

Запорожская государственная инженерная академия  
Запорожский национальный технический университет**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА**

*Усовершенствовано автоматическое управление силовым активным фильтром и оценена энергоэффективность его использования в распределительных электрических сетях, питающих электроприводы. Сравнение с фильтрокомпенсирующими устройствами на базе тиристоров показало преимущества первых.*

*Вдосконалено автоматичне керування силовим активним фільтром та оцінена енергоефективність його використання в розподільчих електричних мережах, що живлять електроприводи. Порівняння з фільтрокомпенсируючими пристроями на базі тиристорів виявило перевагу перших.*

*Automatic control for power active filter (PAF) was improved and energy efficiency of the use of PAF in the electricity distribution networks, which supply electric drives, were estimated. Comparison with filter-compensating devices based on thyristors shown advantages of the first.*

В связи с наблюдающимся в настоящее время широким внедрением во всех отраслях хозяйства автоматизированных электроприводов (АЭП), созданных на основе силовых полупроводниковых преобразователей постоянного и переменного тока, возрастает объем генерации ими в питающую сеть неактивных составляющих мощности. Это, в свою очередь, приводит к дополнительным потерям электроэнергии в распределительных электрических сетях (РЭС).

Последними достижениями силовой преобразовательной техники и наиболее эффективными техническими решениями в области компенсации неактивных составляющих мощностей нагрузок в трехфазных сетях переменного напряжения являются силовые активные фильтры (САФ) [1,5,7], которые в настоящее время стали промышленно выпускаться рядом ведущих фирм: Nokian Capacitors, ABB, Danfoss и др. Указанные фильтры производятся в двух типоразмерах, отличающихся областью их применения: для трехпроводной или четырехпроводной РЭС.

Из анализа зарубежной и отечественной научно-технической литературы установлено, что наиболее предпочтительными (исходя из эффективности компенсации неактивной мощности, простоты и дешевизны их технической реализации) являются схемы САФ, выполненные на основе: трехфазной мостовой схемы активного фильтра (АФ) напряжения, сглаживающего фильтра (СФ) и устройства компенсации тока нейтрали (УКТН), – которые показаны на рис.1. СФ служит для компенсации мощности искажения, генерируемой в сеть самим АФ (вследствие высокочастотного переключения его силовых ключей V1 – V6. УКТН предназначено для компенсации (снижения до нуля) тока в нейтрали четырехпроводной РЭС.

Для автоматического управления САФ находят применение: векторная ШИМ [5], кросс-векторное [7] и прогнозирующее релейно-векторное [1,6] управление. При этом обеспечиваемое посредством САФ

быстродействие при обработке реактивной составляющей сетевого тока определяет общую эффективность компенсации неактивной мощности этим фильтром. В настоящее время наиболее быстродействующее управление (реализуемое фирмой Danfoss) характеризуется обработкой номинальной реактивной составляющей сетевого тока в течение 1 мс. Несмотря на повышенное внимание, уделяемое разработке управления и исследованию САФ, до настоящего времени остаются мало исследованными, актуальными и востребованными практикой задачи совершенствования управления САФ (особенно – применительно к рассмотренным предпочтительным схемам), выбора установленной мощности и исследования эффективности использования САФ в качестве компенсатора неактивной мощности.

Целью статьи является повышение быстродействия управления САФ, разработка методики выбора его установленной мощности, оценка эффективности компенсации неактивной мощности и энергоэффективности использования САФ для РЭС, питающих АЭП постоянного и переменного тока.

В качестве объектов исследования приняты энергосберегающие системы электропитания (СЭ) для АЭП, созданные на основе САФ и показанные на рис.1. От указанных СЭ получают питание: нагрузка Н1 (выполненная в виде трехфазного тиристорного электропривода постоянного тока (ТЭПТ) с мостовой или нулевой схемой преобразователя либо нерегулируемого или регулируемого посредством трехфазного тиристорного преобразователя переменного напряжения (ТПН) асинхронного АЭП) и нагрузка Н2 (выполненная в виде частотно-регулируемого асинхронного АЭП с АИН-ШИМ).

Для данных СЭ предложено усовершенствованное прогнозирующее управление АФ, характеризующееся следующими двумя видами оптимального управления: в динамических режимах – с повышенным быстродействием, а в установившихся режимах –

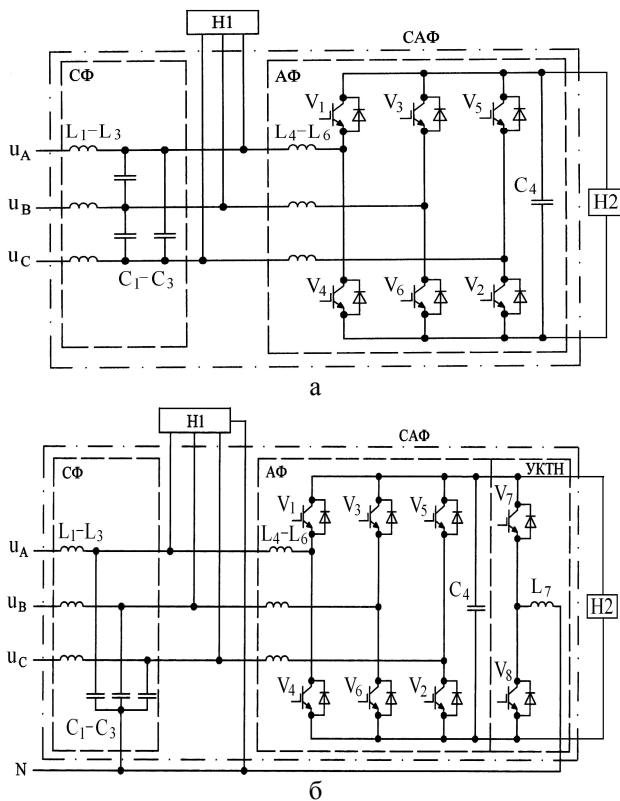


Рис.1. Энергосберегающие системы электропитания АЭП с предпочтительными схемами САФ: для трехпроводной (а) и для четырехпроводной РЭС (б)

с минимизацией частоты переключения силовых ключей АФ. При этом быстроредействующее управление осуществляется путем выбора комбинации  $m_1^*$  силовых ключей АФ, соответствующей максимальному значению прогнозирующего функционала [2]:

$$F_1(m_1^*) = [\cos\Theta_{\Delta I}] [\cos\Theta_{\Delta U}(m)] + [\sin\Theta_{\Delta I}] [\sin\Theta_{\Delta U}(m)] = \max, \quad (1)$$

а минимизация частоты переключения силовых ключей АФ обеспечивается посредством нахождения комбинации  $m_2^*$ , соответствующей максимальному значению другого функционала [4]:

$$F_2(m_2^*) = \frac{\Delta U_{\alpha 0}(m) \Delta I_{\alpha 0} + \Delta U_{\beta 0}(m) \Delta I_{\beta 0}}{\Delta U_{\alpha 0}^2(m) + \Delta U_{\beta 0}^2(m)} = \max. \quad (2)$$

В зависимостях (1) и (2) используются следующие обозначения:  $\Theta_{\Delta I}$  – текущее значение аргумента обобщенного вектора отклонения тока;  $\Theta_{\Delta U}(m)$  – прогнозируемые значения (при  $m$ -ой комбинации силовых ключей АФ) аргумента обобщенного вектора результирующего напряжения  $\Delta \bar{U}(m)$ ;  $m = 1, 2, \dots, 6$  – возможные комбинации открытых и закрытых силовых ключей АФ [1];  $\Delta I_{\alpha 0}$  и  $\Delta I_{\beta 0}$  – проекции на оси неподвижной ортогональной координатной системы (ОКС) « $\alpha$ - $\beta$ » обобщенного вектора отклонения тока, соответствующие моменту времени вхождения в установившийся режим, иначе при условии

$$\sqrt{\Delta I_{\alpha 0}^2 + \Delta I_{\beta 0}^2} = h, \quad (3)$$

где  $h$  составляет 3...5 % от номинального фазного тока АФ;  $\Delta U_{\alpha 0}(m)$  и  $\Delta U_{\beta 0}(m)$  – проекции на оси ОКС « $\alpha$ - $\beta$ » прогнозируемых обобщенных векторов результирующего напряжения, соответствующие моменту времени вхождения в установившийся режим согласно условию (3).

Прогнозируемые значения обобщенного вектора результирующего напряжения

$$\Delta \bar{U}(m) = \bar{U} - \bar{E}_n(m), \quad (4)$$

через текущее значение обобщенного вектора сетевого напряжения  $\bar{U}$  и прогнозируемые (при  $m$ -ой комбинации силовых ключей АФ) значения обобщенного вектора противо-ЭДС  $\bar{E}_n(m)$  АФ, рассчитываемые следующим образом:

$$\bar{E}_n(m) = (2u_n/3) \cdot e^{j\pi(m-1)/3}, \quad (5)$$

где  $u_n$  – текущее напряжение на конденсаторе  $C_4$  АФ;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Большим значениям ( $\Delta I > h$ ) модуля  $\Delta I$  обобщенного вектора отклонения тока  $\Delta \bar{I}$ , определяемого

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{I} &= \bar{I}^* - \bar{I} = \Delta I \cdot e^{j\Theta_{\Delta I}} = \Delta I_{\alpha} + j \Delta I_{\beta}, \\ \Delta I &= \sqrt{\Delta I_{\alpha}^2 + \Delta I_{\beta}^2}, \quad \Delta I_{\alpha} = I_{\alpha}^* - I_{\alpha}, \quad \Delta I_{\beta} = I_{\beta}^* - I_{\beta} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

соответствует динамический режим, а малым отклонениям ( $\Delta I \leq h$ ) – установившийся режим работы АФ, где  $I_{\alpha}^*$ ,  $I_{\beta}^*$  и  $I_{\alpha}$ ,  $I_{\beta}$  – соответственно заданные (при условии полной компенсации неактивной мощности) и фактические значения проекций обобщенных векторов  $\bar{I}^*$  и  $\bar{I}$  сетевого тока на оси ОКС « $\alpha$ - $\beta$ ».

Для УКТН предложено релейное (в заданных токовых «коридорах» с их значениями, близкими к нулю) и независимое (от воздействия на силовые ключи АФ) управление, предложенное в [3].

Для рассмотренных СЭ посредством имитационного моделирования проведены исследования достигаемых в установившихся (при номинальной нагрузке) и динамических режимах (разгона и торможения) электромеханических процессов в ЭП и протекающих электромагнитных процессов в СЭ и РЭС, а также энергетических коэффициентов применительно к основным существующим видам АЭП. К ним относятся упомянутые ранее электроприводы, входящие в состав нагрузок Н1 и Н2, мощностью 5,5 кВт.

Результаты исследования энергетических коэффициентов, достигнутых в РЭС при питании АЭП и использовании САФ, приведены в таблице, где  $K_M$  – сетевой коэффициент мощности;  $K_r$  – общий коэффициент гармоник сетевого тока (СФТ);  $K_c$  – коэффициент снижения нагрузочной составляющей сетевых потерь мощности при использовании САФ. Результаты исследований подтверждены экспериментально на макетном образце САФ напряжением 0,4 кВ и мощностью 5,5 кВА (отличие между рассчитанными и полученными экспериментально значениями не превышает: для коэффициентов  $K_r$  и  $K_c$  – 2 %, для  $K_M$  – 1 %).

Значения энергетических коэффициентов

Вид АЭП	Режим	Скорость	$K_M$ , о.е.	$K_r$ , %	$K_c$ , о.е.
ТЭПТ (с трехф. мостовой схемой)	установ. режим	$0,8 \omega_n$	0,9932	5,1	0,3802
		$0,1 \omega_n$	0,9524	12,8	0,0636
	разгон	–	0,9797*	–	–
ТЭПТ (с трехф. нулевой схемой)	установ. режим	$0,8 \omega_n$	0,9957	3,49	0,2439
		$0,1 \omega_n$	0,9665	11,8	0,0525
	разгон	–	0,9451*	–	–
Нерегулируемый АЭП	установ.	$\omega_n$	0,9973	3,81	0,6434
	разгон	–	0,9647*	–	0,4472*
АЭП с ТПН	установ.	$\omega_n$	0,9973	5,32	0,5399
	разгон	–	0,9822*	–	0,1208*
Частотно-регулируемый АЭП	установ. режим	$\omega_n$	0,9993	2,88	0,905**
		$0,1 \omega_n$	0,9928	8,90	0,510**
	разгон	–	0,9378*	–	–
	торможение	–	–0,8836*	–	–

\* – средние значения в переходном режиме;  $\omega_n$  – номинальная скорость; \*\* – в сравнении с диодным мостовым выпрямителем

На рис.2 приведены диаграммы отработки ступенчато изменяемого номинального сигнала задания  $I_y^*$  реактивной составляющей  $I_{fy}$  сетевого фазного тока (а – режим компенсации реактивной мощности (PM), б – режим генерации PM), которые характеризуют полученное быстродействие для предложенного управления САФ.

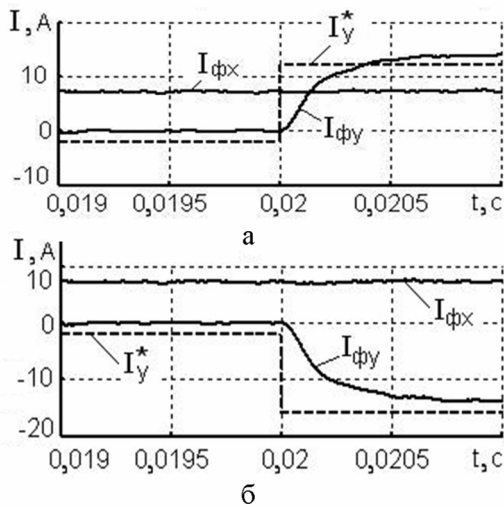


Рис.2. Диаграммы отработки ступенчато изменяемого номинального сигнала задания реактивной составляющей сетевого фазного тока

На рис.3 показана расчетная спектрограмма СФТ при питании частотно-регулируемого асинхронного АЭП, соответствующая номинальному режиму его работы (при этом значение коэффициента  $K_r$  равно 1,25 %, а частота  $f_v$  переключения силовых ключей АФ составляет 2950 Гц).

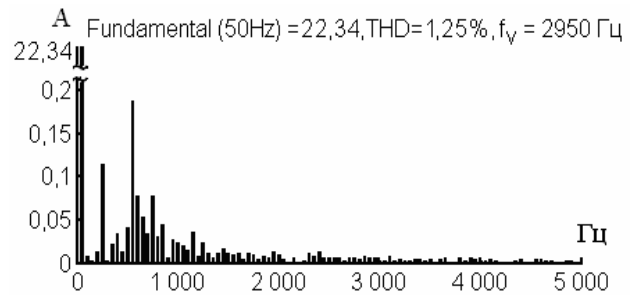


Рис.3. Спектрограмма СФТ при питании частотно-регулируемого асинхронного АЭП

Рассмотрим особенности выбора установленной мощности САФ, исходя из суточного графика изменения мгновенной реактивной мощности  $Q(t)$  нагрузки Н1 на рис. 4 (при отсутствии нагрузки Н2). Методика указанного выбора состоит в следующем:

- 1) из этого графика определяются максимальное  $Q_{max}$  и минимальное  $Q_{min}$  значения мгновенной PM;
- 2) рассчитывается среднее значение  $Q_{cp}$  PM:

$$Q_{cp} = 0,5(Q_{max} + Q_{min}); \quad (7)$$

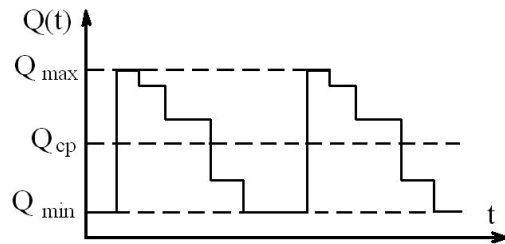


Рис.4. Суточный график изменения мгновенной реактивной мощности  $Q(t)$  нагрузки Н1

- 3) Находится установившаяся мощность  $Q_k$  батареи конденсаторов, подключенной постоянно к сетевым клеммам ( $u_A, u_B, u_C$ ), в виде:

$$Q_k = Q_{cp}; \quad (8)$$

- 4) определяется установленная мощность САФ:  $S_{САФ} \geq Q_{cp} - Q_{min} = Q_{max} - Q_{cp} = 0,5(Q_{max} - Q_{min})$ ; (9) если же присутствует нагрузка Н2, то в состав полной мощности  $S_{САФ}$  дополнительно входит также активная мощность нагрузки Н2.

В качестве сравнения приведем известные зависимости для определения параметров устанавливаемого фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ), созданного на основе тиристорного компенсатора реактивной мощности (ТКРМ):

- 1) для мощности постоянно подключенных конденсаторов:

$$Q_k = Q_{max}; \quad (10)$$

- 2) для мощности тиристорного компенсатора:

$$Q_{ТКРМ} = Q_{max} - Q_{min}. \quad (11)$$

Проведенный анализ установленной мощности без нагрузки Н2 и цен САФ и ФКУ (снабженного резонансными фильтрами высших гармоник включительно до 13-й) применительно к цеху контактной сварки Запорожского завода металлической тары свидетельствует о следующем:

1) установленная мощность конденсаторов при варианте с САФ примерно в 2 раза меньше, чем при варианте с ФКУ;

2) при компенсации одинакового значения РМ нагрузки Н1 установленная мощность САФ примерно в 2 раза меньше, чем ТКРМ (что обусловлено возможностью САФ обеспечить режимы как генерации, так и компенсации РМ);

3) учитывая предыдущее и принимая во внимание увеличенную примерно в 2 раза удельную стоимость САФ по сравнению с ФКУ, цены на САФ и ФКУ при компенсации одинаковой РМ, оказываются на практике примерно равны;

4) срок окупаемости САФ и ФКУ (за счет энергосбережения при компенсации РМ) для указанного цеха контактной сварки составляет примерно 2 года.

5) с учетом следующих дополнительных функций САФ (по сравнению с ФКУ): возможности симметрирования СФТ и более быстродействующей компенсации неактивных составляющих мощности, – расчетный срок окупаемости САФ для данного цеха уменьшается до 1,5 лет.

#### Выводы

1. Усовершенствованное управление САФ характеризуется повышенным быстродействием в динамических режимах (с временем отработки реактивной составляющей СФТ менее 0,7 мс, временем компенсации тока нейтрали сети – менее 0,4 мс) и одновременно уменьшенной частотой переключения силовых ключей САФ в установившихся режимах (что позволяет уменьшить в 1,5 – 2 раза значение динамических потерь мощности в САФ).

2. САФ с предложенным управлением представляет собой эффективное техническое средство энергосбережения в РЭС, питающих АЭП, способен обеспечить снижение нагрузочной составляющей сетевых потерь мощности в 2 - 10 и более раз и характеризуется сроком окупаемости, примерно равным 2 года.

#### Список использованной литературы

1. Волков А.В. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением / А.В. Волков, В.А. Волков // Электротехника. – М.: – 2008. – № 3. – С. 2-10.

2. Пат. UA 30472 Україна, МПК<sup>6</sup>, Н02Р 7/00, Н02Р 21/00. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквADRантного перетворювача / Волков О.В., Волков В.О.; власник Запорізький національний технічний університет. – № U200712688; заявл. 15.11.2007; опубл. 25.02.2008. Бюл. № 4.

3. Пат. UA 40772 Україна, МПК<sup>9</sup>, Н02J 3/01, Н02J 3/18, Н02J 3/26. Джерело електроживлення для

трифазного навантаження обладнаного нейтральним виводом / Волков О.В., Волков В.О.; власник Запорізький національний технічний університет. – № 200813253; заявл. 17.11.2008; опубл. 27.04.2009. Бюл. № 8.

4. Пат. UA 44892 Україна, МПК<sup>6</sup> Н02Р7/00, Н02Р21/00. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквADRантного перетворювача / Волков О.В., Волков В.О. Антонов М.Л.; власник Запорізький національний технічний університет. – № U200900025

5. Шрейнер Р.Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода / Р.Т. Шрейнер, А.А. Ефимов // Электричество. – 2000. – № 3. – С. 46 - 54.

6. Шрейнер Р.Т. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем напряжения / Р.Т. Шрейнер, А.А. Ефимов, Г.С. Зиновьев // Электротехника. – М.: – 2001. – № 12. – С. 47-52.

7. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощности в трехфазной системе электроснабжения / Г.Г. Жемеров, И.Ф. Домнин, О.А. Ильина, Д.В. Тугай // Техніч. електродинаміка. – К.: – 2007. – № 1. – С. 52-57.

Получено 05.07.2011



Волков Александр Васильевич,  
д.т.н., проф. каф. энергетического менеджмента ЗГИА,  
69006, Запорожье,  
пр. Ленина, 226,  
(061)-22-38-509  
volkov\_av@ukr.net



Метельский Владимир Петрович, к.т.н.,  
проф., зав. каф. электропривода та автоматизації промислових установок ЗНТУ,  
69063, Запорожье,  
ул. Жуковского, 103,  
(061)-76-44-625



Волков Владимир Александрович,  
ассистент каф. гидроэнергетики ЗГИА,  
69006, Запорожье,  
пр. Ленина, 226,  
(061)-22-38-242  
green\_stone@ukr.net