

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедры «Металлургия и технология сварочного производства», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина, E-mail: vburlaka@rambler.ru

<sup>2</sup>Доктор техн. наук, профессор, декан сварочного факультета, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры электрификации промышленных предприятий, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

<sup>4</sup>Секретарь сборника «Вестник Приазовского государственного технического университета», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

## ГИБРИДНЫЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Предложено схемное решение гибридного компенсатора реактивной мощности, состоящего из последовательного активного фильтра и батареи конденсаторов (БК) с тиристорным переключением ступеней, что позволяет «изолировать» БК от токов высших гармоник и обеспечить плавное регулирование реактивной мощности. Рассмотрены вопросы выбора соотношений между емкостями ступеней БК, позволяющих минимизировать установленную мощность активного фильтра и количество ступеней в БК.

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, батарея конденсаторов, последовательный активный фильтр, конденсаторы с тиристорным переключением.

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие перетоков реактивной мощности (РМ) в сети приводит к сокращению срока службы оборудования, росту потерь электроэнергии и уменьшению пропускной способности сети в целом. Общеизвестные методы компенсации РМ имеют ряд недостатков: синхронные компенсаторы требуют установки большого количества вспомогательного оборудования, БК с фиксированной емкостью не имеют возможности регулирования, а БК с механическими коммутаторами не обеспечивают непрерывности регулирования и не обладают необходимой скоростью реакции (переключения). Поэтому в современных электрических сетях уровня напряжения 0,4 кВ на смену указанным устройствам приходят усовершенствованные компенсаторы реактивной мощности (КРМ), не содержащие в своем составе вращающихся машин и механических контактов.

Актуальным решением проблемы компенсации РМ является использование компенсаторов с тиристорным управлением, статических компенсаторов и активных фильтров. К компенсаторам с тиристорным управлением относятся тиристорно-управляемые реакторы (ТУР) и тиристорно-переключаемые конденсаторы (ТПК) [1].

В состав устройства ТУР входят конденсатор фиксированной емкости и реактор с тиристорным управлением (рис. 1).

Изменением угла открытия тиристорov можно регулировать действующий ток реактора, что эквивалентно регулированию его индуктивности. Такие КРМ позволяют добиться непрерывности процесса управления, обладают высоким быстродействием и практически полным отсутствием переходных процессов, однако, поскольку ТУР являются источниками токов высших гармоник, они требуют установки дополнительных фильт-

рокомпенсирующих устройств [2]. Одним из примеров практической реализации такого устройства являются тиристорные компенсаторы реактивной мощности серии ТКРМ, которые разработаны ОАО «НИИ Преобразователь» (г. Запорожье, Украина).

ТПК (рис. 2) состоит из БК с тиристорным переключением ступеней и дросселей, служащих для ограниче-

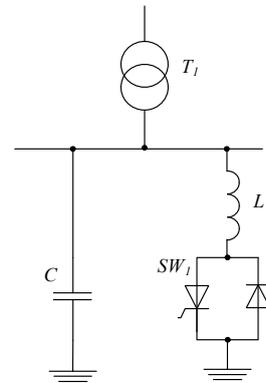


Рисунок 1 – Конфигурация схемы на базе ТУР

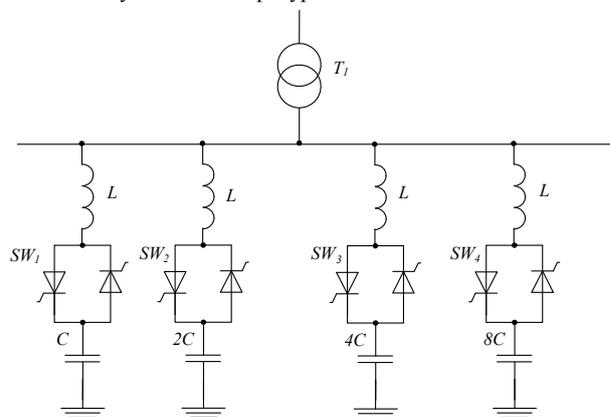


Рисунок 2 – Конфигурация схемы на базе устройства ТПК

ния скорости изменения тока тиристоров и/или расстройки БК для предотвращения резонансов. Для обеспечения «мягкого» включения тиристоров переключение производится в момент равенства напряжения сети и напряжения на конденсаторе.

Устройства на базе ТПК обладают возможностью ступенчато регулировать реактивную мощность, высоким быстродействием и не генерируют высшие гармоники в сеть.

В ТПК эффективным решением является установка емкости ступеней БК пропорционально степеням двойки (рис. 2) [1]. Это дает возможность при  $n$  ступенях БК получить  $2^n$  ступеней регулирования. Например, для схемы, которая включает 4 конденсатора с реактивными мощностями 1, 2, 4 и 8 кВАр, можно получить 16 ступеней регулирования – от 0 до 15 кВАр с шагом 1 кВАр.

Существенным недостатком рассмотренных устройств также является то, что БК подвержены негативному воздействию высших гармонических составляющих, присутствующих в сетевом напряжении. Работа в условиях несинусоидальности кривой тока БК может приводить к резонансным перенапряжениям, токовой перегрузке и, как следствие, перегреву батарей и выходу их из строя.

Обеспечить бесступенчатое регулирование реактивной мощности можно путем включения последовательно с БК регулируемого реактивного сопротивления. Более того, выполнив это сопротивление с максимумом

импеданса на частотах высших гармоник, можно добиться значительного снижения уровня гармоник в токе БК.

Реализовать такое реактивное сопротивление можно с помощью последовательного активного фильтра (АФ) [3, 4]. АФ в подавляющем большинстве случаев выполнен в виде автономного инвертора напряжения (АИН) с накопительным конденсатором большой емкости в цепи постоянного тока и LC-фильтром нижних частот в цепи переменного тока. Схема силовой части такого гибридного КРМ приведена на рис. 3, здесь SW – ключи, выполненные из двух встречно-параллельно включенных тиристоров. БК в составе гибридного КРМ рис. 3 имеет  $m$  ступеней.

Управление гибридным КРМ [4] осуществляется из условия обеспечения единичного коэффициента мощности комплекса «гибридный КРМ + нагрузка». Для этого в системе управления производится вычисление реактивной мощности нагрузки и формирование задания на ток гибридного КРМ. При этом регулирование реактивной мощности осуществляется по разомкнутой схеме – без обратной связи. Эта особенность требует повышенной точности работы узла вычисления реактивной мощности нагрузки и контура регулирования выходного тока гибридного КРМ. Кроме того, для выделения сигнала основной гармоники в системе управления [4] использованы полосовые фильтры, при этом не проведена оценка влияния их ФЧХ на точность компенсации реактивной мощности при изменении частоты сети.

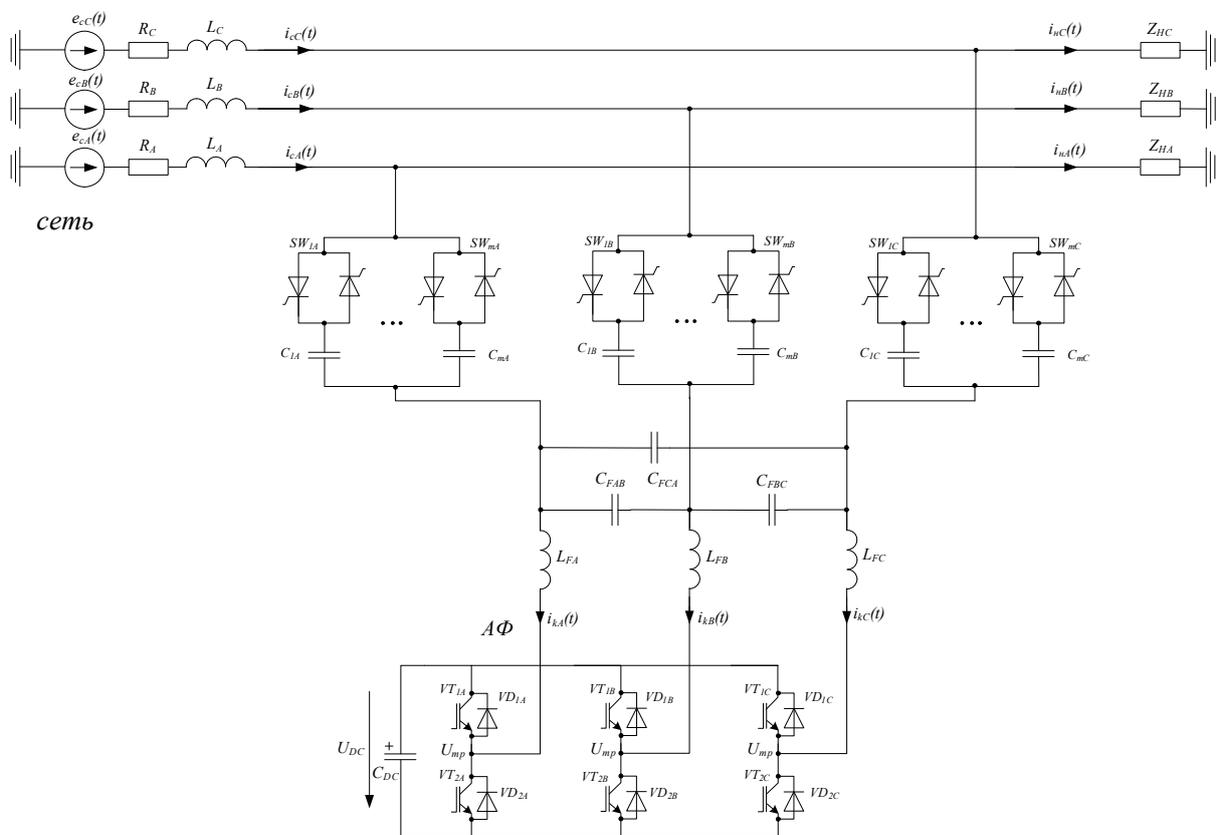


Рисунок 3 – Схема гибридного КРМ

**Целью исследования** является создание гибридного КРМ, свободного от указанных недостатков. Для этого контур управления реактивной мощности сделан замкнутым, что снижает требования к точности работы контура регулирования выходного тока КРМ; для выделения сигнала основной гармоники вместо полосовых фильтров использована петля фазовой автоподстройки частоты (Phase Locked Loop – PLL); решен вопрос выбора емкостей ступеней БК из условия обеспечения непрерывного регулирования реактивной мощности при минимизации установленной мощности активного фильтра в составе гибридного КРМ.

**Материал исследования.** На схеме замещения гибридного КРМ для частот, значительно меньших, чем частота переключения ключей инвертора АФ, последний может быть представлен в виде источника ЭДС  $e(t)$  (рис. 4).

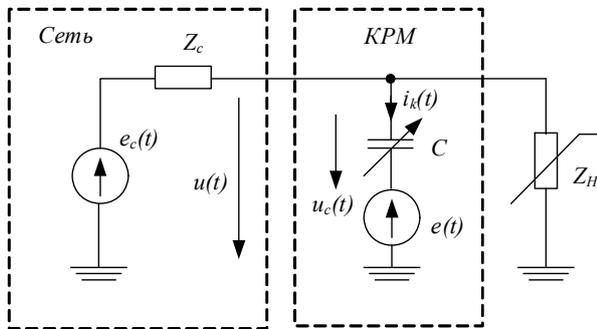


Рисунок 4 – Схема замещения КРМ с АИН

Структурная схема системы управления КРМ представлена на рис. 5. Применено гистерезисное управление инвертором с обратной связью по току (см. контур тока КТ, рис. 5). Ток задания  $i_3(t)$  определяется как сумма синфазной  $i_p(t)$  и квадратурной составляющих  $i_q(t)$ .

Формирование синфазной составляющей тока задания осуществляется регулятором напряжения звена постоянного тока  $U_{DC}$ . Этот ток имеет небольшую величину, так как потребляемая АФ активная мощность расходуется только на потери в нем. По этой причине при дальнейшем анализе свойств гибридного КРМ этим током можно пренебречь.

Блок PLL предназначен для выделения из напряжения сети синфазной и квадратурной компонент основной частоты. Эти сигналы используются для формирования синфазной и квадратурной составляющих тока задания.

Выделение квадратурной компоненты тока сети осуществляется путем перемножения с эталонным сигналом с PLL и последующей низкочастотной фильтрацией. В качестве ФНЧ использован sinc-фильтр первого порядка с интервалом интегрирования, равным периоду сети. Полученный таким образом сигнал  $I_{qc}$  поступает на сумматор вместе с током задания  $I_{qREF}$ . Использование ненулевого  $I_{qREF}$  позволяет осуществлять режимы перекомпенсации либо недокомпенсации РМ. Разностный сигнал является входным для регулятора амплитуды реактивного тока  $I_q$ , выходной сигнал которого используется для формирования  $i_q(t)$ .

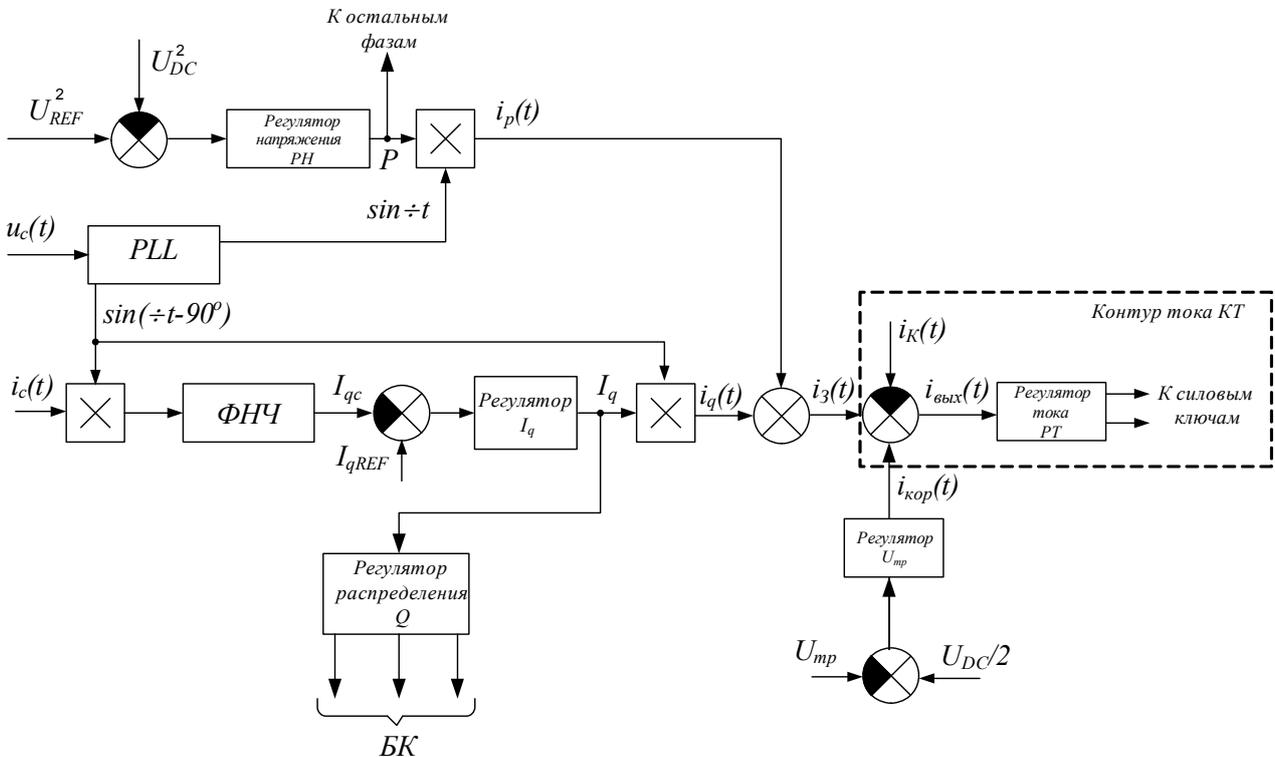


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления КРМ

Регулятор распределения Q выполняет перераспределение мощности между БК и АФ по условию минимизации мощности АФ, т.е. выбирается такая емкость БК, при которой для заданной реактивной мощности выходное напряжение АФ будет минимально.

Поддержание среднего значения напряжения в средней точке полумостов на уровне  $0.5 \cdot U_{DC}$  относительно отрицательной шины звена постоянного тока АФ осуществляется регулятором  $U_{mp}$ , выходной сигнал которого представляет собой ток коррекции  $i_{кор}(t)$ . Здесь достаточно П-регулятора с небольшим коэффициентом усиления. Без этого регулятора неизбежно появление на БК неконтролируемой постоянной составляющей напряжения, что приведет к невозможности обеспечения корректного управления током КРМ.

Поскольку в системе управления АФ в КРМ использовано токовое управление, в схеме замещения активный фильтр как управляемый источник ЭДС можно заменить управляемым источником тока (рис. 6).

Так как в спектре источника тока имеется только основная частота сети, батарея конденсаторов будет изолирована от высших гармоник, присутствующих в сетевом напряжении.

Экономически целесообразным для гибридного КРМ является уменьшение выходного напряжения АФ, что позволяет выполнить его на низковольтной элементной базе, тем самым повысить экономическую (снизить цену) и энергетическую (снизить потери) эффективность.

### АНАЛИЗ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ КРМ

Выходную ЭДС АФ на основной частоте сети от напряжения сети примем пропорциональной сетевому напряжению:

$$E = \Delta \cdot U_1, \tag{1}$$

где  $\Delta$  – коэффициент пропорциональности между напряжением сети и ЭДС АФ, может принимать значения от  $-\Delta_{\max}$  до  $+\Delta_{\max}$ ;  $U_1$  – составляющая напряжения сети на основной частоте, В.

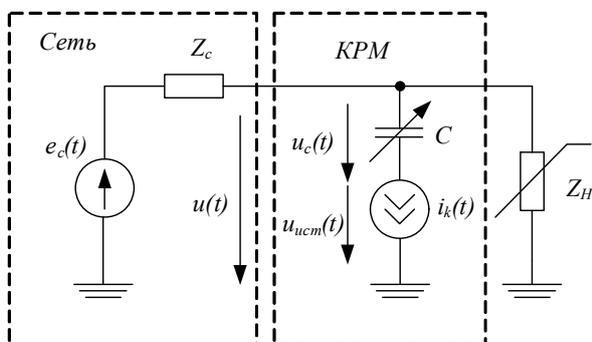


Рисунок 6 – Схема замещения КРМ с управляемым источником тока

Реактивная мощность гибридного КРМ, в соответствии с [5], рассчитывается следующим образом:

$$Q = E \cdot I_k + I_k \cdot U_c, \tag{2}$$

где  $I_k$  – составляющая тока компенсатора на основной частоте;  $U_c$  – напряжение на БК.

Ток КРМ рассчитывается как

$$I_k = \frac{U_1 - E}{X_C}, \tag{3}$$

а напряжение на конденсаторе

$$U_c = U_1 - E. \tag{4}$$

Тогда

$$Q = \frac{U_1 - E}{X_C} \cdot (E + U_c). \tag{5}$$

В результате математических преобразований получим выражение для расчета величины максимальной реактивной мощности n-ой ступени, которую генерирует КРМ:

$$Q_{n\max} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U_1^2 \cdot (1 + \Delta_{\max}), \tag{6}$$

а минимальной генерируемой РМ на (n+1)-ой ступени:

$$Q_{(n+1)\min} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U_1^2 \cdot (1 - \Delta_{\max}). \tag{7}$$

Для гибридного КРМ, в котором использована БК с емкостями ступеней, пропорциональными степени двойки, при  $D_{\max} = 0,1$  получается регулировочная характеристика, показанная на рис. 7. Видно, что при малых номерах ступеней регулирования БК в регулировочной характеристике появляются разрывы, что приводит к снижению точности компенсации РМ.

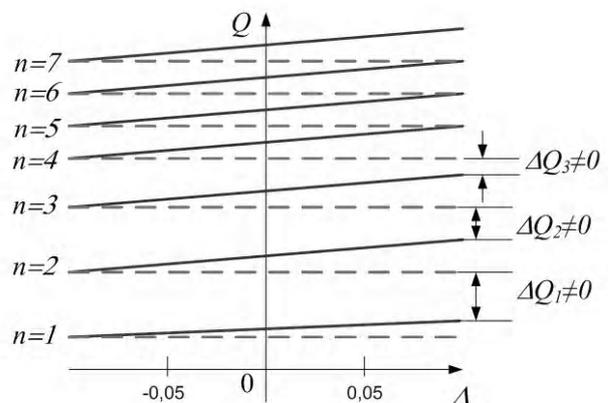


Рисунок 7 – Регулировочная характеристика гибридного КРМ с БК, емкость ступеней которой установлена пропорционально степеням двойки ( $D_{\max} = 0,1$ )

Для устранения разрывов необходимо либо увеличивать величину установленной мощности АФ, либо увеличивать количество ступеней БК, что ухудшает технико-экономические показатели КРМ.

Плавности регулирования РМ можно добиться при условии выполнения равенства:

$$Q_{(n+1)\text{мин}} = Q_{n\text{макс}}, \quad (8)$$

Из выражений (5) – (8) следует соотношение ступеней емкостей БК [6]:

$$\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U + E_{\text{макс}}}{U - E_{\text{макс}}}, \quad (9)$$

где  $C_{n+1}$  – емкость ступени БК с номером  $(n+1)$ ,  $C_n$  – емкость ступени БК с номером  $n$ ,  $E_{\text{макс}}$  – максимальное выходное напряжение АФ на основной частоте,  $U$  – составляющая напряжения сети на основной частоте,  $V$ .

Приняв  $\frac{U + E_{\text{макс}}}{U - E_{\text{макс}}} = q$ , получим следующее выражение:

$$C_{n+1} = C_n \cdot q. \quad (10)$$

Таким образом, для обеспечения бесступенчатого регулирования РМ емкости ступеней БК должны изменяться в геометрической прогрессии.

Экспериментальное опробование проведено на однофазном гибридном КРМ с диапазоном регулирования реактивной мощности от 2,1 кВАр до 13,8 кВАр при напряжении сети 220 В. Максимальное выходное напряжение АФ составляет 22 В (10 % сетевого, т.е.  $D_{\text{макс}} = 0,1$ ). Величины необходимых емкостей ступеней БК соответственно равны 150 мкФ, 183 мкФ, 223 мкФ, 273 мкФ, 333 мкФ, 406 мкФ, 496 мкФ, 605 мкФ, 738 мкФ, 900 мкФ. Чтобы не устанавливать БК большой емкости, необходимая величина набирается путем одновременного включения нескольких конденсаторов меньшей емкости. В состав схемы входят 10 конденсаторов с емкостями 150 мкФ,

33 мкФ, 40 мкФ, 50 мкФ, 60 мкФ, 73 мкФ, 90 мкФ, 109 мкФ, 133 мкФ, 162 мкФ. Включение конденсаторов осуществляется с помощью встречно-параллельно соединенных тиристоров, что позволяет получить десять ступеней непрерывного регулирования мощности КРМ (табл. 1).

Рассмотренный подход позволяет уменьшить количество используемых конденсаторов и целесообразен для применения в случаях, когда установленная мощность АФ составляет менее 20 % от мощности КРМ.

Для уменьшения количества ступеней БК соотношение их емкостей может быть выбрано следующим образом [6]:

$$\left(\frac{C_{n+1}}{C_n}\right)^k = 1 + \frac{C_{n+1}}{C_n}, \quad (11)$$

где  $k$  – целое число не меньше 2.

При выполнении этого условия емкость ступени с номером  $k$  может быть реализована путем параллельного включения ступеней с номерами 0 и 1; емкость ступени с номером  $(k+1)$  – включения ступеней с номерами 1 и 2 и т.д.

Выражения (11) и (9) однозначно определяют зависимость между числом  $k$  и коэффициентом  $\Delta_{\text{макс}}$ , который, в свою очередь, определяет установленную мощность АФ. В таблице 2 представлены результаты определения соотношений емкостей ступеней БК и коэффициента  $\Delta_{\text{макс}}$  для значений  $k$  от 2 до 6.

Таблица 2 – Таблица соответствия значений соотношения емкостей ступеней БК и коэффициента  $\Delta_{\text{макс}}$

№ п/п	$k$	$\frac{C_{n+1}}{C_n}$	$\Delta_{\text{макс}}$
1	2	1,618	0,236
2	3	1,325	0,139
3	4	1,221	0,1
4	5	1,167	0,077
5	6	1,134	0,067

Таблица 1 – Таблица истинности включения конденсаторов ступеней

Конденсатор	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Емкость, мкФ	150	33	40	50	60	73	90	109	133	162
Номер ступени БК	Включенные конденсаторы (+)									
1	+									
2	+	+								
3	+	+	+							
4	+	+	+	+						
5	+	+	+	+	+					
6	+	+	+	+	+	+				
7	+	+	+	+	+	+	+			
8	+	+	+	+	+	+	+	+		
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Таблиця 3 – Таблица истинности включения конденсаторов БК

Конденсатор	C1	C2	C3	C4
Емкость, мкФ	150	183	223	273
Номер ступени батареи конденсаторов	Включенные конденсаторы (+)			
1	+			
2		+		
3			+	
4				+
5	+	+		
6		+	+	
7			+	+
8	+	+		+
9		+	+	+
10	+	+	+	+

Експериментальна перевірка виконана на однофазному гібридному КРМ з 4 конденсаторами ємкістю 150 мкФ, 183 мкФ, 223 мкФ, 273 мкФ (т.е.  $k=4, D_{\max}=0,1$ ). В цьому випадку десять ступеней неперервного регулювання потужності гібридного КРМ були отримані шляхом з'єднання в паралель конденсаторів в різних комбінаціях відповідно до табл. 3. Наприклад, для отримання ємкості п'ятої ступені необхідно спільне включення конденсаторів першої та другої ступені, ємкості шостої ступені – конденсаторів другої та третьої ступені і т.д. При цьому комбінації для дев'ятої та десятої ступені не можуть бути розраховані за виразом (11), однак отримання цих ступеней можливо при включенні конденсаторів в комбінаціях, вказаних в табл. 3. Діапазон зміни реактивної потужності гібридного КРМ становить від 2,1 кВАр до 13,8 кВАр при напрузі мережі 220 В.

Викладений підхід дозволяє значно скоротити кількість конденсаторів в складі батареї та ефективність при невеликій установленій потужності АФ.

**ВИВОДИ**

1. Предложено гибридный КРМ, состоящий из последовательно соединенных БК с тиристорным переключением и АФ, что позволило «изолировать» БК с тиристорным переключением от токов высших гармоник и обеспечить плавность регулирования.

2. Представлены два варианта выбора соотношения между емкостями ступеней БК. Использование первого варианта позволяет обеспечить непрерывность регулирования мощности гибридного КРМ при сниженной установленной мощности АФ. Использование второго варианта позволяет значительно сократить количество конденсаторов в составе БК, однако его эффективность обеспечивается при небольшой установленной мощности АФ.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review / [J. W. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke ] // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, Dec. № 12. – P. 2144–2164
2. Давидов О. Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О. Ю. Давидов, О. В. Бялобржеський // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Осроградського. – 2010. – Вип. 3(62). – С. 132–136.
3. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter / J. W. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán and C. Maffrand // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – Vol. 50, Oct. – № 5. – P. 982–989.
4. Patent US 6,876,179 B2 USA, Int. Cl. G05F 1/70; H02M 1/12. Hybrid Reactive Power Compensation Device; UIS Abler Electronics Co., Ltd., Taipei Hsien (TW). – № 10/424,707; filed 29.04.2003; publ. 05.04.2005.
5. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – Approved 2010-2-2. – IEEE-SA Standards Board, 2010. – 72 p.
6. Пат. 106174 Україна, МПК G05F 1/70 (2006.01) H02J 3/18 (2006.01). Спосіб компенсації реактивної потужності / В. Бурлака, С. Гулаков, С. Поднебенна; Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – а 2013 10826; заявл. 09.09.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

Стаття поступила в редакцію 15.08.2014.  
Після доработки 09.12.2014.

Бурлака В. В.<sup>1</sup>, Гулаков С. В.<sup>2</sup>, Поднебенна С. К.<sup>3</sup>, Савенко О. С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедри «Металургія та обладнання зварювального виробництва», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, E-mail: vburlaka@rambler.ru

<sup>2</sup>Доктор техн. наук, професор, декан зварювального факультету, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна.

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри електрифікації промислових підприємств, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна.

<sup>4</sup>Секретар збірника наукових праць «Вісник Приазовського державного технічного університету», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна.

**КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ**

*Розглянуто широко використовувані пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРМ) – батареї конденсаторів (БК) з тиристорним перемиканням, проведено аналіз їх недоліків: вплив вищих гармонік при несинусоїдальній напрузі мережі, неможливість забезпечити плавність регулювання. Запропоновано схемне рішення УКРМ, що складається з послідовного активного фільтра і БК із ступінчастим перемиканням, що дозволяє «ізолювати» БК від струмів вищих гармонік і забезпечити плавне регулювання реактивної потуж-*

ності. Розглянуто питання вибору співвідношень між ємностями ступенів БК, що дозволяють мінімізувати встановлену потужність активного фільтра і кількість ступенів у БК.

**Ключові слова:** пристрій компенсації реактивної потужності (ПКРМ), батарея конденсаторів (БК), послідовний активний фільтр (АФ), конденсатори з тиристорним перемиканням (ТПК).

Burlaka V. V.<sup>1</sup>, Gulakov S. V.<sup>2</sup>, Podnebennaya S. K.<sup>3</sup>, Savenko O. S.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., doctoral student, Department of Metallurgy and Welding Technology, State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Ukraine, E-mail: vburlaka@rambler.ru.

<sup>2</sup>Doctor of science, Professor, Dean of the Faculty of Welding, State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Ukraine.

<sup>3</sup>Ph.D., Associate Professor, Department of electrification of industrial enterprises, State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Ukraine.

<sup>4</sup>Secretary of the «Reporter of the Pryazovskyi State Technical University», State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Ukraine.

#### REACTIVE POWER COMPENSATOR WITH SMOOTH CONTROL

*Reactive power compensation devices are widely used: thyristor-control reactors (TCR) and thyristor-switched capacitors (TSC). The TCR disadvantages are discussed. The TSC disadvantages are: influence of higher harmonics on nonsinusoidal voltage power system, the inability to ensure the smooth regulation. The proposed reactive power compensator consists of series with active filter and capacitors with step switch. Reactive power compensator's control system is proposed. Hysteretic control of the inverter with current feedback is applied. DC-voltage regulator provides balance of active power. The control system allows overcompensation or undercompensation of reactive power modes. Reactive power distribution regulator performs the redistribution of power between switching capacitors and active filter. Minimization condition of this regulator is active filter's power. Adjustment properties of reactive power compensator are analyzed. The choice of relations between the capacitors TSC steps to minimize the installed capacity of the active filter and the number of stages in TSC is considered. The approach that makes possible to «isolate» capacitors from harmonic currents and provide smooth control of reactive power is proposed.*

**Keywords:** reactive power compensation device, capacitor, series active filter (AF), thyristor switching capacitors (TSC).

#### REFERENCES

1. Dixon J. W., Moran L., Rodriguez J., Domke R. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review, *Proceedings of the IEEE*, 2005, Vol. 93, Dec., No. 12, pp. 2144–2164
2. Davidov O. Yu. Byalobrzheskiy O.V. Analiz zasobiv kompensatsii reaktivnoii potuzhnosti v elektrotehnichnih sistemah, *Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*, 2010, Vip. 3(62), S. 132–136.
3. Dixon J. W., del Valle Y., Orchard M., Ortúzar M., Morán L. and Maffrand C. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter, *EEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, Vol.50, Oct., No. 5, pp. 982–989
4. Patent US 6,876,179 B2 USA, Int. Cl. G05F 1/70; H02M 1/12. Hybrid Reactive Power Compensation Device; UIS Abler Electronics Co., Ltd., Taipei Hsien (TW). – № 10/424,707; filed 29.04.2003; publ. 05.04.2005.
5. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, Approved 2010-2-2, IEEE-SA Standards Board, 2010, 72 p.
6. Burlaka V., Gulakov S., Podnebenna S. Pat. 106174 Ukraine, MPK G05F 1/70 (2006.01) H02J 3/18 (2006.01). Sposib kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti; Derzhavnyi vischiy navchalnyi zaklad «Pryazovskiy derzhavnyi tehnicnyi universitet», a 2013 10826; zayavl. 09.09.2013; opubl. 10.09.2014, Bul. № 17.