

УДК 621.313

А. К. Жук, канд. техн. наук,
В. Н. Запальский, К. Н. Запальский

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. Представлена усовершенствованная схема регулируемого фильтрокомпенсирующего устройства в составе судовой электроэнергетической системы с полупроводниковыми преобразователями. Получены основные выражения, описывающие математическую модель звена фильтра. Это позволит в дальнейшем компенсировать на стороне переменного тока возникающую паразитную низкочастотную девиацию частоты.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, несинусоидальность напряжения, качество электроэнергетики, силовой пассивный фильтр

A. Zhook, PhD.,
V. Zapal'skiy, K. Zapal'skiy

IMPROVEMENT CONTROLLABLE POWER FILTER

Abstract. The article exposes improvement scheme – technical solution of controllable power filter in structure power electroenergy system of ship with semiconductor rectifier. Basic expressions describing the mathematical model of area of circuit power filter are got. Will allow in future compensating nascent parasite low-frequency deviation on the side of AC.

Keywords: power electroenergy system of ship, power quality, nonsinusoidal of voltage, passive power filter

О. К. Жук, канд. техн. наук,
В. М. Запальський, К. М. Запальський

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Анотація. Представлено вдосконалену схему регульованого фільтрокомпенсуючого пристрою у складі судової електроенергетичної системи з напівпровідниковими перетворювачами. Отримані основні вирази, які описують математичну модель фільтру. Це дозволить у подальшому компенсувати на стороні змінного струму виникаючу паразитну девіацію частоти.

Ключові слова: судова електроенергетична система, несинусоїдальність напруги, якість електроенергії, силовий пасивний фільтр

Введение. Снижение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с полупроводниковыми преобразователями обусловлено двумя факторами: наличием высших гармоник в составе тока, потребляемого нелинейной нагрузкой, и фазовым сдвигом основной гармоники этого тока относительно напряжения сети. В качестве основного средства обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) СЭЭС и полупроводниковых преобразователей (ПП) широкое распространение получили несколько типов устройств. Первые, сравнительно простые фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) на базе пассивных индуктивно – емкостных фильтров, которые обеспечивают как улучшение формы сетевого тока и напряжения, так и компенсацию реактивной мощности. Вторые, регулируемые ФКУ – обеспечивают дополнительные преимущества: снижение потерь активной мощности и снижение колебаний напряжения сети [1, 2, 3]. Однако неоднократно наблюдалось, что при резких изменениях режимов работы электрооборудования в сложных морских условиях на стороне переменного тока может возникать паразитная низкочастотная девиация частоты. И как следствие, улучшения качества потребляемой энергии нельзя добиться изменением не только

структуры управления и алгоритма работы, но заменой силовых элементов ФКУ [4, 5]. Следовательно, вопрос обеспечения качества электроэнергии для СЭЭС, исходя из современных требований к электрооборудованию и автоматизации судов, необходимо рассматривать как комплекс мероприятий.

Постановка задачи. На базе проведенного анализа схемотехнических решений устройств повышения качества электроэнергии предложить усовершенствованное регулируемое ФКУ и получить основные выражения, описывающие математическую модель устройства.

Материалы исследования. Обобщенная однолинейная схема автономной ЭЭС с ПП и управляемым ФКУ представлена на рис. 1. [1]

На схеме генератор (питающая сеть) представлен синусоидальной ЭДС e_s с амплитудой E_m и сопротивлением короткого замыкания X_s , трансформатор или входной реактор ПП – сопротивлением X_{Γ} .

В состав ФКУ входит нерегулируемый LC фильтр (РФ) и управляемый реакторный компенсатор (РК). Каждая фаза резонансного фильтра 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

© Жук А.К., Запальский В.Н., Запальский К.Н., 2014

$\xi = \omega_0 / \omega = \sqrt{X_{CO} / X_{P0}} \leq m - 1$, где ω_0 – резонансная частота фильтра, ω – частота сети, m – пульсность ПП.

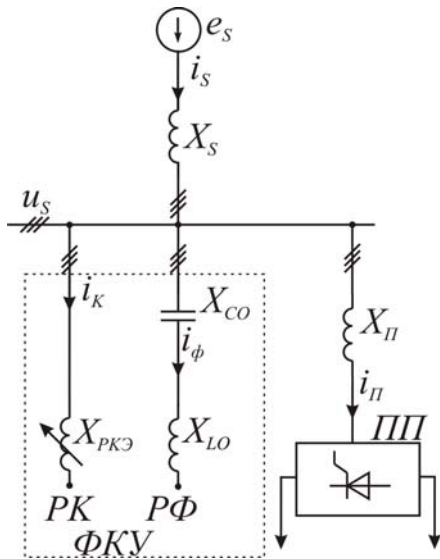


Рис. 1. Обобщенная однолинейная схема автономной ЭЭС с ПП и управляемым ФКУ

Большими преимуществами, по сравнению со схемой рис. 1 [1, 6], обладает реакторный компенсатор (РК), схема которого представлена на рис. 2. Основу схемы составляют три индуктивных элемента L_K и шесть полупроводниковых ключей переменного тока (VD_1 - VD_6). Ключевые элементы реализованы на базе мостовой диодно-транзисторной схемы. В диагональ моста вместо IGBT транзисторов VT_1, VT_2 могут быть включены двуоперационные тиристоры (GTO, IGCT). В каждой фазе предлагаемой схемы РК имеются два ключа: один из них соединен последовательно, а другой параллельно с L_K .

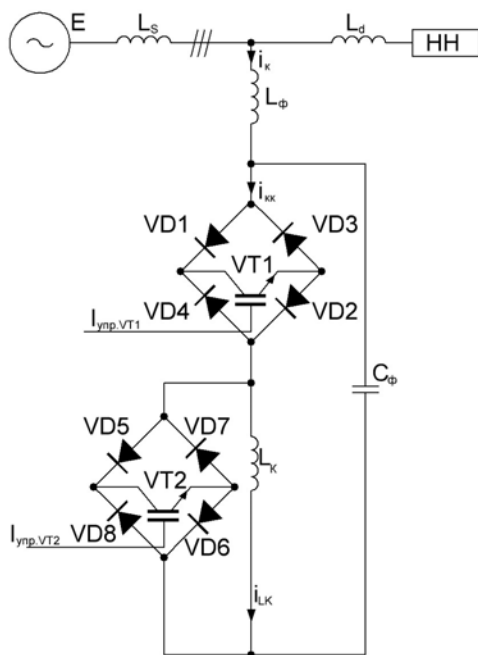


Рис. 2. Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство

В управлении схемой использован принцип широко – импульсного регулирования (ШИР) эквивалентной индуктивности РК, когда угловая частота коммутации элементов ω_K во много раз больше частоты сети ω ($\omega_K \gg \omega$). Величина $f_K = \omega_K / 2\pi$ для современных силовых полупроводниковых ключей достигает 10...20 кГц.

Преимуществом схемы является обеспечение ЭМС СЭС с ПП исходя из двух условий: компенсации реактивной мощности и необходимого снижения несинусоидальности напряжения и тока в сети. Благодаря повышенному быстродействию предложенная схема обеспечивает повышенную точность компенсации реактивной мощности в динамических режимах, что позволяет снизить колебания напряжения и потери активной мощности в сети [6].

Однако при резких изменениях режимов работы электрооборудования в сложных морских условиях на стороне переменного тока может возникнуть паразитная низкочастотная девиация частоты [7, 8]. Для устранения этого недостатка предлагается обеспечить не только регулирование тока протекающего в реакторе L_ϕ , но и осуществление контроля заряда емкости C_ϕ , введением в звено фильтра $L_\phi C_\phi$ регулируемого моста, реализованного на базе транзисторов IGBT типа. Усовершенствованная схема ФКУ приведена на рис. 3.

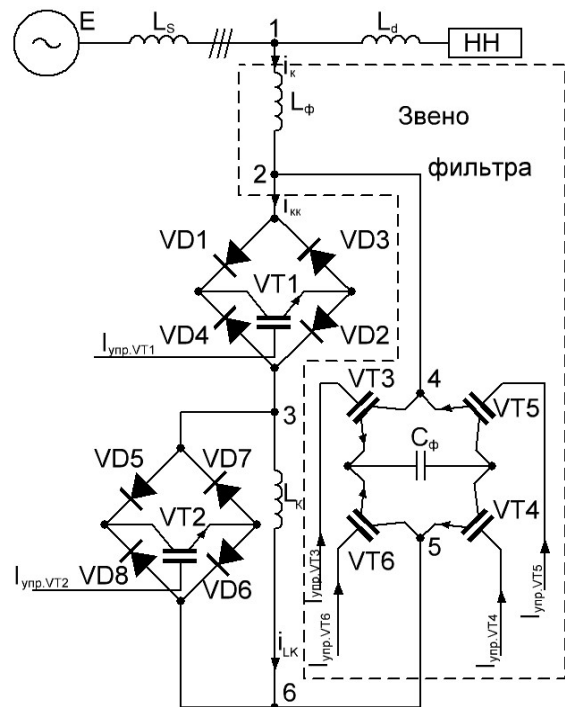


Рис. 3. Усовершенствованная схема фильтрокомпенсирующего устройства

Рассмотрим отдельно звено $L_\phi C_\phi$ фильтра, где в диагональ управляемых ключей, реализованных на базе транзисторов IGBT, включена емкость C_ϕ . На основании предложенной методикой [9] и закона Кирхгофа составим уравнение, определяющее напряжения звена фильтра:

$$U_{3B} = L_\phi \frac{di_{3B}}{dt} + R_{3B}i_{3B} + \frac{1}{C_\phi} \int i_{3B} dt, \quad (1)$$

где L_ϕ – значение индуктивности дросселя звена; R_{3B} – активное сопротивление звена; C_ϕ – значение емкости звена.

Для $k = 1, 2, 3 \dots$ проведем дифференцирование уравнения (1):

$$\frac{dU_{3B}}{dt} = L_\phi \frac{d^2 i_{3B}}{dt^2} + R_{3B} \frac{di_{3B}}{dt} + \frac{i_{3B}}{C_\phi}. \quad (2)$$

Составим математическую модель звена в матричной форме, для $k = 1, 2, 3$

$$C_\phi^k = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \Theta & \cos(\Theta - 2\pi/3) & \cos(\Theta - 4\pi/3) \\ -\sin \Theta & -\sin(\Theta - 2\pi/3) & -\sin(\Theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Уравнение (2) примет вид

$$\frac{d^2}{dt^2} [i_{3B}] = -R_{3B} \frac{d(i_{3B})}{dt} - \frac{1}{C_\phi} (i_{3B}) + \frac{dU_s}{dt}. \quad (4)$$

Далее выполним преобразование выражения в матричную форму

$$C_\phi^k = \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin(\Theta - \pi/6) & \cos(\Theta - \pi/6) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Подставляем преобразованное уравнение в выражение (4)

$$\frac{d^2}{dt^2} [C_\phi^k [i_{dq}]] = -\frac{R_{3B}}{L_\phi} \frac{d}{dt} [C_\phi^k [i_{dq}]] \quad (6)$$

$$- \frac{1}{L_\phi} [C_\phi^k [i_{dq}]] - \frac{1}{L_\phi} \frac{d}{dt} [C_\phi^k [v_{dq}]]$$

$$\frac{d}{dt} [C_\phi^k [i_{dq}]] = C_\phi^{dq} \frac{d}{dt} [i_{dq}] + \quad (7)$$

$$+ \left(\frac{d}{dt} C_k^{dq} \right) [i_{dq}]$$

$$\frac{d^2}{dt^2} [C_k^{dq} [i_{dq}]] = C_k^{dq} \frac{d^2}{dt^2} [i_{dq}] + \quad (8)$$

$$+ \left(\frac{d}{dt} C_k^{dq} \right) \frac{d}{dt} [i_{dq}] +$$

$$+ \left(\frac{d}{dt} C_k^{dq} \right) \frac{d}{dt} [i_{dq}] + \left(\frac{d^2}{dt^2} C_k^{dq} \right) [i_{dq}]$$

$$\frac{d}{dt} [C_k^{dq} [U_{dq}]] = C_k^{dq} \cdot \frac{d}{dt} [U_{dq}] + \quad (9)$$

$$+ \left(\frac{d}{dt} \cdot C_k^{dq} \cdot [U_{dq}] \right)$$

Общее уравнение для выполненного преобразования в уравнениях (6) – (9) примет вид:

$$\frac{d^2}{dt^2} [i_{dq}] = - \begin{bmatrix} \frac{R_{3B}}{L_\phi} & -2\omega \\ 2\omega & \frac{R_{3B}}{L_\phi} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} [i_{dq}] - \begin{bmatrix} -\omega^2 + \frac{1}{C_\phi L_\phi} & -\omega \frac{R_{3B}}{L_\phi} \\ \omega \frac{R_{3B}}{L_\phi} & -\omega^2 + \frac{1}{C_\phi L_\phi} \end{bmatrix} \cdot [i_{dq}] + \frac{1}{L_\phi} \cdot \frac{d}{dt} [U_{dq}] + \frac{1}{L_\phi} \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot [U_{dq}]. \quad (10)$$

Окончательное значение математической модели для каждого значения координаты

$$L_\phi \cdot \frac{d^2 i_d}{dt^2} = -R_{3B} \frac{di_d}{dt} + 2\omega L_\phi \frac{di_q}{dt} - \quad (11)$$

$$- \left(-\omega^2 L_\phi + \frac{1}{C_\phi} \right) i_d + \omega R_{3B} i_q + \frac{dU_d}{dt} - \omega U_q$$

$$L_\phi \cdot \frac{d^2 i_q}{dt^2} = -R_\phi \frac{di_q}{dt} + 2\omega L_\phi \frac{di_d}{dt} - \quad (12)$$

$$- \left(-\omega^2 L_\phi + \frac{1}{C_\phi} \right) i_q + \omega R_{3B} i_d + \frac{dU_q}{dt} - \omega U_d$$

В конечном виде уравнения (11), (12) должны в соответствии с принятой за основу методикой [9], иметь вид

$$L_\phi \cdot \frac{d^2 i_d}{dt^2} + R_{3B} \frac{di_d}{dt} + \left(-\omega^2 L_{3B} + \frac{1}{C_{3B}} \right) i_d = \quad (13)$$

$$= 2\omega L_{3B} \frac{di_q}{dt} + \omega R_{3B} i_q + \frac{dU_d}{dt} - \omega U_q$$

$$L_\phi \cdot \frac{d^2 i_q}{dt^2} + R_{3B} \frac{di_q}{dt} + \left(-\omega^2 L_{3B} + \frac{1}{C_{3B}} \right) i_q = \quad (14)$$

$$= -2\omega L_\phi \frac{di_d}{dt} + \omega R_{3B} i_d + \frac{dU_q}{dt} - \omega U_d$$

Конечная форма выражений для двухкоординатной системы определяющих значения емкости звена C_ϕ , выделенной из уравнений (13), (14), примет вид

$$C_\phi = \frac{2i_d}{R_{3B} \frac{di_d}{dt} + 2\omega L_\phi \frac{di_q}{dt} + \omega R_{3B} i_q + \frac{dU_d}{dt} - \omega U_q - L_\phi \cdot \frac{d^2 i_d}{dt^2} - \omega^2 L_\phi}$$

$$C_\phi = \frac{2i_d}{R_{3B} \frac{di_q}{dt} + 2\omega L_\phi \frac{di_d}{dt} + \omega R_{3B} i_d + \frac{dU_q}{dt} - \omega U_d - L_\phi \cdot \frac{d^2 i_q}{dt^2} - \omega^2 L_\phi}$$

Выводы. Предложено усовершенствованное ФКУ с возможностью осуществления контроля заряда емкости C_ϕ путем введения в звено фильтра $L_\phi C_\phi$ регулируемого моста. Это позволяет обеспечить ЭМС в автономных ЭЭС с ПП компенсацию реактивной мощности и необходимого снижения не синусоидальности напряжения и тока в сети. Кроме этого, при резких изменениях режимов работы электрооборудования в сложных морских условиях на

стороне переменного тока снижает паразитные низкочастотные составляющие девиации частоты.

Дальнейшее улучшение статической и динамической характеристики управляемого ФКУ может быть достигнуто путем совершенствования законов управления в сочетании с повышением точности устройств мониторинга параметров качества электроэнергии СЭС.

Список использованной литературы

1. Жук А. К. Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство / А. К. Жук, Д. А. Жук, В. Н. Запальский. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», науково-технічний журнал «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів : – 2009. – ЕКОінформ. – С. 309 – 312.
2. Жук А.К. Несинусоидальность напряжения в ЭЭС морских сооружений с полупроводниковыми преобразователями. / А. К. Жук, В. Н. Запальский, С. Л. Трибулькевич // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 5. – С. 49 – 54.
3. Запальский В. Н. Анализ эффективности системы управления фильтрокомпенсирующего устройства в составе автономной электроэнергетической системы / В. Н. Запальский, К. Н. Запальский // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ. – 2010. – Вип. 4/2010 (63). – Ч. 2. – С. 11 – 14.
4. Жук А. К. Синтез системы управления фильтрокомпенсирующим устройством на базе регулятора нечеткой логики в составе автономной электроэнергетической системы. Часть 1 / А. К. Жук, В. Н. Запальский, К. Н. Запальский. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 537 – 540.
5. Жук А. К. Синтез системы управления фильтрокомпенсирующим устройством на базе регулятора нечеткой логики в составе автономной электроэнергетической системы. Часть 2 / А. К. Жук, В. Н. Запальский, К. Н. Запальский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36 (1009). – С. 497 – 500.
6. Патент України на корисну модель № 57063 «Керований фільтрокомпенсуючий пристрій» / О. К. Жук, Д. О. Жук, В. М. Запальський. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.02.2010 р. Бюл. № 3.
7. Запальский В. Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта / В. Н. Запальский, К. Н. Запальский // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ. – 2009. – Вип. 3/2009 (56). – Ч. 2. – С. 187 – 190.
8. Патент на полезную модель РФ № 104793 «Высоковольтный статический компенсатор напряжения» /

Ю. К. Розанов, Н. И. Корунов, Н. В. Матвеев и др. Опубликовано: 20.05.2011.

9. Power Quality Improvement using Passive shunt Filter, TCR and TSC Combination. A thesis Submitted in partial Fulfillment of the Requirements for the award of Degree. (2012), *Manjulata Badi, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, India*, 59 p.

Получено 10.07.2014

References

1. Zhook A.K., Zhook D.A., and Zapal'skiy V.N. Upravlyaemoe filtrokompensiruyushhee ustrojstvo [Controllable Power Filter], (2009), *Tematichnij Vipusk "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika Naukovo-texnichnogo Zhurnalu" "Elektroinform"*, Lviv, Ukraine, *EKOinform*, pp. 309 – 312 (In Russian).
2. Zhook A.K., Zapal'skiy V.N., and Tribulkevich S.L. Nesinusoidalnost napryazheniya v EES morskix sooruzhenij s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami. [Nonsinusoidal of Voltage in Power Electroenergy of ships with Semiconductors Rectifiers], (2006), *Texn. Elektrodinamika. Temat. Vip. "Silova Elektronika ta Energoefektivnist"*, Ch. 5, pp. 49 – 54 (In Russian).
3. Zapal'skiy V.N., and Zapal'skiy K.N. Analiz effektivnosti sistemy upravleniya filtrokompensiruyushhego ustrojstva v sostave avtonomnoj elektroenergeticheskoy sistemy [Analyses Effectiveness System of Control Power Filter in Structure of Autonomous Power Energy System], (2010), *Visnik KDPU imeni Mixajla Ostrogradskogo, Kremenchuk, Ukraine, KDU, Vip. 4/2010 (63), Vol. 2, pp. 11 – 14 (In Russian).*
4. Zhook A.K., Zapal'skiy V.N., and Zapal'skiy K.N. Sintez sistemy upravleniya filtrokompensiruyushhim ustrojstvom na baze regulyatora nechetkoj logiki v sostave avtonomnoj elektroenergeticheskoy sistemy, chast 1 [Synthesis System of Control Power Filter with fuzzy-logic Regulator in Autonomous Power Electroenergy System, Part 1], (2012), *Elektromexanichni and Energozberigayuchi Systemic. Tematichnij Vipusk "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika"*, *Naukovo-virobnichogo Zhurnalu, Kremenchuk, Ukraine, KrNU, Vip. 3/2012 (19), pp. 537 – 540 (In Russian).*
5. Zhook A.K., Zapal'skiy V.N., and Zapal'skiy K.N. Sintez sistemy upravleniya filtrokompensiruyushhim ustrojstvom na baze regulyatora nechetkoj logiki v sostave avtonomnoj elektroenergeticheskoy sistemy, chast 2 [Synthesis System of Control Power Filter with fuzzy-logic Regulator in Autonomous Power Electroenergy System, Part 2], (2013), *Visnik Nacionalnogo Texnichnogo Universitetu "HPI". Zbirnik Naukovih Prac. Seriya: Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivodu. Teoriya i Praktika, Kharkiv, Ukraine, NTU "HPI", No. 36 (1009), pp. 497 – 500 (In Russian).*
6. Patent Ukraini na korisnu model No. 57063 "Kerovaniy filtrokompensuyuchiy pristrij" [Controllable Power Filter], (2010), Zhook O.K., Zhook D.O., and Zapal'skiy V.M., zareestrovano v Derzhavnomu Reestri

Patentiv Ukraïni na korisni modeli 10.02.2010 r., Byul. No. 3 (In Russian).

7. Zapal'skiy V.N., and Zapal'skiy K.N. Vliyanie otkloneniya napryazheniya i chastoty na kachestvo elektrosnabzheniya morskogo podvizhnogo obekta. [Authority Deviation of Voltage and Frequency on Power Quality Supply of Marine Movable Object], (2009), *Visnik Kremenchuckogo Derzhavnogo Politexnichnogo Universitetu imeni Mixajla Ostrogradskogo*, Kremenchuk, Ukraine, *KDPU*, Vip. 3/2009 (56), pp. 187 – 190 (In Russian).

8. Patent na poleznuyu model RF No. 104793 “Vysokovoltnyj staticheskiy kompensator napryazheniya” [High-voltage Static Compensator]? (2011), Rozanov U.K., Korunov N.I., Matveev N.V. i dr. Opublikovano 20.05.2011 (In Russian).

9. Power Quality Improvement using Passive shunt Filter, TCR and TSC Combination. A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the award of Degree. (2012), *Manjulata Badi*, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, India, p.59.



Жук
Александр Кириллович,
канд. техн. наук, каф. теоретической электротехники и электронных систем Нац. ун-та кораблестроения имени адмирала Макарова. 54000, пр. Героев Сталинграда, 9, Украина, тел. (0512) 44-16-49.
E-mail: dinoland@mail.ru



Запальский
Владимир Николаевич,
преподаватель комиссии электротехнических дисциплин Государственного высшего учебного заведения «Николаевская политехника». 54000, ул. Никольская, 11, Украина, тел. (0512) 37-95-51.
E-mail: dinoland@mail.ru



Запальский
Константин Николаевич,
преподаватель комиссии электротехнических дисциплин Государственного высшего учебного заведения «Николаевская политехника». 54000, ул. Никольская, 11, Украина, тел. (0512) 37-95-51.
E-mail: dinoland@mail.ru