

Результати розв'язання оптимізаційних задач з урахуванням коефіцієнта зворотної послідовності

Метод розрахунку	Коефіцієнт зворотної послідовності ( $k_o$ ), в. о.		$f$ , кГц		$C$ , мкФ		$L$ , мГн		Відхилення, %			
	Коефіцієнти		Коефіцієнти						$\Delta k_o$	$\Delta f$	$\Delta C$	$\Delta L$
	всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.				
$\alpha - \beta$	0,044	0,114	5	5	10	5	2,7	2,7	159,058	0	50	0
Фрізе	0,0372	0,039	5	5	9	10	2,7	2,7	5,977	0	4,03	0

**Висновки.** Виходячи з побудованих графіків коефіцієнтів регресії, можна стверджувати, що при роботі фільтрокомпенсуючого пристрою з різним навантаженням на діюче значення основної і вищих гармонік струму компенсатора (параметри оптимізації) у більшості випадків впливає індуктивність вхідного реактора. Шляхом розв'язання оптимізаційних задач на основі функцій регресії знайдено оптимальні значення електричних параметрів індуктивності вхідного реактора, ємності конденсаторної батареї та частоти імпульсів у системі керування. На базі цього можна стверджувати про достовірність визначення індуктивності за формулою (8), а формули для розрахунку максимальної частоти ШІМ та ємності конденсаторної батареї потребують уточнення.

#### Список літератури

1. Бурлака В.В. Обзор методов управления активными фильтрами // 36. наук. пр. «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук, 2011. – Вип. 1. – С. 51–54.
2. Матеріали наук.-техн. конф. «Проблеми сучасної електротехніки-2010», 31 травня – 4 червня 2010 р., м. Київ, Україна, 2010. – С. 64–69.
3. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в электрических цепях. Научное издание. – К.: «Наукова думка», 1992. – 312 с.
4. Домнін І.Ф., Жемеров Г.Г., Крилов Д.С., Сокол Е.І. Сучасні теорії потужності та їх використання в перетворюючих системах силової електроніки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність, 2004, ч. 1. – С. 80-91.
5. Zakis J., Vinnikov D., Laugis J., Rankis I., Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation // Наук. прикл. журн. «Технічна електродинаміка» - К.: ІЕД НАН України, 2010 ч.2, с. 16-21.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. / Под ред. Г.С. Зиновьев. – Н.: НГТУ, 1999
7. Сучасний експеримент: підготовка, проведення, аналіз результатів / В.Г. Блохін, О.П. Глудкін, А.І. Гуров, М.А. Ханін; Під ред. О.П. Глудкіна. – М.: Радіо та зв'язок, 1997. – 232 с.
8. Програма для статичних розрахунків та побудови графіків. Режим доступу: <http://www.statgraphics.com/>

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 621.318.48:621.316

**С.И. Черный, Е.В. Перекопский, Н.Н. Радочина**

(Украина, Днепропетровск, Государственный ВУЗ "Национальный горный университет")

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧИМОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Повышение эффективности работы горных предприятий невозможно без улучшения качества электроснабжения. Один из наиболее эффективных путей улучшения работы систем электроснабжения – это компенсация реактивной мощности (РМ) [1]. Однако в реальных условиях эксплуатации на большинстве горных предприятий достигнутая степень оснащённости электрических сетей средствами компенсации РМ значительно меньше оптимального значения. В этих условиях актуально проведение мероприятий по уменьшению перетоков реактивной электроэнергии (РЭ). Низкая рентабельность горных предприятий не позволяет выделять одноразово достаточные средства на приобретение компенсирующих устройств. Поэтому с целью уменьшения затрат на компенсацию РМ необходимо совершенствовать методические подходы по размещению и выбору компенсирующих устройств, что может быть достигнуто за счет учета реальных вероятностных показателей формирования реактивных нагрузок и потребления РЭ.

Известны исследования электрических нагрузок промышленных предприятий и вероятностно – статистических методов их определения, например, это работы [2,3]. Однако для проведения мероприятий

по компенсации РМ необходимо учитывать реальные показатели формирования реактивных нагрузок с учетом корреляционных связей. В работах [4,5] приведены значения коэффициентов корреляции, но они не могут быть рекомендованы горнорудным предприятиям. Результаты исследований, приведенные для горнорудных предприятий [6], дают вероятностные характеристики показателей электроснабжения, но не позволяют решить задачи компенсации РМ, поскольку нет оценки значимости корреляционных связей реактивных нагрузок.

В статье ставится задача определения и анализа значимости взаимных корреляционных связей реактивных нагрузок потребителей с целью уменьшения перетоков РЭ вблизи точек балансового раздела электрических сетей горнорудных предприятий.

Горнорудные предприятия имеют электрические сети древовидной конфигурации. Для узлов нагрузки максимальное (минимальное) значение РМ будет определяться их суммой (разницей) [3], т.е.

$$Q_{max} = \bar{Q} \pm \beta G_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $\bar{Q}$  – среднее значение реактивных нагрузок;  $\beta$  – статистический коэффициент, учитывающий вероятность появления максимальной (минимальной) нагрузки;  $G_{\Sigma}$  – результирующее среднеквадратическое отклонение реактивных нагрузок.

Функциональная взаимосвязь дисперсии результирующего случайного процесса описывается выражением [3,5] вида

$$D_{\Sigma} = \sum_1^n D_n + 2 \sum \lambda_{cs}, \quad (2)$$

где  $D_n$  – дисперсия  $n$ -й реактивной нагрузки;  $\lambda_{cs}$  – взаимно-корреляционные моменты индивидуальных графиков нагрузки [7],

$$\lambda_{cs} = k_{cs} G_c G_s, \quad (3)$$

где  $k_{cs}$  – коэффициент корреляции между потребителями энергии  $Q_c$  и  $Q_s$ ;  $G_c, G_s$  – соответственно среднеквадратические отклонение  $Q_c$  и  $Q_s$ .

Коэффициент корреляции [8]

$$k_{cs} = \frac{\sum_1^n (Q_{ci} - \bar{Q}_c)(Q_{si} - \bar{Q}_s)}{(N-1)G_c G_s},$$

где  $\bar{Q}_c, \bar{Q}_s$  – соответственно среднее значение нагрузок потребителей  $C$  и  $S$ ;  $N$  – количество наблюдений.

Для проведения мероприятий по компенсации перетоков РМ целесообразно оценить коэффициенты корреляции для усредненных графиков реактивных нагрузок, поскольку они являются обобщающими графиков нагрузок.

С целью проведения эксперимента была разработана методика исследования режимов реактивных нагрузок Орджоникидзевского горно-обогатительного комбината, которая позволила определить сроки и условия пассивного эксперимента, и соответственно вероятностные параметры реактивных нагрузок в центрах питания при доверительной вероятности 0,95 и относительной ошибке не более 0,07.

По результатам исследований нагрузок выполнены расчеты коэффициентов взаимной корреляции усредненных графиков нагрузок электроприемников (табл. 1).

Результаты исследований коэффициентов корреляции реактивных нагрузок показывают, что их значения изменяются в широких пределах от -0,48 до +0,54. Из полученных значений только 19% по абсолютной величине превышают 0,4 (в т.ч. из них 2 значения – отрицательные, а одно – положительное). Для остальных взаимозависимых сочетаний среднее значение положительных коэффициентов корреляции  $k_{cs} = 0,31$ , отрицательных соответственно  $k_{cs} = -0,28$ . При этом высокий положительный коэффициент характерен для присоединений, питающих аналогичные производственные процессы. Например, ввод пульпонасосных, вводы обогатительных фабрик, линии, питающие карьеры с одинаковым технологическим циклом. Отрицательные коэффициенты корреляции определяются различием технологии производства. Так, для реактивных нагрузок ЛЭП "Чкаловская - 33 – Север - 32", "Александровка - 31 – Север - 32"  $k_{cs} \approx -0,48$ . Это определяется тем, что линия "Север - 32" питает карьеры с роторными комплексами, а

ЛЭП "Чкаловская - 33 ", "Александровка - 31 " питают карьеры, где работают шагающие экскаваторы и экскаваторы ЭКГ.

Таблица 1

<b>Коэффициенты корреляции реактивных нагрузок</b>	
Электроприемники	$k_{cs}$
Ввод №1 пульнонасосной БОФ - ввод №2 пульнонасосной БОФ	0,39
Ввод №3 БОФ - ввод №1 пульнонасосной БОФ	-0,313
Ввод №3 БОФ - ввод №2 пульнонасосной БОФ	-0,07
ЛЭП Л363 -Л364	0,28
ЛЭП Чкаловская - 33 - Чкаловская - 34	0,34
ЛЭП Чкаловская - 33 - ЧОФ - 31	-0,15
ЛЭП Чкаловская - 34 - ЧОФ - 31	0,31
ЛЭП Чкаловская - 34 - ЧОФ - 32	0,54
ЛЭП Чкаловская - 34 - Север - 32	0,2
ЛЭП ЧОФ-31 - ЧОФ-32	0,37
ЛЭП ЧОФ-31-Север-32	0,153
ЛЭП Чкаловская - 33 - Север - 32	-0,48
ЛЭП Александровка - 31 - Север - 32	-0,47
ЛЭП ЧОФ - 32 - Чкаловская - 33	-0,18
ЛЭП ЧОФ - 32 - Север - 32	0,26
ЛЭП Александровка - 31 - Чкаловская - 33	0,25

Компенсация перетоков РЭ требует учитывать колебания реактивных нагрузок по времени суток, поскольку при обратных перетоках РЭ предприятия платят по повышенным тарифам за электроэнергию. В соответствии "Методики..." [9] для мощных потребителей электроэнергии, как правило, применяется зонный учет потребляемой и генерируемой РЭ. Коэффициент дифференцированного тарифа для зон "пик" ( $k_{пик}$ ) значительно выше, чем для зон "полупик" ( $k_{полупик}$ ) и для зоны "ночь" ( $k_{ночь}$ ); т.е., чтобы уменьшить плату за перетоки РЭ необходимо правильно выбрать мощность компенсирующих устройств (КУ) для каждой из зон тарифа. Зона "полупик" будет характеризоваться средними нагрузками и выбор мощности КУ для данной зоны определяется первой составляющей выражения (1). Формирование минимальных и максимальных нагрузок будет определяться дисперсионной составляющей (2), на которую влияют корреляционные связи. Поскольку удельная плата за обратные перетоки РЭ в часы "ночь" и потребление РЭ в часы "пик" существенно выше удельной платы для часов "полупик", то здесь необходимо учитывать особенности формирования вероятностных параметров реактивных нагрузок.

Исходя из выражений (2) и (3) результирующее среднеквадратическое отклонение

$$G_{\Sigma} = \sqrt{\sum_1^n D_n + 2\sum k_{cs} G_c G_s} . \tag{4}$$

Для инженерных расчетов необходимо оценить значение коэффициентов корреляции, которые существенно влияют на формирование результирующей дисперсии. Исходя из допустимой погрешности ( $\pm 10\%$ ) при равенстве коэффициентов корреляции вторая составляющая выражения (4) будет больше (меньше) суммарной дисперсионной составляющей  $\sum_1^n D_n$  для коэффициентов корреляции, т. е.

$$k_{cs} \geq \frac{0.1\sum D_n}{2\sum G_c G_s} . \tag{5}$$

При определении интегральных показателей потребления (генерации) РМ и перетоков РЭ учитывается результирующее среднеквадратическое отклонение  $G_{\Sigma}$  [10]. Для 10% - ного увеличения (уменьшения)  $G_{\Sigma}$  по сравнению с  $\sqrt{\sum_1^n D_n}$  значение коэффициента корреляции должно быть таким:

$$|k_{cs}| \geq \frac{0.21\sum D_n}{2\sum G_c G_s} . \tag{6}$$

В табл. 2 приведены значения  $|k_{cs}|$ , полученные по результатам расчетов на основании выражений (5) и (6). Расчеты проводились в относительных единицах по отношению к самой большой дисперсионной составляющей ( $D_{max}$ ). При этом изменялось количество присоединений  $N$  и соотношение  $G_c$  и  $G_s$  ( $\frac{G_s}{G_{smax}} = 0,2...1$ ). Для соотношения  $\frac{G_s}{G_{smax}} \leq 0,1$  корреляционными моментами можно пренебречь.

Таблица 2.

**Предельные значения коэффициентов корреляции**

N	Соотношение $\frac{G_s}{G_{smax}}$					
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
3	0,123/0,26	0,07/0,143	0,062/0,13	0,055/0,116	0,051/0,107	0,05/0,105
4	0,1/0,21	0,044/0,092	0,04/0,084	0,37/0,077	0,034/0,071	0,033/0,07
6	0,045/0,094	0,032/0,068	0,0225/0,047	0,022/0,04	0,021/0,044	0,02/0,042
8	0,025/0,052	0,017/0,035	0,0155/0,033	0,015/0,032	0,0145/0,031	0,014/0,03
10	0,0202/0,047	0,014/0,28	0,012/0,0252	0,0118/0,0247	0,0114/0,024	0,011/0,023

\* Примечание: В числителе приведены значения  $k_{cs}$  для условия (5), а в знаменателе – соответственно для условия (6).

Анализ предельных значений коэффициентов корреляции  $k_{cs}$  показывает, что в пределах возможных соотношении ( $\frac{G_s}{G_{smax}} = 0,2...1$ ) даже при низких значениях коэффициентов корреляции наблюдается существенное влияние на формирование результирующих значений дисперсии и среднеквадратического отклонения. Сравнивая результаты коэффициентов корреляции, полученные по результатам экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что практически во всех случаях при расчете результирующих значений дисперсии и среднеквадратического отклонения для узлов нагрузки необходимо учитывать корреляционные связи.

### Выводы

1. Коэффициенты корреляции усредненных графиков реактивных нагрузок потребителей горнорудного предприятия изменяются в широких пределах отрицательных и положительных значений (от  $-0,48$  до  $+0,54$ ), что подтверждает необходимость их учета при расчете результирующей дисперсионной составляющей суммарных реактивных нагрузок.

2. Неучет корреляционных взаимосвязей реактивных нагрузок потребителей горнорудного предприятия может привести к существенным погрешностям результирующего среднеквадратического отклонения, определяющего интегральные показатели перетоков РЭ.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть продолжены в направлении оценки корреляционных связей реактивных нагрузок потребителей разного иерархического уровня (т.е. различных уровней напряжения).

### Список литературы

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях/Ю.С.Железко – М.: Энергоатомиздат, 1989, – 176 с.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий/С.Д.Волобринский, Г.М.Каялов, П.Н.Клейн и др.; под ред. С.Д. Волобринского. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. Фокин Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения/Ю.А.Фокин.– М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
4. Фокин Ю.А. Экспериментальные исследования нагрузок крупных городских подстанций с комплексным составом потребителей/Ю.А.Фокин, И.И.Арсамаков// Электричество. – 1972. – №10. – С.23 – 28.
5. Фокин Ю.А. Статистические характеристики активных и реактивных нагрузок потребителей электрических сетей напряжением 6–10 кВ/Ю.А.Фокин, А.А.Гремяков // Электричество. – 1972. – №2. – С.75 – 78.
6. Джунов В.А. Оценка качества электроэнергии в распределительных сетях напряжением 6 кВ марганцеворудных карьеров/В.А. Джунов // Горн.электромеханика и автоматика: респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1984. – Вып.46. – С. 17 – 21.
7. Корн Г. Справочник по математике (для научных сотрудников и инженеров) / Г.Корн, Т.Корн –М.: Наука, 1974. – 822 с.
8. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум);: учеб. пособие/ под ред. Г.К.Круга.: – М.: Высшая школа, 1983. – 216.

9. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Наказ міністерства палива та енергетики України // Офіційний вісник України. – 2002. – №6. – С.18 – 47.

10. Черный С.И. Улучшение режимов работы электрических сетей за счет снижения перетоков реактивной энергии // С.И. Черный // Гірн. електромеханіка та автоматика: нау. – техн.зб. – 2003. – Вип.70. – С. 33–36.

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*

УДК621.335.04:621.333

**Т.М. Міщенко, Д.О. Босий, канд-ти техн. наук**

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна)*

### **ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ НАПРУГИ ТА СТРУМУ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОВІЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Загальновідомо, що найважливішим, виходячи з ряду факторів, є рівень гармонійних складових в напрузі та струмі в точках присіднання електричного навантаження. У системі електричної тяги таким навантаженням є електрорухомий склад (ЕРС), зокрема, електровози. Тому виконаємо гармонійний аналіз для первинних (вхідних відносно до ЕРС) напруги  $u(t)$  і струму  $i(t)$  нових електровізів змінного струму: ДС 3 та 2ЕЛ5к.

Вибір для зазначених досліджень цих електровізів обумовлений не лише їх новизною, але й наступним.

Згідно з думкою авторів роботи [1], подальший розвиток електровозобудування України має здійснюватися на основі принципу "гибкого экипажа". І це можливе на базі чотиривісного електровоза ДС 3. Причому можливо отримання двох модифікацій двосистемного електровоза подвійного живлення 25 кВ, 50 Гц/3 кВ потужністю 4800 кВт: вантажо - пасажирського на основі асинхронних тягових двигунів (АТД) на максимальну швидкість 140 км/год і пасажирсько-швидкісного (також на основі АТД) на максимальну швидкість 200 км/год.

Автори роботи [2] також вважають, що електротяговий привід перспективних електровізів (Росія) повинен будуватися на базі безколекторних тягових двигунів (ТЕД), найімовірніше, на основі АТД, регулювання режиму роботи яких здійснюється за допомогою статичних перетворювачів частоти і кількості фаз, які складаються із імпульсного регулятора та чотирикватратного перетворювача, від яких живиться автономний інвертор напруги із широтно-імпульсною модуляцією. Кожен такий тяговий перетворювач живить два АТД. Таке схемотехнічне рішення і закладено якраз в електровозі ДС 3.

В електровозі 2ЕС5К тяговий привід дещо інший: кожна його секція обладнано двома тиристорними перетворювачами, кожен з яких живить по два колекторні двигуни (постійного струму), для регулювання напруги на яких застосоване зонне регулювання. Цей електровоз цікавий (з позиції поставленої задачі) не лише сучасним виконанням, але й тим, що тиристорні перетворювачі використовують на діючих здавна електровозах ВЛ80С.

Необхідні для вирішення поставленого в цій роботі завдання числові експериментальні дані запозичено з роботи [3].

#### **Візуальний аналіз осцилограм**

На рис.1 і 2 наведені осцилограми (два періоди) вхідних напруги  $u(t)$  і струмів  $i(t)$  відповідно електровізів ДС3 та 2ЕС5К.

Як впливає із візуального аналізу цих рисунків, унаслідок того, що тягові підстанції, що живлять фідерні зони із зазначеними електровозами, є достатньо потужними джерелами електроенергії, тому синусоїдна форма вхідної напруги не спотворюється. Причому це спостерігається для обох електровізів і при різному навантаженні: в межах діючого значення струму від 10 до 100 А.

Інша річ, що істотно, відбувається з формою тягового електровозного струму: вона помітно спотворюється внаслідок того, що силові кола електровізів містять потужні нелінійні реактивні елементи. Тому у подальшому проаналізуємо гармонійний склад та інші величини лише тягового струму. Це не зовсім відповідає нормам діючого в Україні ГОСТ 13109-97, в якому нормуються показники якості електроенергії, виходячи із форми і значень лише напруги, а струму цей стандарт не торкається. Однак міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад ІЕЕЕ 519-1992) обмежують не лише гармонійний склад напруги живлення, але й струму, що споживається. При цьому, згідно з міжнародним стандартом ІЕЕЕ 519-1981, основним фактором оцінки струму є інтегральний показник гармонійного складу струму, (%), [4], який визначається за формулою: