

УДК 621.317.629.12

Г.И. Коробко¹, В.В. Лебедев², П.В. Ахлестин¹

КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВЫХ СЕТЯХ ПРИ ПИТАНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»¹,
ООО «СТАНДАРТ», Нижний Новгород²

Показано применение активного устройства компенсации высших гармоник напряжения в судовой единой электроэнергетической системе. Разработана и предложена методика определения коэффициента нелинейных искажений напряжения на «чистой шине», от которой питаются ответственные потребители.

Ключевые слова: активный компенсатор, высшие гармоники, единая электроэнергетическая система, «чистая шина», судовые ответственные потребители.

На речных и морских судах достаточно широко используют единую электроэнергетическую систему (ЕЭС) для питания гребной электрической установки (ГЭУ) и общесудовых потребителей (ОСП). Такую систему применяют на ледоколах, пассажирских, промысловых судах и судах технического флота. На рис. 1 представлена блок-схема ЕЭС переменного тока. В её состав входят главные генераторы G1, G2, G3, обеспечивающие питание энергией ГЭУ. Аварийно - стояночный дизель – генератор G4 – обеспечивает питание общесудовых потребителей в режиме стоянки судна и питание потребителей, влияющих на живучесть судна при аварийных режимах. Преобразователи частоты: ПЧ1 управляет электродвигателем подруливающего устройства М1, ПЧ2 и ПЧ3 управляет двумя гребными электродвигателями М2 и М3 соответственно.

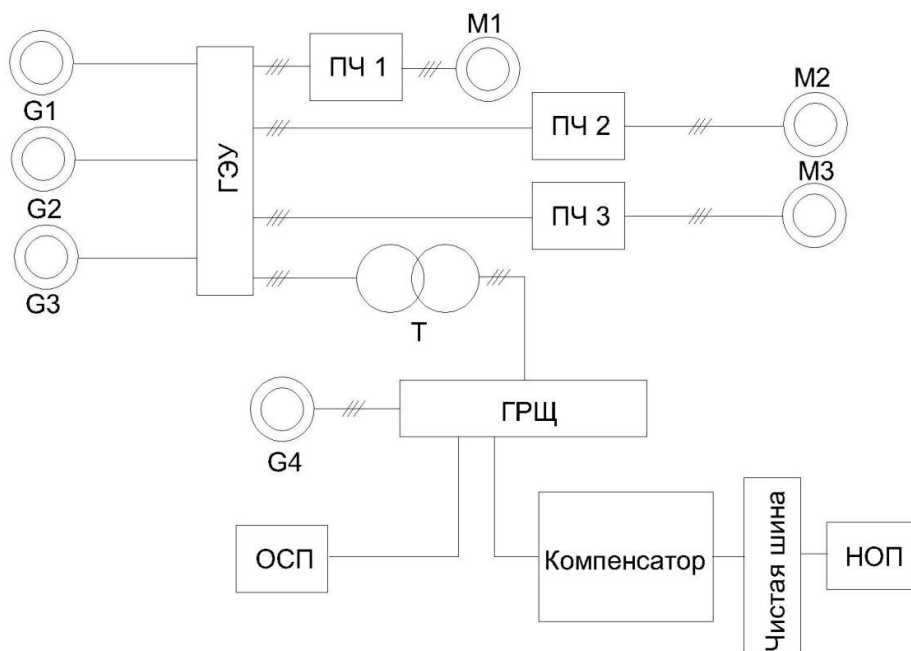


Рис. 1. Блок-схема единой электроэнергетической системы

В ходовом режиме секция ОСП получает питание от главного распределительного

щита – ГРЩ, через силовой понижающий трансформатор - Т. Наиболее ответственные потребители (НОП) получают питание от так называемой «чистой шины» - ЧШ, подключаемой к ГРЩ через компенсатор.

Ответственные потребители судна должны получать достаточно высокое качество электроэнергии, предъявляемое Российским морским регистром судоходства – РМРС [1] и Российским речным регистром – РРР [2].

Примерами таких потребителей являются:

1. Навигационные системы.
2. Гироскопические навигационные устройства.
3. Навигационные устройства отображения, обработки и регистрации.
4. Лаг и эхолот.
5. Магнитные судовые компасы.
6. Авторулевой.
7. Комплексная система автоматика.
8. Пожарная сигнализация.
9. Аэрозольное пожаротушение.
10. Топливная система и т.д.

Искажения кривой напряжения и тока, вносимые статическими преобразователями в судовую сеть, вызывают [4]:

- понижение эффективности при выработке, передаче и использовании электроэнергии;
- повышение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- старение изоляции электрического оборудования и сокращение, вследствие этого, срока его службы;
- неверную работу систем управления;
- вибрацию электродвигателей;
- пульсацию вращающего момента электродвигателей;
- перегрев обмоток трансформаторов, двигателей и другого оборудования;
- отключение оборудования при искажении напряжения сети.

Одним из важных показателей качества электроэнергии является - коэффициент несинусоидальности кривой напряжения судовой сети, обусловленной работой силовых полупроводниковых устройств, не должен превышать 10 % [1]. Применение силовых полупроводниковых устройств, вызывающих искажение синусоидальности кривой напряжения более 10 %, является в каждом случае предметом специального рассмотрения Регистром. Значение коэффициента несинусоидальной кривой напряжения не должно превышать 10% и определяется по формуле

$$K_{II} = \frac{1}{U_c} * \left(\sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2} * 100\% \right),$$

где U_c – действующее значение напряжения сети;

U_n – напряжение гармонической составляющей n -го порядка;

n – порядок высшей гармонической составляющей;

K_{II} - коэффициент нелинейных искажений.

Значение K_{II} регламентируется для полностью укомплектованной судовой энергетической системы.

По особому согласованию с Регистром допускается использование отдельных шин с $K_{II} > 10\%$ для питания мощных источников гармонических составляющих напряжений и не восприимчивого к ним электрооборудования при условии, что указанные шины подключаются к основным шинам сети через развязывающие устройства.

Для снижения искажений сетевого напряжения, питающего ответственных потребителей, в ЭЭС (рис. 2) включён компенсатор К.

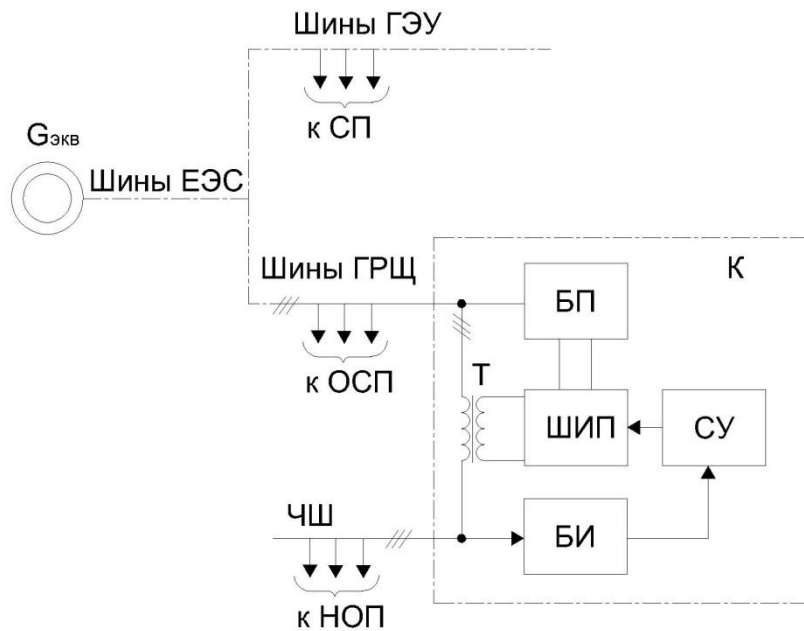


Рис. 2. Схема электроснабжения судна с компенсатором К, подключённым к чистой шине

Блок схема компенсатора состоит из вольтодобавочного трансформатора - Т, вторичная обмотка которого включена между шинами ГРЦ и «чистой шиной» - ЧШ. Первичная обмотка трансформатора получает управляющее напряжение от широтно – импульсного преобразователя – ШИП, подключенного к блоку питания – БП. Система управления – СУ получает напряжение на «чистой шине» от блока измерения – БИ и формирует сигнал компенсации для управления ШИПа. Вольтодобавочным трансформатором передаётся в сеть сумма высших гармоник напряжения, которые находятся в противофазе с высшими гармониками напряжения на шинах ГРЦ [4].

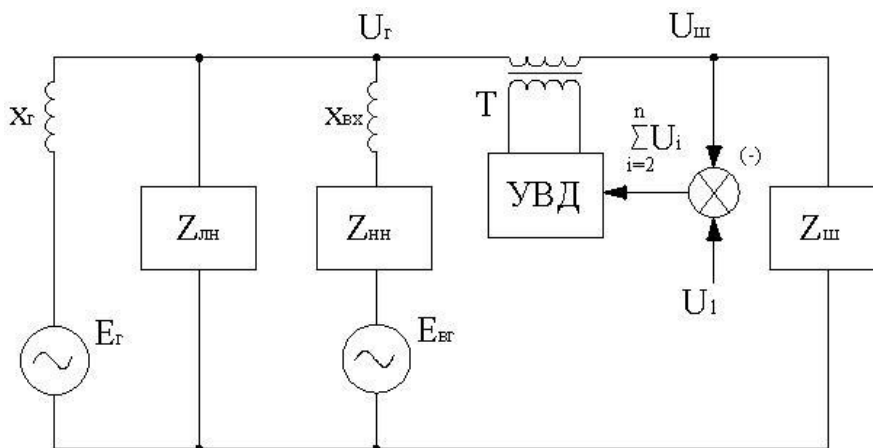


Рис. 3. Общая схема замещения ЭЭС с активным компенсатором

Схема замещения ЭЭС при компенсации нелинейных искажений, вносимых работой эквивалентным мощным нелинейным преобразователем, показана на рис. 3. Преобразователь представлен блоком $Z_{НН}$ и генератором высших гармоник ЭДС $E_{ВГ}$. На входе преобразователя

зователя введено эквивалентное индуктивное сопротивление $X_{вх} = X_m + X_p + X_l$, где X_m – приведенное индуктивное сопротивление вольтодобавочного трансформатора; X_p – индуктивное сопротивление реактора или входного трансформатора; X_l – индуктивное сопротивление линии. Создаваемые преобразователем токи высших гармоник в контурах системы приводят к искажению напряжения на шинах ЕЭС [5].

В схеме замещения эквивалентный генератор представлен источником синусоидальной ЭДС E_r основной гармоники и эквивалентным индуктивным сопротивлением X_r . Кроме того, в схеме предусмотрена линейная нагрузка $Z_{лн}$, которая в общем случае может содержать активно-индуктивную составляющую и ЭДС (для асинхронных электродвигателей). Для компенсации нелинейных искажений напряжения на «чистой шине» в схему введено устройство вольтодобавки (УВД) подключенное к вольтодобавочному трансформатору (Т). Управление устройством осуществляется сигналом разности напряжения на «чистой шине»,

который в общем случае содержит весь спектр гармоник $U_2 = U_1 + \sum_{i=2}^n U_i$. Таким образом, на

входе УВД будет сигнал суммы $\sum_{i=2}^n U_i$, находящийся в противофазе с высшими гармониками напряжения на шине [4]. Анализ схемы замещения выполнялся для первой гармоники и отдельно для всех высших гармоник, источником которых является нелинейная нагрузка. Учитывая, что в первом случае сигнал на входе вольтодобавочного устройства равен нулю, схема замещения будет иметь вид, показанный на рис. 4.

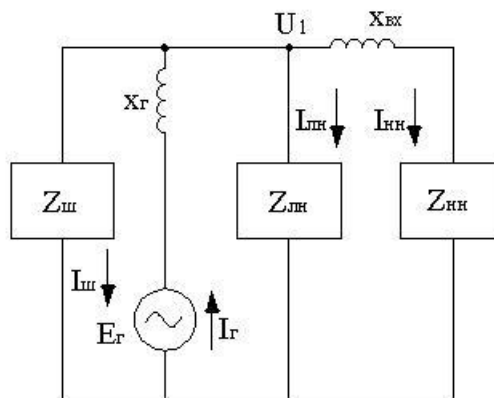


Рис. 4 Схема замещения ЕЭС для основной (первой) гармоники.

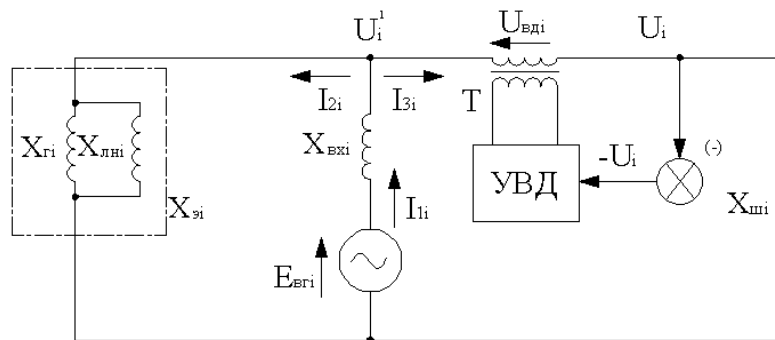


Рис. 5 Схема замещения ЕЭС с вольтодобавкой для высших гармоник

Напряжение на зажимах шины генератора равно $U_1 = E_2 - I_2 * X_2$, где ток генератора $I_2 = I_{лн} + I_{нн} + I_{ш}$ равен сумме нагрузок токов линейной $I_{лн}$, нелинейной $I_{нн}$, «чистой шины» $I_{ш}$ и определяется известными методами по их параметрам. Поскольку генератор оснащен автоматической системой регулирования возбуждения, то напряжение на его зажимах в установившемся режиме будет равно номинальному при изменении величины, характера и соотношения линейных и нелинейных нагрузок. Схема замещения ЕЭС для высших гармоник представлена на рис. 5.

Для высших гармоник тока индуктивное сопротивление элементов схемы определяется как $X_i = X_1 * i$, где i – номер гармоники. Линейную нагрузку представим индуктивным сопротивлением $X_{лнi}$. Тогда включенные параллельно X_{2i} и $X_{лнi}$ можно заменить на эквивалентное внешнее индуктивное сопротивление:

$$X_{эi} = \frac{X_{2i} * X_{лнi}}{X_{2i} + X_{лнi}}$$

Будем считать, что индуктивное сопротивление трансформатора (Т) равно нулю. Для определения напряжения высших гармоник на «чистой шине» используем выражение

$$U_i = I_{3i} * X_{шi}. \quad (1)$$

На основании схемы замещения (рис. 5) запишем законы Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_{1i} - I_{2i} - I_{3i} &= 0, \\ E_{\theta 2i} &= X_{\theta xi} * I_{1i} + X_{эi} * I_{2i}, \\ E_{\theta 2i} - U_{\theta \delta i} &= X_{\theta xi} * I_{1i} + X_{шi} * I_{3i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя систему уравнений (2), получаем выражения для токов в виде

$$I_{1i} = \frac{E_{\theta 2i} - U_{\theta \delta i} - X_{\theta xi} * I_{1i}}{X_{шi}} + \frac{E_{\theta 2i} - X_{\theta xi} * I_{1i}}{X_{эi}} \quad (3)$$

$$I_{2i} = \frac{E_{\theta 2i} - X_{\theta xi} * I_{1i}}{X_{эi}} \quad (4)$$

$$I_{3i} = \frac{E_{\theta 2i} - U_{\theta \delta i} - X_{\theta xi} * I_{1i}}{X_{шi}}. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (3) к виду

$$I_{1i} = \frac{E_{\theta 2i} * K_x}{X_{эi}} + \frac{U_{\theta \delta i} * K_x}{X_{шi}}, \quad (6)$$

где $K_x = \frac{X_{эi}}{X_{эi} + X_{\theta xi}}$ – коэффициент соотношения эквивалентного и входного индуктивных сопротивлений для высших гармоник.

Преобразовав выражение (5), получаем

$$I_{3i} = \frac{E_{\theta 2i} - U_{\theta \delta i}}{X_{шi}} - K_x * \frac{X_{\theta xi}}{X_{шi}} * \left(\frac{E_{\theta 2i}}{X_{эi}} - \frac{U_{\theta \delta i}}{X_{шi}} \right). \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в уравнение (1), получим

$$U_i = E_{\theta 2i} * \left(1 - \frac{X_{\theta xi} * K_x}{X_{эi}} \right) - U_{\theta \delta i} * \left(1 - \frac{X_{\theta xi} * K_x}{X_{шi}} \right). \quad (8)$$

Поскольку $U_{вдi} = U_i * K_{вд}$, где $K_{вд}$ – общий коэффициент усиления (передачи) вольтодобавочного устройства и трансформатора, уравнение (8) получаем в виде

$$U_i = \frac{E_{\theta zi} * K_x}{1 + K_{\theta d} * (1 - K_{ui})}, \quad (9)$$

где $K_{ui} = K_x * \frac{X_{\theta xi}}{X_{ui}}$ - коэффициент индуктивного сопротивления «чистой шины».

В выражении коэффициента K_{ui} значение K_x примерно равно $0,7 \div 0,8$, а отношение $\frac{X_{\theta xi}}{X_{ui}}$ составляет $0,03 \div 0,05$, тогда величина K_{ui} лежит в диапазоне $0,02 \div 0,04$. В большинстве случаев K_{ui} можно пренебречь, и выражение (9) принимает вид

$$U_i = \frac{E_{\theta zi} * K_x}{1 + K_{\theta d}}. \quad (10)$$

Величина коэффициента нелинейных искажений может быть определена из графических зависимостей $K_{II} = f(S_{np}^*, X_2)$ [6], где S_{np}^* – приведенная относительная мощность эквивалентного преобразователя. Для предварительного расчёта K_{II} используем составленную таблицу 1 для двух основных схем преобразователей при значении $S_{np}^* = 1$, (6-фазная мостовая и 12-фазная 2-мостовая схемы).

Таблица 1

X _Г , о.е.		0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3
K _{И0} , %	6 ^{ти} Фазная мостовая	13	16,5	19,5	22	24,5	27	29	31	32,5	34	35,5	37	38,5
	12 ^{ти} Фазная 2 ^х мостовая	8,5	11	13,5	15,5	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26	27	28

Расчёт фактического значения коэффициента нелинейных искажений при любой величине S_{np}^* и выбранной схемы преобразователя определяется выражением

$$K_{ИС} = K_{И0} * K_S + K_{cx} * X_2 * (1 - K_S) * K_S, \quad (11)$$

где $K_S = S_{np}^*$ – относительный коэффициент мощности нелинейной нагрузки. K_{cx} - коэффициент схемы равен 100 - для 6-фазной мостовой и 65 для 12- фазной 2-мостовой схемы.

В соответствии с выражением (10) изменение коэффициента вольтодобавки $K_{\theta d}$ приводит к пропорциональному изменению всех высших гармоник напряжения U_i . Можно показать, что в этом случае будет иметь такое же изменение величины коэффициента нелинейных искажений напряжения. Следовательно, с учётом выражений (10) и (11) получаем коэффициент нелинейных искажений напряжения в общем виде:

$$K_{II} = \frac{K_{ИС} * K_x}{1 + K_{\theta d}}. \quad (12)$$

В качестве нелинейной нагрузки рассмотрим трёхфазный мостовой выпрямитель с выбранными значениями K_S . Величину максимального коэффициента нелинейных искажений $K_{И0}$, для конкретного значения $X_2 = 0,14$, выбираем из табл. 1. После выполнения расчётов, на рис. 6 и 7 представлены графические зависимости коэффициента нелинейных искажений K_{II} от величины коэффициента вольтодобавки $K_{\theta d}$, полученные в соответствии с выражением (12).

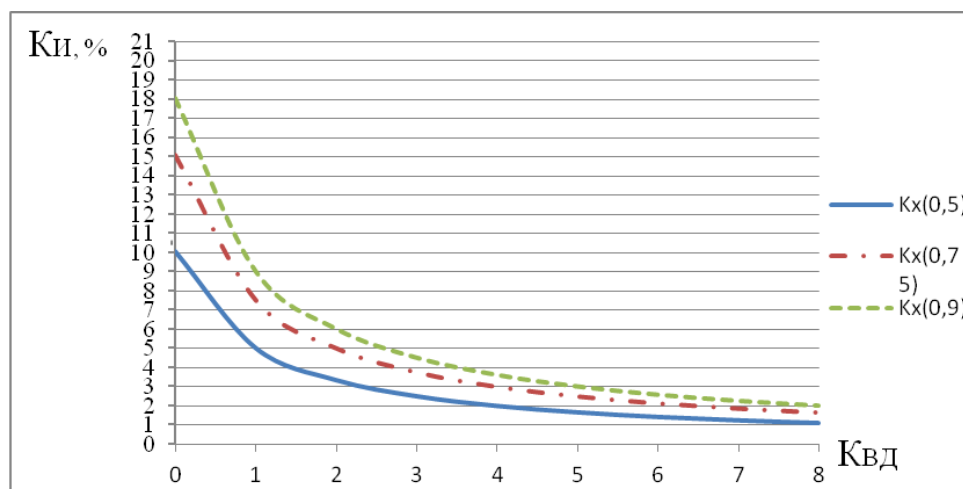


Рис. 6. Зависимость $K_{II} = f(X_{\text{вд}})$ при $X_2 = 0,14$ и $K_S = 0,7$

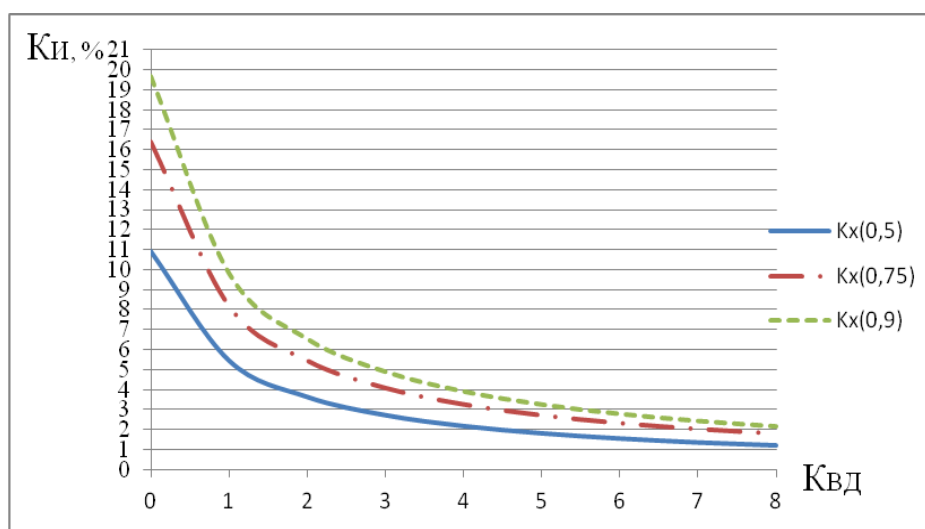


Рис. 7. Зависимость $K_{II} = f(X_{\text{вд}})$ при $X_2 = 0,14$ и $K_S = 0,8$

Таким образом, использование активного принципа вольтодобавки позволяет эффективно компенсировать нелинейные искажения напряжения на «чистой шине». При величине коэффициента вольтодобавки, равной 6 и более, величина коэффициента искажений становится меньше 2 %.

Анализ высших гармоник в сетях ЭЭС судов показывает, что необходимо применение различных устройств как пассивных, так и активных, для снижения нелинейных искажений на шинах электростанции. В результате математического описания составленной схемы замещения судовой электроэнергетической системы были получены выражения для расчёта коэффициента нелинейных искажений напряжения на «чистой шине», от которой получают питание наиболее ответственные потребители.

Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки судов (в 4-х т.). Т3. – С.-Петербург, 2015.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т3. – М., 2008.
3. **Коробко, Г.И.** Использование принципа вольтодобавки для компенсации нелинейных искажений напряжения./ Г.И. Коробко, В.В. Лебедев, П.В. Ахлестин // Вестник ВГАВТ. – Н.Новгород: ВГУВТ. – 2015. – №43. – С. 303–307.

4. **Лебедев, В.В.** Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: дисс. ... канд. техн. наук, специальность 05.09.03, 2014. Нижний Новгород. –132 с.
5. **Коробко Г.И.** Повышение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств / Г.И. Коробко [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2012. Т 78 №1 (94). – С. 192–203.
6. Качество электрической энергии на судах: справочник / В.В. Шейнихович [и др.]. – Л.: Судостроение, 1988. –160 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.05.2016*

G.I. Korobko, V.V. Lebedev, P.V. Akhlestin

**DISTORTION COMPENSATION VOLTAGE IN SHIP NETWORKS
WHEN POWERED SHIP RESPONSIBLE CONSUMERS**

Volga state University of water transport,
llc «STANDARD», Nizhny Novgorod

Conclusion: The above equivalent circuits of a ship uniform electropower system, allowed us to receive expression for calculation of the factor of nonlinear distortions of tension. An increasing the factor of the voltage booster equal to 6 and more, the factor of nonlinear distortion of tension is less than 2%.

Design/methodology/approach: Analytical computation.

Findings: The analysis shows that ship uniform electro power systems work at maximum permissible level of the highest harmonicas of tension. Use of the active compensator on the basis of the voltage booster allows to compensate effectively nonlinear distortions on the pure tire.

Key words: active compensator, the highest harmonicas, unified power system, «the pure tire», responsible consumers.