



**Жук
Олександр
Кирилович**

УДК 62.396
У66

MODEL SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM OF ADJUSTABLE POWER LINE CONDITIONER WITH REACTOR COMPENSATOR

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ
С РЕАКТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ**

DOI 10.15589/SMI. 2018.01.10

Oleksandr K. Zhuk

О. К. Жук, канд. техн. наук, доц.¹
akzhuk2@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-9069-475X

Iryna Y. Zhuk

І. Ю. Жук, старший викладач²
irina_g2@ukr.net
ORC ID: —

Dmytro O. Zhuk

Д. О. Жук, канд. техн. наук, доц.¹
vicedirector2012@gmail.com
ORC ID: 0000-0001-9782-1822

Dmytro V. Kryvoruchko

Д. В. Криворучко, асистент каф. СЕЕС¹
dmitry.gpspeed@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-8670-8872

Kateryna A. Voskoboienko

К. А. Воскобоєнко, асп.¹
—
ORC ID: —

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev*

²*Petro Mogila Black Sea National University*

¹*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

²*Черноморский национальный университет им. Петра Могилы, г. Николаев*

Abstract. Conditions for full reactive power compensation in an autonomous electric power system (EPS) with powerful semiconductor converters (SC) are determined. The constructing principles of control system (CS) of improved adjustable power line conditioner (APLC) are proposed. The MATLAB-model of EPS for the estimation of the APLC CS effectiveness is created and investigated.

Keywords: autonomous electric power system (EPS), reactive power compensation, adjustable power line conditioner (APLC), pulse-width modulation (PWM)

Анотація. Визначено умови повної компенсації реактивної потужності навантаження в автономній електроенергетичній системі (ЕЕС) з потужними напівпровідниковими перетворювачами (НП). Запропоновано принципи побудови відповідної системи керування (СК) удосконаленого фільтрокомпенсуючого пристрою (УФКП). Створена і досліджена MATLAB-модель системи для оцінки ефективності роботи СК УФКП.

Ключові слова: автономна електроенергетична система (ЕЕС), компенсація реактивної потужності, фільтрокомпенсуючий пристрій (ФКП), широтно-імпульсне регулювання (ШИР)

Аннотация. Определены условия полной компенсации реактивной мощности нагрузки в автономной электроэнергетической системе (ЭЭС) с мощными полупроводниковыми преобразователями (ПП). Предложены принципы построения соответствующей системы управления (СУ) усовершенствованного фильтрокомпенсирующего устройства (УФКУ). Создана и исследована MATLAB-модель системы для оценки эффективности работы СУ УФКУ.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система (ЭЭС), компенсация реактивной мощности, фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ), широтно-импульсное регулирование (ШИР)



**Жук
Ірина
Оріївна**



**Жук
Дмитро
Олександрович**



**Криворучко
Дмитро
Вікторович**



**Воскобоєнко
Катерина
Андріївна**

References

Жук А.К., Жук Д.А., Криворучко Д.В. Моделирование электроэнергетической системы с тиристорным преобразователем и фильтрокомпенсирующим устройством // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» – 2014, С. 76–82

O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.

doi: 10.1109/IEPS.2016.7521866

Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство для автономной электроэнергетической системы с мощными преобразователями / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко, С. А. Степенко. // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 32–34.

Фильтрокомпенсирующее устройство с широтно-импульсным регулированием реакторного компенсатора / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко. // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 59–66.

Вступ. Проблема обеспечения качества электроэнергии (КЭ) и электромагнитной совместимости (ЭМС) в автономных электроэнергетических системах (ЭЭС) современных морских судов и морских платформ является весьма актуальной в связи с применением на них мощных полупроводниковых преобразователей (ПП) различного назначения. Снижение КЭ в таких ЭЭС обусловлено двумя причинами: наличием высших гармоник в составе потребляемого тока и фазовым сдвигом основной гармоники тока относительно напряжения сети.

Разработка эффективных системных управляемых фильтрокомпенсирующих устройств (УФКУ) для автономных (судовых) ЭЭС с ПП связана с выполнением специфических, зачастую противоречивых требований: точность компенсации реактивной мощности в статике и динамике, высокое быстродействие, эффективное снижение высших гармоник в широком диапазоне частот для ограничения коэффициентов несинусоидальности напряжения сети и потребляемого тока, минимальное количествостраиваемых цепей.

Задача осложняется тем, что современные активные или гибридные УФКУ сами являются источниками высших гармоник, ввиду наличия в их составе полупроводниковых ключей [1].

В [1–4] представлены результаты исследования усовершенствованного УФКУ с реакторным компенсатором (РК).

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является обеспечение автоматической компенсации реактивной мощности в автономной ЭЭС с ПП и реализация принципа управления быстродействующим РК с широтно-импульсным регулированием (ШИР) в составе УФКУ.

На рис. 1 приведена обобщенная схема автономной ЭЭС с ПП и УФКУ.

УФКУ состоит из нерегулируемого резонансного LC-фильтра (РФ) и управляемого реакторного компенсатора (РК). Каждая из фаз резонансного филь-

тра, включенных по схеме «звезда», состоит из соединенных последовательно конденсатора и реактора с сопротивлениями X_{C0} и X_{L0} . Порядок частоты настройки РФ соответствует нулю частотной характеристики сопротивления системы и, как правило, выбирается из условия $\xi = \omega_0 / \omega = \sqrt{X_{C0} / X_{P0}} \leq m - 1$, где ω_0 — резонансная частота фильтра, ω — частота сети, m — количество фаз выпрямления ПП. Одновременно РФ является генератором реактивной мощности на основной гармонике:

$Q_{PФ} = 3U_{\phi}^2 / (X_{C0} - X_{P0})$, где U_{ϕ} — действующее значение фазного напряжения сети [3]. Реакторный компенсатор условно показан в виде индуктивного элемента с регулируемым эквивалентным сопротивлением на основной гармонике X_{LK} . РК потребляет реактивную мощность $Q_{PК} = 3U_{\phi}^2 / X_{PКЭ}$. [4]

В системе используется схема усовершенствованного гибридного УФКУ, которая представлена на рис. 2. РК представляет собою индуктивный элемент с сопротивлением X_{LK} , который подключен к точ-

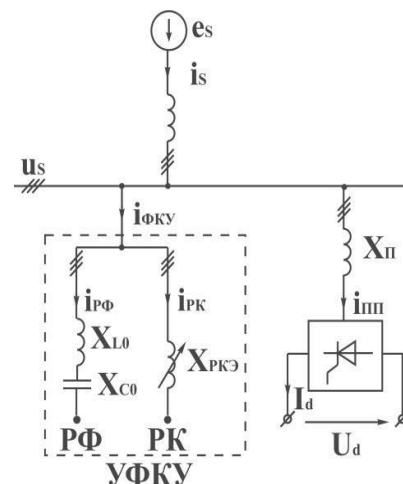


Рис. 1. Обобщенная структурная схема автономной ЭЭС с ПП и УФКУ

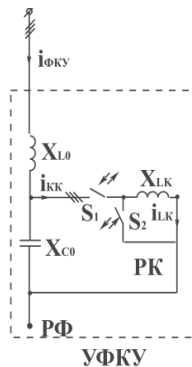


Рис. 2. Схема УФКУ с широтно-импульсным регулированием РК

ке соединения индуктивности X_{L0} и емкости X_{C0} РФ с помощью последовательно-параллельных ключей S_1 и S_2 , условно показанных в виде контактов. Резонансный фильтр в данном случае, выполняет роль помехозащитного фильтра по отношению к РК [4].

Для регулирования эквивалентной индуктивности РК используется принцип широтно-импульсного регулирования (ШИР), при котором угловая частота коммутации ключей ω_K во много раз больше частоты сети ω ($\omega_K \gg \omega$) [1]. Ключ S_1 , периодически коммутируется и подключает реактор X_{LK} к фазному напряжению в течение временного интервала t_1 . Ключ S_2 , включается только при отключении S_1 и служит для закорачивания фазы реактора на время t_2 . Таким образом, период коммутации ШИР определяется выражением $T_K = t_1 + t_2$. Управление индуктивностью РК осуществляется путем изменения относительного времени проводящего состояния ключей S_1, S_2 (скважности) $\gamma = (t_1 + t_2)/T_K$. При работе широтно-импульсного регулятора происходит периодическое чередование режимов подключения реактора на трехфазное напряжение и режимов его трехфазного к.з. Изменяемое эквивалентное сопротивление фазы РК $X_{РКЭ} = X_{LK}/\gamma^2$ [4].

Параметры РФ выбираются исходя из двух условий: ограничения несинусоидальности напряжения сети и компенсации реактивной мощности ПП. Условием полной компенсации реактивной мощности для любого режима системы ПП-УФКУ является соотношение $Q_{PФ} - Q_{РК} - Q_{ПП} = 0$ [4].

В последующем будем считать, что в качестве ПП рассматривается тиристорный преобразователь (ТП). Реактивная мощность, потребляемая ПП $Q_{ПП} \approx I_d \sqrt{U_{d0}^2 - U_d^2}$, где U_{d0} — максимальное выпрямленное напряжение соответствующее углу управления $\alpha = 0$; U_d, I_d — текущие значения выпрямленного напряжения и тока [4].

Если во всем диапазоне регулирования ПП выпрямленный ток равен номинальному ($I_d = I_{dH}$), то $Q_{ПП}$ принимает максимальное значение при минимальном значении $U_d = U_{dmin}$, соответствующем максимальному углу управления α_{max} : $Q_{ППmax} \approx I_{dH} \sqrt{U_{d0}^2 - U_{dmin}^2}$ [4].

В этом случае необходимые реактивные мощности РФ и РК определяются из соотношения $Q_{PФmax} = Q_{РКmax} = Q_{ППmax}$ [4].

На основе вышеизложенного строим СУ — П-регулятор, который реализует вычисление текущей скважности ШИР в соответствии с выражением:

$$\gamma = \sqrt{\frac{Q_{PФ} - Q_{ПП} X_{РК}}{3U_{\phi}^2}}. \quad (1)$$

Дополнительно вводится отрицательная обратная связь по отклонению тока нагрузки ΔI_H^* с коэффициентом усиления равным 0,3.

На рис.3 представлена модель автономной ЭЭС, построенная в соответствии со схемой (рис.1) [4].

На рис. 3 обозначены: 1 — эквивалентный генератор; 2 — трансформатор; 3 — полупроводниковая нагрузка (тиристорный выпрямитель и система фазового управления); 4 — блок вычисления реактивной мощности и отклонения по току; 5 — блок вычисления скважности ШИР; 6 — УФКУ. На рис. 4 раскрыты блоки 4 и 5.

Такая система управления работает по принципу компенсации и содержит датчики выпрямленного тока I_d и угла управления α ПП. При наличии нескольких нагрузок структура, на рис. 3 усложняется за счет увеличения количества соответствующих датчиков и каналов управления. Отмеченного недостатка можно избежать, если использовать в структуре СУ датчики напряжения и тока лишь генератора совместно с программным цифровым устройством определения РП. Нескомпенсована реактивная мощность в системе определяется выражением

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} i_{SA} u_{SBC} + i_{SB} u_{SAC} + i_{SC} u_{SAB}. \quad (2)$$

В состав устройства входят стандартный трехфазный блок вычисления РП согласно выражению (2) и фильтр нижних частот для выделения постоянной составляющей в сигнале Q (рис. 5). Такое усовершенствование структуры обеспечивает также большую точность компенсации РП за счет непосредственного вычисления последней.

На рис.6 представлены временные диаграммы напряжений и токов генератора в установившемся режиме при неизменном токе нагрузки $I_d = 1400$ А и угле управления ПП $\alpha = 30^\circ$ при использовании СУ выполненной за схемой на рис. 3 (а) и усовершенствованной СУ УФКУ на рис. 5 (б). Стоит отметить, что второй вариант обеспечивает более высокие значения коэффициентов несинусоидальности тока и напряжения (не более чем на 10%) а время переходного процесса увеличивается до 2 раз (с $t_1 = 0,06$ до $t_2 \approx 0,12$ с). Это обусловлено выбором следующих критериев переходных процессов при оптимизации: время переходного процесса $\leq 0,15$ с; перерегулирование — максимальное допустимое относительное значение РП (как часть от полной номинальной мощности) 20%; относительный провал (всплеск) напряжения генератора $\delta U = \pm 20\%$; заданная допустимая погрешность (трубка) — 5%.

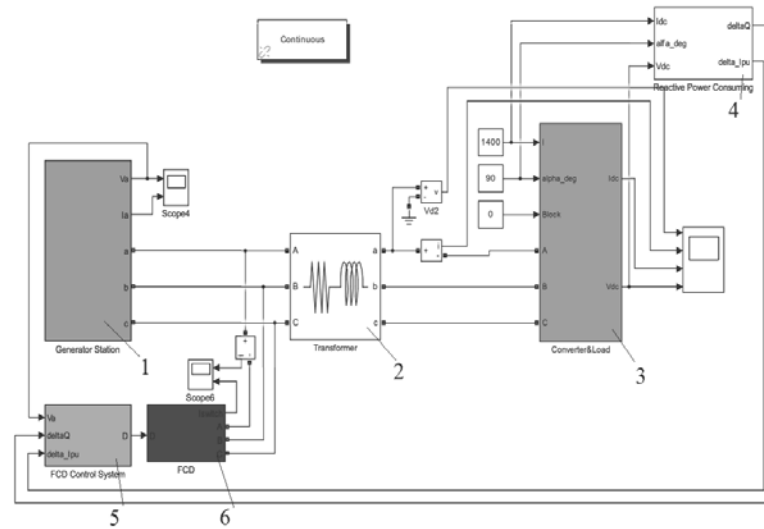


Рис. 3. Модель автономной ЭЭС с ПП и УФКУ

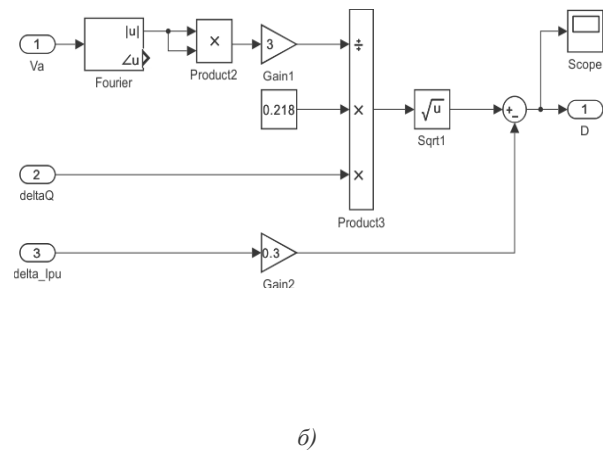
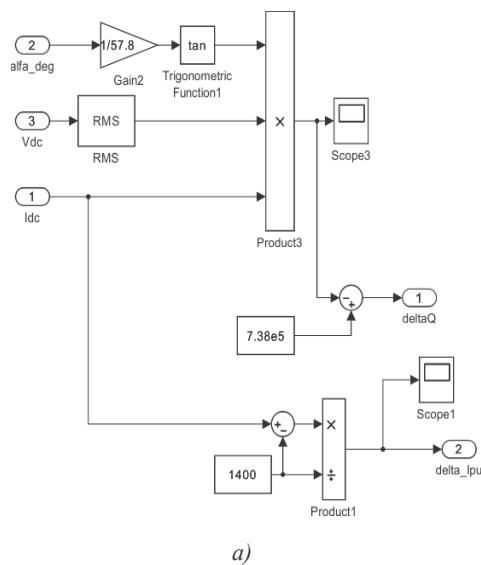


Рис. 4. Модель блока вычисления реактивной мощности и отклонения по току (а) и блока вычисления скажности (б)

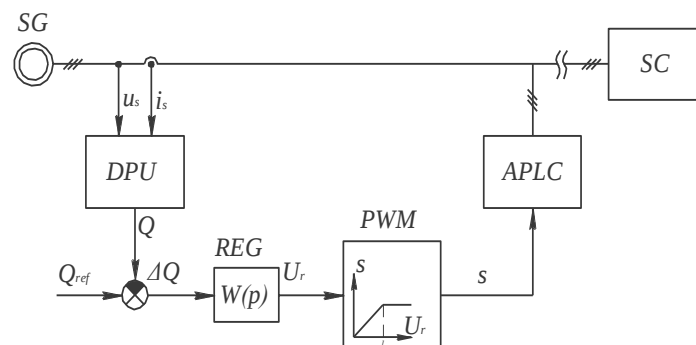
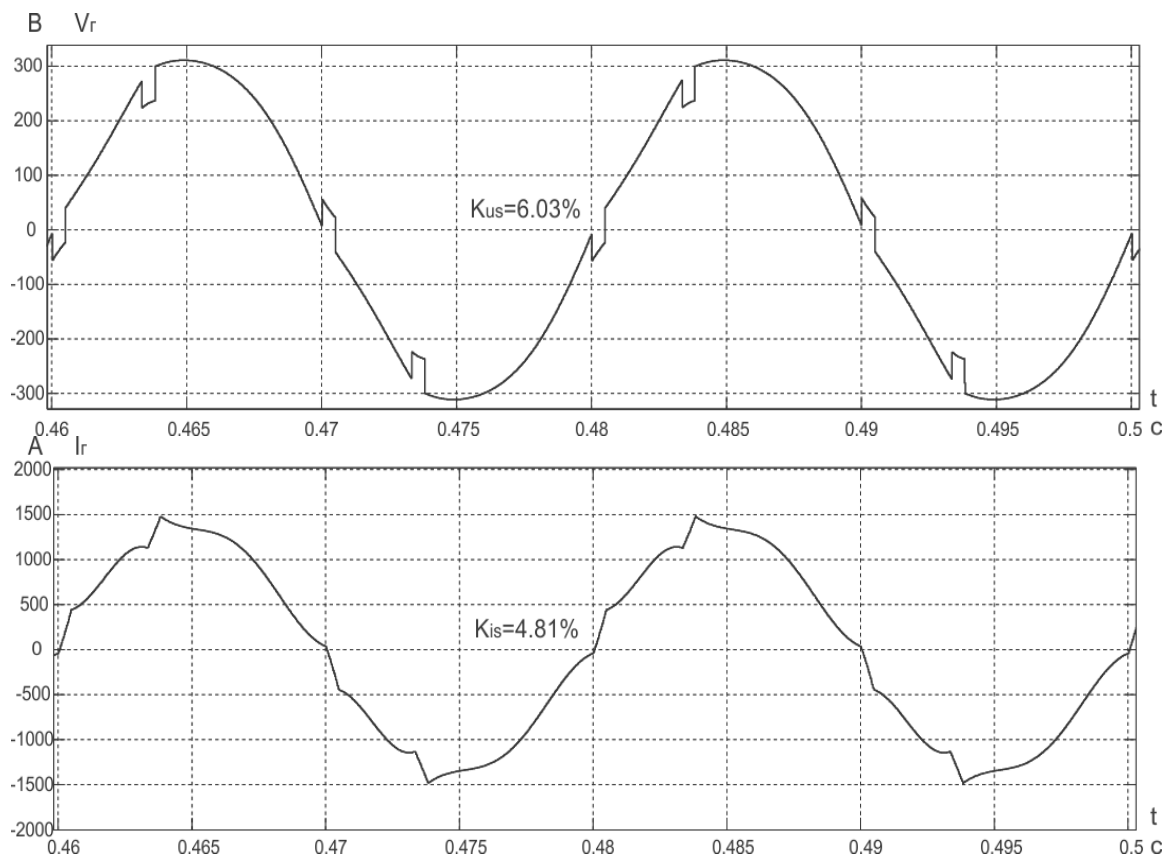
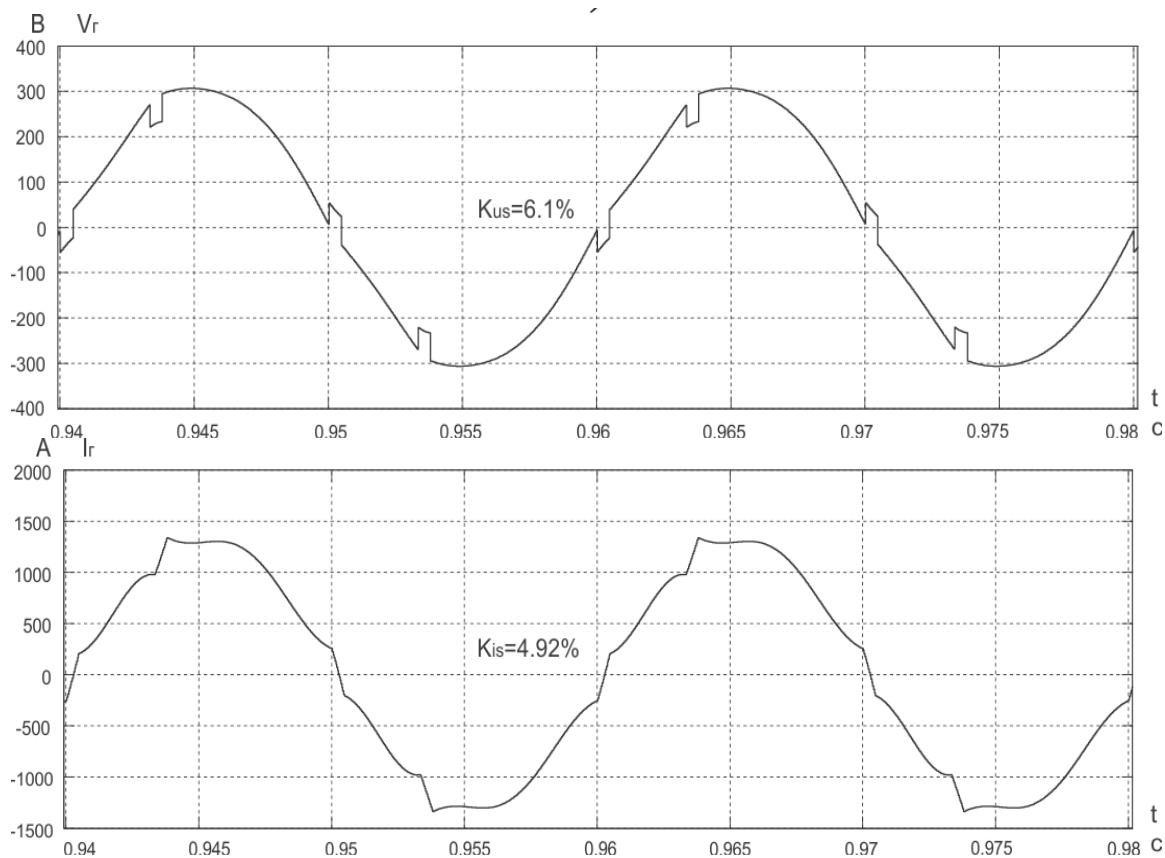


Рис. 5. Структурно-функциональная схема СУ УФКУ в автономной ЭЭС с ПП



a)



б)

Рис. 6. Напряжение и ток генератора в установившемся режиме при использовании СУ компенсационного типа (а) и усовершенствованной СУ (б)

Применение СУ в сравнении с [1] позволило полностью скомпенсировать реактивную мощность ($\cos\varphi_{(1)} = 1$), вместе с этим коэффициенты несинусоидальности напряжения и тока генератора выросли на 1%, с 4,98% до 6,1% и с 3,86 до 4,92 соответственно.

ВЫВОДЫ. 1. Разработаны структура и принцип управления быстродействующим реакторным компенсатором в составе УФКУ, позволяющие автоматически компенсировать реактивную мощность.

2. Реализация СУ УФКП возможна при применении датчиков выпрямленного тока I_d и угла управ-

ления α ПП (рис. 3), однако, такая структура значительно усложняется при увеличении числа нагрузок. Этого недостатка возможно избежать, используя схему, в которой используются лишь датчики линейных напряжений и токов генератора с непосредственным вычислением реактивной мощности системы соответствующим трехфазным блоком (рис. 4).

3. Эффективность применения СУ в УФКУ подтверждается модельным экспериментом в котором время переходного процесса не превышает $t_2 \approx 0,12$ с, коэффициент мощности $\cos\varphi_{(1)} = 1$, коэффициент несинусоидальности напряжения $K_{is} = 6,1\% < 10\%$.

Список литературы

- [1] Жук А.К., Жук Д.А., Криворучко Д.В. Моделирование электроэнергетической системы с тиристорным преобразователем и фильтрокомпенсирующим устройством // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» – 2014, С. 76–82
- [2] O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.
doi: 10.1109/IEPS.2016.7521866
- [3] Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство для автономной электроэнергетической системы с мощными преобразователями / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко, С. А. Степенко. // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 32–34.
- [4] Фильтрокомпенсирующее устройство с широтно-импульсным регулированием реакторного компенсатора / А. К. Жук, Д. А. Жук, Д. В. Криворучко. // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 59–66.

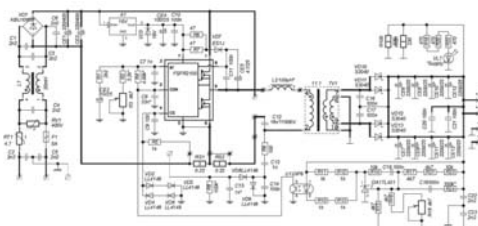
© О. К. Жук, І. Ю. Жук, Д. О. Жук та інші
Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов

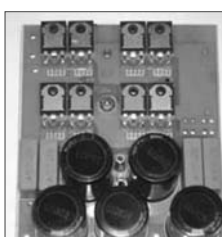


Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОБЛЕМ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



Научно-исследовательский институт современных проблем автоматики и электротехники работает над:

- Разработкой преобразователей постоянного напряжения на основе резонансных инверторов для судовых систем автоматики и специальных систем;
- Повышением качества электроэнергии в автономных электростанциях с газодизель-генераторными установками

просп. Героев Украины, 9, каб. 458
тел.: +38 (0512) 70-94-44

♦ г. Николаев, Украина, 54025
♦ e-mail: sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua

Подробная информация: nuos.edu.ua/science/