

К.М. Маренич, канд. техн. наук, С.А. Руссіян

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ УПОВІЛЬНЕННЯ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ГІРНИЧОЇ МАШИНИ

Постановка задачі та її актуальність. З метою зменшення коливальних складових електромагнітного моменту, уповільнення пуску асинхронних електроприводів широке застосування в промисловості отримали силові тиристорні трифазні регулятори напруги. За наявності розімкненої системи автоматичного керування, вони функціонують у режимі збільшення напруги живлення асинхронного двигуна від фіксованої зменшеної величини до номінальної, зазвичай, за лінійним законом. Дослідженнями [1] встановлено, що в цьому разі на певному інтервалі зміни заданих кутів α відкривання тиристорів у системі “ТРН-АД” виникає нестійкий стан, що характеризується автоколиваннями струму статора АД, його ЕРС обертання, фактичних кутів відкривання α та провідності β силових тиристорів. Отже, прийнятним є більш складний закон керування тиристорами ТРН, що передбачає підвищення інтенсивності зменшення кутів α після досягнення граничної величини. Цей принцип є більш коректним щодо керування розгоном асинхронного електропривода, але щодо гірничої промисловості його впровадження додатково потребує з'ясування сумісної роботи ТРН з функціонуванням апарата захисту електротехнічного комплексу (ЕТК) дільниці шахти від витоків струму на землю (АЗ).

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженнями [2] обґрунтовані структури моделей процесів в ЕТК дільниці шахти і встановлено характер впливу контакторної комутації асинхронних двигунів на величину параметра спрацювання дільничних АЗ серії АЗУР. У роботі [3] розглянуті питання впливу силових тиристорних комутаційних схем на величину оперативного струму АЗ. Однак у даних дослідженнях не враховані фактори впливу процесів у системі “ТРН-АД” на параметри стійкості функціонування АЗ (серії АЗУР) при східчастій зміні інтенсивності зменшення кута α відкривання силових тиристорів ТРН.

Постановка задачі. Дослідження характеру впливу системи ТРН-АД (в складі ЕТК дільниці шахти) на величину параметра спрацювання дільничного апарата захисту від витоків струму на землю при застосуванні ступеневого закону зміни інтенсивності зменшення кута відкривання тиристорів ТРН.

Основний матеріал і результати досліджень. Об'єктом досліджень є процеси, що відбуваються в ЕТК дільниці шахти, оснащеному системою “ТРН-АД” (рис. 1). Схема містить трифазне джерело живлення з фазними напругами $U_A; U_B; U_C$; ТРН, виконаний на трьох парах зустрічно-паралельно з'єднаних тиристора $VS1-VS6$; АД, в якому R_s і L_s – активний опір і індуктивність статора; R_r і L_r – активний опір і індуктивність ротора; L_m – індуктивність головного магнітного поля, яка розрахована на фазу АД. Для забезпечення протікання опера-

тивного струму АЗ в мережі статора АД паралельно тиристорам ТРН передбачені резистори активних опорів ($R1 - R6$).

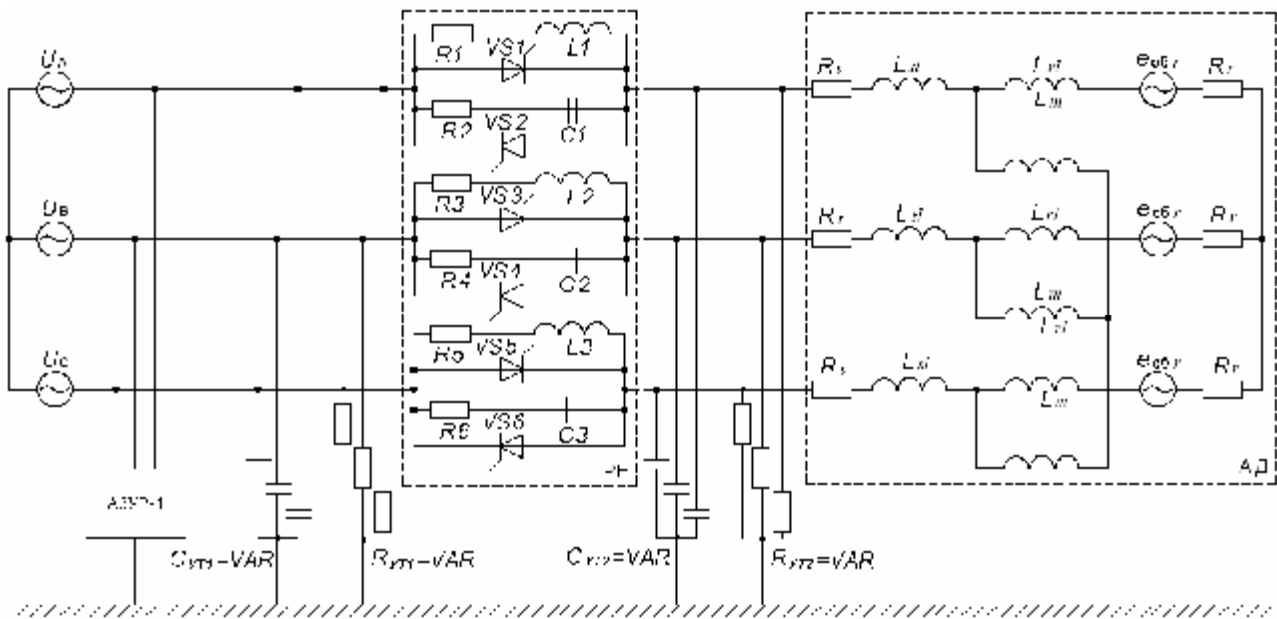


Рис. 1. Розрахункова схема ЕТК дільниці із системою “ТРН-АД”

Припустимо, що у вихідному стані ТРН, який функціонує в режимі фазового керування, відповідно до лінійного закону зміни кута α відкриття тиристорів регулятора в діапазоні $\alpha_n \leq \alpha \leq 0$ (ел. град)

$$\alpha(t)_{\text{лін.пуск}} = \alpha_n - Qt, \quad (1)$$

де $\alpha_n = 180$ ел. град – початковий кут відкриття тиристорів ТРН; $Q \in [4,7; 28]$ – інтенсивність комутації (град/с).

В процесі дослідження даної моделі прийняті такі припущення: як, двигун в системі “ТРН-АД” запропонована машина типу ЭД-КОФВ315LB4 потужністю 250 кВт з відповідними електричними параметрами, обмотка статора АД з’єднана за схемою “зірка”; лінійна номінальна напруга джерела живлення 660 В, частота напруги 50 Гц; номінальний електромагнітний момент двигуна $M_H = 1613$ Н·м; номінальна частота обертання ротора $\omega_{\text{ном}} = 1480,5$ об/хв; момент опору ($M_{\text{оп}}$) задається при моделюванні в діапазоні $0,1M_H < M_{\text{оп}} < M_H$.

Миттєве значення фазної ЕРС обертання ротора [4]

$$-e_{obr} = \frac{1}{\sqrt{3}} p \omega (L_m (2i_{sA} + i_{sB}) + L_r (2i_{rB} + i_{rA})), \quad (2)$$

де p – кількість пар полюсів АД; i_s та i_r – струми статора та ротора; ЕРС e_{obr} має знак (-) відносно ЕРС обертання, індукованої в обмотці статора.

На першому етапі досліджень доцільно встановити характер взаємного впливу ТРН і АД, враховуючи наявність ЕРС обертання. З цією метою тирис-

торні пари можуть бути представлені відповідними опорами R_{VSi} . Значення кожного з цих опорів змінюється стрибкоподібно від $R_{\min} = 10^{-3}$ Ом при відкритті одного з тиристорів пари до опору ізоляції $R_{\max} = 10^6$ Ом в разі неспроможного стану обох тиристорів пари.

Просторовий вектор падіння напруги ТРН визначається, окрім опорів тиристорів, струмом \bar{i}_S статора двигуна, тобто

$$\bar{u}_{TRH} = \bar{i}_s \cdot (R_{VS1,2}; R_{VS3,4}; R_{VS5,6}) = \frac{2}{3} (i_{sA} \cdot R_{VS1,2} + a \cdot i_{sB} \cdot R_{VS3,4} + a^2 \cdot i_{sC} \cdot R_{VS5,6}). \quad (3)$$

Просторовий вектор напруги на затискачах статора двигуна \bar{u}_s знаходиться за другим законом Кірхгофа:

$$\bar{u}_s = \bar{u} - \bar{u}_{TRH}. \quad (4)$$

Математична модель АД у нерухомій системі координат визначається такими залежностями [5]:

$$\begin{cases} \bar{y}_S = \int (\bar{U}_S - \bar{i}_S R_S) dt + \bar{y}_S(0); \\ \bar{y}_r = \int (j\omega \bar{y}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{y}_r(0); \\ w = \frac{1}{J} \int (M - M_C) dt + w(0); \\ M = -\frac{3}{2} I_M [\mathcal{Y} \cdot \bar{i}_r]; \\ \bar{i}_S = \frac{1}{L_S L_r - L_m^2} (L_r \bar{y}_S - L_m \bar{y}_r); \\ \bar{i}_r = \frac{1}{L_S L_r - L_m^2} (L_S \bar{y}_r - L_m \bar{y}_S). \end{cases} \quad (5)$$

Початковими є величини

$\bar{y}_S(0+) = \bar{y}_r(0+) = w(0+) = 0$, що відповідає процесу пуску АД.

Тут $\bar{y}_r, \bar{y}_S, \bar{i}_r, \bar{i}_S$ – просторові вектори; \mathcal{Y} – спряжений вектор до \bar{y}_r .

Модель залежності моменту АД від частоти обертання ротора описується рівнянням [6]

$$M(w) = M_0 + (M_H - M_0) \left(\frac{w}{w_H} \right)^k, \quad (6)$$

де M_0 – момент опору руху при нульовій швидкості; M_H – момент опору при номінальній швидкості; k – коефіцієнт, що характеризує зміну моменту при збільшенні швидкості ($0 < k \leq 2$).

Оскільки ТРН має функціонувати в режим і фазового керування розрахункова схема (рис. 1) доповнюється моделями системи імпульсно–фазового керування (СІФУ), засобу завдання кута α відкриття тиристорів. Усе це визначає узагальнену структуру моделі системи “ТРН-АД” (рис. 2).

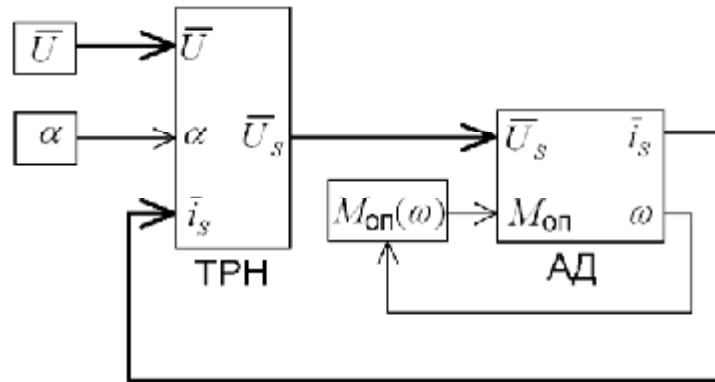


Рис. 2. Узагальнена структура моделі системи “ТРН-АД”

Окрім зазначеного, структура моделі ТРН з керуванням від СІФУ містить просторові вектори напруги джерела живлення, модель визначення просторового вектора \bar{u}_{TRN} падіння напруги на ТРН, виходячи із залежності (3); просторовий вектор напруги \bar{u}_s на затискачах статора АД відповідно залежності (4).

У результаті дослідження процесів у системі “ТРН-АД” при керуванні пуском двигуна шляхом зміни кута α відкриття тиристорів ТРН (від 180 ел. град до 0) встановлена наявність діапазону величин α , якому відповідає виникнення автоколивань електричних та електромеханічних параметрів, що збігаються з результатами досліджень [2], рис. 3.

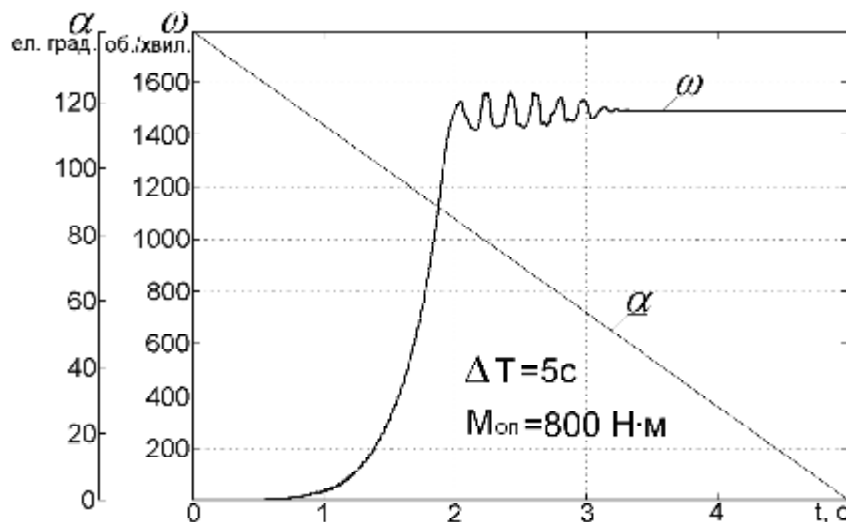


Рис. 3. Діаграма залежності частоти обертання ротора (ω) АД при пуску від зміни кута α відкриття тиристорів ТРН

Узагальнені результати досліджень автоколивальних процесів наведені на рис. 4 і 5.

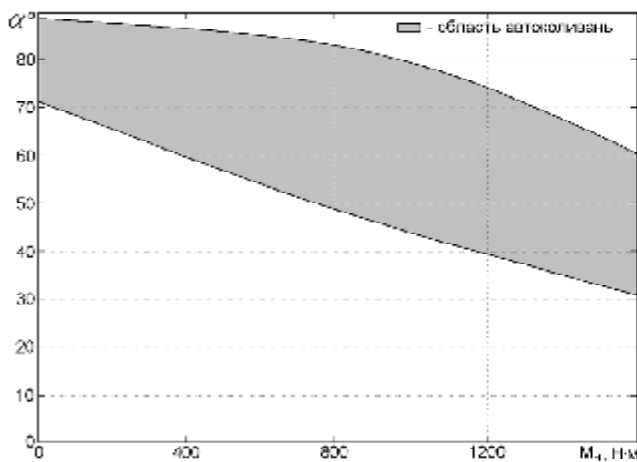


Рис. 4. Розрахункова область автоколивань параметрів у системі “ТРН-АД”, обумовлених величинами кута α відкриття тиристорів ТРН залежно від моменту опору $M_{оп}$ АД

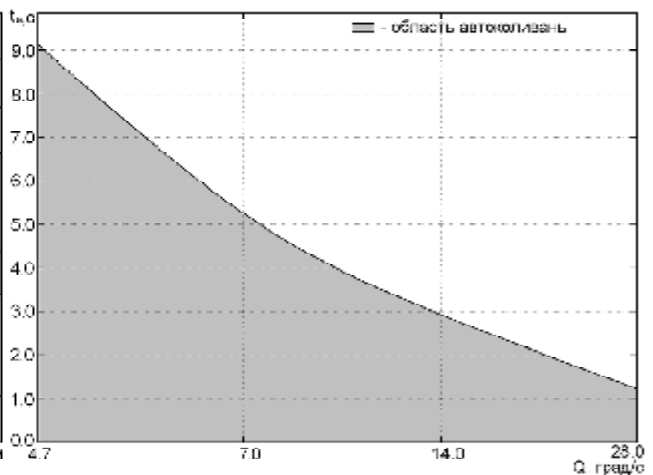


Рис. 5. Залежність тривалості t_a , автоколивань параметрів у системі “ТРН-АД” від інтенсивності (Q) зменшення кута α відкриття тиристорів ТРН

Таким чином, з метою уникнення появи автоколивальних процесів у системі “ТРН-АД” прийнятним слід вважати двоетапний закон завдання інтенсивності зменшення кутів α відкриття тиристорів ТРН при керуванні разгоном АД, а саме:

$$a(t) = \begin{cases} a_n - Q_I t, & a_n \leq a \leq a_{AK}; \\ a_{AK} - Q_{II} t, & a_{AK} < a \leq 0^0, \end{cases} \quad (4)$$

де $\alpha_n = 180$ ел. град; $Q_I \in [4,7; 28]$ град/с і $Q_{II} \in [50; 150]$ град/с; $\alpha_{AK} \approx 90$ ел. град – кут відкриття тиристорів ТРН, якому відповідає початок автоколивань параметрів у системі “ТРН-АД”.

Доцільність такого рішення підтверджує діаграма (рис. 6).

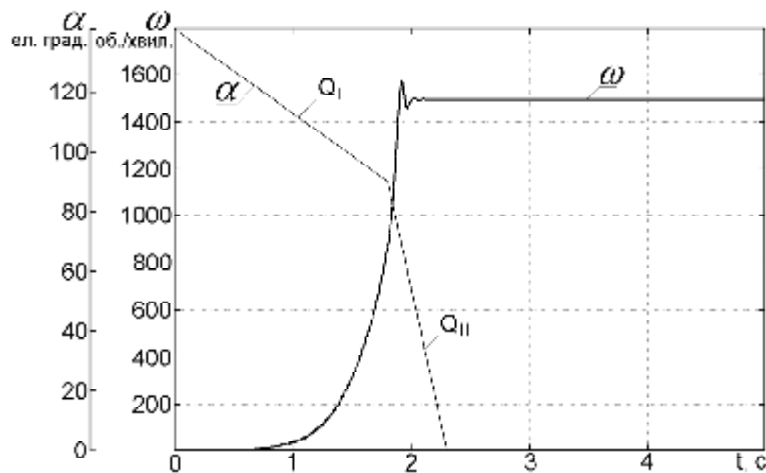


Рис. 6. Діаграма зміни частоти обертання ротора ω АД

Вплив зазначеного вище процесу керування тиристорами ТРН (під час повільного пуску АД) на параметри стійкості дільничного апарата захисту (АЗ) залежно від витоків струму на землю може бути визначений при дослідженні комп'ютерної моделі (рис. 7).

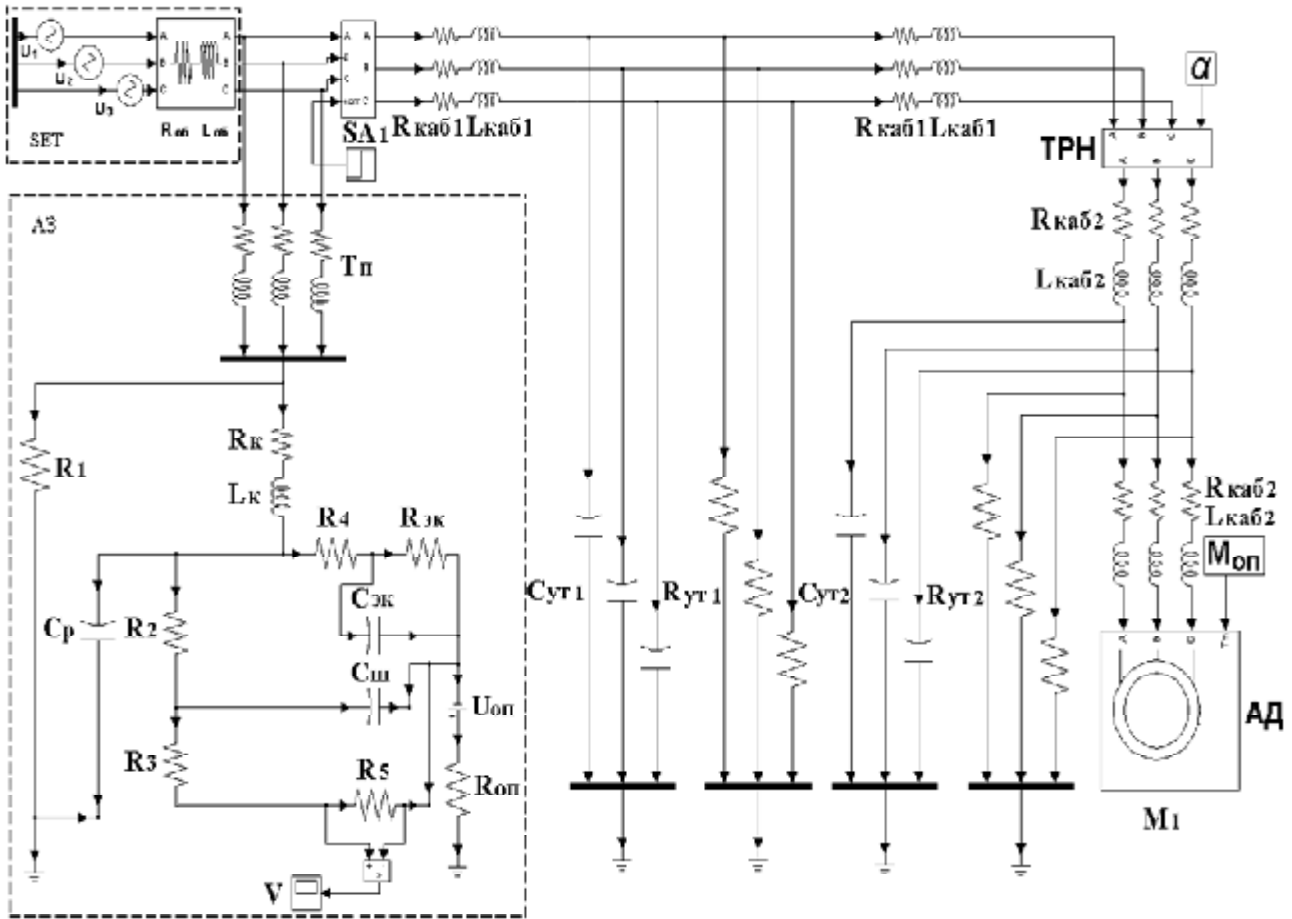


Рис. 7. Розрахункова модель для дослідження електротехнічного комплексу дільниці шахти із системою “ТРН-АД”

- Стосовно процесу включення відгалуження мережі прийняті такі припущення:
- лінійна номінальна напруга трифазної мережі – 660 В частотою 50 Гц;
 - параметри ізоляції електромережі дільниці: $R_{i3} = 40$ кОм/фазу, $C_{ут1} + C_{ут2} < 1$ мкФ/фазу;
 - коло оперативного струму представлено відповідними елементами апарата АЗУР-4;
 - контрольований (гранично припустимий) рівень падіння напруги на реагуючому елементі $R_5 - 2,4$ В відповідно до технічної характеристики апарата АЗУР-4.

У результаті моделювання отримана залежність падіння напруги на реагуючому елементі АЗ (R_5) при двоетапному законі ($Q_I = 28$ ел. град/с, $Q_{II} = 150$ ел. град/с) зміни інтенсивності кута відкриття тиристорів α (рис. 8).

Ці результати збігаються при двоетапному законі зміни інтенсивності кута відкриття з експериментальними даними (рис. 9) і свідчать про те, що за-

стосування тиристорного регулятора напруги для уповільнення пуску АД за умови двоетапного закону змінення кута α відкриття тиристорів ТРН не призведе до неприпустимого збільшення напруги ($U < 2,4$ В) на реагуючому елементі апарату захисту від витоків струму на землю (серії АЗУР) і не буде впливати на стійкість параметрів цього захисту [8].

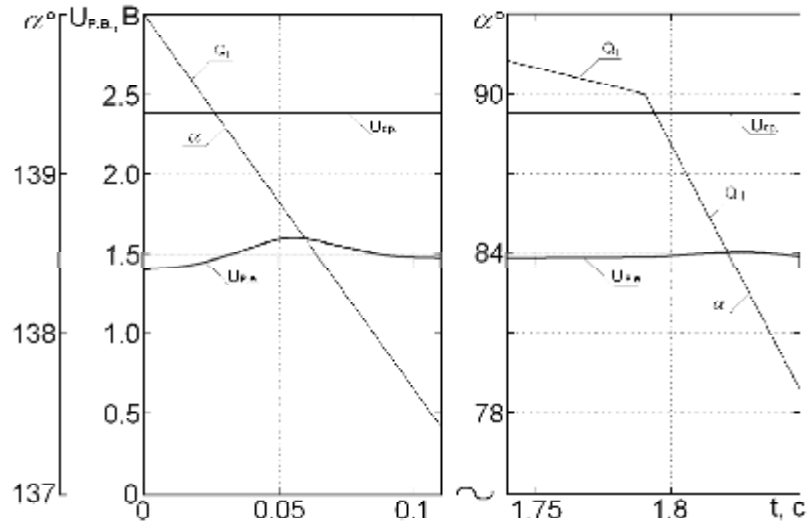


Рис. 8. Залежність падіння напруги $U_{p.e.}$ на реагуючому елементі АЗ (R_5) при двоетапному законі зменшенні кута відкриття тиристорів (α)

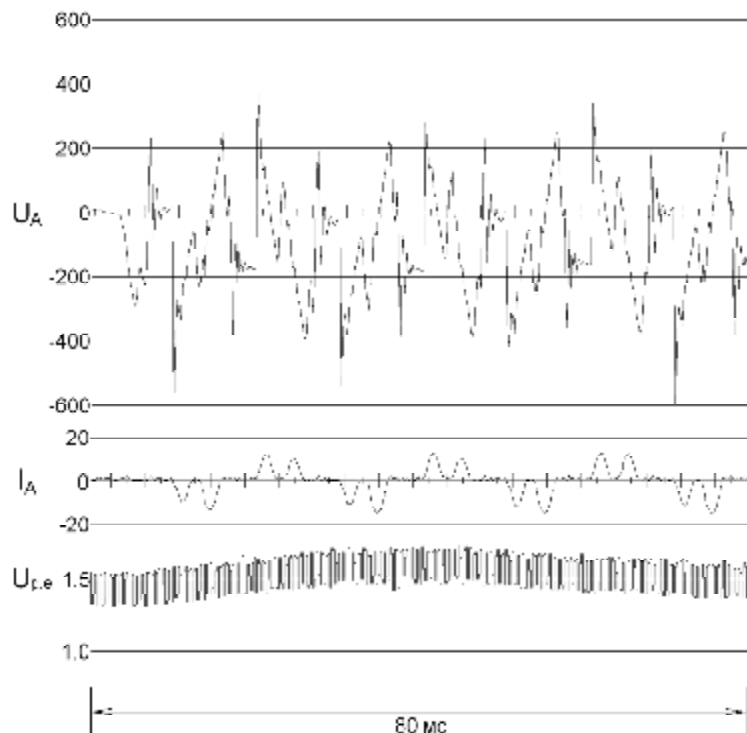


Рис. 9. Осцилограма керованого пуску АД:
 U_A – напруга фази А; I_A – струм фази А; $U_{p.e.}$ – напруга на реагуючому елементі АЗ

Висновки і напрями подальших досліджень. Моделюванням процесів у системі “ТРН-АД” встановлені діапазони параметрів керування та збурення, які обумовлюють наявність автоколивань електричних та електромеханічних пара-

метрів в об'єкті дослідження. Обґрунтовано доцільність застосування двоетапного закону зміни кута відкривання тиристорів α ТРН під час керування розгоном АД, а самі підвищення інтенсивності зміни кута відкривання α в діапазоні від 90 до 0 (ел. град) на рівні $Q \geq 50$ ел. град/с. Встановлено, що зазначений спосіб керування ТРН не впливатиме на стійкість параметрів апарата захисту від витоків струму на землю в шахтному дільничному електротехнічному комплексі.

Напрямом подальших досліджень слід вважати обґрунтування прийнятних параметрів керованого відключення АД шляхом повільного підвищення кута відкривання тиристорів α ТРН.

Список літератури

1. Маренич К.Н. Процессы в системе “тиристорный коммутатор – асинхронный двигатель” при фазовом и квазичастотном регулировании напряжения [текст] // Преобразование параметров в электрических и технологических установках: сб. науч. тр. – К.: Ин-т электродинамики АН УССР, 1993. – С. 57–63.
2. Маренич К.Н. Исследование влияния переходных процессов при коммутации присоединения в электротехническом комплексе на устойчивость к ложным срабатываниям аппарата АЗУР-4 [текст] // Праці Луганського відділення Міжнар. акад. інформатизації. – 2009. – №1 (18). – С. 52–57.
3. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
4. Маренич К.М. Питання стійкості систем “тиристорний комутаційний апарат – асинхронний мотор” під час фазового регулювання напруги [текст] // Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки. Сб. наук. пр. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 1993. – С. 35–39.
5. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
6. Мартынов М.В. Автоматизированный электропривод в горной промышленности. – М.: Недра, 1977. – 376 с.