

УДК: 621.313

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОКОВ І НАПРЯЖЕНЬ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Запальский В.Н., магис.

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев  
54025 г. Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9  
E-mail: [dinoland@mail.ru](mailto:dinoland@mail.ru)

Наведені результати досліджень з оцінки спектрального складу струмів і напруг в автономній електроенергетичній системі. Запропоновані рекомендації щодо покращення форм кривих струму (напруги) в електричних мережах при живленні їх від напівпровідникових перетворювачів напруги.

**Ключові слова:** гармонічний аналіз, напівпровідникові перетворювачі.

Results of studies are brought in article on estimation of spectral composition current and voltages in autonomous electroenergetic system. Offered recommendations on improvement of forms current (voltages) in electric set when power supply them from semiconductor converters of voltage.

**Key words:** harmonic analysis, semiconductor converters.

**Введение.** Использование тиристорных преобразователей (ТП) в автономных электроэнергетических системах (АЭС) приводит к потреблению ими несинусоидального тока и напряжения. В результате основная гармоника тока содержит реактивную составляющую, что приводит к искажению формы напряжения питающей сети и снижению коэффициента мощности. Нагрузка, подключенная к ТП, как правило, нелинейна и генерирует в сеть высшие гармоники. Следствием этого является возникновение дополнительных потерь в источниках и приемниках электроэнергии, преждевременный выход из строя электрооборудования, ускоренное старение изоляции и т.д. [1]. Как правило, при выполнении сложных технологических операций на морских сооружениях (МС) (буровые суда, буровые платформы, дебаркадеры, плавкраны и т.д.) работают два и более ТП. Отсюда, было бы целесообразно усовершенствовать предложенные ранее методики спектрального анализа работы силовых полупроводниковых преобразователей (ПП) в АЭС МС [2-3], что позволит учитывать работу нескольких ТП в составе АЭС МС.

**Цель работы.** Рассмотреть вопросы спектрального анализа работы силовых ПП в составе АЭС МС при разных режимах работы с помощью программного пакета Matlab/Simulink. Такой анализ необходим для расчета энергетических характеристик ТП, исследований вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС) с источником питания и нагрузкой, проектирования силовых фильтров, диагностики неисправностей в ТП, а также определения коэффициента несинусоидальности кривой напряжения.

**Материал и результаты исследований.**

Однолинейная схема замещения АЭС МС [3], в состав которой входят несколько ТП с обобщенным Г-образным фильтром фазы А, приведена на рис. 1.

Элементы питающей сети (источника) представлены синусоидальной ЭДС основной частоты  $e_A = E_m \sin \omega t$  и сопротивлением к.з.  $X_S$ . Преобразователи показаны источниками периодического несинусоидального тока  $i_{ПА1}, i_{ПА2}, i_{ПАК}$ , совпадающие с током первичной обмотки трансформатора ТП, и сопротивлением к.з. данного трансформатора  $X_{П1}, X_{П2}, X_{ПК}$ . Продольное звено фильтра – реактор с сопротивлением  $X_P$ .

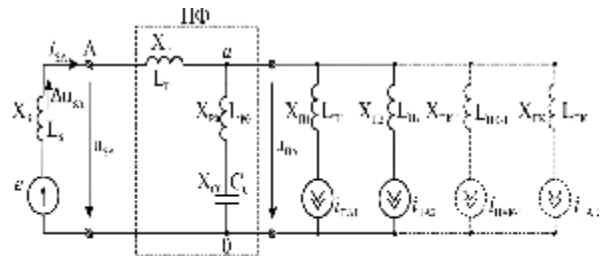


Рисунок 1 – Однолинейная схема замещения АЭС МС

Резонансный фильтр образуется при последовательном включении в поперечном звене реактора и конденсатора с сопротивлениями  $X_{P0}$  и  $X_{CO}$ . Резонансная ветвь, как правило, настраивается на частоту первой гармоники генерируемой ТП. Порядок частоты настройки данной ветви соответствует нулю частотной характеристики сопротивления системы относительно узлов  $a$  и  $\theta$ . Полосу характеристики соответствует частота порядка  $m = \sqrt{X_{CO} / (X_S + X_P + X_{P0})}$ . Простейший широкополосный фильтр нижних частот образуется из резонансного при  $X_{P0} = 0$ . Если  $X_{CO} \rightarrow \infty, X_{P0} \rightarrow 0$ , Г-образный фильтр вырождается в продольный реакторный.

Особенностью представленной схемы замещения АЭС МС является то, что при выполнении

технологических операций одновременно может работать только два ТП, согласно инструкции по эксплуатации МС [4].

Полагаем, что ТП выполнен по трехфазной мостовой схеме, первичная и вторичная обмотки их трансформаторов соединены однотипно, а выпрямленный ток не содержит пульсаций. Анализ формы фазного напряжения сети  $u_{SA}$  существенно упрощается при допущении о линейном характере коммутаций тока вентилей. Тогда, значительно просто было бы проводить анализ при наличии одного ТП. В данном случае, как описывалось выше, в АЭЭС МС присутствует несколько ТП. При этом, согласно техническому условию эксплуатации МС, максимально доступное количество одновременно работающих ТП – два. Соответственно, при выполнении технологических операций условия работы ТП зависят от тока нагрузки  $i_n$  и сопротивления к.з. данного трансформатора  $X_{ПК}$ .

Одним из главных факторов ухудшения качества электроэнергии в рабочих режимах автономных ЭЭС с ТП является искажение кривой питающего напряжения, которое оказывает крайне неблагоприятное влияние на безопасность и надежность функционирования указанных объектов в целом [6].

Несинусоидальность кривой напряжения сети характеризуется следующими показателями, допустимые значения которых регламентируются различными нормативными документами, например ГОСТ 13109–97:

- коэффициент искажения синусоидальности (коэффициент несинусоидальности):

$$K_U = \left( \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} U_{S(n)}^2} / U_{S(1)} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

- коэффициент  $n$ -й гармоники:

$$K_{U(n)} = (U_{S(n)} / U_{S(1)}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $U_{S(1)}$  и  $U_{S(n)}$  – соответственно действующие значения основной и  $n$ -й гармоник напряжения,  $n_{max}$  – наивысший порядок учитываемых гармоник.

Для определения коэффициента несинусоидальности напряжения сети, выражение (1) целесообразно представить на основании равенства Парсеваля в конечной форме, позволяющей учесть весь гармонический спектр:

$$K_U = \left[ \sqrt{DU_S^2 - DU_{S(1)}^2} / U_{S(1)} \right] \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $DU_S$ ,  $DU_{S(1)}$  – соответственно действующее значения и действующее значение основной гармоники всех искажающих составляющих напряжения.

Величина  $DU_S^2$  может быть получена из интегрального соотношения [5]

$$DU_S^2 = DU_H^2 + DU_K^2 + DU_K'^2 = \frac{1}{P_0} \int_0^P (Du_H^2 + Du_K^2 + Du_K'^2) dq, \quad (4)$$

где  $DU_H$  – действующее значение импульсной колебательной составляющей напряжения,  $DU_K$ ,  $DU_K'$  – действующие значения колебательной составляющей напряжения.

В [4] показано, что выражение (3) может быть представлено в аддитивной форме:

$$K_U = \sqrt{K_{UH}^2 + K_{UK}^2}, \quad (5)$$

где  $K_{UH}$  и  $K_{UK}$  – составляющие коэффициента несинусоидальности, обусловленные идеализированными импульсами и коммутационными колебаниями и определяемые из выражений:

$$K_{UH} = \left[ \sqrt{(DU_H^2 - DU_{H(1)}^2) / U_{S(1)}} \right] \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$K_{UK} = \sqrt{K_{UK}^2 + K_{UK}'^2} = \left[ \sqrt{(DU_K^2 + DU_K'^2) / U_{S(1)}} \right] \cdot 100\% \quad (7)$$

Составляющие  $K_{UK}$  и  $K_{UK}'$  обусловлены коммутационными колебаниями, сопровождающими выключение и включение тиристоров.

Довольно часто определение коэффициента несинусоидальности необходимо проводить в сложных эксплуатационных условиях, при разных режимах работы оборудования. Предложенная методика определения коэффициента несинусоидальности в данной статье позволит в течении короткого промежутка времени выполнить исследование АЭЭС МС в разнообразных штатных и нештатных режимах работы, значительно сократит время и средства на разработку и испытание схемотехнических решений по улучшению коэффициента несинусоидальности.

На основании предложенной схемы замещения АЭЭС, рис. 1, составим компьютерную модель системы, созданную в среде Matlab/Simulink и показанную на рис. 2. Модель позволяет исследовать протекающие электромагнитные процессы в АЭЭС МС в масштабе реального времени и с достаточной точностью определить коэффициент несинусоидальности при различных режимах работы оборудования.

Matlab – модель состоит из объединенных с помощью линий связи блоков, а именно: силовая часть (блоки 1, 2, 12), система управления (блоки 7, 8), измерительные приборы (осциллографы) (блоки 19, 20, 22, 25), блоки подключения измерительных приборов (блоки 16, 17, 18, 21), измерители (блоки 10, 11, 13, 14, 15), фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) (блок 9), система питания ФКУ (блок 23), блок задающего ступенчатого воздействия (24).

Питание нагрузки осуществляется от трехфазной симметричной системы напряжений  $U_n=380$  В (блок 1), через питающую линию (блок №2). В этом блоке устанавливаются заранее рассчитанные значе-

ния омических сопротивлений линии. Блоки 3, 4 представлены в виде соединения  $RL$  – цепочки, имитируя тем самым реактивную нагрузку. Работа преобразователей ТП1 (блок 5) и ТП2 (блок 6) контролируется системами управления (блоки 7, 8),

настроенных на разные углы коммутации тиристоров  $\alpha_{ТП1} = 60^\circ$ ,  $\alpha_{ТП2} = 30^\circ$ . К питающей линии подключено ФКУ (блок 9) обеспечивающее снижение коэффициента несинусоидальности.

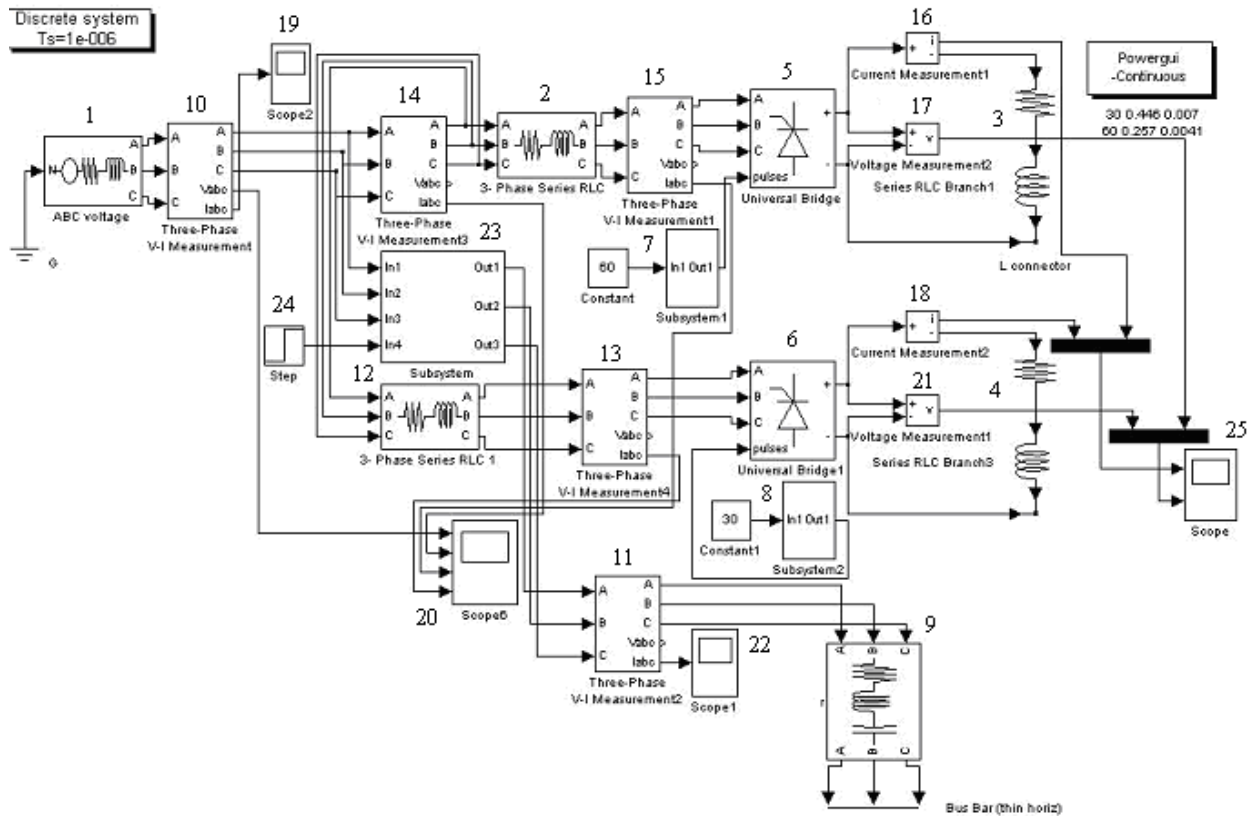
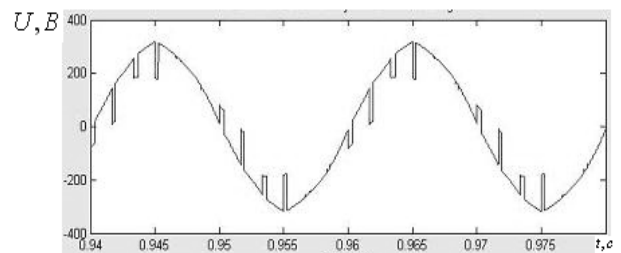


Рисунок 2 – Компьютерная модель системы, созданной в среде Matlab/Simulink

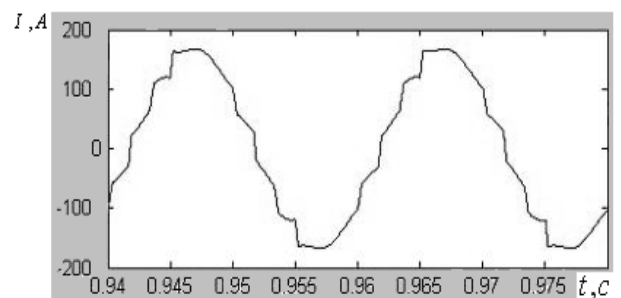
Результатом моделирования является получение кривых тока и напряжения на шинах главного распределительного щита (ГРЩ), а также проведение гармонического анализа работы энергосистемы МС. Кривые приведены на рис. 3 (а, б), 4 (а, б).

В качестве сравнения полученных результатов воспользуемся оригинальной методикой оценки гармонического состава сетевого напряжения путем осциллографирования с последующей оцифровкой полученных кривых и обработкой их на ЭВМ с помощью Быстрого преобразования Фурье в программном продукте Mathcad 13 [3]. Полученные результаты моделирования сведены в табл. 1.

На рис. 5, а,б представлены осциллограммы линейных напряжения и тока на шинах ГРЩ, соответствующие предельному (в отношении максимально возможного значения  $k_{ни}$ ) рабочему режиму МС. Рассматриваемые кривые соответствуют структуре одиночный СГ-одиночный ТП. Нагрузкой преобразователя является электродвигатель постоянного тока кранового оборудования при  $I_d = 200$  А;  $U_d = 400$  В.

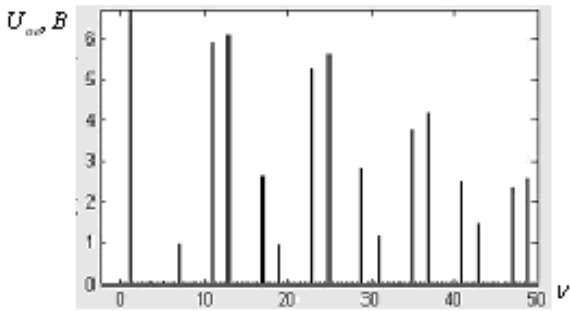


а) кривая напряжения на шинах ГРЩ

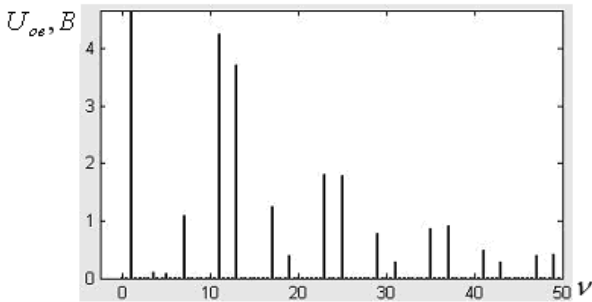


б) кривая тока на шинах ГРЩ

Рисунок 3 – Результаты моделирования

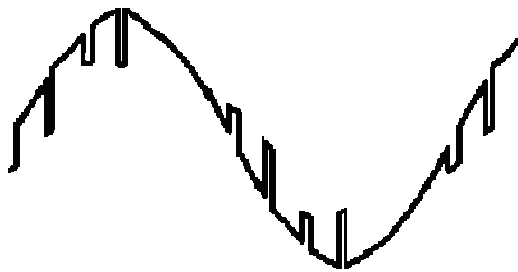


а) анализ гармонического состава напряжения на шинах ГРЦ

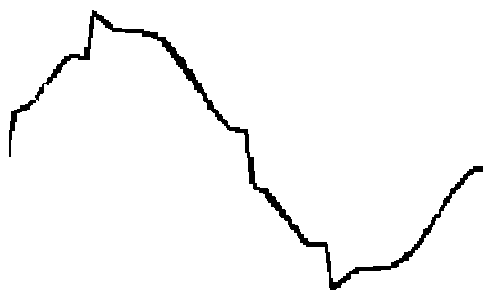


б) анализ гармонического состава тока на шинах ГРЦ

Рисунок 4 – Результаты моделирования



а) осциллограмма линейного напряжения на шинах ГРЦ МС



б) осциллограммы тока на шинах ГРЦ МС

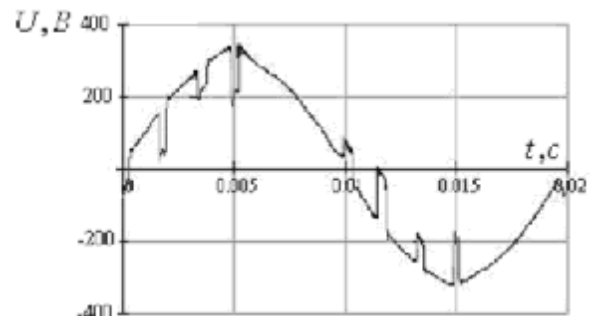
Рисунок 5 – Осциллограммы линейного напряжения и тока на шинах ГРЦ МС

Результатом преобразования осциллограмм линейного напряжения и тока на шинах ГРЦ МС, рис. 5, являются аналитические кривые, рис. 6,а и рис. 7,а, по которым выполнен гармонический анализ. Гармонические спектры экспериментальных кривых с расчетом степени искажения, которая определяется коэффициентом искажения синусоидальности

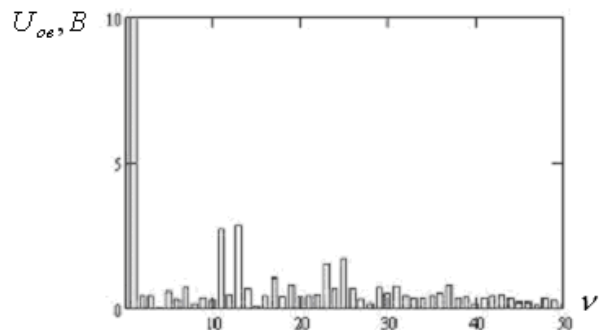
$$K_U = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} / U_1, \text{ показаны на рис. 6,б и рис. 7,б.}$$

Таблица 1 – Экспериментальные, аналитические и смоделированные значения  $K_U$

Виды анализа	Нагрузка АЭС МС %	Коэффициент несинусоидальности	
		$K_U, \%$	$K_I, \%$
Эксперимент	80	15,96	8,01
Расчет	80	15,07	7,21
Моделирование	80	14,18	6,62

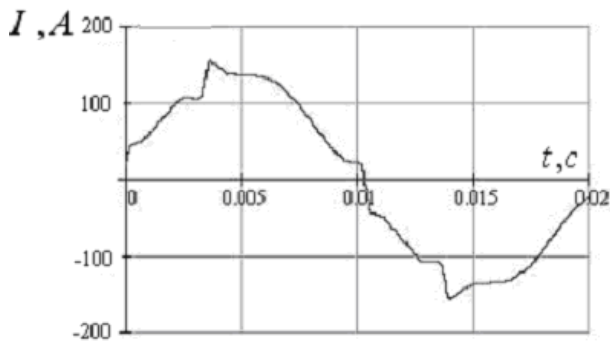


а)

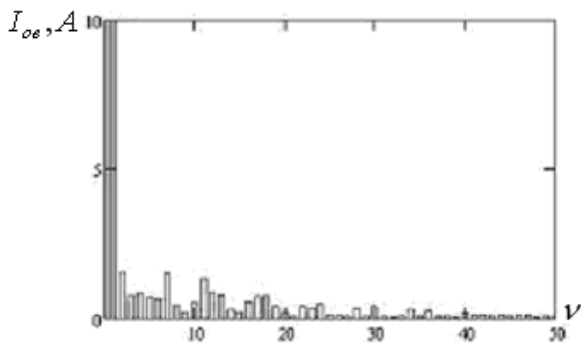


б)

Рисунок 6 – Результаты преобразования осциллограмм линейного напряжения и тока на шинах ГРЦ МС



а)



б)

Рисунок 7 – Результати преобразования осциллограмм линейного напряжения и тока на шинах ГРЩ МС

**Выводы.** 1. Использование приведенной методики позволяет получить более точные результаты анализа. Снижение погрешности достигается путем создания наиболее реальных условий работы всего технологического оборудования.

2. Спектры, полученные в результате анализа, позволяют рассчитать энергетические характеристики ТП, синтезировать ФКУ, если это необходимо, а также реализовать диагностику неисправности системы.

3. Предложенная методика определения коэффициента несинусоидальности в данной статье позволит в течение короткого промежутка времени выполнить исследование АЭЭС МС в разнообразных штатных и нештатных режимах работы, значительно сократит время и средства на разработку и испытание схмотехнических решений по улучшению коэффициента несинусоидальности.

4. Как видно из рис. 3,6,7 настройка ФКУ производилась на фиксированное значение ( $n = 7$ ), что показывает неэффективность его работы. Следовательно, более целесообразным является включение на входе преобразователей технологических механизмов содержащих ТП регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов Я.Ф., Жук А.К., Черевко А.И. Искажение напряжения в судовой электроэнергетической системе (СЭС), содержащей тиристорные преобразователи // Республ. межведомств. тематич. научн.-техн. сборник «Судостроение» - Киев-Одесса: Вища школа, 1975. – Вып. 24. – С. 76-88.

2. Анисимов Я.Ф., Жук А.К., Симонян С.Т. Гармонический анализ высокочастотных колебаний напряжений на первичной стороне вентильных преобразователей // Изв. вузов. Электромеханика. – 1980. – № 11. – С. 1210-1216.

3. Жук А.К., Запальский В.Н., Трибулькевич С.Л. Несинусоидальность напряжения в ЭЭС морских сооружений с полупроводниковыми преобразователями // Материалы конференции “Силовая электроника и энергоэффективность”. СЭЭ’200 – Электротехника, 2006. – С. 136 – 141.

4. Жук Д.А. Особенности электроэнергетических систем современных буровых судов с динамическим позиционированием // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 4 (397). – С.111 –119.

5. Абрамов Б.И., Портной Б.М., Шевырев Ю.В. Методы выбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности // Электротехника. – 2001. – №1. – С. 38–42.

6. Жук А.К., Жук Д.А. Комплексная оценка и обеспечение качества электроэнергии в единой ЭЭС двойного рода тока бурового судна «Газпром-1». Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. Вип. 2/2002(12). – Кременчук: КДПУ, 2002. – С. 208–211.

7. Жук А.К. Анализ влияния тиристорного преобразователя на питающую сеть с учетом коммутационных колебаний // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2003. – №60. – С. 39 – 47.

Стаття надійшла 26.09.2007р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.