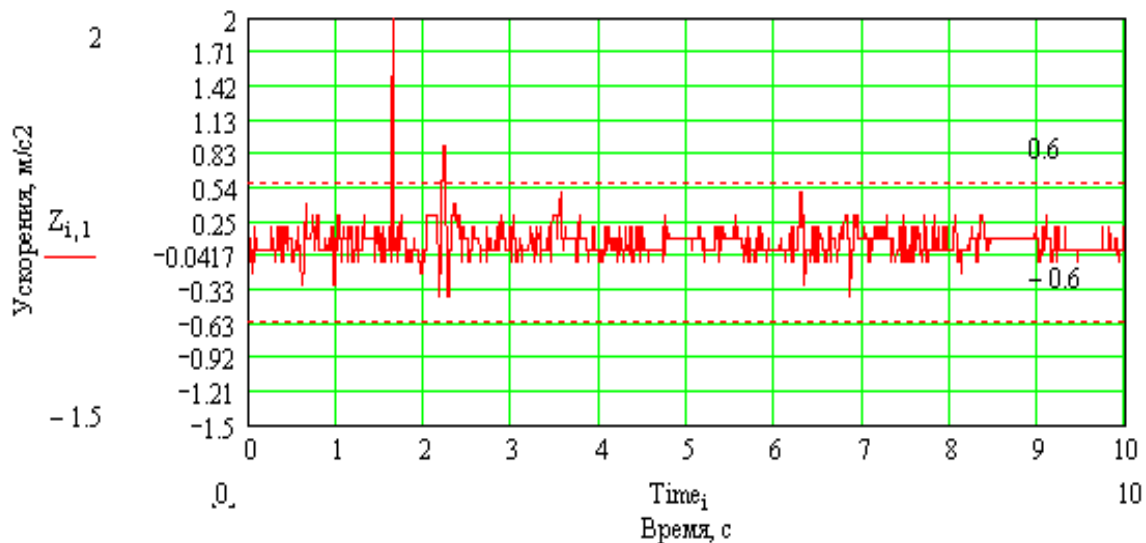


Рис. 2 Горизонтальные ускорения сосуда в боковой плоскости верхнего пояса при торможении на подъеме в районе отметки 690 м

На графиках приведены развертки горизонтальных ускорений сосуда по времени при аварийном торможении. Маркерами отмечены максимальные значения средних горизонтальных ускорений при рабочем режиме движения по стволу на участке торможения.

На основании формулы (1) были получены следующие наибольшие значения коэффициентов динамичности при торможении на спуске и подъеме контровеса для лобовой и боковой плоскости проводников.

На спуске при торможении на уровне 440м: $K_{din,a}^{bok} = 1.5$; $K_{din,a}^{lob} = 1.3$.

На подъеме при торможении на уровне 440м: $K_{din,a}^{bok} = 2.3$; $K_{din,a}^{lob} = 2.1$.

На спуске при торможении на уровне 690м: $K_{din,a}^{bok} = 1.1$; $K_{din,a}^{lob} = 1.08$.

На подъеме при торможении на уровне 690м: $K_{din,a}^{bok} = 1.4$; $K_{din,a}^{lob} = 1$.

Приведенные графики данных экспериментов показывают, что в режиме торможения амплитуды динамических перегрузок в кинематической паре «башмак - проводник» при одной и той же начальной скорости торможения 6 м/с в некоторых точках ствола имеют явную тенденцию к росту по сравнению с рабочим режимом движения по этим участкам. Максимальные значения горизонтальных ускорений при торможении контровеса представлены в таблице 1.

Отсюда видно, что самым динамичным при торможении является участок в средней части ствола, максимальные ускорения направляющих сосуда в котором достигают 3.1 м/с². В таблице 2 представлены максимальные значения динамических перегрузок направляющих сосуда при движении контровеса по этим же участкам на рабочей скорости 6 м/с.

Таблица 1

Максимальные значения перегрузок при торможении контровеса

| h, м | $A_{max,tor}^{bok}$, м/с ² | | $A_{max,tor}^{lob}$, м/с ² | |
|------|--|--------|--|--------|
| | Спуск | Подъем | Спуск | Подъем |
| 100 | 0.7 | 0.5 | 1.2 | 1.5 |
| 440 | 1.8 | 1.4 | 1.4 | 1.9 |
| 690 | 1.1 | 2.0 | 1.3 | 1.3 |

Таблица 2

Максимальные значения перегрузок при рабочей скорости

| h, м | $A_{max,rab}^{bok}$, м/с ² | | $A_{max,rab}^{lob}$, м/с ² | |
|------|--|--------|--|--------|
| | Спуск | Подъем | Спуск | Подъем |
| 100 | 0.5 | 0.4 | 1.8 | 0.9 |
| 440 | 1.2 | 0.6 | 1.1 | 0.9 |
| 690 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.3 |

В целом по стволу есть ряд участков с максимальными значениями горизонтальных перегрузок при нарушениях плавности на рабочей скорости движения. На них максимальные значения горизонтальных ускорений реализуются в районе отметки 220м и достигают 2.8 м/с² в лобовой плоскости при спуске контровеса и 2.1 м/с² при подъеме.

Это значит, что срабатывание предохранительного тормоза даже на участках с плавным рабочим движением сосуда вызывает возникновение дополнительных перегрузок системы по уровню эквивалентных и даже превышающих уровень перегрузок при движении по участку пространственно искривленных проводников. Поэтому плавное движение сосуда по участку с прямолинейной, но изношенной армировкой, еще не гарантирует безопасность ее эксплуатации в случае срабатывания на нем аварийного тормоза.

Результаты экспериментов, проведенных в промышленных условиях, и их анализ показывают, что при наличии в стволе участков с изношенной армировкой необходимо проводить тщательный осмотр проводников и расстрелов после реализации на них аварийного торможения подъемных сосудов.

Список використаних джерел

1. Единый нормативно-технический документ для проектирования, строительства и эксплуатации вертикальных стволов шахт. НИИ горной механики им. М.М. Федорова. – Донецк – 1994. – 82 с.
2. Сорокін В.І., Ільїна І.С. Дослідження взаємодії шахтних підйомних посудин з провідниками під час гальмування // Питання прикладної математики і математичне моделювання. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2001. – Вип.1. – С. 93-99.
3. ГР 3-032 – 2004. Діагностика стану систем „кріплення - масив” та „підйомна посудина – жорстке армування” шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання. – Міністерство промислової політики України. - Галузевий нормативний документ. – Київ. – 2004. – 40с.
4. Гавруцкий А.Е., Мусиенко В.Д., Осадчая Л.С. Исследование горизонтальных нагрузок на армировку в скиповом стволе ЗЖРК № 1 // Шахтное строительство, 1981. – №7. – С. 19-21.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.

УДК 621.33.21: 622.62-83

С. В. Дибрін

(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)

ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОСМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧИСЛА ЕКСПЛУАТОВАНИХ НА ГОРИЗОНТІ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ШАХТНОГО ТРАНСПОРТУ З ІНДУКЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Проаналізовано можливість істотного зниження максимуму потужності тягової перетворювальної підстанції без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного шахтного транспорту. З'ясовано, що знизити величину потужності, яка передається двигунам, можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності). Це дасть можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі й дозволить збільшити на лінії число використовуваних рухомих складів. Зроблено висновок про доцільність подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії та схеми його підключення на електровозі.

Ключові слова: зниження максимуму потужності, автономне джерело потужності, рудниковий безконтактний електровоз, накопичувач енергії.

Аннотация. Проанализирована возможность существенного снижения максимума мощности тяговой преобразовательной подстанции без влияния на существующую техническую базу (оборудование) системы бесконтактного шахтного транспорта. Выяснено, что снизить величину мощности, передаваемой двигателям, можно, установив на электровозе автономный источник энергии с заданной мощностью (источник мощности). Это позволит снизить потери электрической энергии на электровозе и увеличит на линии число используемых составов. Сделан вывод о целесообразности дальнейшего анализа, расчета и выбора конкретного накопителя энергии, а также схемы его подключения на электровозе.

Ключевые слова: снижение максимума мощности, автономный источник мощности, рудничный бесконтактный электровоз, накопитель энергии.

Abstract. The possibility of reducing the maximum power of the converter substation of a non-contact mine transport system is analyzed. The power can be reduced by installing an independent electric power source on the electric locomotive. This will increase the number of simultaneously used railway rolling stocks.

Key words: reduction of maximum power, independent power source, energy storage, mine non-contact electric locomotive.

Постановка проблеми. Завдання можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту за незмінних інших умов пов'язане з вирівнюванням графіку навантаження тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4. Першим етапом при дослідженні цього питання став аналіз складових навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту [1]. Наступними мають стати аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту, а також пошук і аналіз можливого технічного рішення стосовно збільшення числа використовуваних електровозів (В14-900).

Мега роботи. Пошук технічного рішення щодо збільшення числа використовуваних на горизонті електровозів (В14-900) при незмінних інших умовах та аналіз цього рішення.

Аналіз досліджень і публікацій. Шахтний транспорт з безконтактною передачею енергії й досі залишається досить унікальною розробкою з низкою специфічних особливостей. У відомих літературних джерелах аналіз можливості та варіантів технічної реалізації збільшення числа використовуваних електровозів при незмінних інших умовах не проводився.

Результати дослідження

Аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту

Проаналізуємо складові навантаження тягової перетворювальної підстанції системи безконтактного транспорту з точки зору можливості зниження максимумів потужності, що віддається нею.

Потужність втрат при експлуатації лінії ΔP_d залежить від її довжини і може бути зменшена тільки за рахунок заміни устаткування, що забезпечує функціонування лінії (кабель, конденсатори). Проте вибір

кабелю обґрунтовується економічними розрахунками усєї системи безконтактного транспорту і може стати темою окремого дослідження. Компенсуючі конденсатори лінії спеціально розроблено для цієї системи безконтактного транспорту й їх заміна на ефективніші також вимагає окремої розробки.

Потужність власних потреб електровоза $P_{e.вл.п} = 2,7$ кВт [1] можна зменшити за рахунок заміни устаткування, що забезпечує функціонування допоміжних вузлів електровоза, на економічніше. Але таке зменшення не може істотно вплинути на зниження загального навантаження перетворювальної підстанції, оскільки доля даної потужності одного електровоза складає близько 1,5 % від встановленої потужності перетворювальної підстанції.

Потужність втрат на електровозі ΔP_e залежить від потужності, що витрачається на переміщення рухомого складу (знаходиться в квадратичній залежності від струму, споживаного двигунами $I_{дв}$:

$\Delta P_e = (2 \cdot I_{дв})^2 \cdot R_{н.е.}$, де $R_{н.е.}$ – еквівалентний опір втрат електровоза), якщо не враховувати потужності власних потреб.

Таким чином, з усіх складових навантаження тягової перетворювальної підстанції можливість істотного зниження максимуму потужності без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного транспорту пов'язана з потужністю $P_{e.дв}$, що витрачається на рух. Процес її передачі від мережі до двигунів зображено на рис. 1:

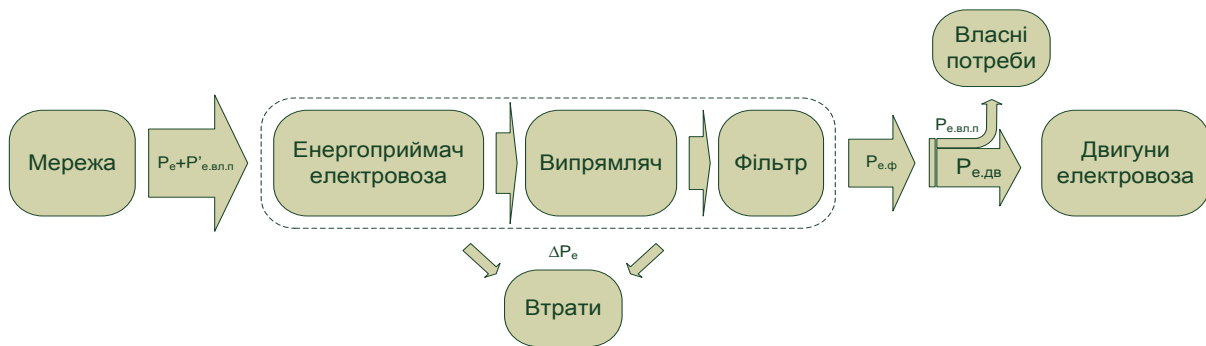


Рис. 1. Процес передачі потужності від мережі до двигунів:

$P_{e.вл.п}$ – електрична потужність власних потреб електровоза; $P'_{e.вл.п}$ – електрична потужність власних потреб електровоза з урахуванням втрат, викликаних її передачею по ланцюгах приймально-силового контуру; P_e – електрична потужність електровоза без урахування потужності $P'_{e.вл.п}$; ΔP_e – електрична потужність втрат у ланцюгах приймально-силового контуру; $P_{e.ф}$ – електрична потужність на виході фільтра; $P_{e.дв}$ – електрична потужність на затискачах двигунів електровоза

Максимальне значення потужності, споживаної двигунами, припадає на час розгону. Знизити значення $P_{e.дв}$ в цей період можна, зменшивши струм двигунів. Але це призведе до недовикористання двигунів по потужності, збільшення загального часу транспортування або зменшення кількості вагонеток та, відповідно, до погіршення експлуатаційно-економічних показників транспорту.

Домогтися зниження значення потужності, що передається двигунам $P_{e.дв}$, можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності). При цьому процес передачі потужності $P_{e.дв}$, що витрачається на рух, від мережі до двигунів зміниться (див. рис. 2):

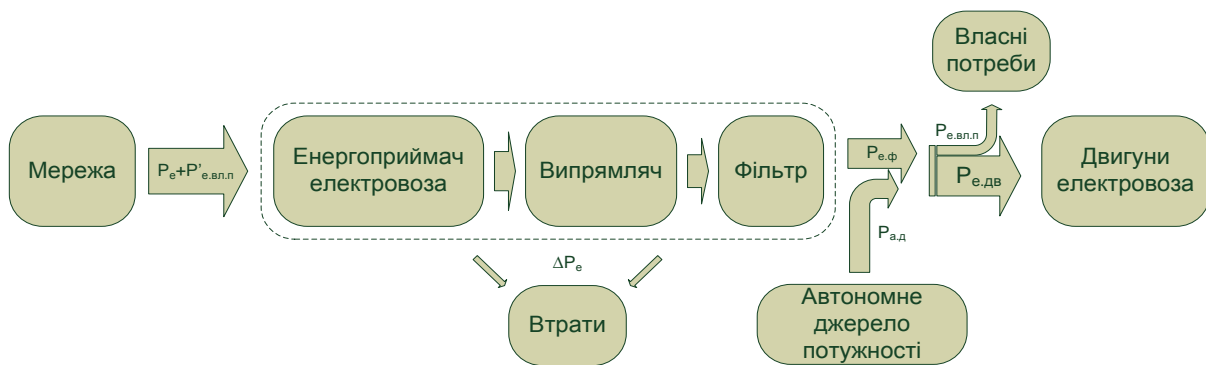


Рис. 2. Процес передачі потужності від мережі до двигунів з автономним джерелом енергії на електровозі:

$P_{a,0}$ – необхідна добавка потужності від автономного джерела енергії

Реалізація запропонованого варіанта дозволить зменшити струм в силовому ланцюзі, що, у свою чергу, дасть можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі (зменшиться ΔP_e).

Збільшення числа безконтактних електровозів на лінії за рахунок зниження максимуму потужності електровозів

Максимальна потужність тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4, використовуваної для живлення даного шахтного безконтактного транспорту, $P_{\max} = 180$ кВт.

Запишемо рівняння стабільної роботи перетворювальної підстанції в мережі безконтактного транспорту:

$$\begin{aligned} P_{\max} &\geq \Delta P_{\lambda} + \sum_{i=1}^N (P_{e,0e,i} + \Delta P_{e,i}) + P_{e,вл,n} \cdot N = \\ &= \Delta P_{\lambda} + \sum_{i=1}^N P_{e,i} + P_{e,вл,n} \cdot N = \\ &= \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L + U_{хв,с} \cdot \sum_{i=1}^N I_{e,0e,i} + P_{e,вл,n} \cdot N, \end{aligned} \quad (1)$$

де ΔP_{λ}^0 – питома потужність втрат в лінії; L – протяжність транспортування; $P_{e,0e,i}$ – електрична потужність, що витрачається на рух i -м електровозом; $\Delta P_{e,i}$ – потужність, що втрачається на i -му електровозі, $P_{e,i} = P_{e,0e,i} + \Delta P_{e,i}$; $I_{e,0e,i}$ – струм в ланцюзі двигунів i -го електровоза; N – число рухомих складів на лінії.

Навантаження перетворювальної підстанції буде максимальним у періоди, коли на маршруті декілька рухомих складів здійснюють розгін.

Відповідно до тягового розрахунку з початковими даними, що відповідають умовам шахти "Лутугінська" ВО "Луганськвугілля" (на якій для експлуатації безконтактних електровозів В14 обладнано горизонт 376 м на східному корінному відкочувальному штреку з протяжністю транспортування при централізованому електропостачанні близько $L = 3$ км), електрична потужність електровоза під час розгону $P_{e,p} = 70,014$ кВт.

Питома потужність втрат у лінії $\Delta P_{\lambda}^0 = 11,15$ кВт/км [1].

Частина втрат, що вноситься потужністю власних потреб $P_{e,вл,n}$ у потужність втрат ланцюгів приймально-силового контуру $\Delta P_{e,p,i}$, дуже мала (зважаючи на замале значення $P_{e,вл,n}$), тому для спрощення розрахунків приймемо, що $P'_{e,вл,n} = P_{e,вл,n}$.

Виразимо з рівняння (1) і розрахуємо допустиме число рухомих складів N на лінії, припустивши, що усі вони здійснюють розгін одночасно, тобто $\sum_{i=1}^N (P_{e,0e,p,i} + \Delta P_{e,p,i}) = (P_{e,0e,p} + \Delta P_{e,p}) \cdot N = P_{e,p} \cdot N$:

$$N \leq \frac{P_{\max} - \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L}{P_{e,p} + P_{e,вл,n}} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{70,014 + 2,7} = 2,015. \quad (2)$$

Отримане число рухомих складів, що безперебійно живляться перетворювальною підстанцією, співпадає з числом рухомих складів, що безперебійно живляться в умовах діючої системи транспорту з безконтактною передачею енергії (шахта «Лутугінська»). На шахті при збільшенні кількості рухомих складів систематично відбувалося відключення підстанції захистом.

Припустимо: потужність, що витрачається кожним рухомих складом на рух під час розгону (без урахування потужності власних потреб), вдалося знизити до рівня потужності, що витрачається електровозом на сталий рух з порожняком $P_{e,лор} = P_{e,0e,лор} + \Delta P_{e,лор}$ (більша з потужностей, споживаних під час сталого руху). Згідно з тяговим розрахунком потужність електровоза під час сталого руху з порожняком $P_{e,лор} = 39,51$ кВт. Тоді допустиме на лінії число рухомих складів N розраховуємо подібно виразу (2):

$$N \leq \frac{P_{\max} - \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L}{P_{e,лор} + P_{e,вл,n}} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{39,510 + 2,7} = 3,472.$$

Таким чином, для цих умов з'являється реальна можливість збільшити на лінії число використуваних рухомих складів до трьох одиниць.

Обґрунтування енергоємності накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів

Згідно з тяговим розрахунком $U_{xx.6} = 230,6$ В – напруга холостого ходу випрямляча; виходячи з того, що при струмі годинного режиму роботи обох двигунів $152 \cdot 2 = 304$ А, напруга на затискачах двигунів (з урахуванням падіння напруги на опорі втрат $R_{n.e.} = 0,15$ Ом) має бути 185 В; $t_{p.sp} = 40,2$ с – найбільший розрахунковий час розгону (час розгону навантаженого рухомого складу).

Для максимального за часом і найбільш важкого випадку А – розгону трьох навантажених рухомих складів – визначимо величину енергії автономного джерела потужності на кожному електровозі, що забезпечує зниження потужності в період розгону з рівня, споживаного електровозом на розгін $P_{e.p} = P_{e.дв.p} + \Delta P_{e.p} = 70015$ Вт, до рівня, допустимого за умов забезпечення експлуатації трьох електровозів. Для цього розрахуємо:

- допустиму потужність, яка витрачається кожним електровозом, що розганяється, на рух $P_{e.p.дон}$ (без урахування потужності власних потреб), виразивши $P_{e.p}$ з формули (2) :

$$P_{e.p.дон} \leq \frac{P_{max} - \Delta P_{л}^0 \cdot L}{N} - P_{e.вл.л} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{3} - 2,7 = 46,15 \text{ кВт};$$

- зменшення втрат потужності, що витрачається електровозом на рух, при її зниженні з необхідного рівня під час пуску $P_{e.p}$ до допустимого значення $P_{e.p.дон}$:

$$\Delta(\Delta P_{e.p.дон}) = (I_{e.p}^2 - I_{e.p.дон}^2) \cdot R_{n.e.} = \frac{P_{e.p}^2 - P_{e.p.дон}^2}{U_{xx.6}^2} \cdot R_{n.e.} = \frac{70015^2 - 46150^2}{230,6^2} \cdot 0,15 = 7,82 \text{ кВт}.$$

Зменшення потужності, що витрачається на рух, призведе й до зниження потужності втрат в енергоприймачі, викликаних струмом власних потреб (як складової загального струму). Зважаючи на малу величину $P_{e.вл.л}$, а значить і малу величину самого зниження, бачимо, що це дозволить трохи зменшити шукану енергоємність автономного джерела потужності, але ускладнить розрахунок, враховувати його не будемо;

- необхідну добавку потужності від автономного джерела:

$$P_{a.д} = P_{e.p} - P_{e.p.дон} - \Delta(\Delta P_{e.p.дон}) = 70,015 - 46,15 - 7,82 = 16,045 \text{ кВт};$$

- необхідне зменшення струму на виході фільтра (струм автономного джерела)

$$\Delta I_{a.д} = \frac{P_{e.p} - P_{e.p.дон}}{U_{xx.6}} = \frac{70015 - 46150}{230,6} = 103,5 \text{ А};$$

- очікувану напругу на виході фільтра при роботі автономного джерела

$$U_{n.a(a.д)} = U_{xx.6} - \frac{P_{e.p.дон}}{U_{xx.6}} \cdot R_{n.e.} = 230,6 - \frac{46150}{230,6} \cdot 0,15 = 200,58 \text{ В};$$

- шукану величину енергії (енергоємність) автономного джерела потужності

$$W_{a.д} = \frac{t_{p.sp}}{60 \cdot 60} \cdot P_{a.д} = \frac{40,2}{60 \cdot 60} \cdot 16045 = 179,2 \text{ Вт}\cdot\text{ч};$$

- очікуване граничне мінімальне значення ККД роботи автономного джерела потужності, при якому значення потужності втрат в самому джерелі дорівнюватиме величині зменшення потужності втрат від потужності, що витрачається електровозом на рух при її зниженні з $P_{e.p}$ (необхідної при розгоні) до $P_{e.p.дон}$ (допустимої),

$$\eta_{\text{гран.а.д}} = \frac{P_{\text{а.д}}}{P_{\text{а.д}} + \Delta(\Delta P_{\text{е.р.дон}})} = \frac{16,045}{16,045 + 7,82} = 0,672.$$

Однотимний розгін трьох навантажених рухомих складів (випадок А) – це винятковий випадок.

Для можливих менш енергетично важких для перетворювальної підстанції випадків комбінацій швидкісних станів рухомих складів на лінії (випадки В–F):

- ✓ випадок В – розгін двох навантажених і сталий рух порожнього рухомого складу;
- ✓ випадок С – розгін трьох порожніх рухомих складів;
- ✓ випадок D – розгін навантаженого і сталий рух двох порожніх рухомих складів;
- ✓ випадок E – розгін двох порожніх і сталий рух порожнього рухомого складу;
- ✓ випадок F – розгін двох порожніх і сталий рух навантаженого рухомого складу

розраховуємо величину необхідної енергії автономного джерела потужності на найбільш "потребуючому" рухомому складі, що розганяється (навантаженому або порожньому, якщо немає навантаженого).

Результати розрахунків наведено в таблиці.

| | $P_{\text{е.р.дон}}$, Вт | $\Delta(\Delta P_{\text{е.р.дон}})$, Вт | $\Delta I_{\text{а.д}}$, А | $U_{\text{н.е(а.д.)}}$, В | $\Delta P_{\text{е.р.дон}}$, Вт | $\eta_{\text{гран.а.д}}$ | $P_{\text{а.д}}$, Вт | $W_{\text{а.д}}$, Вт·ч (кДж) |
|-----------|------------------------------|---|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Випадок А | 46150 | 7820 | 103,5 | 200,58 | 7820 | 0,672 | 16045 | 179,2 (645,12) |
| Випадок В | 49471 | 6924 | 89,1 | 198,42 | 6924 | 0,663 | 13619 | 152,13 (547,668) |
| Випадок С | 46150 | 7820 | 103,5 | 200,58 | 7820 | 0,672 | 16045 | 80,036 (288,13) |
| Випадок D | 59435 | 3863 | 45,9 | 191,94 | 3863 | 0,635 | 6717 | 75,025 (270,09) |
| Випадок E | 49471 | 6924 | 89,1 | 198,42 | 6924 | 0,663 | 13619 | 67,938 (244,577) |
| Випадок F | 56701 | 4758 | 57,7 | 193,72 | 4759 | 0,643 | 8555 | 42,673 (153,623) |

Отримані значення необхідної енергії автономного джерела потужності $W_{\text{а.д}}$ можна вважати достатньо малими для можливості подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача і схеми його підключення (наприклад, енергетична місткість автомобільного акумулятора може складати 40 А·год, тобто близько 12 В·40 А·год = 480 Вт·год).

Висновки

1. Можливість істотного зниження максимуму потужності тягової перетворювальної підстанції без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного шахтного транспорту пов'язана з потужністю, що витрачається на його рух.

2. Знизити величину потужності, що передається двигунам, можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності).

3. Установка автономного джерела потужності дає можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі й дозволить збільшити на лінії число використовуваних рухомих складів.

4. Отримані значення необхідної енергоємності автономного джерела потужності дозволяють зробити висновок про доцільність подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії і схеми його підключення на електровозі для збільшення числа використовуваних рухомих складів на лінії.

Список літератури

1. Составляющие загрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного шахтного транспорта / Сиверин И.С., Дыбрин С.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- Дніропетровськ: РВК НГУ, 2014.- Вип.92. – С. 37-40.
2. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г.Пивняк, И.П.Ремизов, С.А.Саратикянц (д.б. все авторы); под ред. Г. Г. Пивняка.– М.: Недра, 1990. – 245 с.
3. Электровоз рудничный высокочастотный В14-900: Руководство по эксплуатации В14.00.00.000 РЭ// Донгипроуглемаш, Дружковский машиностроительный завод.
4. Преобразователь частоты тиристорный ТОВ1-160-1,2 к-4000 УХЛ4: Паспорт ИВЕГ. 435523.013 ПС

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випансенко С.І.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

UDC 621.311.243

A. L. Merzlikin, A. V. Akulov,
(Ukraine, Dnipro, LLC "M&A Group")

A. M. Hrebeniuk, PhD,
(Ukraine, Dnipro, State higher Educational Institution "National mining university")

THE SELECTION OF THE OPTIMUM PV MODULES/INVERTER POWER FACTOR FOR SMALL GRID-CONNECTED SOLAR POWER STATIONS

Анотація. Мета даного дослідження полягає в тому, щоб з'ясувати коефіцієнт потужності фотоелектричних модулів / інвертора, що призведе до максимальної продуктивності сонячної електростанції. Була проведена імітаційна модель з різними параметрами потужності. Результат моделювання показує, що оптимальний коефіцієнт потужності для малих сонячних електростанцій в Україні становить від 1,15 до 1,2.

Ключові слова: сонячна електростанція, фотоелектричний модуль, інвертор мережі, коефіцієнт потужності, коефіцієнт продуктивності, ККД СЕС.

Аннотация. Целью этого исследования является выяснение соотношения мощности фотоэлектрических модулей / инвертора, которое приведет к максимальному выходу солнечной электростанции. Проведена имитационная модель с различными параметрами коэффициента мощности. Результат моделирования показывает, что оптимальный коэффициент мощности для небольшой солнечной электростанции в Украине составляет от 1,15 до 1,2.

Ключевые слова: солнечная электростанция, фотоэлектрический модуль, инвертор сетки, коэффициент мощности, коэффициент производительности, КПД СЭС.

Abstract. The aim of this research is to find out the PV modules/inverter power ratio, that will result into maximum of solar power station yield. The simulation model with different power factor parameters was carried out. The result of the modeling shows that the optimal power factor for small solar power plant in Ukraine is between 1.15 and 1.2.

Keywords: solar power station, PV module, on grid inverter, power factor, performance ratio, SPS efficiency.

Introduction

Over the past few years, there has been a significant increase in individuals' investments in the construction of solar power stations (SPS) with an installed capacity of up to 30 kW. This situation became possible due to the implemented amendments to the Law of Ukraine "On Electric Power Industry" [1] and a constant decrease of the SPS main elements specific cost - PV modules and on grid inverters. When designing the SPS installed power and selecting equipment, a potential investor faces the problem of matching characteristics to build the most efficient system. The situation is also complicated by the lack of unified technical recommendations and a wide variety of different manufacturers. In their majority, the market leaders in the solar PV modules and inverters production have their own series of capacities, which differ from each other. For example: the leading manufacturer of inverters (SMA) produces three-phase on grid inverters Sunny Tripower with rated power of 15, 20 and 25 kW, but the manufacturer of solar PV modules Suntech have the most cost-effective polycrystalline modules with the capacity of 240 and 260 watts.

Main part

The research task was to find the optimal ratio of the installation power of the modules/inverter in terms of the minimum electrical losses in the system, the maximum specific production of electrical energy, the minimum payback period. The latter criteria should be decisive when choosing a particular power ratio. The results of the study are obtained on an idealized model in which the losses in transformers, shadows, etc. are neglected.

The initial modeling data are shown below and in Table 1:

Table 1.

| Initial modeling data | | |
|--|--|---|
| PV Array Characteristics | Inverter | PV Array loss factors |
| PV module: <i>Suntech STP 260-20/Wem Si-poly</i> 16-21 modules in series, 6 strings in parallel; Nb. Modules - 96-126; Unit Nom. Power - 260 [Wp]; Array global power 25-32,8 [kWp]. | Model: <i>SMA Sunny Tripower 25000TL-30</i> ; Unit Nom. Power - 25.0 [kWac]; Operating Voltage - 390-800 [V]; Nb. of inverters 2 * MPPT 50 %. | Thermal Loss factor - U_c (const) - 29.0 [W/m ² K]; Wiring Ohmic Loss – 1.3% at STC; Module Mismatch Losses – 1 % at MPP Strings Mismatch Loss – 0.1% The remaining losses are assumed to be 0 %. User's needs: Unlimited load. |

Geographical Site: Latitude 48.47° N, Longitude 35.05° E, Altitude 60 m, Albedo 0.20

Meteo data: Meteonorm 7.1 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic

Orientation: Azimuth 0°, Tilt 30, Transposition Perez, Free Horizon, No Shadings

To achieve the maximum solvable power of 30 kW for individuals, the use of two inverters with the rated power of 15 kW each is not economically viable, because their total cost is 180% of one 25 kW inverter price, which will significantly increase the amount of CAPEX.

Modeling of power generation process was designed using the PVSyst [2] software product with the parameters specified in Table 1.

Designations taken:

- PV modules total STC power capacity P_{PV} , kWp;
- power factor- the ratio of the PV modules total power and the installed power of the inverter

$$K_p = \frac{P_{PV}}{P_{inv}} \quad (1)$$

- energy, injected into grid per year E_{grid} , MWh;
- performance ratio (PR);
- specific energy produced E_{spec} , kWh/kWp/year.

The modeling results are shown in the table 2.

Table 2.

| The main modeling results of the SPS yield | | | | | |
|---|-------|------------------|-------|-------------------------|---------------------------|
| P_{PV} [kWp] | K_p | E_{grid} [MWh] | PR | Total PV modules number | E_{spec} [kWh/kWp/year] |
| 25 | 1 | 33,1 | 0,889 | 96 | 1327 |
| 26,5 | 1,06 | 35,3 | 0,891 | 102 | 1330 |
| 28,1 | 1,12 | 37,4 | 0,893 | 108 | 1332 |
| 29,6 | 1,19 | 39,5 | 0,893 | 114 | 1333 |
| 31,2 | 1,25 | 41,5 | 0,89 | 120 | 1329 |
| 32,8 | 1,31 | 43,3 | 0,885 | 126 | 1321 |

Based on the obtained data, the dependence of the performance ratio on the power factor was plotted (Figure 1, a). According to the graph below, it can be concluded that the maximum efficiency of the system, and, therefore, the maximal specific yield will be observed at K_p values of the range 1.15-1.2. By modeling with solar modules of other manufacturers, the similar K_p ration was gained.

These data are explained as follows. The amount of electricity generated by SPS during the day have normal distribution, where the peak falls at noon time (curve 1, Figure 1, b). This curve shape is ideal and corresponds to several days in a year with ideal weather conditions. Curve 2 (Figure. 1, b) shows the distribution of the SPS yield with an inverter of lower power than PV modules (overclocking inverter).

Although the maximum power output of a solar system will be ‘clipped’ back to the inverter’s output through overclocking, there will be gains in the overall amount of energy generated and more energy produced in the early morning and late afternoon. The Figure 1, b shows how the midday losses associated with an ‘undersized’ inverter can be offset by morning and afternoon gains. At this time of day, the not so high solar irradiation intensity is compensated by the low ambient temperature, which positively affects the solar modules efficiency.

As for the equipment payback period, the SPS with the optimal power factor will pay for the difference in cost from SPS with $K_p=1$ in less than 2.5 years, including the costs of installing additional PV modules.

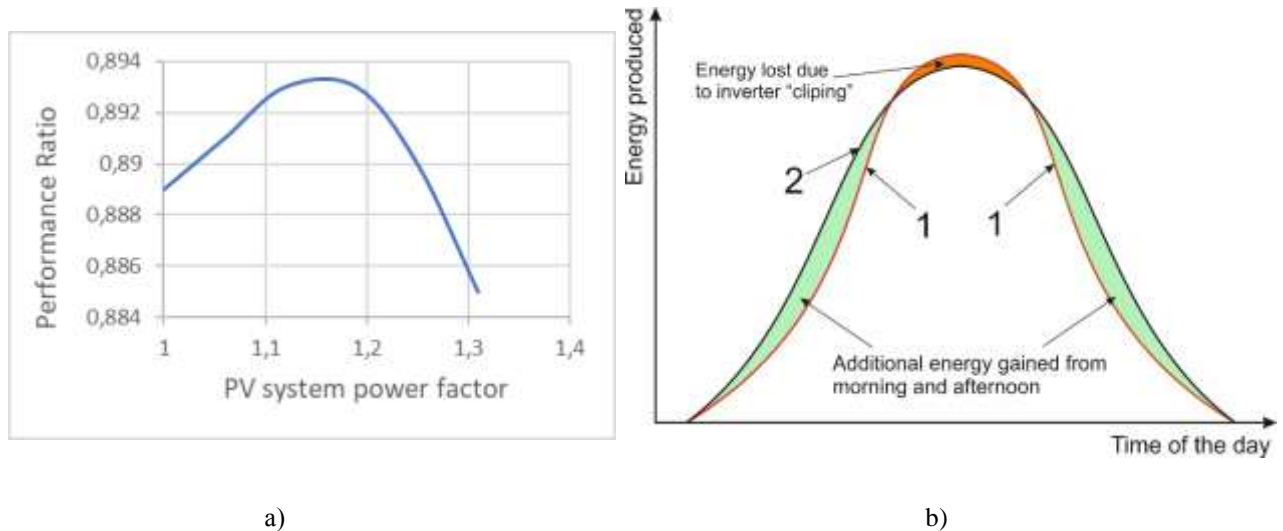


Fig. 1. a- graph of performance ration versus power factor, b – SPS yield distribution during the day.

Figure 2 shows diagrams of the annual distribution (Figure 2 , a) of the normalized energy production and the system performance ratio (Figure 2, b) for the optimum K_p .

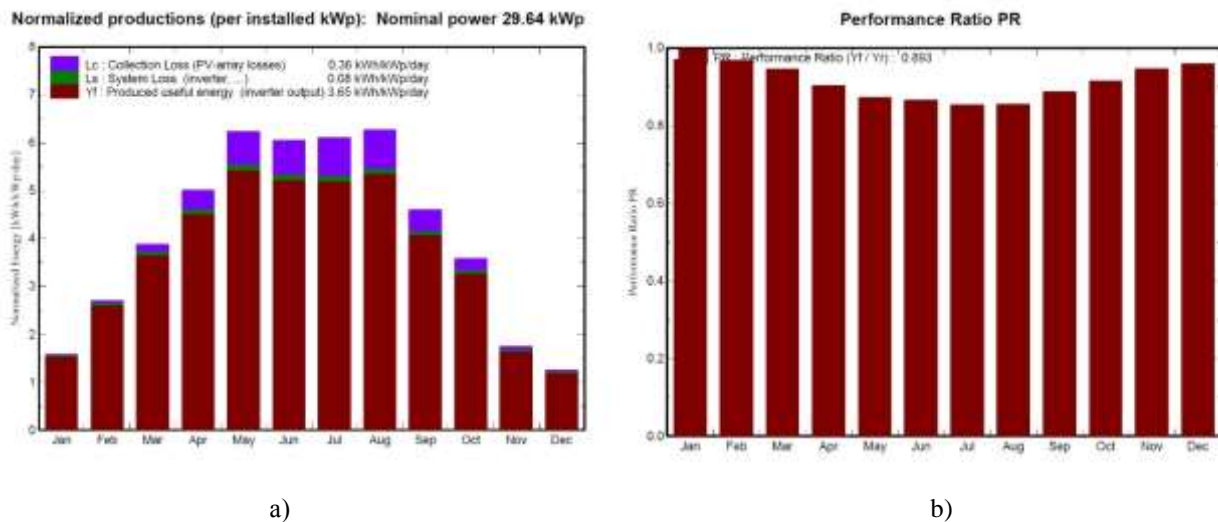


Fig. 2. a – diagram of the annual distribution of the SPS normalized energy production, b - diagram of the annual distribution of the system performance ratio.

Conclusion

When choosing equipment for solar power station construction with an installed capacity of up to 30 kW, it is optimal to exceed the power of the PV modules by 15-20% over the power of the inverter.

Solar power stations with the optimal power factor are more cost-effective and, therefore, more attractive for a potential investor.

The obtained results are of interest to potential investors, especially in the context of the new Law of Ukraine "On the Electricity Market" [3] main provisions and the constant reduction of the energy net cost, produced at SPS.

References

1. The Law of Ukraine "On Electric Power Industry" № 575/97-BP from 16.10.1997.
2. Software from <http://www.pvsyst.com/en/software/functionalities>.
3. The Law of Ukraine "On the Electricity Market" № 2019-VIII from 13.04.2017.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

В.А. Волков, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, ГВУЗ " Національний горний університет")

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ В ПУСКТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ СКОРОСТЬЮ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКОЙ

Анотація. Запропоновано і досліджено близька до оптимальної (названа «квазіоптимальний») траєкторія зміни швидкості частотнорегульованого асинхронного двигуна (ЧРАД) з вентиляторним навантаженням, при якій забезпечуються найменші (в порівнянні з іншими відомими траєкторіями зміни швидкості) електромагнітні втрати енергії цього двигуна з даним навантаженням в пускогальмівних режимах при будь-яких значеннях часів розгону і гальмування. Уточнено аналітичні залежності для модуля статорної струму і основних електромагнітних втрат потужності ЧРАД, в яких враховуються електромагнітні втрати в сталі двигуна. Проведено дослідження основних електромагнітних втрат енергії для ЧРАД з вентиляторним навантаженням при різних значеннях часів розгону і гальмування стосовно різних видів (лінійного, параболічного і квазіоптимального) траєкторій швидкості. Виявлено існування оптимальних значень часів розгону і гальмування, при яких для згаданих різних траєкторій швидкості двигуна вказані втрати енергії ЧРАД з вентиляторної навантаженням в пускогальмівних режимах мінімальні.

Ключові слова: частотне регулювання, асинхронний двигун, пускогальмівні режими, електромагнітні втрати енергії.

Аннотация. Предложена и исследована близкая к оптимальной (названная «квазиоптимальной») траектория изменения скорости частотнорегулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД) с вентиляторной нагрузкой, при которой обеспечиваются наименьшие (в сравнении с другими известными траекториями изменения скорости) электромагнитные потери энергии этого двигателя с данной нагрузкой в пускотормозных режимах при любых значениях времен разгона и торможения. Уточнены аналитические зависимости для модуля статорного тока и основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД, в которых учитываются электромагнитные потери в стали двигателя. Проведено исследование основных электромагнитных потерь энергии для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при разных значениях времен разгона и торможения применительно к различным видам (линейной, параболической и квазиоптимальной) траекторий скорости. Выведено существование оптимальных значений времен разгона и торможения, при которых для упомянутых разных траекторий скорости двигателя указанные потери энергии ЧРАД с вентиляторной нагрузкой в пускотормозных режимах минимальны.

Ключевые слова: частотное регулирование, асинхронный двигатель, пускотормозные режимы, электромагнитные потери энергии.

Abstract. A near-optimal (called "quasi-optimal") trajectory of the change in the speed of a frequency-controlled asynchronous engine (FCAE) with a fan load, which ensures the lowest (in comparison with other known velocity changes trajectories), the electromagnetic energy losses of this engine with a given load in the starting braking modes are proposed and investigated at any values of acceleration and deceleration times. The analytical dependencies for the modulus of stator current and the main electromagnetic losses of the FCAE are specified, which take into account the electromagnetic losses in the engine steel. The study of the main electromagnetic energy losses for FCAE with fan load at different values of acceleration and deceleration times for various types of (linear, parabolic and quasi-optimal) velocity trajectories was carried out. The existence of optimal values of acceleration and deceleration times for which the indicated losses of energy for the mentioned different engine speed trajectories with fan load in the starting braking modes are minimal.

Keywords: frequency control, asynchronous engine, starting braking regimes, electromagnetic energy losses.

Введение. Принимая во внимание широкое внедрение в последние годы в мире и в Украине частотнорегулируемых асинхронных электроприводов (ЧРАЭП) и происходящее удорожание электрической энергии, становится актуальной и востребованной практикой задача энергосбережения в указанных электроприводах. При этом одно из ныне существующих распространенных и весьма перспективных в будущем направлений применения таких частотнорегулируемых электроприводов приходится на центробежные вентиляторы и дымососы, в которых частотное регулирование предназначено не только для экономичного регулирования их производительности в установившихся режимах, но и для осуществле-

ния их плавного пуска в динамических режимах [1,2]. Необходимость последнего для средней и большой мощности указанных типов нагнетателей (отличающихся высокой инерционностью и устанавливаемых, как правило, непосредственно на валу двигателя) обусловлена «тяжелыми» прямыми пусками их приводных асинхронных двигателей. А именно, такие пуски рассматриваемых нагнетателей характеризуются увеличенной продолжительностью времен разгона и, как следствие, повышенными непроизводительными электромагнитными потерями энергии в приводе двигателя, что может привести к недопустимому перегреву асинхронного двигателя при прямом пуске и на практике существенно ограничивает допустимое количество пусков (до нескольких раз в сутки) указанных нагнетателей.

Наиболее эффективный подход к снижению непроизводительных потерь электроэнергии, которому посвящена основная часть известных публикаций в отечественной и зарубежной литературе (например, [3 – 7]), относится к установившимся режимам работы частотнорегулируемых асинхронных двигателей (ЧРАД) и основан на использовании в них оптимальных законов частотного управления (по минимуму электромагнитных потерь мощности, по минимуму статорного тока, по минимуму потребляемой активной мощности и др.) асинхронного двигателя. Только в относительно небольшой части существующих известных публикаций [8 – 12] исследуются вопросы энергосбережения в динамических режимах разгона и торможения применительно для ЧРАД, работающих с постоянным статическим моментом в интенсивных пускотормозных режимах (например, на прокатных станах, подъемно-транспортных механизмах).

Лишь совсем единичные работы [8, 9] рассматривают вопросы энергосбережения в динамических режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой. К сожалению, в приведенных монографиях Ю.П. Петрова отмеченные исследования энергосбережения в частотнорегулируемых асинхронных электроприводах центробежных вентиляторов выполнены неполно. А именно, во-первых, в динамических режимах разгона минимизируются (за счет предложенной в этих монографиях параболической траектории изменения скорости двигателя во времени) только электрические потери энергии в статорной и роторной обмотках ЧРАД, а потери в стали двигателя совсем не учитываются. Во-вторых, остались совершенно нерассмотренными вопросы энергосберегающего управления ЧРАД с вентиляторной нагрузкой в режиме торможения. В-третьих, остался неисследованным вопрос существования оптимальных значений времен разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, при которых электрические (или электромагнитные) потери энергии в пускотормозных режимах становятся минимальными. В-четвертых, не проведены исследования электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД (составляющих, как известно, большую часть из общих потерь мощности и энергии асинхронного двигателя [13]), а также отсутствует сопоставительное сравнение предложенной в [8, 9] параболической тахограммы с другими (например, линейной) траекториями изменения скорости, применяющимися в настоящее время на практике.

Цель работы. Разработка и исследование энергосберегающего управления скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой, которое обеспечивает минимизацию основных электромагнитных потерь энергии двигателя в пускотормозных режимах, а также – осуществление сопоставительного сравнения разработанного управления с другими известными (линейным, параболическим) видами управления скоростью этого двигателя.

При последующих исследованиях энергосберегающего управления ЧРАД примем допущения:

- пуски и торможения вентилятора (дымососа) происходят при полностью открытом шибере [2];
- учитывалось общепринятое идеализированное представление асинхронного двигателя [4, 7] при одновременном учете в нем потерь мощности в стали (присущих неидеализированному двигателю) [10];
- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов в пускотормозных режимах [8 – 10];
- автоматической системой регулирования электроприводом поддерживается наиболее распространенный для векторного управления закон частотного управления: при постоянстве модуля Ψ_r потокоцепления ротора двигателя, равном его номинальному значению Ψ_m (т.е. при $\Psi_r = \Psi_m = const$) [4, 7];
- значения момента сопротивления M_c вентиляторной нагрузки изменяются в квадратичной зависимости от скорости ω вентилятора или дымососа (установленных непосредственно на валу двигателя);
- значение момента инерции J привода принимается неизменным и равным сумме: $J = J_r + J_b$ моментов инерции ротора J_r двигателя и вентилятора (дымососа) J_b ;
- пренебрегаем механическими потерями мощности двигателя (составляющими очень малую величину – при номинальной скорости от 1 до 5 % от номинальных общих потерь мощности двигателя [13]), которые затрачиваются на преодоление трения в подшипниках и приведение в движение устанавливаемого на валу двигателя охлаждающего вентилятора); механические потери мощности уменьшаются прямо пропорционально квадрату скорости двигателя при ее снижении вниз от номинального значения;

Энергобережения та энергоефективність

- все аналитические зависимости и расчеты приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц [4, 7];

- исследованию подлежали режимы: разгона ЧРАД от нулевой до максимальной ω_M скорости и торможения от максимальной скорости ω_M до нулевой скорости (где при расчетах значение ω_M в относительных единицах принималось равным единице: $\omega_M = 1$ о.е., что, как известно, соответствует в относительных единицах синхронной скорости этого электродвигателя [4, 7]);

- последующие исследования проводились для предложенного энергосберегающего управления в сравнении с известными (линейным и параболическим) видами изменения скорости ЧРАД применительно к параметрам: асинхронных электродвигателей типов А03-400М-У2 мощностью 315 кВт и АДО-2000-6000-12У1 мощностью 2000 кВт, а также центробежного вентилятора типа ВМ-17 [19] и дымососа типа ДОД-31,5 ФГМ [20] (основные паспортные данные которых приведены в табл. 1).

Таблица 1

Паспортные данные двигателей, центробежного вентилятора ВМ-17 и дымососа ДОД 31,5 ФГМ

| Название параметра | Единицы измерения | Значения параметра | |
|---|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | А03-400М-У2 | АДО-2000-6000-12У1 |
| I Электродвигатели | | | |
| Номинальная мощность | кВт | 315 | 2000 |
| Номинальная скорость | об/мин. | 1485 | 497,5 |
| Номинальное линейное напряжение | В | 660 | 6000 |
| Номинальный фазный ток | А | 323 | 259,5 |
| Номинальный коэффициент полезного действия | % | 94 | 96,3 |
| Номинальный коэффициент мощности | о.е. | 0,91 | 0,77 |
| Пусковая перегрузочная способность по моменту | о.е. | 0,9 | 1,0 |
| Максимальная перегрузочная способность по моменту | о.е. | 2 | 2,5 |
| Кратность пускового тока | о.е. | 7 | 5,5 |
| Активное сопротивление статорной обмотки | 10^{-3} о.е. | 18,09 | 8,989 |
| Активное сопротивление роторной обмотки (приведенной к статору) | 10^{-3} о.е. | 10,73 | 5,543 |
| Индуктивность намагничивания | о.е. | 4,50 | 3,582 |
| Индуктивность рассеяния статора | о.е. | 0,1605 | 0,0633 |
| Индуктивность рассеяния ротора | о.е. | 0,1264 | 0,0603 |
| Момент инерции ротора | кг·м ² | 7,25 | 196,5 |
| II Центробежный вентилятор и дымосос | | | |
| | | ВМ-17 | ДОД 31,5 ФГМ |
| Номинальная скорость | об/мин. | 1500 | 495 |
| Номинальная производительность | 10 ³ м ³ /ч | 58 | 985000 |
| Номинальное полное давление | кгс/м ² | 9383 | 500 |
| Номинальная мощность на валу двигателя | кВт | 177 | 1790 |
| Максимальный коэффициент полезного действия | % | 82 | 80,5 |
| Диаметр рабочего колеса | м | 1,7 | 3,176 |
| Момент инерции ротора | кг·м ² | 190 | 5375 |

Для нахождения и анализа основных электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД при векторном управлении с постоянством потокоцепления ротора двигателя воспользуемся зависимостью [10]:

$$\Delta P_{em} \approx a + b \cdot (M_c + J\omega')^2 + c \cdot \omega^{1,3}, \quad (1)$$

в которой постоянные коэффициенты рассчитываются через параметры ЧРАД из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} a &= (\Psi_r / L_m)^2 \cdot (R_s + 0,005 \cdot P_n / \eta_n), \\ b &= (R_s + k_r^2 R_r + 0,005 \cdot P_n / \eta_n) / (k_r^2 \Psi_r^2), \quad c = \Delta P_{cmn} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) используются следующие обозначения: M_c и J – приведенные к валу двигателя соответственно момент сопротивления нагрузки и момент инерции привода; Ψ_r и ω – модуль потокосцепления ротора и угловая частота вращения (скорость) ротора двигателя соответственно; R_s и R_r – активные сопротивления соответственно статорной и роторной (приведенной к статору) фазных обмоток двигателя; P_n и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя; ΔP_{cmn} и k_r – номинальное значение потерь в стали и коэффициент связи ротора двигателя соответственно; $\omega' = d\omega/dt$ – первая производная скорости по времени. При этом посредством слагаемого, равного $0,005 \cdot P_n / \eta_n$ и содержащегося в первой и второй формулах из (2), учитываются в составе потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} в том числе добавочные потери мощности асинхронного двигателя [13].

Подставив в (1) значение момента сопротивления M_c для вентиляторной нагрузки [2, 14]:

$$M_c = M_{cn} \cdot (\omega / \omega_n)^2, \quad (3)$$

получим аналитическую зависимость для расчета потерь электромагнитной мощности в ЧРАД, приводящем в движение центробежный вентилятор или дымосос:

$$\Delta P_{em} \approx a + b \cdot (q \cdot \omega^2 + J\omega')^2 + c \cdot \omega^{1,3}. \quad (4)$$

При этом значение постоянного коэффициента q в (4) находится через номинальные значения момента сопротивления M_{cn} и мощности P_{cn} вентиляторной нагрузки (соответствующие номинальной скорости ω_n вентилятора или дымососа) из соотношений [2, 14]:

$$q = M_{cn} / \omega_n^2 \quad \text{и} \quad M_{cn} = P_{cn} / \omega_n. \quad (5)$$

После подстановки потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} из (4) в соотношения:

$$\Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{em} \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_m = \int_0^{t_m} \Delta P_{em} \cdot dt, \quad (6)$$

получим из (6) аналитические выражения для расчета основных электромагнитных потерь энергии (ОЭПЭ) рассматриваемого двигателя с вентиляторной нагрузкой соответственно при разгоне и торможении (где t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения соответственно).

На первом этапе найдем оптимальную траекторию скорости ЧРАД (приводящего в движение вентиляторную нагрузку), при которой значения ОЭПЭ двигателя в пускотормозных режимах минимальны. Как известно из теории вариационного исчисления, оптимизация (минимизация) основных электромагнитных потерь энергии ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при разгоне и торможении:

$$\Delta W_p = \Delta W_p^o = \min \quad \text{и} \quad \Delta W_m = \Delta W_m^o = \min, \quad (7)$$

описываемых математически интегральными зависимостями (6) от функции ΔP_{em} из (4), зависящий от переменных величин: скорости ω и ее производной скорости ω' по времени, – осуществляется при временных функциях для скорости ω , отвечающих уравнению Эйлера [15]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} \cdot \omega'' + \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial \omega'} + \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega} = 0, \quad (8)$$

где $\omega'' = d^2\omega/d^2t$ – вторая производная скорости по времени.

После вычисления входящих в уравнение Эйлера (8) частных производных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega} &= b \cdot [4q^2 \cdot \omega^3 + 4qJ\omega \cdot \omega'] + 1,3c \cdot \omega^{0,3}, & \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega \cdot \partial t} &= 0, \\ \frac{\partial(\Delta P_{em})}{\partial \omega'} &= b \cdot [2qJ \cdot \omega^2 + 4J^2 \omega'], & \frac{\partial^2(\Delta P_{em})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} &= 2bJ^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

и их подстановки в уравнение (8) найдем математическое выражение для этого уравнения применительно к пускотормозным режимам ЧРАД с вентиляторной нагрузкой:

$$\omega'' = N \cdot \omega^3 + K \cdot \omega^{0,3}, \quad (10)$$

где постоянные коэффициенты N и K рассчитываются с учетом (5) и (9) из соотношений:

$$N = 2q/J^2 = 2M_{cn}/J^2\omega_n^2 = 2P_{cn}/J^2\omega_n^3 \quad \text{и} \quad K = 1,3 \cdot c/2bJ^2. \quad (11)$$

Анализ вида полученного уравнения (10) свидетельствует о том, что оно является нелинейным дифференциальным уравнением (ДУ) второго порядка, в котором в левой части присутствует вторая производная ω'' скорости, а в правой части содержится сумма двух нелинейных (то есть, с показателями, не равными единице) степенных функций от переменной ω , характеризующихся следующими значениями этих показателей: 3 и 0,3. Как известно, нелинейное ДУ не имеет точного аналитического решения [16] и для его численного решения используются различные существующие итерационные методы [17].

В предложенном исследовании численное решение нелинейного ДУ (10) применительно к значениям постоянных коэффициентов $N = 1,9156 \cdot 10^{-8}$ о.е. и $K = 2,0194 \cdot 10^{-8}$ о.е. (соответствующих параметрам электродвигателя АОЗ-400М-У2 и центробежного вентилятора ВМ-17 из табл.1) выполнено методом Рунге-Кутты [17] и построено для режимов разгона (за время $t_p = 1,57 \cdot 10^3$ о.е. = 50с от нулевой до максимальной скорости $\omega_M = 1$ о.е.) и торможения (за время $t_m = 1,57 \cdot 10^3$ о.е. = 50с от максимальной $\omega_M = 1$ о.е. до нулевой скорости) сплошной линией на рис.1,а,б. Только обозначенные буквой «О» и показанные сплошной линией на этом рисунке траектории изменения скорости (тахограммы) ЧРАД из всех других возможных их видов являются оптимальными, так как лишь они, согласно уравнению Эйлера (8), обеспечивают для ЧРАД минимально возможные значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения.

На *втором этапе* для режимов разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой (применительно к параметрам двигателя АОЗ-400М-У2 и вентилятора ВМ-17) осуществим интерполяцию рассчитанных численным методом на первом этапе оптимальных тахограмм разгона и торможения (показанных на рис.1,а,б сплошной линией и обозначенных буквой «О») аналитическими зависимостями, характеризующимися наименьшими среднеквадратичными отклонениями оптимальных тахограмм.

В начале этих исследований задавались разные известные математические функции (степенная, показательная, гиперболическая, тригонометрическая и логарифмическая), вид у которых похож на вид оптимальной тахограммы «О» для ЧРАД на рис.1,а,б. При идентичных начальных и конечных значениях скоростей и при одинаковых временах $t_{p,m}$ разгона (или торможения) расхождение интерполирующих аналитических функций (характеризующихся текущими значениями ω) от оптимальной тахограммы ЧРАД (характеризующейся текущими значениями ω^*) оценивалось по величине среднеквадратичного отклонения, определяемого из соотношения:

$$\delta = \left[\frac{1}{t_{p,m}} \int_0^{t_{p,m}} (\omega - \omega^*)^2 \cdot dt \right]^{0,5}. \quad (12)$$

Результатами приведенных исследований установлено, что из всех перечисленных известных интерполирующих функций наилучшим совпадением с оптимальным численным решением (показанным кривыми «О» на рис.1,а,б) характеризуется общее аналитическое решение для нелинейного ДУ (10) в виде функции гиперболического синуса с варьируемым значением коэффициента ξ в аргументе:

$$\omega = C_1 \cdot sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t + C_2), \quad (13)$$

где C_1 и C_2 – постоянные величины, определяемые из начальных и конечных значений для скорости ЧРАД в рассматриваемых пускотормозных режимах; t – текущее время, изменяемое в пределах: $0 \leq t \leq t_p$ – при разгоне и $0 \leq t \leq t_m$ – при торможении.

Полученные из (13) частные решения, соответствующие принятым ранее начальным и конечным значениям скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой (идентичным ранее рассмотренным для точного численного решения «О» на рис.1,а,б), имеют следующий вид:

$$\omega = \omega_M \cdot \left[\frac{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right] \quad \text{и} \quad \omega = \omega_M \cdot \left\{ \frac{\text{sh}[\xi \cdot \sqrt{K} \cdot (t_m - t)]}{\text{sh}(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \quad (14)$$

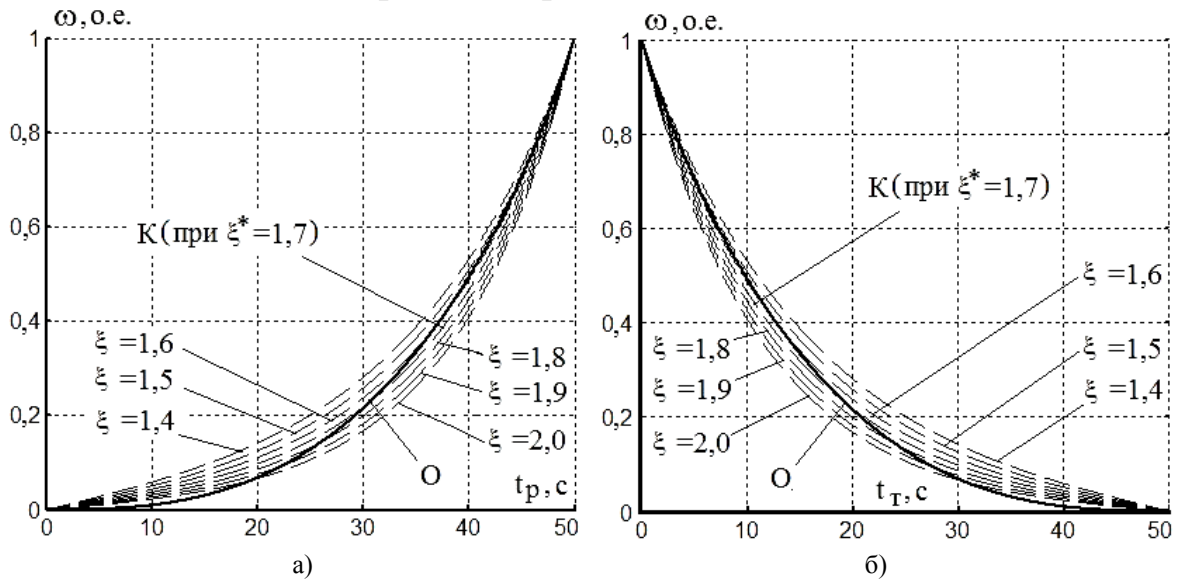


Рисунок 1. Графические зависимости для: оптимальной (О), квазиоптимальной (К) при $\xi = \xi^*$ и в виде функции гиперболического синуса тахограмм (последние показаны пунктиром при разных значениях поправочного коэффициента ξ) для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой: а – при разгоне, б – при торможении

соответственно при разгоне или торможении, где ω_M – максимальные значения скорости двигателя (соответствующие окончанию разгона или началу торможения); начальное значение скорости при разгоне и конечное значение скорости при торможении приняты равными нулю; t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения соответственно.

При варьировании значения поправочного коэффициента ξ в диапазоне от 1,4 до 1,8 о.е. рассчитаны из (14) для режимов разгона и торможения (при $t_p = t_m = 50$ с) текущие значения скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, интерполированные функциями гиперболического синуса и показанные пунктирными графиками на рис.1,а,б. Для каждого из этих графиков вычислены среднеквадратичные отклонения (приведенные в табл. 2) от оптимальной тахограммы «О» скорости, показанной сплошной линией на этих рисунках.

Таблица 2

Значения среднеквадратичного отклонения между оптимальной и интерполированной в виде гиперболического синуса тахограммами ЧРАД в зависимости от поправочного коэффициента ξ

| Величина, ед. измер. | Значение величины | | | | | | | ξ^* |
|----------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| ξ , о.е. | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,70 |
| δ , % | 5,2190 | 3,7632 | 2,6505 | 2,2059 | 2,6120 | 3,4843 | 4,4917 | 2.2059 |

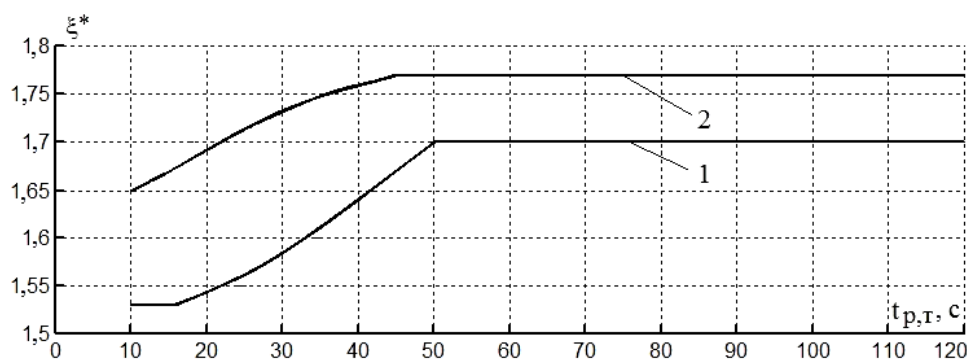
Виявлено, що існує таке оптимальне значення ξ^* поправочного коефіцієнта ξ (для рис.1,а,б значення $\xi^* = 1,70$), при якому обчислене з (12) середньквадратичне відхилення мінімально (для вказаного рисунка: $\delta = 2,2\%$). Вказана (найкращим чином збігаючись з оптимальною кривою швидкості «О» на рис.1, а, б) тахограма ЧРАД, що відповідає оптимальному значенню поправочного коефіцієнта $\xi = \xi^*$, названа «квазіоптимальною» і позначена на малюнку літерою «К»).

Були виконані аналітичні розрахунки оптимальних значень ξ^* поправочного коефіцієнта ξ при зміні часів розгону t_p і гальмування t_m двигачів типу А03-400М-У2 (з центробіжним вентилятором ВМ-17) і АОД-2000-6000-12У1 (з дымососом ДОД-31,5ФГМ) в діапазоні тривалостей від 10 с до 120 с, результати яких наведені в табл. 3. По отриманих з табл. 3 даних побудовані на рис. 2 графічні залежності, що характеризують зміну оптимального значення ξ^* поправочного коефіцієнта ξ для квазіоптимальних тахограм ЧРАД з вентиляторною навантажкою при різних часах розгону і гальмування.

Таблиця 3

Залежність оптимальних значень поправочних коефіцієнтів ξ^* при квазіоптимальній траєкторії швидкості від тривалості часів розгону (гальмування)

| Назва величини, одиниця виміру | Значення величини | | | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | I Електродвигач А03-400М-У2 з центробіжним вентилятором ВМ-17 | | | | | | | |
| Час $t_{p,m}$, с | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Коефіцієнт ξ^* , о.е. | 1,53 | 1,53 | 1,54 | 1,57 | 1,58 | 1,61 | 1,64 | 1,67 |
| Час $t_{p,m}$, с | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| Коефіцієнт ξ^* , о.е. | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| II Електродвигач АОД-2000-6000-12У1 з дымососом ДОД-31,5 ФГМ | | | | | | | | |
| Час $t_{p,m}$, с | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Коефіцієнт ξ^* , о.е. | 1,65 | 1,67 | 1,69 | 1,72 | 1,73 | 1,75 | 1,76 | 1,77 |
| Час $t_{p,m}$, с | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| Коефіцієнт ξ^* , о.е. | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 1,77 | 1,77 |



**Рисунки 2. Залежності при квазіоптимальних тахограмах оптимального значення ξ^* поправочного коефіцієнта від часу розгону (або гальмування):
1 – для двигача А03-400М-У2 з вентилятором ВМ-17;
2 – для двигача АОД-2000-6000-12У1 з дымососом ДОД-31,5ФГМ.**

При цьому виявлено, що в згаданому широкому діапазоні зміни тривалостей часів розгону і гальмування ЧРАД з вентиляторною навантажкою середньквадратичні відхилення між поточними значеннями швидкостей, розрахованими з аналітичних залежностей (14) при оптимальних значеннях коефіцієнта ξ^* , і поточним оптимальним значенням швидкості двигача (заданим кривими «О» на рис.1,а,б) не перевищують: 2,2% для ВМ-17 або 1,25% для ДОД-31,5ФГМ, що на практиці, очевидно, допустимо для інженерних розрахунків. Отримані при оптимальних значеннях ξ^* поправочного коефіцієнта траєкторії зміни швидкості:

$$\omega = \omega_M \cdot \left[\frac{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right], \quad \omega = \omega_M \cdot \left\{ \frac{\text{sh}[\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot (t_m - t)]}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \quad (15)$$

и реализующее их автоматическое управление предложено называть «квазиоптимальными» соответственно тахограммами и управлением в пускотормозных режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой.

В качестве иллюстрации вида полученных квазиоптимальных тахограмм (на примере электродвигателя А03-400М-У2 с центробежным вентилятором ВМ-17) приведены на рис. 3 рассчитанные квазиоптимальные тахограммы (обозначенные буквой «К») для времен разгона и торможения, равных: 30 с; 60 с; 90 с и 120 с. Для сравнения на этих же рисунках при указанных значениях длительностей времен разгона и торможения представлены тахограммы для тех же двигателя и вентилятора при линейном и параболическом видах изменения скорости от времени (обозначенные соответственно буквами «Л» и «П»).

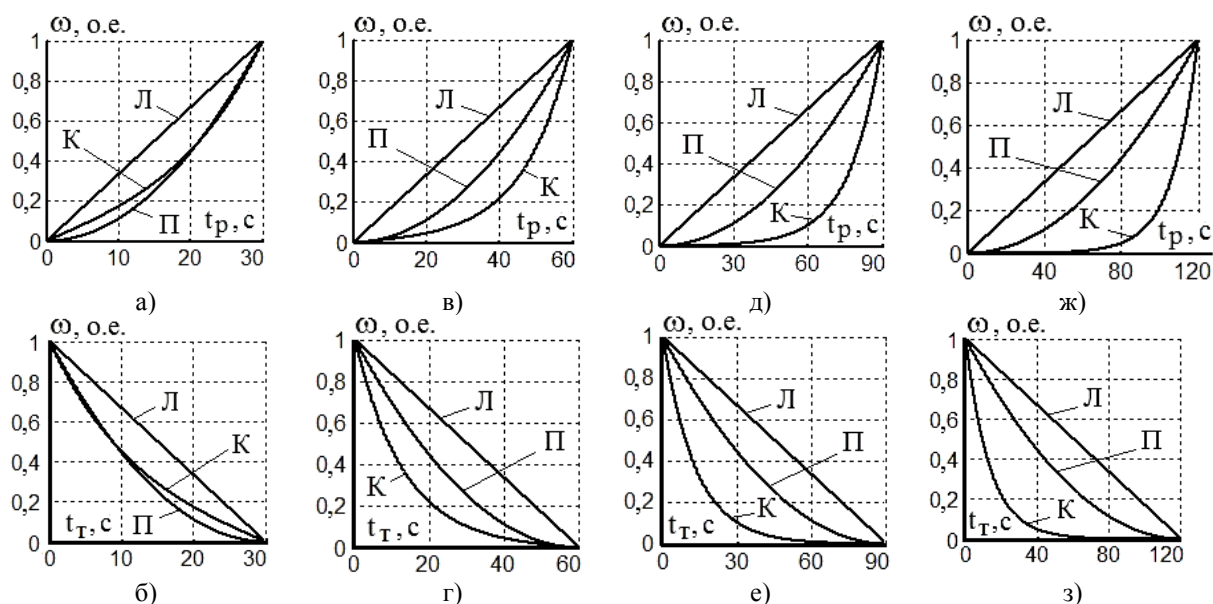


Рисунок 3. Квазиоптимальные тахограммы разгона (а, в, д, ж) и торможения (б, г, е, з) двигателя А03-400М-У2 с центробежным вентилятором ВМ-17 для длительностей времен $t_{p,m}$, равных:

а, б – 30с (при $\xi^* = 1,58$); в,г – 60с (при $\xi^* = 1,7$); д, е – 90с (при $\xi^* = 1,7$); ж, з – 120с (при $\xi^* = 1,7$)

На *третьем этапе* выполним анализ приближенного математического выражения (1) для вычисления электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД и уточним его. Важным достоинством выражения (1) является относительная его простота, которая позволяет за счет этого получить, в свою очередь, простой вид (10) уравнения Эйлера и найти его приближенное общее (13) и частные (15) решения.

Однако, рассматриваемое выражение (1) характеризуется определенной погрешностью при расчете упомянутых электромагнитных потерь мощности ΔP_{em} ЧРАД, так как в указанном выражении не учитывается дополнительная составляющая электрических потерь мощности для статорной обмотки, вызванная передачей через нее энергии, затрачиваемой в виде потерь мощности ΔP_{cm} в стали двигателя.

Проиллюстрируем выше изложенное с использованием «Т»-образной схемы замещения ЧРАД из [4], представленной на рис. 4 и составленной в обобщенных векторах (статорного напряжения \bar{U}_s , статорного \bar{I}_s и роторного \bar{I}_r токов, результирующего тока намагничивания $\bar{I}_{m\Sigma}$, электродвижущих сил (ЭДС): намагничивания \bar{E}_m , ротора \bar{E}_p и вращения $j \cdot \omega \cdot \bar{\Psi}_r$). В схеме замещения применены следующие обозначения параметров: R_s и R_r – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора соответственно; L_m и R_m – фазные значения индуктивности намагничивания и эквивалентного активного сопротивления контура намагничивания соответственно; $\bar{\Psi}_r$ и ω – обобщенный вектор потокосцепления ротора и угловая частота вращения (скорость) ротора соответственно; j – мнимая единица.

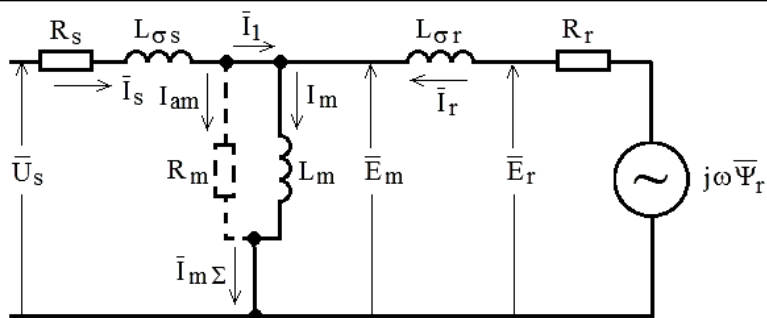


Рис. 4. Схема замещения ЧРАД (соответствующая: без наличия в ней резистора R_m – идеализированному, а с наличием резистора R_m – неидеализированному представлению этого двигателя)

При идеализированном представлении ЧРАД (когда в нем не учитываются потери в стали, которые принимаются равными нулю: $\Delta P_{cm} \approx 0$) в схеме замещения на рис.4 отсутствует резистор R_m и протекающая через этот резистор активная составляющая I_{am} обобщенного вектора $\bar{I}_{m\Sigma}$ тока намагничивания равна нулю ($I_{am} = 0$), а модуль $I_{m\Sigma}$ указанного обобщенного вектора равен реактивной составляющей I_m тока намагничивания ($I_{m\Sigma} = I_m$). Очевидно, для идеализированного ЧРАД соответствует равенство обобщенных векторов: статорного тока \bar{I}_s (потребляемого статорной обмоткой от преобразователя частоты) и статорного тока \bar{I}_1 (равного разности обобщенных векторов намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$ и роторного тока \bar{I}_r на рис. 4).

При неидеализированном ЧРАД (когда в нем осуществляется учет потерь мощности в стали: $\Delta P_{cm} \neq 0$) в схеме замещения на рис.4 присутствует эквивалентный резистор R_m , в котором потери активной мощности (при протекании через него активной составляющей I_{am} вектора намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$) равняются упомянутым текущим потерям мощности в стали двигателя: $R_m \cdot I_{am}^2 = \Delta P_{cm}$.

В связи с нелинейным характером изменения потерь мощности в стали ЧРАД, следующим из последнего слагаемого в (1), а также существующей зависимостью значения активной составляющей I_{am} обобщенного вектора намагничивающего тока $\bar{I}_{m\Sigma}$ от модуля E_m обобщенного вектора ЭДС намагничивания \bar{E}_m двигателя (находящегося в виде произведения модуля обобщенного вектора магнитного потока намагничивания Ψ_m и угловой частоты этого вектора ω_1 [4]: $E_m = \omega_1 \cdot \Psi_m$), определение текущего значения сопротивления эквивалентного резистора R_m для ЧРАД в рассматриваемых динамических режимах разгона и торможения чрезвычайно сложно и характеризуется очень громоздкими (препятствующими широкому инженерному использованию на практике) математическими соотношениями.

Предлагается другой способ учета потерь мощности в стали неидеализированного ЧРАД, а именно – путем изменения расчетной зависимости для этих потерь в стали из (1) на более точную [13]:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm.n} \cdot \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{m.n}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{1n}} \right)^{1,3} \quad (16)$$

и введения в исходное расчетное выражение (1) для электромагнитных потерь мощности ЧРАД дополнительной составляющей электрических потерь ΔP_{ed} , вызванных увеличением значения активной (моментобразующей) составляющей I_{sy} обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s неидеализированного ЧРАД. В зависимости (16) используются обозначения: $\Delta P_{cm.n}$ – номинальное значение потерь мощности в стали асинхронного двигателя (соответствующее его номинальной скорости); Ψ_m и $\Psi_{m.n}$ – текущее и номинальное значения модуля обобщенного вектора потока намагничивания ЧРАД; ω_1 и ω_{1n} – текущее и номинальное значения угловой частоты магнитного поля статора двигателя (где $\omega_{1n} = 1$ о.е.).

Последние из упомянутых величин рассчитываются из соотношений [4]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_m &= \sqrt{\Psi_r^2 + k_r^2 \cdot L_{\sigma r}^2 \cdot I_{1y}^2} \quad , & \omega_I &= \omega + \beta \quad , \\ \Psi_{mn} &= \sqrt{\Psi_m^2 + k_r^2 \cdot L_{\sigma r}^2 \cdot I_{1yn}^2} \quad , & \beta &= \frac{k_r \cdot R_r}{\Psi_m} \cdot I_{1y} = \frac{R_r}{\Psi_m^2} \cdot M \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где β – абсолютное скольжение двигателя; I_{1y} и I_{1yn} – соответственно текущее и номинальное (соответствующее номинальному значению электромагнитного момента) значения активной (моментаобразующей) составляющей обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_1 идеализированного ЧРАД; M – электромагнитный момент двигателя (соответствующий идеализированному и неидеализированному ЧРАД).

Для пояснения необходимости расчета дополнительной электрической составляющей $\Delta P_{e,d}$ потерь мощности сначала приведем известное математическое выражение для расчета передаваемой через трехфазную статорную обмотку к ротору идеализированного ЧРАД (когда в нем не учитываются потери в стали) электромагнитной мощности [4]:

$$P_{em} = \omega_I \cdot (k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{1y}) \quad (18)$$

требуемой для создания при заданной угловой частоте ω_I вращения магнитного поля статора необходимого значения электромагнитного момента двигателя [4]:

$$M = k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{1y} \quad (19)$$

Затем рассмотрим неидеализированный ЧРАД, в котором учитываются потери мощности в стали при создании требуемого из (18) значения электромагнитной мощности (передаваемой в ротор). Для получения данного значения из (18) электромагнитной мощности в роторе, очевидно, необходимо в трехфазной статорной обмотке двигателя создать превышающее (на величину потерь в стали) значение P_{em}^* электромагнитной мощности ЧРАД:

$$P_{em}^* = P_{em} + \Delta P_{cm} \quad (20)$$

определяемое аналогично соотношению (18) в виде:

$$P_{em}^* = \omega_I \cdot (k_r \cdot \Psi_r \cdot I_{sy}) \quad (21)$$

где I_{sy} – активная (моментаобразующая) составляющая обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s для неидеализированного ЧРАД (согласно рис.5).

После подстановки выражений (16), (18) и (21) в (20) определим увеличение ΔI_{sy} активной составляющей обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s , обеспечивающее при поддержании заданного из (18) значения электромагнитной мощности P_{em} в роторе ЧРАД одновременное создание дополнительной активной мощности $\Delta P_{e,d}$ в статорной обмотке, затрачиваемой при передаче мощности ΔP_{cm} (равной потерям мощности в стали двигателя) к эквивалентному резистору R_m в схеме замещения на рис.5:

$$\Delta I_{sy} = I_{sy} - I_{1y} = \frac{\Delta P_{cm,n}}{k_r \Psi_r} \cdot \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{mn}} \right)^2 \cdot \omega_I^{0,3} \quad (22)$$

Приведем математические соотношения для расчета входящих в (22) модулей I_1 и I_s обобщенных векторов \bar{I}_1 и \bar{I}_s статорного тока соответственно идеализированного и неидеализированного ЧРАД:

$$I_1 = [I_{1x}^2 + I_{1y}^2]^{0,5} \quad \text{и} \quad I_s = [I_{1x}^2 + I_{sy}^2]^{0,5} \quad (23)$$

$$\text{где} \quad I_{sy} = I_{1y} + \Delta I_{sy} \quad (24)$$

активная составляющая обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_s идеализированного ЧРАД; I_{1x} – равные между собой намагничивающие (потокообразующие) составляющие обобщенных векторов \bar{I}_1 и \bar{I}_s статорного тока идеализированного и идеализированного ЧРАД.

При использовании соотношений (20) – (22) рассчитаем приближенные электромагнитные потери мощности в идеализированном ЧРАД из соотношения [10]:

$$\Delta P_{em} \approx (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot I_1^2 + k^2 R_r \cdot I_{1y}^2 + \Delta P_{cm}, \quad (25)$$

и уточненные электромагнитные потери мощности в идеализированном двигателе из зависимости:

$$\Delta P_{em}^* = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot [I_{1x}^2 + (I_{1y} + \Delta I_{sy})^2] + k^2 R_r \cdot I_{1y}^2 + \Delta P_{cm}. \quad (26)$$

Приняв во внимание известные математические соотношения для электромагнитного момента [18]:

$$M = M_c + J \cdot \omega' , \quad (27)$$

а также для намагничивающей I_{1x} и активной I_{1y} составляющих идеализированного ЧРАД [4]:

$$I_{1x} = \frac{\Psi_r}{L_m} \quad \text{и} \quad I_{1y} = \frac{M}{k_r \Psi_r} , \quad (28)$$

соответствующие закону управления при постоянстве потокосцепления ротора ($\Psi = \Psi_r = const$), преобразуем выражение (26) для уточненных электромагнитных потерь мощности к следующему виду:

$$\Delta P_{em}^* = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot \left[\left(\frac{\Psi_r}{L_m} \right)^2 + \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} + \Delta I_{sy} \right)^2 \right] + \Delta P_{cm}, \quad (29)$$

где в формулах (25), (26) и (29) текущие потери мощности в стали ΔP_{cm} рассчитываются из (16).

В результате вычитания из уточненного значения ΔP_{em}^* электромагнитных потерь идеализированного ЧРАД, рассчитываемых из (29), их приближенного значения ΔP_{em} , вычисленного из (25), определим значения дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e.d}$ в виде:

$$\Delta P_{e.d} = \Delta P_{em}^* - \Delta P_{em} = (R_s + 0,005 P_n / \eta_n) \cdot \left[\left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} + \Delta I_{sy} \right)^2 - \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{k_r \Psi_r} \right)^2 \right]. \quad (30)$$

С учетом зависимостей (30) и (6) находится через приближенные значения ΔP_{em} электромагнитных потерь мощности идеализированного ЧРАД уточненное значение этих потерь:

$$\Delta P_{em}^* = \Delta P_{em} + \Delta P_{e.d} , \quad (31)$$

а через него – уточненные значения ОЭПЭ данного ЧРАД в пускотормозных режимах:

$$\Delta W_p^* = \int_0^{t_p} \Delta P_{em}^* \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_m^* = \int_0^{t_m} \Delta P_{em}^* \cdot dt. \quad (32)$$

С учетом соотношений (17), (22) и (23), (26), (30) и (31) рассчитывается ряд других зависимостей для пускотормозных режимов:

- квадрат отношения текущего Ψ_m и номинального Ψ_{mn} значений модуля обобщенного вектора намагничивания идеализированного ЧРАД:

$$(\Psi_m/\Psi_{mn})^2 = (\Psi_m^2 + k_r^2 L_{\sigma r}^2 I_{1y}^2) / (\Psi_m^2 + k_r^2 L_{\sigma r}^2 I_{1yn}^2); \quad (33)$$

- отношение текущих значений модулей обобщенных векторов статорного тока ЧРАД:

$$I_s / I_1 = [(I_{1x}^2 + I_{1y}^2) / (I_{1x}^2 + I_{1y}^2)]^{0,5}; \quad (34)$$

- отношение текущего значения дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e,d}$ к уточненным текущим значениям электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{em,p}^*$ или $\Delta P_{em,m}^*$ соответственно при разгоне и торможении неидеализированного ЧРАД:

$$\chi_p = \Delta P_{em,d} / \Delta P_{em,p}^* \quad \text{и} \quad \chi_m = \Delta P_{em,d} / \Delta P_{em,m}^*; \quad (35)$$

- отношение составляющей электромагнитных потерь энергии, вызванной дополнительными электрическими потерями мощности $\Delta P_{e,d}$, к уточненным электромагнитным потерям энергии ΔW_p^* и ΔW_m^* соответственно при разгоне и торможении неидеализированного ЧРАД:

$$\lambda_p = \frac{1}{\Delta W_p^*} \int_0^{t_p} \Delta P_{e,d} \cdot dt \quad \text{и} \quad \lambda_m = \frac{1}{\Delta W_m^*} \int_0^{t_m} \Delta P_{e,d} \cdot dt; \quad (36)$$

- отношение $\Delta P_{em}^* / \Delta P_{em}$ между собой уточненных ΔP_{em}^* и приближенных ΔP_{em} электромагнитных потерь мощности ЧРАД;

- отношение $\Delta W_{p,m}^* / \Delta W_{p,m}$ между собой уточненных $\Delta W_{p,m}^*$ и приближенных $\Delta W_{p,m}$ электромагнитных потерь энергии ЧРАД.

Эти расчетные значения позволяют оценить в зависимостях (22) – (24) и (30) – (32) влияние дополнительных электрических потерь мощности $\Delta P_{e,d}$ на точность определения модуля I_s обобщенного вектора статорного тока и на точность вычисления уточненных значений электромагнитных потерь мощности ΔP_{em}^* или энергии $\Delta W_{p,m}^*$ неидеализированного ЧРАД.

На четвертом этапе выполним исследования в пускотормозных режимах для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой: ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^*$ при изменении длительностей времен разгона и торможения; электро-механических и энергетических переходных процессов двигателя: ω , I_s , M_c , M , ΔP_{em}^* и $\Delta W_{p,m}^*$; а также упомянутых ранее величин: $(\Psi_r/\Psi_{rn})^2$, I_s / I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m , $\Delta P_{em}^* / \Delta P_{em}$ и $\Delta W_{p,m}^* / \Delta W_{p,m}$.

В частности, на рис.5 построены рассчитанные из (29) графические зависимости ОЭПЭ в режимах разгона и торможения для электродвигателя А03-400М-У2 (нагруженного на центробежный вентилятор ВМ-17) и электродвигателя АОД-2000-6000-12У1 (нагруженного на дымосос ДОД-31,5ФГМ) при варьировании длительностей времен разгона t_p и торможения t_m применительно к различным траекториям (линейной, параболической и квазиоптимальной) изменения скорости в пускотормозных режимах. Согласно рис.5 указанные зависимости уточненных ОЭПЭ $\Delta W_p^*(t_p)$ и $\Delta W_m^*(t_m)$ характеризуются явным «U»-образным видом, вследствие чего для всех видов (линейного, параболического и квазиоптимального) траекторий скорости ЧРАД существуют определенные значения длительностей времен разгона и торможения, при которых соответствующие им значения ОЭПЭ минимальны. Минимальные значения ОЭПЭ ΔW_p^o , ΔW_m^o и соответствующие им оптимальные значения времен t_p^o и t_m^o приведены в табл. 4.

В той же табл. 4 для сравнения представлены результаты расчета ОЭПЭ для тех же электродвигателей при нечастотных способах пуска и торможения (показанные без скобок для открытого, а в скобках – для закрытого состояния шибера) и соответствующие: прямому пуску (ПП), динамическому торможению (ДТ) и торможению противовключением (ТПВ). Эти расчеты выполнены с использованием известных аналитических зависимостей из [18]: сначала – применительно к трехфазному короткозамкнутому асинхронному двигателю (КАД), работающему на холостом ходу (т.е. при $M_c = 0$):

$$\Delta W_{mn.xx} \approx 0,5J \cdot \omega_M^2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_r}\right), \quad \Delta W_{dm.xx} \approx 0,5J \cdot \omega_M^2 \quad \Delta W_{mn.xx} \approx 1,5J \cdot \omega_M^2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_r}\right), \quad (37)$$

в режимах прямого пуска, динамического торможения и торможения противовключением.

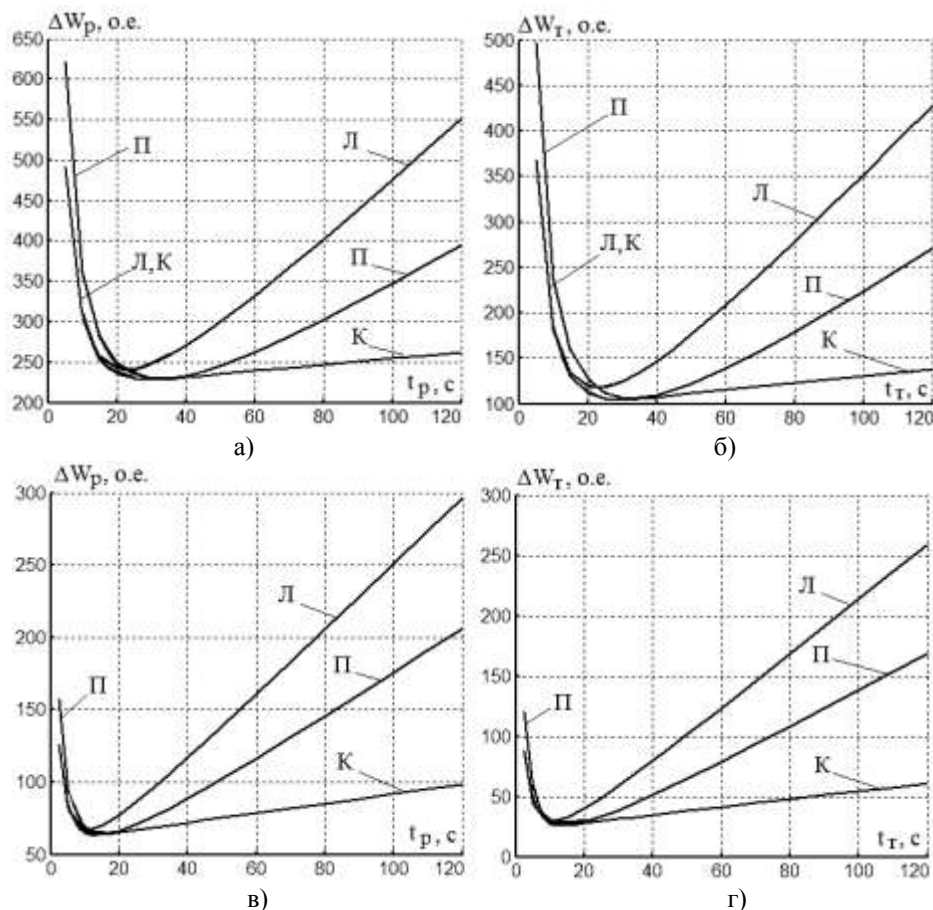


Рис. 5. Зависимости основных потерь электромагнитной энергии (а, б – для электродвигателя А03-400М-У2; в, г – для электродвигателя АОД-2000-6000-12У1) в режимах разгона (а, в) и торможения (б, г) с вентиляторной нагрузкой при линейной (Л), параболической (П) и квазиоптимальной (К) траекториях изменения скорости

Оптимальные значения времен $t_{p,m}$ разгона и торможения ЧРАД с вентиляторной нагрузкой и соответствующие им минимальные значения $\Delta W_{p,m}^o$ ОЭПЭ

| Тип двигателя | Название величин, ед.измер. | Режим | Вид тахограммы | | | Режим | $t_{p,m}$, с | $\Delta W_{p,m}$, 10^3 о.е. | $\Delta E_{p,m}$, кВтч |
|--------------------|-----------------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|---------------|--------------------------------|-------------------------|
| | | | Л | П | К | | | | |
| А03-400М-У2 | $t_{p,m}^o$, с | Р | 23 | 33 | 30,0 | ПП | 12,3 (11,1) | 6,56 (5,93) | 2,06 (1,86) |
| | | Т | 23 | 33 | 30,0 | ДТ | 29,2 (39,1) | 1,19 (1,60) | 0,356 (0,489) |
| | $\Delta W_{p,m}^o$, о.е. | Р | 241,4 | 229,9 | 228,3 | ТП | 14,9 (17,1) | 13,1 (15,1) | 4,24 (4,87) |
| | | Т | 117,7 | 106,1 | 104,5 | В | 7,60 (9,11) | 5,59 (6,70) | 13,3 (15,9) |
| АОД-2000-6000-12У1 | $t_{p,m}^o$, с | Р | 11 | 15 | 13 | ПП | 5,81 (5,16) | 3,12 (2,77) | 7,27 (6,43) |
| | | Т | 11 | 15 | 13 | ДТ | 13,9 (19,9) | 0,486 (0,698) | 1,11 (1,61) |
| | $\Delta W_{p,m}^o$, о.е. | Р | 67,04 | 64,29 | 63,60 | ТП | 7,60 (9,11) | 5,59 (6,70) | 13,3 (15,9) |
| | | Т | 29,60 | 26,85 | 26,16 | В | 7,60 (9,11) | 5,59 (6,70) | 13,3 (15,9) |

Затем определялись электромагнитные потери энергии в тех же режимах применительно для КАД, работающего с вентиляторной нагрузкой, из соотношений [18]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{nn} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} - M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{nn.xx}, & \Delta W_{dm} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{dm.xx}, \\ \Delta W_{mm} &\approx \left(\frac{M_{cp}}{M_{cp} + M_{c.cp}} \right) \cdot \Delta W_{mm.xx} \end{aligned} \right\}, \quad (38)$$

в которых средние значения M_{cp} электромагнитного момента двигателя находилось приближенно:

$$M_{cp,nn} \approx 0,5M_n(\lambda_n + \lambda_M), \quad M_{cp,dm} \approx -0,3M_n, \quad M_{cp,m} \approx -0,8M_n - \quad (39)$$

При прямом пуске, динамическом торможении и торможении противовключением соответственно, а среднее значение $M_{c.cp}$ статического момента нагрузки вычислялось приближенно с учетом (3) в виде:

$$M_{c.cp} \approx \frac{k}{t_{p,m}} \int_0^{t_{p,m}} M_{cn} \cdot \left(\frac{t}{t_{p,m}} \right)^2 \cdot dt = \frac{k}{3} M_{cn}, \quad (40)$$

где M_n – номинальное значение электромагнитного момента двигателя; λ_n и λ_M – паспортные значения пусковой и максимальной перегрузочных способностей двигателя по моменту; M_{cn} – номинальное значение статического момента вентиляторной нагрузки; k – коэффициент, равный единице при полностью открытом или 0,4 – при закрытом шибере [2].

Также в табл. 4 приведены (без скобок – с открытым, в скобках – с закрытым шибером) значения экономии $\Delta E_{p,m}$ электроэнергии, достигнутые за счет уменьшения ОЭПЭ в рассматриваемых двигателях при переходе от прямого пуска, динамического торможения и торможения противовключением – к частотным пуску и торможению, которые приходится на один пуск (или одно торможение) и рассчитывались соответственно в виде:

$$\Delta E_p = \Delta W_{nn} - \Delta W_p^o, \quad \Delta E_{m(dt)} = \Delta W_{dt} - \Delta W_m^o, \quad \Delta E_{m(tm)} = \Delta W_{tm} - \Delta W_m^o. \quad (41)$$

На рис. 6 построены (для оптимальных значений времен $t_{p,m}^o$ разгона и торможения электродвигателя А03-400М-У2, нагруженного на центробежный вентилятор ВМ-17) временные диаграммы электромеханических (скорости ω , модуля статорного тока I_s , статического момента M_c нагрузки, электромагнитного момента M) и энергетических (основных потерь электромагнитной мощности ΔP_{em}^* и энергии ΔW_p^* и ΔW_m^*) переходных процессов в ЧРАД, рассчитанных соответственно из зависимостей: (15), (23), (3), (27), (29) и (32) для указанного двигателя при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах.

На рис. 7 представлены графические зависимости для рассчитанных (применительно к электродвигателю А03-400М-У2, нагруженному на центробежный вентилятор ВМ-17) из соотношений (29) и (32), (33) – (36) величин: $(\Psi_r/\Psi_{rn})^2$, I_s/I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m , $\Delta P_{em}^*/\Delta P_{em}$ и $\Delta W_{p,m}^*/\Delta W_{p,m}$, – иллюстрирующих собой достигаемое повышение точности расчета ОЭПЭ ΔP_{em}^* и модуля I_s статорного тока с учетом уточненного расчета потерь в стали двигателя при пускотормозных режимах (для $t_{p,m} = 30$ с) с разными траекториями (линейной, параболической и квазиоптимальной) изменения скорости ЧРАД.

Представленные на рис. 7 графики свидетельствуют о превышении: при разгоне – модуля I_s статорного тока и потерь электромагнитной мощности ΔP_{em}^* над соответствующими значениями I_1 и ΔP_{em} этих параметров для идеализированного двигателя, а при торможении – наоборот, о превышении модуля

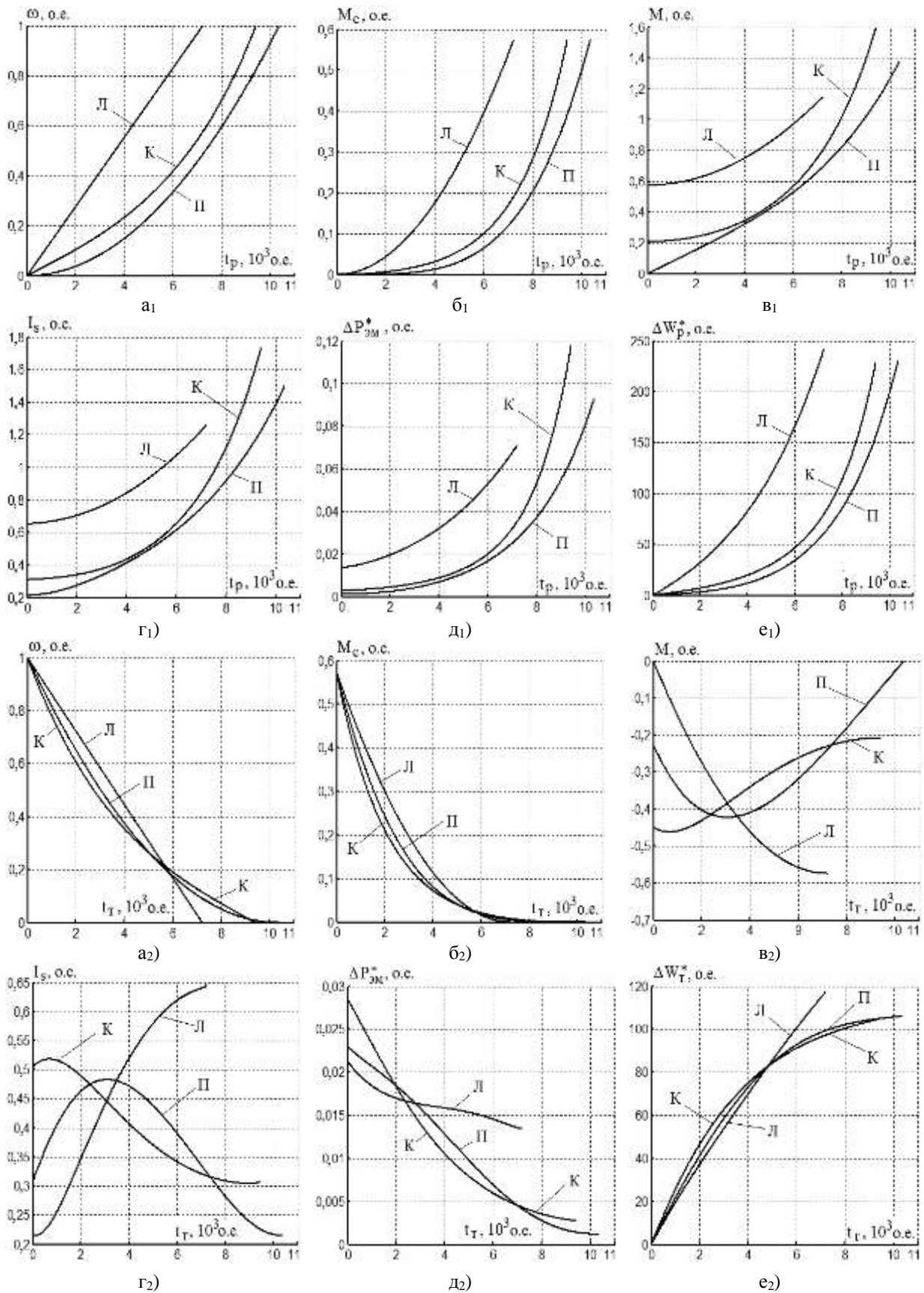


Рис. 6. Электромеханические и энергетические переходные процессы при оптимальных временах $t_{p,m}^0$ разгона (а1 – е1) и торможения (а2 – е2) электродвигателя А03-400М-У2 с вентиляторной нагрузкой для линейной (Л), параболической (П) и квазиоптимальной (К) траекторий изменения скорости

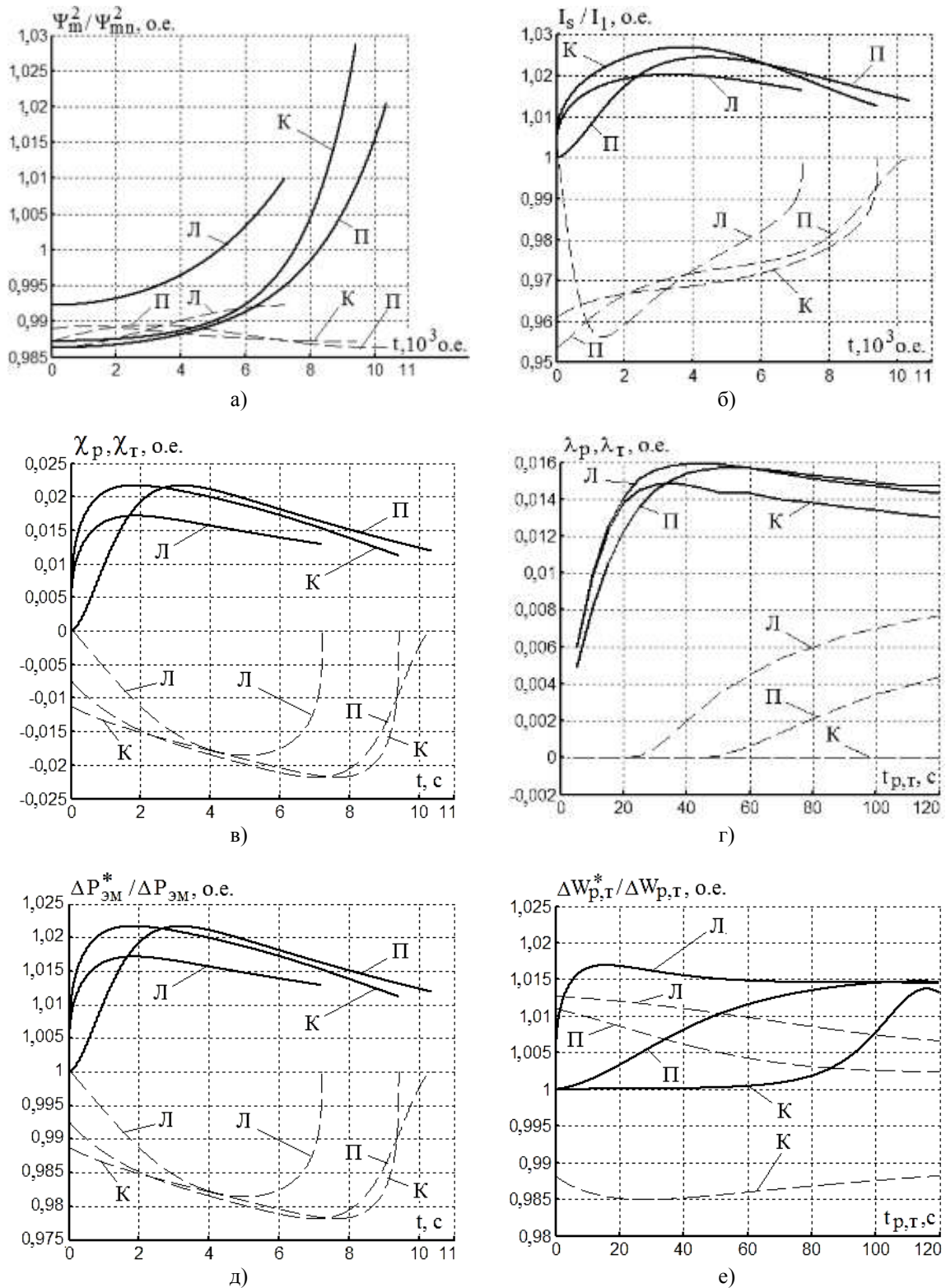


Рис.7 Рассчитанные для электродвигателя А03-400М-У2, нагруженного на вентиляторную нагрузку, графики величин: $(\Psi_r / \Psi_{rn})^2$, I_s / I_1 , χ_p и χ_m , λ_p и λ_m (показанные: сплошной линией – при разгоне, пунктиром – при торможении).

I_1 статорного тока и потерь электромагнитной мощности ΔP_{em} идеализированного ЧРАД над соответствующими значениями I_s и ΔP_{em}^* этих параметров неидеализированного двигателя. Это обусловлено тем, что энергия, затрачиваемая на потери в стали ЧРАД, передается неодинаковыми путями: при разгоне – с выхода преобразователя частоты через статорную обмотку к контуру намагничивания (показанному в виде элементов L_m и R_m на рис. 4), а при генераторном (рекуперативном) торможении – от вращающегося ротора к указанному контуру намагничивания.

Для перевода расчетных значений параметров режима ЧРАД из относительных единиц в абсолютные необходимо, как известно, умножить значение данной величины, полученное в относительных единицах, на соответствующее базисное значение для этой величины [4, 7]. Базисные значения для основных величин применительно к рассмотренным ЧРАД приведены в табл. 5.

Таблица 5

Базисные значения для основных расчетных величин ЧРАД

| Тип электродвигателя | мощность | энергия | момент | статорный ток | скорость | время |
|----------------------|----------|---------|--------|---------------|----------|--------|
| | кВт | кДж | Нм | А | рад/с | с |
| АОЗ-400М-У2 | 368,22 | 1,1727 | 2345 | 456,8 | 155,5 | 0,01/π |
| АОД-2000-6000-12У1 | 2697 | 8,589 | 51530 | 367 | 52,09 | 0,01/π |

ВЫВОДЫ

1. Предложенный вид квазиоптимальных траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах с вентиляторной нагрузкой (которые представляют временные функции (15) гиперболического синуса с варьируемым значением поправочного коэффициента ξ^*) обеспечивают хорошее совпадение (со среднеквадратичным отклонением менее 2,2%) с оптимальными траекториями скорости, соответствующими частным численным решениям уравнения (10) Эйлера. Согласно аналитическим (15) и графическим (на рис. 3) зависимостям для квазиоптимальных траекторий скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой, для них установлена зеркальная (относительно вертикальной оси « ω ») симметрия.

2. Выявлено, что в исследованном широком диапазоне изменения времен разгона и торможения отличие значений ОЭПЭ при квазиоптимальной (К) и оптимальной (О) траекториях ЧРАД (при одинаковых значениях указанных времен) не превышает 0,5%. При любых одинаковых значениях времен разгона (или торможения) ЧРАД с вентиляторной нагрузкой для квазиоптимальной траектории скорости достигаются наименьшие значения ОЭПЭ в двигателе по сравнению с другими известными видами (линейным, параболическим) этих траекторий. В частности, согласно рис. 5 значения ОЭПЭ для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой при квазиоптимальной траектории могут быть в пускотормозных режимах с временами, равными 120 с, меньше: в (2 – 3) раза – по сравнению с линейной или в (1,5 – 2) раза – по сравнению с параболической траекториями скорости (где большие значения соответствуют торможению).

3. Исходя из рис. 5, установлен для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий изменения скорости ЧРАД с вентиляторной нагрузкой «U»-образный вид зависимостей ОЭПЭ от длительности времени разгона и торможения. С учетом этого для данных траекторий скорости существуют оптимальные значения времен разгона и торможения, при которых значения ОЭПЭ двигателя в пускотормозных режимах минимальны.

4. За счет перехода от прямого пуска к частотному пуску (с квазиоптимальной, параболической или линейной траекториями скорости при оптимальных временах разгона ЧРАД с вентиляторной нагрузкой) обеспечивается уменьшение электромагнитных потерь энергии двигателя при пуске в (27 – 49) раз при открытом или в (24 – 43) раза при закрытом шибере, что позволяет не только снизить затраты на оплату электроэнергии, но и уменьшить нагрев двигателя и увеличить допустимое его количество пусков в сутки. Одновременно при этом, как известно, при частотных пусках в несколько раз увеличиваются (за счет исключения отрицательных воздействий повышенных пусковых значений электромагнитного момента и статорных токов) межремонтные сроки эксплуатации электродвигателей.

5. Полученные и показанные на рис. 6 для ЧРАД с вентиляторной нагрузкой временные диаграммы электромеханических и энергетических переходных процессов двигателя при разгоне и торможении свидетельствуют об их практической реализуемости (так как их текущие значения находятся в диапазоне допустимых для них рабочих значений).

6. Согласно графикам на рис. 7 предложенные зависимости (24), (26), (29) и (35) позволяют повысить точность расчета модуля I_s обобщенного вектора статорного тока и основных электромагнитных потерь мощности ΔP_{em}^* ЧРАД на 2,7% и 2,2%, а ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^*$ в пускотормозных режимах – на 1,7 %,

что достигается за счет учета потерь мощности в стали двигателя и дополнительных потерь мощности $\Delta P_{e,d}^*$, затрачиваемых на передачу указанных потерь в стали через статорную обмотку двигателя.

Список литературы

1. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелочков, М.Г. Ладычев. – М.: Теплотехник, 2005. – кн.1. – 688с.; кн.2 – 768с.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. Под ред. И.Я. Браславского. – М.: изд.центр. «Академия», 2004. – 256с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1966. – 298с.
4. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
5. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420с.
6. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
7. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
8. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.
9. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144с.
10. Волков А.В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А.В. Волков, А.А. Колесников // Электротехника. – 2013. – №5. – С.2–9.
11. Волков В.А. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – №2. – С.55 – 64.
12. Волков В.А. Исследование квазиоптимального управления скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя в пуско-тормозных режимах / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – №3. – С.23 – 37.
13. Радин В.И. Электрические машины: асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович: Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш.шк., 1988. – 328с.
14. Дымососы и вентиляторы: каталог-справочник. – М.:НИИ Информтяжмаш, 1974. – 184с.
15. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584с.
16. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
17. Кальницкий Л.А. Специальный курс высшей математики / Л.А. Кальницкий, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержеев. – М.: Высш.шк., 1978. – 389с.
18. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.Н. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1973. – 616с.
19. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/vm17-html/> (10.01.2018)
20. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/dymdod31-5-html/> (10.01.2018)

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, доц. Тиховодом С.М.

УДК 622.625.28

О.В. Єліна, канд. фіз.-мат. наук, М.М. Мілих, Є.М. Сніжко, канд.-ти техн. наук
(Україна, Дніпро, Дніпровський національний університет ім.Олесь Гончара)

Ю.Б.Починок

(Україна, Дніпро, ТОВ НВП „МонТекс”)

МОНІТОРИНГ БАТАРЕЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

Анотація. Розглянуто систему моніторингу батарей Li-Ion акумуляторів з використанням мереж MicroLan з інтерфейсом I-Wire, який об'єднує та дозволяє підключити до обладнання керування модулі вимірювання напруги, струму, температури та здійснювати пасивне балансування кожного окремого акумулятора батарей. Модулі захищені від високої напруги батареї гальванічною розв'язкою.

Ключові слова: Li-Ion акумулятор, система моніторингу, пасивна система балансування, вимірювання напруги, струму, температури батарей, гальванічна розв'язка, інтерфейс I-Wire.

Аннотація. Рассмотрена система мониторинга батарей Li-Ion аккумуляторов с использованием сети MicroLan с интерфейсом I-Wire, который объединяет и обеспечивает подключение к оборудованию управления модулей измерения напряжения, тока, температуры и пассивной балансировки каждого отдельного аккумулятора батареи. Модули защищены от высокого напряжения батареи гальванической развязкой.

Ключевые слова: Li-Ion аккумулятор, система мониторинга, пассивная система балансировки, измерение напряжения, тока, температуры батарей, гальваническая развязка, интерфейс I-Wire.

Abstract. The paper considers the system of monitoring of Li-Ion batteries using the MicroLan network with the I-Wire interface, which combines and provides connection to the control equipment of modules for measuring the voltage, current, temperature and passive balancing of each separate battery. Modules are protected from high voltage battery is electrically isolated.

Keywords: Li-Ion battery, system of monitoring, passive balancing of each separate battery, measuring the voltage, current, temperature, galvanic isolation, I-Wire interface.

Актуальність роботи. Батареї високої напруги на базі Li-Ion акумуляторів широко застосовуються в електротранспорті, пристроях безперебійного електроживлення. Використання таких батарей у гірничо-видобувній промисловості для електрифікації гірничних робіт підвищить їх ефективність завдяки великій енергетичній щільності, пікової потужності та великій кількості перезарядів (понад 3000) у порівнянні з іншими типами батарей.

Сьогодні для таких батарей та окремого використання виготовляються літій-іонні акумулятори (Li-Ion, в яких застосовано гелевий електроліт), літій-полімерні акумулятори (Li-Pol, в яких застосовано щільний полімер, насичений розчином літію [1]). Найбільш перспективними є літій-залізо-фосфатні акумулятори, в яких використовуються катоди на основі фосфатів LiFePO₄. Фосфати металів підгрупи заліза – представники нової групи електродних матеріалів літій-іонних джерел струму, в яких застосовується перезарядження, серед таких матеріалів найбільш перспективний LiFePO₄. Літій-залізо-фосфатні акумулятори мають більш високу питому ємність, потенціал заряду/розряду, термічну стійкість, постійну напругу розряду, практично, до повного розряду [2].

Використання накопичувачів енергії на основі літій-іонних акумуляторів усіх типів передбачає вирішення специфічних задач керування, які пов'язані з реалізацією спеціальних алгоритмів заряду та розряду для паралельно-последовних схем включення окремих елементів батарей з урахуванням того, що відбувається зміна в часі параметрів окремих елементів. Для вирішення цих задач необхідно проводити постійний контроль коефіцієнту зміни внутрішнього опору, величини напруги на кожному елементі батареї, температури елементів та за необхідності забезпечувати включення / відключення окремих елементів, щоб запобігати надзаряду, або надрозряду кожного акумулятора батареї [3].

Для забезпечення надійної, сталої та прогнозованої роботи накопичувачів енергії на базі літій-іонних акумуляторів потрібна автоматизована система моніторингу (Battery Monitoring System – BMS) і керування зарядженням / розрядженням, яка буде здійснювати накопичення інформації стосовно основних параметрів акумуляторів, що надасть можливість прогнозувати роботу батареї, дозволяє правильно планувати режими роботи та цикли заряду, а це підвищить терміни її експлуатації. Для експлуатації літій-іонних батарей необхідно застосовувати системи балансування, які зводять розбаланс напруги між окремими елементами батареї до мінімуму. Взагалі системи балансування можна поділити на пасивні та активні [4]. Пасивна система балансування буде зменшувати струм заряду того акумулятора батареї, напруга на якому зростає швидше. Активна система балансування перерозподіляє енергію в акумуляторній батареї і може працювати як при заряді, так і при розряді батареї. В цій роботі розглянуто побудову системи моніторингу з пасивним балансуванням.

Функції системи балансування. Процес зарядження батарей елементів літій-іонних акумуляторів розділяється на два основних етапи [3]. На першому етапі зарядження здійснюється постійним струмом при лінійно наростаючій напрузі на елементі до того, як напруга на елементі досягне рівня 4,1 – 4,2 В (3,2 В для LiFePO₄). На другому етапі зарядження здійснюється при постійній напрузі. Перший етап може тривати 40 хвилин або менше залежно від типу акумулятора, другий триває більш довгий період.

Струм зарядження акумуляторної батареї визначається величиною ємності C елементів, з яких вона складається, та дорівнює цій величині, наведеній в амперах. Струм заряду може змінюватись від $0.5C$ А до $2C$ А. Для літій-залізо-фосфатних елементів струм заряду може досягати 300 А – 1200 А. Формування постійного струму такої величини потребує створення системи спеціальних зарядних терміналів, які мають зворотній зв'язок зі системою моніторингу батареї. Таким чином, процес зарядження реалізується спільно зарядним терміналом (зовнішнім пристроєм відносно до акумуляторної батареї) та системою моніторингу (яка є складовою частиною батареї).

Загальною проблемою для будь – яких систем акумуляторних батарей з послідовним підключенням елементів є розкид параметрів окремих елементів або секцій, які складаються з паралельно включе-

них елементів. Для запобігання цього необхідно застосовувати вирівнювання параметрів секцій або елементів для проектування надійних батарей з більш розширеним терміном роботи та строком служби. Вирівнювання базується на вимірюванні рівня зарядженості кожної секції або елемента. При перегріві або при перезарядженні елемента може спостерігатися прискорене погіршення робочих характеристик.

Не існує двох ідентичних елементів або секцій акумуляторних батарей, завжди є деякі розходження у рівні заряду, швидкості саморозряду, ємності, повному опорі, температурному режимі. При складанні багато-секційних батарей виробники, як правило, проводять відбір елементів за однаковими або близькими значеннями напруги і рівнем заряду. Розходження у повному опорі, ємності та швидкості саморозряду можуть привести до розброду напруги між елементами. Оскільки зарядні пристрої визначають повний заряд по досягненню всіма секціями точки стабілізації напруги, то для окремих секцій або елементів їх напруги можуть розрізнитися, а для деяких перевищувати межу захисту від перенапруги [3].

Для запобігання цим процесам необхідно провадити вирівнювання напруг всіх повністю заряджених секцій або елементів акумуляторної батареї. Засоби вирівнювання поділяються на два типи: пасивний та активний. Пасивний спосіб вирівнювання параметрів (так званий засіб вирівнювання розрядних опорів) полягає в тому, що елементи, які потребують вирівнювання, розряджаються через обхідний ланцюг („байпас”), розсіюючи енергію (рис. 1).

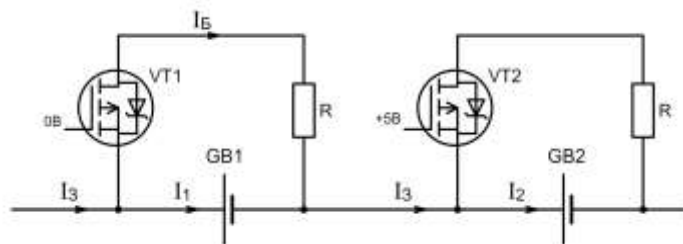


Рис.1 Схема ланцюгів пасивного вирівнювання

На схемі зображені ланцюги пасивного вирівнювання двох елементів батареї або секції з послідовним з'єднанням акумуляторів. Для акумулятора *GB1* обхідний ланцюг через відкритий MOSFET – транзистор *VT1* і резистор *R* забезпечує зменшення струму, що проходить через акумулятор, $I_1 = I_3 - I_B$ на величину струму, що проходить через „байпас”, I_B , для другого акумулятору транзистор *VT2* закритий і струм $I_2 = I_3$, тобто струму зарядження батареї або секції.

Пасивний метод призводить до втрат енергії у вигляді тепла і тому має менше переваг, але є більш простий тому використовується у більшості систем. Активний метод передбачає передачу надлишку енергії в секції з перезарядженням до інших секцій індуктивним або ємнісним методом, що не призводить до втрат енергії, але потребує більших витрат на додаткове обладнання.

При пасивному методі, якщо напруга окремої секції досягає порогу, зарядження припиняється та підключається „байпас”. Процес зарядження припиняється до того, як секція або елемент з більш високою напругою не досягне порогу відновлення, після чого вирівнювання припиняється.

Більш довершений алгоритм використовує стратегію вирівнювання параметрів виходячи з апроксимації швидкості зарядження секцій та замедлення більшої швидкості підключенням „байпас” не очікуючи моменту досягнення порогу. Такий алгоритм зменшує енергетичні витрати, але потребує більших обчислювальних потужностей процесору керування вирівнюванням.

Система має забезпечувати моніторинг батарей різноманітних схем з'єднання акумуляторів для досягнення необхідної напруги та струму батареї незалежно від потужності та розмірів секцій. Система моніторингу має визначати розряд струмом, який перевищує допустимий, та значення температури секцій, що вище норми, контролювати не перевищення допустимої напруги акумулятора та розряд, нижче допустимого, сигналізувати і відключати батарею при короткому замиканні. Можна встановити критичні параметри акумуляторів, що підлягають захисту (див. табл.1).

Таблиця 1

| Тип акумулятору | Li-Ion | Li-Pol | LiFePO4 |
|-----------------------------|--------|--------|---------|
| Максимальна напруга, В | 4,4 В | 4,2 В | 3,7 В |
| Мінімальна напруга, В | 3,0 В | 3,0 В | 2,2 В |
| Максимальна температура, °С | 60 | 60 | 70 |

Сьогодні провідні фірми серійного виготовляють мікросхеми, які виконують функції зарядження та моніторингу батарей літій-іонних акумуляторів, мають різні показники та призначені для роботи з різним числом елементів батарей.

Енергозбереження та енергоефективність

Наприклад, Analog Devices (США) випускають низку мікросхеми, одна з яких AD7280A містить всі функції направленої цільового моніторингу, що використовуються в гібридних електричних автомобільних батареях, і розрахована на керування до 6-ти послідовно з'єднаних елементів батареї. Ця мікросхема включає також динамічні функції, що можуть виявити, коли напруга на елементі перевищує верхній чи нижній ліміт, визначений користувачем, та виміряти напругу і температуру елементів батареї. Мікросхеми з аналогічною архітектурою випускаються іншими фірмами, в тому числі Texas Instruments на 16 елементів. Порівняльні функції та окремі параметри мікросхем для моніторингу наведені в табл. 2.

Таблиця 2

| Виробник | Analog Devices | Texas Instruments | STMicroelectronics | Maxim Integrated |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|
| Тип мікросхеми | AD7280A | bq76PL455A-Q | STC3115 | DS2756 |
| Число послідовно з'єднаних елементів | 6 | 16 | 1 | 1 |
| Вимірювання напруги | Виконується | Виконується | Виконується | Виконується |
| Вимірювання струму | Не виконується | Виконується | Не виконується | Виконується |
| Вимірювання температури | Із зовнішньою термопарою | Із зовнішнім датчиком | Не виконується | Виконується |
| Балансування | Виконується | Виконується | Виконується | Виконується |
| Інтерфейс | I2C | SPI | I2C | 1-Wire |

Розподілена система моніторингу з пасивним балансуванням Порівняльний аналіз елементної бази виявив, що застосування мікросхем, які розраховані на моніторинг декількох секцій, призводить до складних схем з'єднань вимірювальних ланцюгів, що знаходяться в умовах завад, викликаними змінами струму при включенні та виключенні навантаження. Тому найбільш доцільним є використання принципів побудови розподіленої системи збирання інформації та управління. Така система передбачає розташування модулю вимірювання та балансування безпосередньо на кожному елементі батареї або секції і з'єднання цих модулів з блоком керування за допомогою цифрового заводостійкого інтерфейса. Такі можливості надає мережа «MicroLAN» (Miniature Local Area Network), створена на базі інтерфейсу 1-Wire, який розроблений корпорацією Dallas Semiconductor (США) і сьогодні є зареєстрованим торговою маркою Maxim Integrated Product, Inc.

1-Wire – двонаправлена шина зв'язку для пристроїв з низькошвидкісною передачею даних (зазвичай 15,4 кбіт/с, максимум 125 кбіт/с в режимі перевантаження), в якій для цифрового обміну використовують однопровідну лінію зв'язку. Основою архітектури мереж MicroLan, є топологія загальної шини, коли кожен з пристроїв підключений безпосередньо до єдиної магістралі без каскадних з'єднань або відгалужень. При цьому використовується структура мережі з одним ведучим або майстром і численними веденими. В системі застосована мережа MicroLan з лініями зв'язку 1-Wire, що складаються з трьох основних проводів: DATA - шина даних, GND - поворотний або земляний дріт, EXT_POWER - зовнішнє живлення не лише обслуговуваних ведених пристроїв, але і зовнішніх відносно них ланцюгів датчиків.

Завдяки наявності у складі будь-якого пристрою, забезпеченого мережевою версією 1-Wire інтерфейсу, індивідуальної унікальної адреси (відсутність збігу адрес для приладів, що випускаються, гарантується фірмою-виробником), мережа MicroLan має практично необмежений адресний простір. При цьому кожен з таких приладів відразу готовий до використання у складі мереж MicroLan без яких-небудь додаткових апаратно-програмних модифікацій. Компоненти однопровідних мереж є самотактуємими напівпровідниковими пристроями, в основі обміну інформацією між якими лежить керування зміною тривалості часових інтервалів імпульсних сигналів у однопровідному середовищі та їх вимір. Передача сигналів для 1-Wire інтерфейсу асинхронна і напів дуплексна, та вся інформація, циркулююча в мережі, сприймається абонентами або як команди, або як дані. Команди мережі генеруються майстром і забезпечують різні варіанти пошуку й адресації.

Стандартна швидкість роботи мережі 15,4кбіт/с була вибрана, по-перше, з урахуванням забезпечення максимальної надійності передачі даних на великі відстані і, по-друге, з урахуванням швидкодії поширених типів мікроконтролерів, які в основному мають використовуватися при реалізації провідних пристроїв однопровідної шини. Ця величина швидкості обміну може бути зменшена до будь-якого можливого значення завдяки введенню примусової затримки між передачею окремих бітів даних. На рис. 2 наведено структурну схему системи моніторингу батареї акумуляторів або окремої секції батареї.

В модулях вимірювання і балансування використано мікросхеми DS2756 (Maxim Integrated) [6]. Мікросхема DS2756 забезпечує високоточне вимірювання напруги (10 розрядів, молодший розряд 4,88 мВ), струму (12 розрядів, молодший розряд 15,625мкВ/ R шунта), температури (10 розрядів, молодший розряд 0,125°C) та балансування одного елемента батареї. Модулі з'єднуються за інтерфейсом 1-Wire. Оскільки напруга на окремих секціях відрізняється одна від одної, то застосована гальванічна розв'язка (до 560 В амплітуди) інтерфейсу 1-Wire від вимірювача за допомогою елементів ADuM1250 згідно з технологією iCoupler (Analog Device) [7].

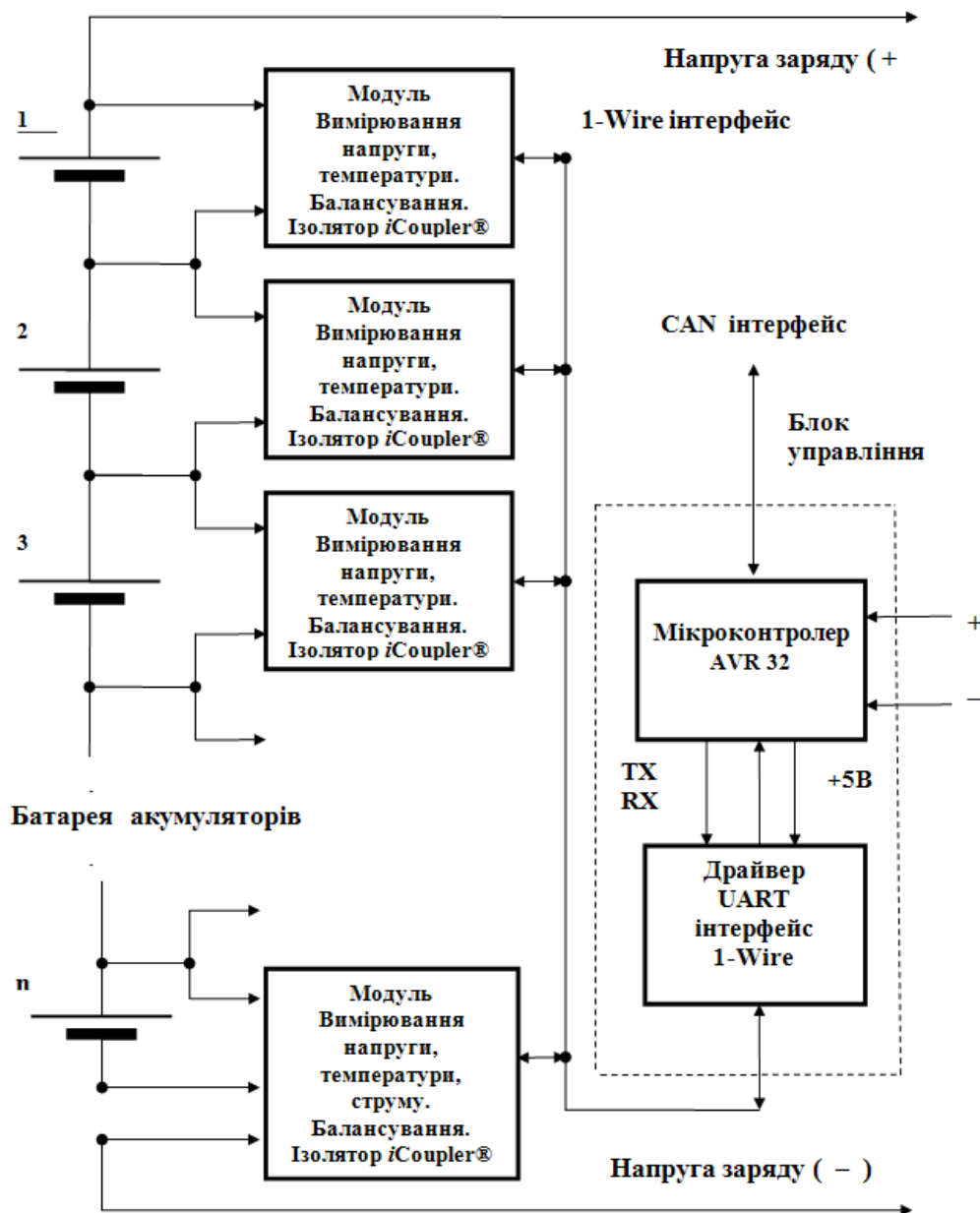


Рис. 2. Структурна схема системи моніторингу

Плати модулів встановлюються на кожному елементі батареї, мікросхема DS2756 безпосередньо контактує з поверхнею елемента для забезпечення вимірювання температури. Для елементів великих розмірів встановлюються додаткові датчики DS18B20 (Maxim Integrated) [8], для вимірювання температури окремих частин елемента батареї. Ці датчики підключаються до інтерфейсу 1-Wire, їх електроживлення здійснюється від лінії EXT_POWER інтерфейсу. При реалізації однопроводового інтерфейсу використовуються стандартні КМОП/ТТЛ логічні рівні сигналів.

Блок керування системою моніторингу побудований на 32-розрядному мікроконтролері в індустріальному виконанні з можливістю застосування в електротранспорті. Використано процесор сімейства AT32UC3C0512 архітектури AVR32 (Microchip) [9], який має широкий набір апаратних ресурсів, необхідних для побудови системи моніторингу. Апаратна підтримка стандарту CAN дає можливість інтегру-

вати систему в промислову мережу контролерів. До кожного з 5-ти інтерфейсів UART мікроконтролера за допомогою майстер-пристрою DS2480B (Maxim Integrated) [10] підключається окремий інтерфейс 1-Wire, що дозволяє отримати 5 секцій елементів батареї для послідовного, паралельного та послідовно-паралельного їх включення. Оскільки в мережах MicroLan кожен елемент підключений до інтерфейсу 1-Wire має свій унікальний MAC адрес, тому адреса мікросхеми DS2756 дозволяє привласнити кожному елементу батареї цей унікальний номер, ідентифікуючи його з метою заміни і калібрування системи вимірювання. Крім того, здійснюється налаштування параметрів драйверу під топологію мережі. Для забезпечення гальванічної розв'язки з ланцюгами TXD, RXD інтерфейсу UART мікроконтролера використовується мікросхема ADuM1250. Розв'язка ланцюгів живлення здійснюється за допомогою DC-DC перетворювача AIM/4s – 0505. Електрична схема модуля вимірювання та балансування наведена на рис. 3.

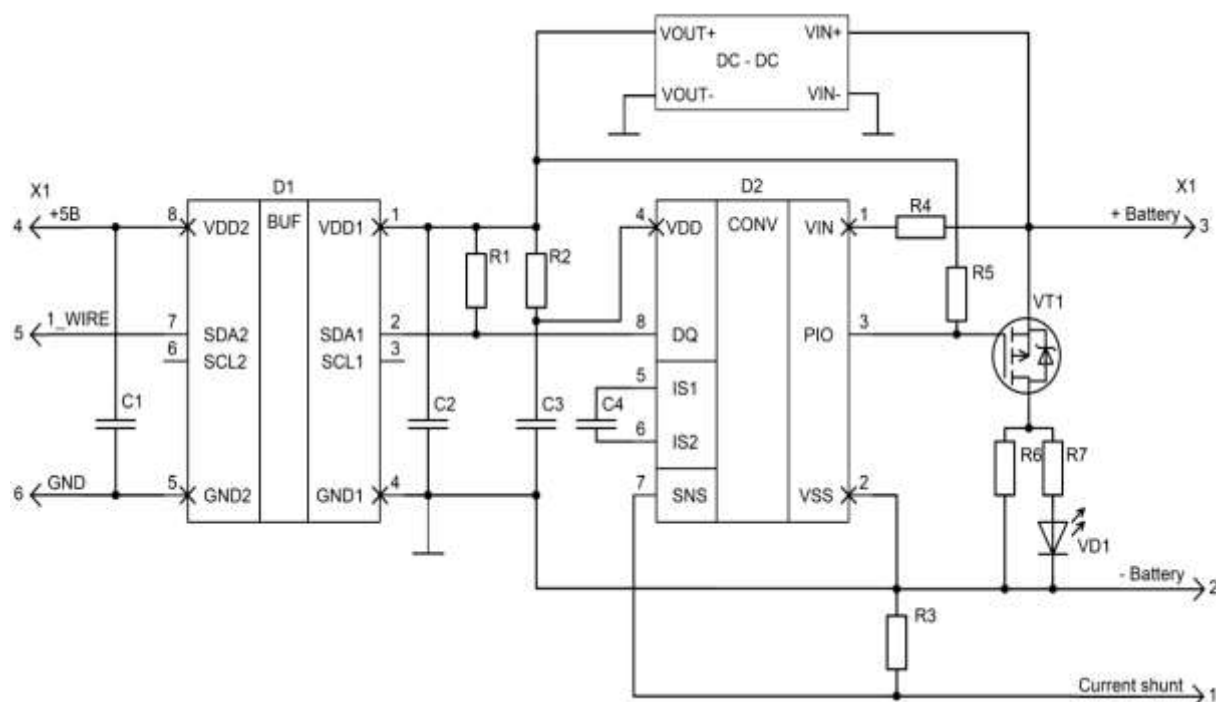


Рис. 3. Електрична схема модуля вимірювання та балансування

У схемі модуля елемент D1 є мікросхемою гальванічної розв'язки ADuM1250, D2 – DS2756. Вимірювання струму здійснюється за допомогою шунта R3 за величиною напруги на вході SNS D2, напруга на акумуляторі батареї вимірюється через резистор R4, встановлений на вході VIN. Відкритий MOSFET – транзистор VT1 разом з резистором R6 створює ланцюг „байпас”, якщо на затворі транзистору нульовий потенціал. При високому потенціалі на затворі транзистор VT1 закритий. Електроживлення DS2756 модуля та другої половини ADuM1250 здійснюється від акумуляторної батареї, до якої підключений модуль, через DC-DC перетворювач 0,9 – 5 В у 5 В.

При вимірюванні струму і напруги акумулятор приєднують до контактів 3 та 2 з'єднувача X1, а вхідні ланцюги для зарядження – до контактів 1 та 3 X1. При вимірюванні тільки напруги вхідні ланцюги для зарядження підключають до контактів 1 та 2 X1, тоді як контакти 1 та 2 замкнуті.

Програмне забезпечення системи моніторингу акумуляторної батареї функціонує під управлінням операційної системи реального часу RTOS і дозволяє:

- контролювати струм заряду/розряду, напругу і температуру всіх елементів батареї;
- коригувати процес заряду елементів батареї шляхом управління силовим вузлом „байпас”;
- накопичувати статистичні дані про стан всіх елементів в ході експлуатації батареї;
- формувати тестові режими при введенні в експлуатацію і ремонті батареї;
- організувати зв'язок із зовнішнім пристроєм по інтерфейсу CAN з метою управління, обміну даними,
- візуалізації процесу моніторингу;
- адаптувати параметри драйверів інтерфейсу мережі MicroLAN до топології конкретної мережі.

Конфігурація і статистичні дані системи моніторингу стану акумуляторної батареї зберігаються на SD карті і в будь-який момент доступні до зовнішнього керуючого пристрою.

Список літератури

1. Шембель О. М., Білогуров В. А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. — № 2(17), 2009.
2. Силевич В,Ю. Основные типы тяговых аккумуляторных батарей, которые используются в легковом транспортном сегменте.// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — № 74, 2016 (с. 222– 226).
3. Рыкованов А. С., Румянцев А. М. Способы заряда Li-Ion аккумуляторов и батарей на их основе // Компоненты и технологии. 2012. № 11.
4. Рыкованов А.С. Активные и пассивные системы баланса Li-Ion аккумуляторных и батарей // Компоненты и технологии. 2014. № 3.
5. Рыкованов А. С. Системы баланса Li-Ion аккумуляторных батарей. // Силовая электроника. – № 1, 2009 (с.52-55).
6. DS2756,datasheet, www.maximintegrated.com.
7. ADuM1250,datasheet, www.analog.com.
8. DS18B20,datasheet, www.maximintegrated.com.
9. AT32UC3C0512 , datasheet, www.microchip.com.
10. DS2480, datasheet, www.maximintegrated.com.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Трубіциним М.Д.

Відомості про авторів

| | | |
|-----------------------------------|--|---------|
| Акулов Артем Володимирович | Головний спеціаліст фірми ООО МПА ГРУП | 107 |
| Бобров Олексій Володимирович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 23; 78 |
| Бородай Валерій Анатолійович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 3 |
| Боцьва Наталія Павлівна | канд. біол. наук, доцент кафедри " Експериментальної фізики та фізики металів" Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро | 41 |
| Буряк Артем Олегович | Студент електротехнічного факультету (група ЕМг-14-1) Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 17 |
| Виноградов Борис Володимирович | Д-р техн. наук, професор, професор кафедри "Матеріалознавство" ДВНЗ "Українського державного хіміко-технологічного університету", м. Дніпро | 84 |
| Волков Володимир Олександрович | Докторант кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 110 |
| Гребенюк Андрій Миколайович | Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 107 |
| Дибрін Сергій Володимирович | Асистент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 17; 102 |
| Єліна Олена Володимірівна | Канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри „Експериментальної фізики та фізики металів” Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. | 127 |
| Ільїна Світлана Сергіївна | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гірнича механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 97 |
| Карманова Лілія Валентинівна | Ст. викладач кафедри "Вища математика" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 59 |
| Ковальов Олександр Робертович | Ст. викладач кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 3 |
| Кожевников Антон Вячеславович | Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Автоматизація та комп'ютерні системи" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 71 |
| Козир Світлана Василівна | асистент кафедри "Системний аналіз і управління" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 29 |
| Колб Андрій Антонович | Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 26 |

Відомості про авторів

| | | |
|--|--|---------|
| Колб Антон Андрійович | Канд. техн. наук, доцент, професор кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 26 |
| Малієнко Андрій Вікторович | асистент кафедри "Системний аналіз і управління" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 29 |
| Мерзлікін Андрій Леонідович | Технічний директор фірми ТОВ МІА ГРУП | 107 |
| Мещеряков Леонід Іванович | Д-р техн. наук, професор кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 46; 59 |
| Міліх Михайло Макарович | Канд. техн. наук, доцент кафедри „Експериментальної фізики та фізики металів” Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. | 127 |
| Нестерова Ольга Юріївна | Канд. філ. наук, доцент кафедри "Переклад" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 23 |
| Паламарчук Юлія Анатоліївна | Аспірант кафедри " Експериментальної фізики та фізики металів" факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро | 41 |
| Підгородецький Олександр Васильович | Студент кафедри "Комп'ютерно - інтегровані технології і метрологія" ДВНЗ "Українського державного хіміко-технологічного університету", м. Дніпро | 65 |
| Починок Юрій Борисович | Заступник директора по науці Товариства з обмеженою відповідальністю Науково-виробниче підприємство „МонТекс” м. Дніпро | 127 |
| Прокуда Володимир Миколаєвич | Канд. техн. наук, асистент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 8 |
| Радченко Виталій Васильович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Теплоенергетика та гідроенергетика" Запорізької державної інженерної академії | 13 |
| Сабанов Сергій Олександрович | професор кафедри «Програмування фізичних процесів та комп'ютерної інженерії» Запорізького інституту економіки та інформаційних технологій, м. Запоріжжя | 33; 51 |
| Сніжко Євген Матвійович | Канд. техн. наук, доцент кафедри " Експериментальної фізики та фізики металів " Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро | 41; 127 |
| Таланін Ігор Євгенійович | д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри «Програмування фізичних процесів та комп'ютерної інженерії» Запорізького інституту економіки та інформаційних технологій, м. Запоріжжя | 33; 51 |
| Таланін Віталій Ігорович | Канд. фіз.-мат. наук, професор кафедри «Програмування фізичних процесів та комп'ютерної інженерії» Запорізького інституту економіки та інформаційних технологій, м. Запоріжжя | 33; 51 |

Відомості про авторів

| | | |
|-----------------------------------|---|----|
| Тимченко Світлана Євгенівна | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Вища математика" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 91 |
| Толстов Олександр Валерійович | Студент електротехнічного факультету (група ЕМг-14-1) Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 17 |
| Торопцев Григорій Ігоревич | Студент факультету інформаційних технологій (група СПТ-15- 1) Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 91 |
| Удовик Ірина Михайлівна | Канд. техн. наук, доцент завідувачка кафедрою "Програмне забезпечення компютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 71 |
| Уланова Наталія Петрівна, | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Вища математика" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 59 |
| Федін Дмитро Олександрович. | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Матеріалознавство" ДВНЗ "Українського державного хіміко-технологічного університету", м. Дніпро | 84 |
| Ципленков Дмитро Володимирович | Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро | 78 |
| Швачка Олександр Іванович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Комп'ютерно - інтегровані технології і метрологія" ДВНЗ "Українського державного хіміко-технологічного університету", м. Дніпро | 65 |
| Ширін Артем Леонідович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Програмне забезпечення компютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 59 |
| Щербаков Петро Миколайович | Канд. техн. наук, доцент кафедри "Вища математика" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро. | 91 |

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Принимаются статьи на украинском, русском или любом иностранном языке.

Статья должна быть оформлена с четким выделением структурных частей:

- индекс УДК;
- полный список авторов с указанием в скобках полного названия организации;
- название статьи;
- аннотация на трех языках (русский, украинский, английский);
- ключевые слова на трех языках (русский, украинский, английский);
- основной текст статьи с названиями структурных частей, например: Введение, Постановка задачи, Решение задачи, ..., Выводы; и т.п.
- список использованных источников
- сведения об авторах на украинском языке.

Параметры страницы: формат А4, все поля по 2,5 см; колонтитулы – по 1,6 см.

УДК – шрифт Times New Roman 10 pt, отступ первой строки – нет, межстрочный интервал одинарный; выравнивание – слева

А.А. Иванов, д-р (канд.) техн. наук – шрифт Times New Roman 10 pt, полужирный курсив (Страна, Город, Название организации) – шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева.

**ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ: ШРИФТ TIMES NEW ROMAN 11 PT,
ПОЛУЖИРНЫЙ, ПРОПИСНЫЕ БУКВЫ, ОТСТУП ДО: 1 СТРОКА,
ОТСТУП ПОСЛЕ: 1 СТРОКА, ВЫРАВНИВАНИЕ – ПО ЦЕНТРУ**

Аннотация подается объемом 75-100 слов. Должна структурироваться по логике описания результатов в статье и иметь следующие элементы: цели и задания работы, результаты, их научная новизна, практическое значение. Аннотация не должна повторять название статьи. Аннотация должна быть представлена на **3-х языках** (русский, украинский, английский) по такому образцу: Шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки 0,75 см, выравнивание – по ширине, расстановка переносов автоматическая.

Основной текст статьи должен быть набран в формате файла текстового редактора Microsoft Word: Основной текст: шрифт Times New Roman 10 pt, отступ первой строки – 0,75 см, выравнивание – по ширине. Стиль: Обычный. Расстановка переносов автоматическая, ширина зоны переносов слов – 0,5 см.

Основные подзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, полужирный, строчные буквы, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева, до подзаголовка оставлять одну пустую строку.

Второстепенные подзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева, до подзаголовка оставлять одну пустую строку

Таблицы располагать в абзаце со стилем: Обычный. Номер таблицы: стиль Обычный, выравнивание по правому краю. Единицы измерения, желательно в "шапке" таблицы, а не в самой таблице. Таблица должна быть расположена по возможности ближе к первой ссылке на нее.

Таблица 1. шрифт Times New Roman 10 pt,

**Краткий заголовок таблицы: шрифт Times New Roman 9 pt,
полужирный, отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру**

| | |
|---|-------------|
| Заголовок внутри таблицы (шапка): шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный, отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру. До и после заголовка отступать строку не надо. | Длина, м |
| Текст таблицы: шрифт Times New Roman 9 pt, отступ первой строки – нет, выравнивание – по левому краю. До и после текста внутри таблицы отступать строку не надо | 250 |

Формулы: выравнивание – справа. Нумерация формул – в круглых скобках. До и после формул оставлять одну пустую строку. Между формулами оставлять пустую строку **не надо**

$$c^2 = a^2 + b^2. \quad (1)$$

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Требования к формулам:

Размер символов в формулах: Обычный – 10 пт.; Крупный индекс – 8 пт.; Мелкий индекс – 7 пт.; Крупный символ – 12 пт.; Мелкий символ – 8 пт.

Стиль формул: Функция – наклонный; Переменная – наклонный; Скобки – прямые; Цифры – прямые.

Все обозначения – латинскими символами!!! Кириллица в формулах – недопустима!!!

Рисунки. На все рисунки должны иметься ссылки в тексте, пронумерованные арабскими цифрами (1, 2, 3..) в порядке их упоминания в тексте (например: рис. 1, а). Рисунки в тексте располагаются по центру. Надписи на рисунках должны быть выполнены, по возможности, шрифтом размера не менее 10 или 9 pt. Толщина линий на рисунках должна быть не менее 0,75 pt.

Подрисуночная подпись (Рис. 1 Схема...) обязательна: шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру.

После подрисуночной подписи отступать одну строку.

Рисунки - должны быть **сгруппированы и вставлены в текст**. Фотографии – вставлены в текст статьи как объект. Обтекание – "в тексте". Допускаются цветные изображения.

Ссылки на литературу должны следовать в порядке их появления в тексте, номер ссылки в квадратных скобках должен следовать за каким-либо утверждением, положением или за фамилией автора.

Список использованных источников

(шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный, выравнивание по центру, до и после заголовка отступать строку)

Список литературы должен соответствовать ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Выравнивание по левому краю. Нумерация – автоматическая. шрифт Times New Roman 9 pt.

Сведения об авторах:

Сведения об авторах предоставляются отдельным файлом в произвольной форме. **Обязательно** они должны включать в себя полные фамилию, имя и отчество (**на украинском языке**), ученную степень, ученное звание, должность, место работы (в т.ч. название кафедры, отдела), контактные телефоны, *e-mail* (если есть).

Порядок предоставления материала в редколлегию

1. Условия публикации: статьи на русском или украинском языках - **50** грн; на иностранном языке – **40** грн. за каждую страницу оформленного, в соответствии с требованиями, текста. Оплата - при сдаче материала в печать.

2. Объем статьи от 4 до 10 страниц формата А4. Статья должна быть оформлена в соответствии с вышеуказанными требованиями. **Заполнение последней страницы – не менее 80 %.**

3. Статья должна быть представлена в печатном виде в 1 экземпляре и в электронном виде на любом носителе или по электронной почте по адресу:

shkrabetsF@nmu.org.ua или gea@nmu.org.ua

4. Материалы принимаются только при наличии **экспертного заключения, рецензии и заявления на публикацию статьи.**

5. Решение об опубликовании статьи принимает редакционная коллегия.

6. Принятые в печать материалы авторам **НЕ ВОЗВРАЩАЮТСЯ.**

7. В случае несоответствия указанным требованиям, материал статьи к публикации **НЕ ПРИНИМАЮТСЯ.**

Редколлегия сборника "Горная электромеханика и автоматика"

49005, Украина, г. Днепрпетровск, просп. Д. Яворницкого, 19, Национальный горный университет, кафедра "Возобновляемые источники энергии". Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>

В научно-техническом сборнике "Горная электромеханика и автоматика" публикуются работы по следующим направлениям: *Электрификация горных работ; электрооборудование горной промышленности; электромеханика; энергосбережение и энергоэффективность, математическое моделирование и автоматизация производственных процессов и проектных работ горной промышленности; контроль технологических процессов; механизация горного производства; горные машины и комплексы; технические приборы обеспечения рудничной аэрологии и охраны труда; научная и производственная реклама.*

REQUIREMENTS TO THE DESIGN OF ARTICLES

The articles should be written in Ukrainian, Russian or any foreign language.

The article should contain the following elements:

- index UDC;
- a full list of authors, the full name of the organization (in brackets);
- article title;
- abstract and keywords in three languages (Russian, Ukrainian, English);
- the main text of the paper with the names of the elements, for example: Introduction, Statement of the Problem, Solution, ..., Conclusions, etc.;
- A list references;
- information about the authors in Ukrainian.

Page specification: format A4, all margins - 2,5 cm; footers –1,6 cm.

UDC (font Times New Roman, left-aligned, 10 pt, indentation of the first line - no, single line spacing)

A.A Ivanov, Doctor of Engineering Sciences (font Times New Roman, left-aligned, bold, italic 10 pt), (Country, City, Name of organization) –font Times New Roman left-aligned, 10 pt, italics, single line spaced.

**TITLE OF AN ARTICLE
(FONT TIMES NEW ROMAN 11 PT, CENTERED, BOLD, CAPITAL LETTERS.,
SPACE BEFORE: 1 LINE, SPACE AFTER 1 LINE)**

The abstract should consist of 75-100 words. It must be structured according to the logics of results description in the ARTICLE and contain the following elements: goals and objectives, results, their scientific novelty, practical significance. The abstract musn`t repeat the title of the article. The abstract should be submitted in 3 languages (Russian, Ukrainian, English), formatting guidelines: font Times New Roman 10 pt, italics, first line indentation 0.75 cm, justification according to width, automatic hyphenation.

The main text of the article should be typed in text editor file format Microsoft Word: Main text: font Times New Roman 10 pt, first line indentation 0.75 cm, justification according to width. Style: Normal. Automatic hyphenation, the width of the hyphenation zone is 0.5 cm.

The main sub-headings: font Times New Roman left-aligned, 10 pt, bold, lower case, indentation of the first line - no, before the subtitle one blank line left.

Secondary headings: font Times New Roman left-aligned, 10 pt, italics, indentation of the first line - no, before the subtitle one line left blank.

Tables should be placed in a paragraph with the following style: Normal. Table number: style is Normal, right-aligned. Measurement units should rather be provided in the heading of the table, than in the table. The table must be located as close as possible to the first reference on it.

Table 1. font Times New Roman 10 pt,
**Summary table headline: font Times New Roman, centered 9 pt,
Bold, indentation of the first line - no**

| | |
|---|----------------------|
| Title in the table (heading): font Times New Roman, centered 9 pt, bold, indentation of the first line - no Before and after the header line it is not necessary to retreat. | Length, M |
| The text of the table: font Times New Roman, left aligned 9 pt, indentation of the first line - not. It is not necessary to leave a line before and after hedging. | 250 |

Formula: right aligned. Formulae number - in parentheses. Before and after formulae leave one line blank. In the formulae it is not necessary leave a blank line.

$$c^2 = a^2 + b^2 . \quad (1)$$

Formulae formatting:

The size of the symbols in formulas: Normal – 10 pt.; Large index – 8 pt.; Small index - 7 pt. ; large symbol - 12 pt. ; Small character - 8 pt.

Formula Style: Function - sloping; Variable - sloping; Brackets - straight; The figures - straight.

All designations are in Latin characters !!! Cyrillic is non acceptable in the formulas !!!

Figures. All Figures must have references in the text in Arabic numbers (1, 2, 3..) in order of their appearance in the text (for example: Fig. 1, a). The drawings in the text located as centered. Inscriptions in the figures must be, if possible, in font size not less than 10 or 9 pt. The thickness of the lines in the pictures should not be less than 0,75 pt.

Caption (Fig. 1. Scheme ...) obligatory: font Times New Roman centered 9 pt, bold, indentation of the first line - no. After a caption leave one line blank.

Figures should be grouped together and inserted into the text. Photos are inserted in the text as an object. Wrapping is "in the text". Color images allowed.

References should follow in the order they appear in the text, the reference number in square brackets should follow any statement or position of the author's name.

List of sources used

(font Times New Roman centered 9 pt, bold, before and after heading a blank line left)

References must comply with SSOU(state standards of Ukraine)GOST 7.1:2006. Font Times New Roman, left aligned 9 pt. Numbering - Auto. .

Information about authors:

Information about authors is provided in a separate file in any form. It is obvious that it includes the surname, name and patronymic (in Ukrainian), a degree, academic title, position, affiliation (including name of the department), contact phone numbers, e-mail.

The submission procedure

1. Terms of publication: article in Russian and Ukrainian languages 50 UAH fee; in a foreign language 40 UAH fee per each page issued in accordance with the requirements to the text. Payment is made when submitting material for publication.

2. The articles length is from 4 to 10 A4 pages. Article shall be formatted in accordance to the above mentioned requirements. **Filling of the last page is at least 80 %.**

3. The article must be submitted in printed form in one copy and in electronic form, using any medium or by e-mail, the following address:

shkrabetsF@nmu.org.ua or gea@nmu.org.ua

4. Materials will only be accepted if there are an expert statement, review and application for publishing of an article (blank file is available for download on the website <http://gea.nmu.org.ua/> or <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php> section "Requirements for publication").

5. The decision on the publication of the article is taken by the editorial board.

6. Submitted printed papers are not returned.

7. In the case of non-specified requirements, paper is not accepted for publication.

The editorial board of the book "Mining Electrical and Automation":

State HEI "National Mining University", Department "Renewable energy sources"19, D. Yavornitskiy Ave., Dnipro, Ukraine, 49005. Site: <http://gea.nmu.org.ua>

Fields: electrification of mining operations; mining electrical equipment; electromechanics; math modeling, automation of production processes and mining industry design works; control of technological processes; mechanization of mining production; mining machines and systems; technical devices to ensure the mine aerology, fire safety and occupational safety in the mining industry; issues of energy conservation and efficiency; scientific and industrial advertising.

З М І С Т

Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

| | |
|--|----|
| В.А. Бородай, О.Р. Ковальов Результати попередньої проробки аварійно-резервної системи електропостачання обмеженої потужності | 3 |
| В.М. Прокуда Визначення завантаження шахтного конвеєра з резинотросовою стрічкою для аналізу його енергоефективності | 8 |
| В. В. Радченко Семантична модель перетворення трифазного сигналу | 13 |
| С. В. Дибрін, О. В. Толстов, А. О. Буряк Вибір типу акумулюючого елемента накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів | 17 |
| A.V. Bobrov, Nesterova O.Y Substantiation of controlled variables for energy management system of piston compressor units | 23 |
| А. А. Колб, Ант. А. Колб К расчету энергетических показателей частотно-регулируемого асинхронного электропривода в установленном режиме | 26 |

ЧАСТИНА II. АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

| | |
|--|----|
| С.В. Козир, А.В. Малієнко Моделирование процессов добычи угля в комбайновой лаве | 29 |
| И.Е. Таланин, В.И. Таланин, С.А. Сабанов Особенности применения документных баз данных в нагруженных сетях | 33 |
| Ю.А. Паламарчук, Є.М. Сніжко, Н.П. Боцьва. Оптимізація часу роботи автономних вузлів сенсорної мережі для автоматизації контролю довшілля | 41 |
| Л.І. Мещеряков Формування базових інформаційних агентів в інтелектуальні мультиагентні системи для керування гірничими агрегатами | 46 |
| И.Е. Таланин, В.И. Таланин, С.А. Сабанов решение проблемы декомпозиции для виртуальных устройств маршрутизации на базе оборудования CISCO | 51 |
| Л.І. Мещеряков, Н.П. Уланова, Л.В. Карманова, А.Л. Ширін Статистичні моментні зв'язки інформаційних сигналів в системах розпізнавання | 59 |
| А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка Настройка ПИД - регулятора инерционных объектов горно - металлургического комплекса | 65 |

ЧАСТИНА III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

| | |
|---|-----|
| А.В. Кожевников, И.М. Удовик Идентификация стохастической модели энергопотребления двигателя очистного комбайна | 71 |
| О.В. Бобров, Д.В. Циленков Моделирование электромеханической системы «электрична мережа – привід – компресор – пневмомережа» | 78 |
| Д.О. Федін, Б.В. Виноградов. Парциальные системы динамической модели привода барабанной мельницы | 84 |
| П.Н. Щербаков, С.Е. Тимченко, Г.И. Торопцев Устройство оперативного контроля крепости и трещиноватости горных пород в процессе шарошечного их бурения | 91 |
| І.С. Ільїна Экспериментальное определение динамических параметров систем "сосуд-армировка" в промышленных условиях при аварийном торможении подъемной машины | 97 |
| С. В. Дибрін Обґрунтування енергоємності накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів шахтного транспорту з індукційною передачею енергії | 102 |

ЧАСТИНА IV. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

| | |
|---|-----|
| A. L. Merzlikin, A.V. Akulov, A.M. Hrebenuk. The selection of the optimum PV-modules/inverter power factor for small grid-connected solar power stations | 107 |
| В.А. Волков. Энергосберегающее управление в пускотормозных режимах скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой | 110 |
| О.В. Єліна, М.М. Міліх, Є.М. Сніжко, Ю.Б.Починок Моніторинг батарей високої напруги li-ion акумуляторів | 127 |
| Відомості про авторів | 133 |
| Вимоги до оформлення статей | 137 |

Запрошуємо Вас до участі в міжнародній науково-практичній конференції

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ 2018

яка відбудеться з 15 по 16 листопада 2018 року:

МЕТА КОНФЕРЕНЦІЇ

Обговорення проблем та пошук перспектив енергозбереження та енергоефективності, а також актуальних питань, що виникають при розробці та експлуатації електрообладнання, економічних та екологічних аспектів електроенергетики, нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ:

1. Енергозбереження та енергоменеджмент
2. Експлуатація електрообладнання
3. Технології безпечного використання електроенергії
4. Сучасні технології виробництва, розподілення та використання електроенергії)
5. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
6. Моделювання в енергетиці
7. Автоматизація виробничих процесів
8. Економічні та екологічні аспекти електроенергетики
9. Горизонт 2020 – програми європейської співпраці

Матеріали конференції (доповіді) за бажанням авторів (при виконанні умов видання) можуть бути надруковані у фаховому виданні у Науково-технічному збірнику "Гірнична електромеханіка та автоматика".

Вартість публікації – 50грн/стор. тексту. Мова – українська, англійська, німецька, французька, польська.

До участі у конференції запрошуються всі зацікавлені особи.

За результатами роботи конференції буде підготовлено збірник тез.

Строк подачі тез та заявки на участь – 30 вересня 2018 року.

Більш детальна інформація за адресою: tsyplenkov.d.v@nmu.one

Оргкомітет буде вдячний за розповсюдження даної інформації серед колег, зацікавлених взяти участь у конференції.

Науково-технічний збірник
Гірнича електромеханіка та автоматика

Випуск 99

Технічний редактор
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 26.12.2017. Формат 30x42/2. Папір
Captain. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,8. Обл.-вид. арк. 7,8.
Тираж 300 прим. Зам. №

ISSN 0201-7814

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному ВНЗ "Національний гірничий університет"
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.