

УДК: 621.313

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. К. Жук

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
просп. Ленина, 3, г. Николаев, 54000, Украина

В. Н. Запальский, К. Н. Запальский

Государственное высшее учебное заведение «Николаевская политехника»
ул. Никольская, 11, г. Николаев, 54000, Украина. E-mail: dinoland@mail.ru

Рассмотрены вопросы использования регулятора нечеткой логики в составе системы управления регулируемого фильтрокомпенсирующего устройства. Составлена и проанализирована структурная схема реализации системы управления на базе регулятора нечеткой логики. Получены переходные процессы системы управления при реализации предложенного закона регулирования в сравнении с трехпозиционным регулятором и ПИД-регулятором.

Ключевые слова: регулятор нечеткой логики, фильтрокомпенсирующее устройство, несинусоидальность напряжения.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ НА БАЗІ РЕГУЛЯТОРА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ У СКЛАДІ АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

О. К. Жук

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
просп. Леніна, 3, м. Миколаїв, 54000, Україна

В. М. Запальський, К. М. Запальський

Державний вищий навчальний заклад «Миколаївська політехніка»
вул. Нікольська, 11, м. Миколаїв, 54000, Україна. E-mail: dinoland@mail.ru

Розглянуто питання щодо використання регулятора нечіткої логіки у складі системи керування фільтро-компенсуючого пристрою. Складана та проаналізована структурна схема реалізації системи керування на базі нечіткого регулятора. Отримані перехідні процеси системи керування при реалізації запропонованого закону регулювання у порівнянні з трипозиційним регулятором та ПІД-регулятором.

Ключові слова: регулятор нечіткої логіки, фільтрокомпенсуючий пристрій, несинусоїдальність напруги.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные автономные электроэнергетические системы (АЭЭС) морских подвижных объектов (МПО) характеризуются постоянным возрастанием нелинейных и быстро изменяемых нагрузок [1, 2]. В связи с этим при проектировании и эксплуатации АЭЭС становятся вопросы компенсации реактивной мощности и постоянного мониторинга влияния на судовую сеть фликкерных эффектов.

Наиболее распространенным способом их устранения является внедрение в состав АЭЭС управляемых фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Однако системы управления (СУ) ФКУ не всегда удовлетворяют условиям регулирования. Это связано, во-первых, с использованием ПИ-регуляторов в соответствии с рекомендациями [3, 4], что не всегда является целесообразным в автономных ЭЭС при постоянно возрастающей доле нелинейных и быстро изменяемых нагрузок. Во-вторых, полученные переходные процессы таких СУ свидетельствуют о значительном перерегулировании свыше допустимого 5 % предела и установившегося на протяжении длительного времени процесса, а, следовательно, об их неустойчивости. В-третьих, проведенный анализ полученных переходных процессов [5] показал, что выбранный закон управления не является оптимальным. Поэтому в качестве перспективы необходимо выбирать для ФКУ АЭЭС другие условия регулирования.

Целью данной работы является рассмотрение возможности использования в составе системы управления ФКУ элементов нечеткой логики.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Исходными данными для СУ ФКУ являются спектры напряжений на шинах главного распределительного щита (ГРЩ), а также токов в фидерах синхронных генераторов (СГ), нелинейной нагрузки (НН), ФКУ и реактивная составляющая основной гармоники тока [1]. В качестве примера рассмотрим типичную для морского сооружения структурную схему (рис. 1) соединения источника электрической энергии E_s , НН в виде полупроводникового преобразователя (ПП) и двигателя M , а также сопротивления линии X_S и сопротивления ПП X_{II} [2].

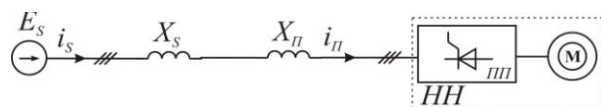


Рисунок 1 – Структурная схема соединения источник – нелинейная нагрузка

Как было отмечено ранее [4, 5], использование в составе СУ ФКУ ПИ- или ПИД-регулятора позволяет достаточно просто настраивать их для работы с конкретным объектом. Однако при резких изменениях или переходе на другие режимы работы АЭЭС МПО ухудшается характер переходных процессов

системы. В результате возникает необходимость в использовании дополнительных устройств, которые выполняли бы коррекцию работы регуляторов. В качестве альтернативного решения в составе СУ могут использоваться технологии нечеткой логики (НЛ).

На рис. 2 приведена структурная схема регулятора НЛ.



Рисунок 2 – Структурная схема нечеткого регулятора

Нечеткий регулятор (НР) включает три основных блока: фазификации, формирования логического решения и дефазификации.

В блок фазификации поступают входные лингвистические изменения $x_i, i=1,2,\dots, n$, такие, как ошибка системы ε , скорость изменения ошибки ε' , ускорение ошибки ε'' , которые описываются как универсальные множители u зависимости функции $\mu(u)$. Текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические.

В блоке формирования логического решения, реализованного в виде матрицы знаний (базы правил), фиксируются лингвистические правила в виде ЕСЛИ (выходное значение) или ТО (ответная реакция). Соответствующим формулированием правил функционирования системы достигается желаемый результат, при котором для любой управляющей лингвистической величины как минимум одно из правил будет принято.

В блоке дефазификации результирующая функция, оказывающая влияние на объект управления, преобразуется в числовую величину, как правило, методом определения «центра масс» площади результирующей фигуры, которая находится под графиком результирующей функции принадлежности.

Общее правило расчета абсциссы центра масс определяется как $s_c=S(u_c, \mu_c)$, и это выражение справедливо для участка площади, которую охватывает результирующая функция $\mu(u)$ в пределах изменения переменной u от u_1 до u_2 , и определяется выражением:

$$u_c = \frac{\int_{u_1}^{u_2} u \mu(u) du}{\int_{u_1}^{u_2} \mu(u) du} \quad (1)$$

При переходе к численному интегрированию методом трапеции с шагом дискретизации u_0 , получаем:

$$u_c = \frac{\frac{u_0 \mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} u_i \mu_i + \frac{u_2 \mu_M}{2}}{\frac{\mu_0}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} \mu_i + \frac{\mu_M}{2}} \quad (2)$$

где $\frac{u_2 - u_1}{M} = u_0$ – шаг дискретизации, M – число

дискрет на интервале $u_2 - u_1, i=1,2,3,\dots, M-1$. При реализации регулятора с использованием НЛ на микропроцессоре удобно выбирать трапециевидные и треугольные формы терминов. Результирующая функция принадлежности в таком случае будет кусочно-линейной, и тогда центр масс определяется выражением:

$$u_c = \frac{\sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k) b_k + (2a_k - a_{k+1}) b_k]}{3 \sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) (b_{k+1} + b_k)} \quad (3)$$

где N – количество вершин; a_k, b_k – координаты вершин результирующей фигуры.

Полученное значение u_c потом преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления путем обратного отображения величины u_c с единого универсального множества в диапазоне изменений $[m_{\min}, m_{\max}]$ лингвистической переменной управляющего сигнала на объект m .

В данном исследовании используется НР типа Мамдани, структура которого реализована в программном продукте Matlab. Кроме этого, пакет Fuzzy Logic Toolbox в Matlab обладает простым интерфейсом, что позволяет легко проектировать и диагностировать модели на основе НР.

Для проведения анализа работы СУ на основе регуляторов нечеткой логики составим линеаризованную модель энергосистемы с НН и сопротивлением сети X_S, L_S (рис. 3) [2]. НН в виде полупроводникового преобразователя и электродвигателя M потребляют из сети сопротивлениями X_S, L_S напряжение, сформированное источником E_S . ПП является источником нелинейных искажений и реактивной мощности, для компенсации которой используется ФКУ. СУ ФКУ состоит из датчиков тока, включенных в фидеры НН, регулируемого ФКУ (РФКУ) и источника. Измеренные сигналы $i_{НН}, i_{уст}, i_{ФКУ}$ поступают в микропроцессорный блок СУ, в котором формируется сигнал управления $i_{упр}$, подаваемый на исполнительные элементы РФКУ, реализованные в виде транзисторных ключей VT_1 и VT_2 .

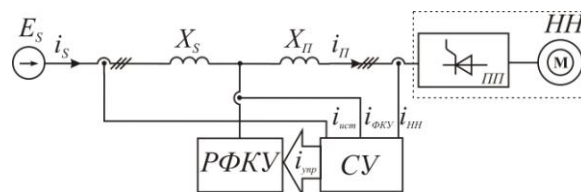


Рисунок 3 – Модель энергосистемы с учетом включения регулируемого ФКУ

Для каждой переменной СУ заданы лингвистические термины, соответствующие некоторым диапазонам четких значений. Чтобы определить неко-

торые граничные значения ошибки ε , рассмотрим вероятные значения опорного напряжения U_{SOP} и текущего значения напряжения $U_{STЕК}$. Значение опорного напряжения U_{SOP} задается, поэтому оптимальное значение можно задать через коэффициент опорного напряжения $k_{UOP} = 0,3..1$ [6, 7]. Соответственно текущее значение $U_{STЕК}$ принимает значение $k_{UTEK} = 0..1$. Однако нагрузка в АЭС может иметь как индуктивный, так и емкостный характер. Для устойчивой и правильной работы СУ ФКУ необходимо разделять значение характера нагрузки, поэтому примем значение напряжения при емкостном характере условно негативным, тогда $U_{STЕК}$ может принимать значения от -1 до $+1$. Исходя из того, что $\varepsilon = U_{SOP} - U_{STЕК}$, ошибка ε будет иметь границы $[-0,7..2]$. Для входной переменной «егго» (ε) используем шесть терминов для составления лингвистических правил: NH – отрицательное большое, NL – отрицательное малое, Z – близкое к нулю, PL – положительное малое, PM – положительное среднее, PH – положительное большое.

Для входной переменной «d егго» ($d\varepsilon$) определяем соответственно такие границы $[-0,2..0,2]$. Поскольку скорость изменения ошибки может возрастать или уменьшаться, тогда принимаем увеличение скорости как положительное значение, а уменьшение – негативное. Определяем термины для составления лингвистических правил: QD – быстро спадающее значение, SD – медленно спадающее значение, C – постоянное значение, SI – медленно возрастающее значение, QI – быстро возрастающее значение. На рис. 4 показано изображение функции независимой переменной «ошибки» и, соответственно «скорость изменения ошибки».

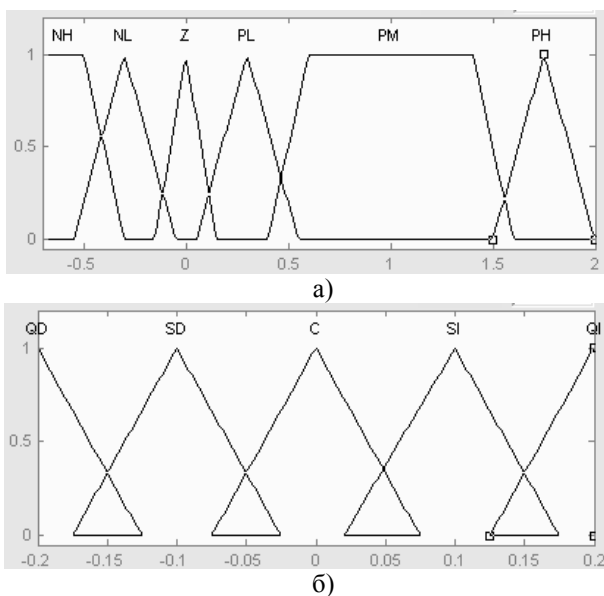


Рисунок 4 – Независимая функция входных переменных: а) – «егго»; б) – «d егго»

В качестве выходных лингвистических переменных принимаем частоту и скважность выходного сигнала управления ключами ФКУ. Лингвистическая переменная «частота» имеет свой частотный диапазон, ограниченный пятью границами в виде

терминов для составления лингвистических правил: Z – нулевое значение, L – нижнее значение, M1 – первое среднее значение, M2 – второе среднее значение, H – высокое значение частоты. Лингвистическая переменная «скважность» также ограничена четырьмя границами в виде терминов для составления лингвистических правил: Z – нулевое значение, L – низкое значение, M – среднее значение, H – высокое значение скважности. На рис. 5 представлен вид независимой функции переменных «частоты» и «скважности».

Аналитическое выражение, описывающее треугольную функцию, имеет вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (4)$$

где a, b, c – параметры независимой функции.

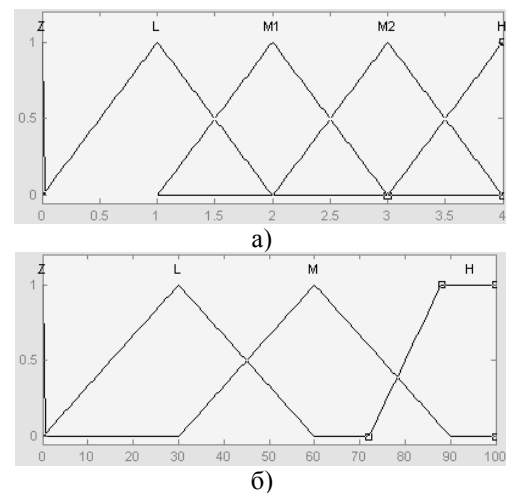


Рисунок 5 – Независимая функция выходных переменных: а) – «частота»; б) – «скважность»

В результате регулятор на базе НЛ будет иметь вид, приведенный на рис. 6.

На основании структурной схемы СУ (рис. 3) и с учетом структуры регулятора на базе НЛ (рис. 6) составим структурную схему анализа СУ ФКУ (рис. 7). Анализ структуры рис. 7 проводился в программном продукте *MatLab/Simulink* [6].

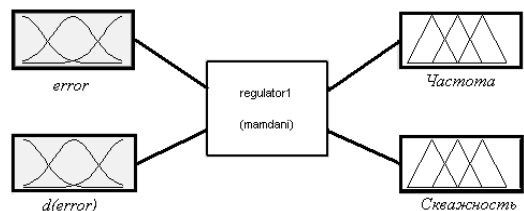


Рисунок 6 – Структура регулятора на базе нечеткой логики

Сигналы с датчиков $I_{ИСТ}$, $I_{ФКУ}$, $I_{НН}$ поступают на вход системы управления (рис. 7). Измеренные аналоговые сигналы преобразуются в цифровой код с помощью АЦП, а затем в блоке быстрого преобразования Фурье (БПФ) создается массив данных, ко-

торый поступает на элемент сравнения (СЭ) и записывается в нечеткую память (НП). НП разбивает массив данных в соответствии с лингвистическими терминами на нулевое (НЗ), среднее (СЗ) и высокое значение (ВЗ), образуя, тем самым, регуляторы нечеткой логики (РНЛ1, РНЛ2, РНЛ3). Записанные значения лингвистических терминов подаются в фазификатор (АФ) и разбиваются на соответствующие элементы фаззи-логики (ЭФЛ). Сформированные значения лингвистических терминов в виде сигналов управления поступают в дефазификатор

(ДФ) и, выполнив обратное преобразование, в аналоговый сигнал с помощью блока ЦАП подается на делитель, в результате чего на исполнительные элементы ФКУ подаются сигналы управления I_{UPR1} , I_{UPR2} .

Результаты модельного исследования в виде переходных процессов для разных типов регуляторов показаны на рис. 8, где приняты следующие обозначения: 1 – трехпозиционный регулятор, 2 – ПИД-регулятор, 3 – регулятор нечеткой логики.

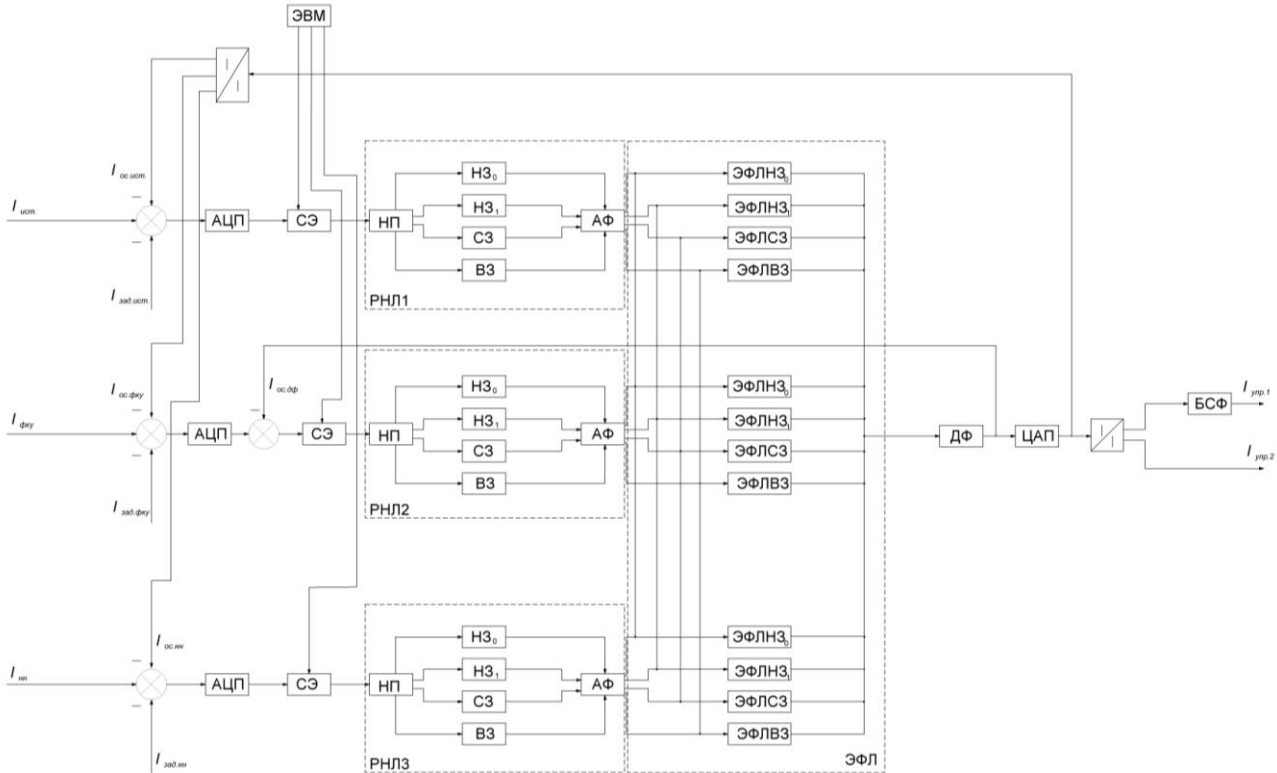


Рисунок 7 – Структура системы управления ФКУ на базе нечеткой логики

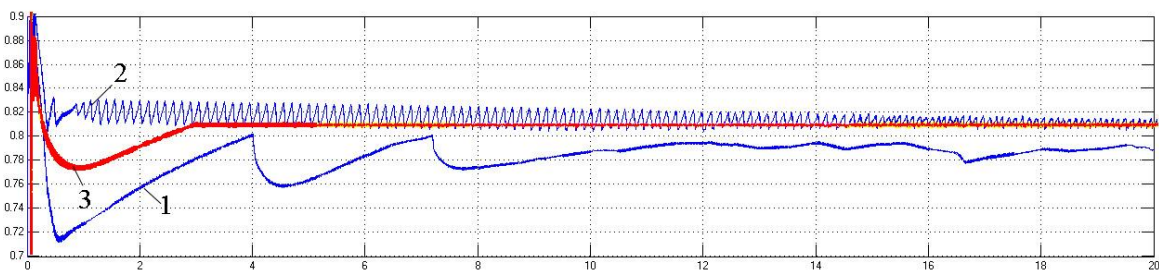


Рисунок 8 – Переходный процесс СУ при разных регуляторах

ВЫВОДЫ. Полученные переходные процессы СУ ФКУ с разными типами регуляторов дают основание сделать вывод, что, во-первых, использование трехпозиционного регулятора в соответствии с рекомендациями [5] не всегда является целесообразным в АЭС. Это связано с большим перерегулированием, колебательностью и длительностью переходного процесса из-за наличия постоянно возрастающей доли нелинейных и быстро изменяемых нагрузок. Во-вторых, наличие значительного перерегулирования, свыше допустимого 5 % предела, и

длительного времени установившегося процесса приводит к неустойчивости СУ. В-третьих, самыми эффективными регуляторами являются регуляторы на основе нечеткой логики и ПИД-регулятор с оптимальными значениями параметров, что обеспечивается наименее быстрым переходным процессом с наименьшими отклонениями по частоте. Проведенный анализ результатов исследования переходных процессов даст возможность в дальнейшем составить структуру СУ ФКУ с выбором оптимального закона управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жук А.К., Жук Д.А., Запальский В.Н. Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство // Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика" науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ" – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 309–312.
2. Жук А.К., Запальский В.Н., Трибулькевич С.Л. Несинусоидальность напряжения в ЭЭС морских сооружений с полупроводниковыми преобразователями // Техн. электродинамика. – 2007. – № 11. – С. 64–69.
3. Somsai K., Srikaew A. and other. "Optimal PI – controller design and simulation of SVC", Proceedings of the 7-th WSEAS International Conference on Power System, Beijing, China, 2007. – PP. 30–35.
4. Запальский В.Н., Запальский К.Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта //

Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 3/2009 (56), ч. 2. – С. 187–190.

5. Запальский В.Н., Запальский К.Н. Анализ эффективности системы управления фильтрокомпенсирующего устройства в составе автономной электроэнергетической системы // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), ч. 2. – С. 11–14.

6. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

7. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2003. – 512 с.

CONTROL SYSTEM POWER FILTER WITH REGULATOR OF INDISTINCT LOGIC IN ELECTROENERGY SYSTEM OF SHIP

A. Zhook

National of Shipbuilding University
prosp. Lenina, 3, Nikolaev, 54000, Ukraine

V. Zapal'skiy, K. Zapal'skiy

State Higher Education Institution "Nikolaev Polytechnics"
ul. Nikol'skaya, 11, Nikolaev, 54000, Ukraine. E-mail: dinoland@mail.ru

The questions of the use of regulator of indistinct logic in composition control system of the power filter. Made and analyses flow diagram of realization control system with regulator of indistinct logic. The transients of control system during realization of the offered law of adjusting are got.

Key words: non sinusoidal of power, regulator of indistinct logic, passive power filter, control system.

REFERENCES

1. Zhuk A.K., Zhuk D.A., Zapalsky V.N. Managed filter-unit // *Thematic Issue on "Problems of automated electric. Theory and Practice" scientific and technical journal «Elektroinform»*. – L'viv: Ekoinform, 2009. – PP. 309–312. [in Russian]
2. Zhuk A.K., Zapalsky V.N. Tribulkevich S.L. Wave form of voltage EPS of offshore structures with semiconductor converters // *Tech. Electrodynamics*. – 2007. – № 11. – PP. 64–69. [in Russian]
3. Somsai K., Srikaew A. and other. "Optimal PI-controller design and simulation of SVC", Proceedings of the 7-th WSEAS International Conference on Power System, Beijing, China, 2007. – PP. 30–35. [in English]
4. Zapalsky V., Zapalsky K. Influence of voltage and frequency deviations on the quality of sea power of a moving object // *Bulletin of the Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State Polytechnic University*. – Kremenchuk, 2009. – Iss. 3/2009 (56), Part 2. – PP. 187–190. [in Russian]

5. Zapalsky V., Zapalsky K. Analysis of the effectiveness of the filter-control devices as part of an autonomous power system // *Bulletin of the Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State Polytechnic University*. – Kremenchuk, 2009. – Iss. 4/2010 (63), Part 2. – PP. 11–14. [in Russian]

6. *Modern control systems* / R. Dorf, R. Bishop. Per. from English by B. Kopylov. – М.: Laboratory of Basic Knowledge, 2002. – 832 p. [in Russian]

7. Gostev V. *Synthesis of fuzzy control systems regulators*. – К.: Radioamator, 2003. – 512 p. [in Russian]

Стаття надійшла 16.01.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Сеньком В.І.