

УДК 621.317

## Моделирование устройства компенсации нелинейных искажений напряжения судовой электроэнергетической системы

Г.И. Коробко, В.В. Лебедев  
ФБОУВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»,  
г. Н.Новгород, Российская Федерация  
E-mail: elektrotech@vgavt-nn.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Наличие мощных нелинейных потребителей в судовых электроэнергетических системах приводит к искажению формы сетевого напряжения и, как следствие, к снижению качества электроэнергии. Применение пассивных способов компенсации нелинейных искажений либо малоэффективно, либо невозможно в силу специфики работы судовых электроэнергетических систем. Актуальным направлением в решении данной проблемы является разработка активных устройств компенсации нелинейных искажений. В качестве такого устройства может быть применена система компенсации на базе вольтодобавки.

**Материалы и методы:** Моделирование устройства компенсации нелинейных искажений напряжения в судовых электроэнергетических системах осуществлено в пакете MATLAB.

**Результаты:** Разработана модель судовой электроэнергетической системы с вольтодобавочным компенсатором нелинейных искажений напряжения. Определены оптимальные параметры элементов устройства компенсации и настройки его системы управления.

**Выводы:** Предложенное активное устройство компенсации в составе судовой электроэнергетической системы позволяет существенно снизить величину нелинейных искажений (с 10–14 % до 4,5–5,5 %) и может быть использовано в автономных электростанциях с мощными нелинейными потребителями.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, нелинейные искажения напряжения, устройства компенсации, вольтодобавочные трансформаторы, судовые электроэнергетические системы.

## Simulating of a nonlinear voltage distortion compensation device of a ship electric power system

G.I. Korobko, V.V. Lebedev  
Volga state academy of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: elektrotech@vgavt-nn.ru

### Abstract

**Background:** High-powered nonlinear loads in ship electric power systems cause a shape distortion of supply voltage and, consequently, a decrease in electric power quality. Using passive means of nonlinear distortion compensation is either ineffective or impossible due to specific operational characteristics of ship electric power systems. To solve this problem it is urgent to develop active nonlinear distortion compensation devices. A compensation system based on voltage boosters can be used for such purpose.

**Materials and methods:** MATLAB package was used to simulate a nonlinear voltage distortion compensation device in the ship electric power systems.

**Results:** A model of the ship electric power system with a boost compensator of nonlinear voltage distortion has been developed. The optimal parameters of the compensation device and its control system settings were determined. The activation of the compensation system leads to a decrease in the nonlinear distortion factor from 10–14 % to 4,5–5,5 %.

**Conclusions:** The suggested active compensation device makes it possible to sufficiently decrease the nonlinear distortion amount in the ship electric power system. It can be used in autonomous electric power stations with powerful nonlinear loads.

**Key words:** electric power quality, nonlinear voltage distortion, compensation devices, boosters, ship electric power systems.

Применение в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) мощных полупроводниковых преобразователей, потребляющих несинусоидальный ток, приводит к искажению формы сетевого напряжения, что негативно сказывается на работе как источников, так и потребителей электроэнергии [1]. В связи с этим должны приниматься меры по снижению нелинейных

искажений до уровня, регламентированного Российским Речным Регистром<sup>1</sup>.

Существуют различные способы снижения нелинейных искажений напряжения [2], однако наиболее перспективными на сегодняшний день являются активные фильтры и вольтодобавочные компенсаторы. Принцип работы последних заключается в формировании и передаче в сеть

<sup>1</sup> Российский Речной Регистр. Правила. В 4 т. Т. 3. – М., 2008. – 432 с.

высших гармоник напряжения, находящихся в противофазе с высшими гармониками напряжения сети. На рис. 1 представлена функциональная схема вольтодобавочного устройства компенсации нелинейных искажений, включенного между генератором G и нелинейной нагрузкой НН. Другие потребители подключаются перед устройством компенсации, т. е. на шины генератора (электростанции).

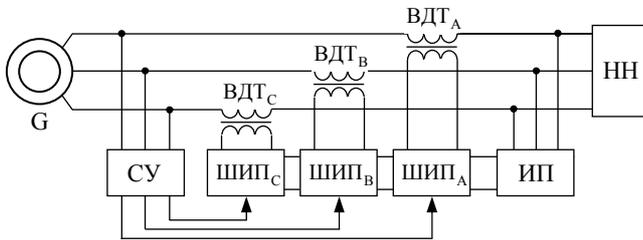


Рис. 1. Функциональная схема вольтодобавочного устройства компенсации нелинейных искажений напряжения

Система управления СУ измеряет напряжение в каждой из фаз сети и формирует сигналы рассогласования, представляющие собой сумму высших гармоник напряжения. Эти сигналы являются задающими для широтно-импульсных преобразователей ШИП<sub>А</sub>, ШИП<sub>В</sub> и ШИП<sub>С</sub>, формирующих напряжение вольтодобавки, которое через вольтодобавочные трансформаторы ВДТ<sub>А</sub>, ВДТ<sub>В</sub> и ВДТ<sub>С</sub> передается в сеть. Поскольку вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно с сетью, напряжение сети складывается с напряжением вольтодобавки, за счет чего происходит компенсация нелинейных искажений напряжения. Источник питания широтно-импульсных преобразователей ИП представляет собой трехфазный неуправляемый выпрямитель с выходным сглаживающим фильтром.

Для исследования эффективности компенсации нелинейных искажений была разработана модель судовой электроэнергетической системы с вольтодобавочным устройством компенсации (рис. 2). Моделирование производилось в пакете программ Matlab Simulink. При разработке модели были применены стандартные блоки библиотеки Simulink и SimPowerSystem [3]. В качестве генератора G использован синхронный явнополюсный генератор мощностью 250 кВА с номинальным напряжением 400 В, 50 Гц и номинальной частотой вращения 1500 об/мин. Параметры генератора задаются в системе о.е., а для учета насыщения вводится кривая намагничивания машины. Задание частоты вращения обеспечивается с помощью блока SB1. Система возбуждения генератора представлена блоком Excitation, на вход которого подается требуемая величина выходного напряжения генератора  $V_{ref}$  (в о.е.). Нагрузка генератора состоит из двух групп потребителей: с линейными характеристиками (блок LLoad) и нелинейными (блок NLLoad). Блок NLLoad представляет собой трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель, работающий на активно-индуктивную нагрузку, величина которой составляет 100 кВт и принимается за номинальное значение ( $P_{НН}$ ).

Устройство компенсации нелинейных искажений представлено тремя вольтодобавочными трансформаторами  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_c$ , системой управления Control system и источником питания PWT Supply. Последний состоит из трехфазного мостового выпрямителя, на входе которого установлены коммутационные дроссели, а на выходе – сглаживающий RLC-фильтр. Выходное напряжение источника питания и ток, потребляемый системой компенсации, отображаются на осциллографе Scope4.

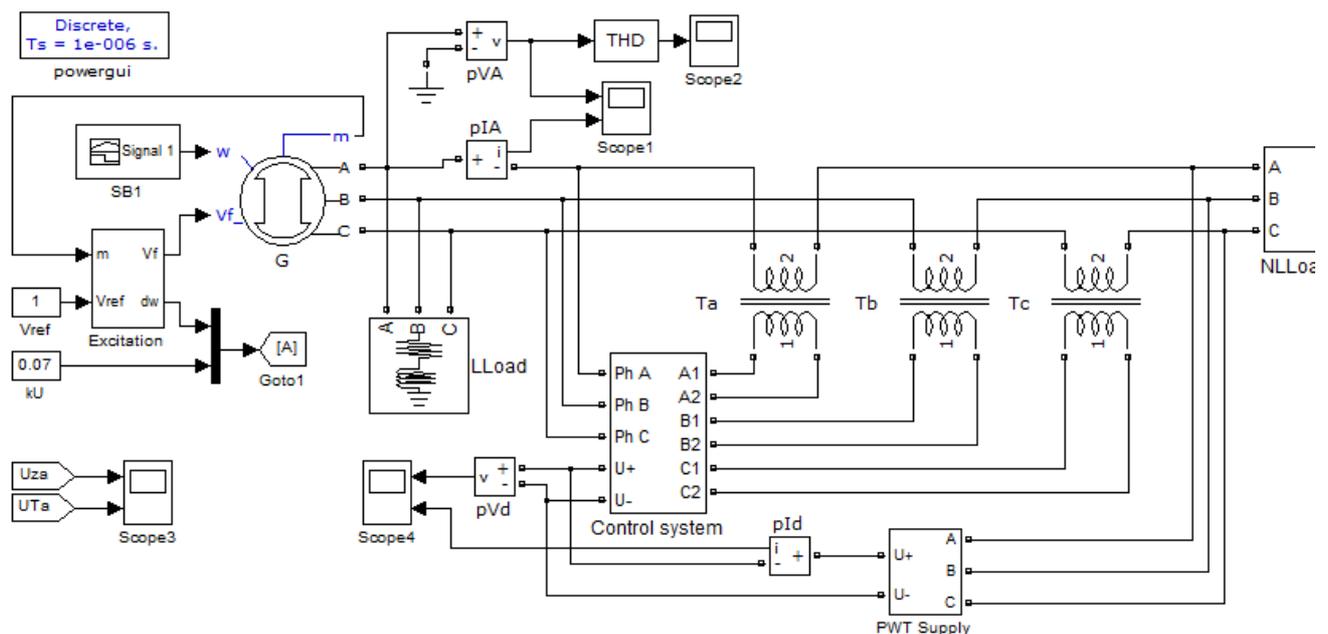


Рис. 2. Модель СЭЭС с устройством компенсации нелинейных искажений напряжения

Для задания параметров системы компенсации предварительно была определена величина коэффициента нелинейных искажений при подключении номинальной нелинейной нагрузки. Вольтодобавочные трансформаторы были заменены на индуктивности в целях предварительного учета их эквивалентного индуктивного сопротивления. Величина коэффициента нелинейных искажений  $K_{НИ}$  при номинальной нелинейной нагрузке составила 12,6 %.

При определении мощности ВДТ будем считать, что для компенсации нелинейных искажений в сеть должны быть переданы все значимые высшие гармоники напряжения. Тогда из выражения для коэффициента нелинейных искажений

$$K_{НИ} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_i$  ( $i = 2, 3, \dots$ ) – действующие значения основной и  $i$ -й гармоники напряжения, определяем напряжение на вторичной обмотке ВДТ:

$$U_{2T} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} = K_{НИ} \cdot U_1 = 0,126 \cdot 230 = 29 \text{ В.}$$

Действующее значение тока вторичной обмотки ВДТ определяется из выражения

$$I_{2T} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}. \quad (2)$$

В подкоренном выражении в (2) кроме основной гармоники тока учтены наиболее значимые 5, 7, 11 и 13 гармоники, генерируемые в сеть при работе трехфазного мостового выпрямителя. Максимальные значения высших гармоник тока могут составить 0,2; 0,14; 0,11; и 0,077 от первой гармоники тока. Преобразовав выражение (2), получим

$$I_{2T} = I_1 \cdot \sqrt{1 + (0,2)^2 + (0,14)^2 + (0,11)^2 + (0,077)^2} = 1,05 \cdot I_1.$$

Первую гармонику тока определим, считая, что она полностью определяет мощность, потребляемую нелинейной нагрузкой  $P_{НН}$ :

$$I_1 = \frac{P_{НН}}{3 \cdot U_1} = \frac{100000}{3 \cdot 230} = 145 \text{ А.}$$

Тогда

$$I_{2T} = 1,05 \cdot I_1 = 1,05 \cdot 145 = 152 \text{ А,}$$

а полная мощность на вторичной обмотке ВДТ будет равна

$$S_{2T} = U_{2T} \cdot I_{2T} = 29 \cdot 152 = 4,41 \text{ кВА.}$$

Учитывая КПД трансформатора и запас по напряжению на его вторичной обмотке, который необходимо иметь вследствие сложной формы напряжения вольтодобавки, мощность ВДТ можно определить по формуле

$$S_T = S_{2T} \frac{K_{ЭН}}{\eta} = 4,41 \frac{1,2}{0,9} = 5,88 \text{ кВА,}$$

где  $\eta$  – КПД трансформатора;  $K_{ЭН}$  – коэффициент запаса по напряжению.

В процессе моделирования были измерены активная и реактивная мощности на первич-

ной обмотке ВДТ, которые составили 5670 Вт и 690 ВАР соответственно. Результирующая полная мощность составила 5710 ВА, что подтверждает результаты расчета.

Структурная схема системы управления каналом компенсации фазы А представлена на рис. 3.

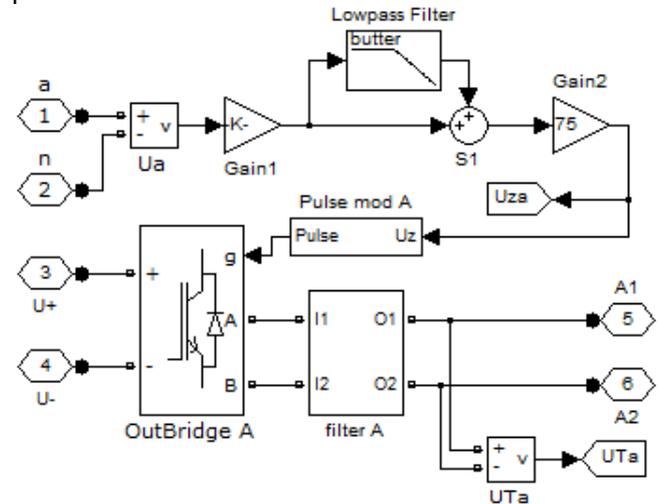


Рис. 3. Структурная схема системы управления каналом компенсации фазы А

Для формирования сигнала суммы высших гармоник фазное напряжение  $U_a$  подается на вход сумматора S1 и на вход фильтра низких частот Lowpass Filter, в качестве которого использован фильтр Баттерворта 8-го порядка. Выходное напряжение фильтра, содержащее только основную гармонику, сдвинутую на 180° относительно сетевого напряжения, поступает на второй вход сумматора S1. При этом основная гармоника сетевого напряжения полностью компенсируется, и на выходе сумматора S1 формируется сигнал суммы высших гармоник напряжения. Последний преобразуется с помощью пропорционального звена Gain2 в сигнал задания  $U_{za}$ , который поступает на вход модулятора длительности импульсов Pulse mod A. Он преобразует задающий сигнал  $U_{za}$  в сигнал управления Pulse, состоящий из 4-х последовательностей импульсов, поданных на управляющий вход g широтно-импульсного преобразователя OutBridge A. В качестве ШИП использован стандартный блок Universal Bridge на базе IGBT-транзисторов. Преобразователь выполнен по мостовой схеме и работает в режиме несимметричной модуляции. Его выходное напряжение поступает на сглаживающий RLC-фильтр filter A. Сформированное на его выходе напряжение вольтодобавки  $U_{Ta}$  поступает на клеммы 5 и 6, к которым подключается первичная обмотка вольтодобавочного трансформатора. Напряжение питания ШИП подается на клеммы 3 и 4.

На рис. 4 представлены результаты моделирования работы СЭЭС с устройством компенсации при подключении номинальной нелинейной нагрузки. Для отображения напряжения, тока нелинейной нагрузки и коэффициента нели-

нейных искажений в фазе А служат измерительные блоки pVA, pIA, блок измерения нелинейных искажений THD и осциллографы Score1, Score2.

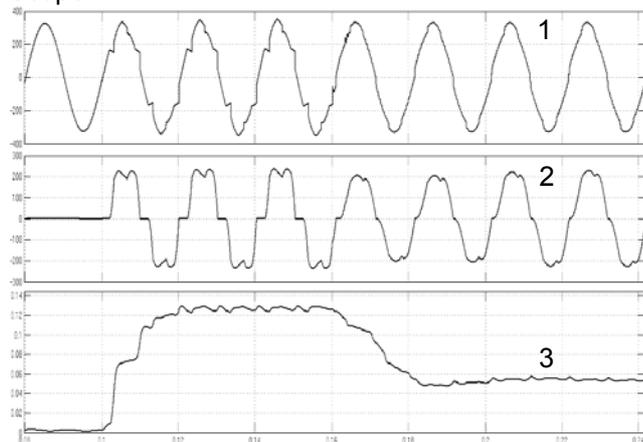


Рис. 4. Результаты моделирования при подключении нелинейной нагрузки: 1 – фазное напряжение; 2 – фазный ток; 3 – коэффициент нелинейных искажений напряжения

В момент времени  $t = 0,1$  с происходит подключение нелинейной нагрузки. При этом напряжение сети значительно искажается, а величина коэффициента нелинейных искажений достигает 12,5 %. В момент времени  $t = 0,16$  с включается устройство компенсации нелинейных искажений, что приводит к снижению  $K_{НИ}$  до 5,5 %. До этого ВДТ работал в режиме трансформатора тока, так как его первичная обмотка была зашунтирована ключами ШИП. Анализ диаграмм (рис. 4) показывает, что устройство обеспечивает сравнительно высокое быстродействие, которое можно оценить по времени переходного процесса, составляющему около 0,02 с.

Степень компенсации нелинейных искажений будет зависеть от того, насколько точно форма напряжения на первичной обмотке вольтодобавочного трансформатора УТа повторяет задающий сигнал  $U_{за}$ , представляющий собой сигнал суммы высших гармоник. Точность формирования напряжения УТа зависит от несущей частоты модуляции, параметров выходного фильтра ШИП, а также частотных свойств ВДТ. При построении модели была использована несущая частота модуляции 10 кГц и модель трансформатора с номинальной частотой 50 Гц. Диаграммы сигналов  $U_{за}$  и  $U_{Та}$ , полученные на осциллографе Score3, представлены на рис. 5.

Представленные результаты моделирования показывают достаточно хорошее, но не полное совпадение сигналов  $U_{за}$  и  $U_{Та}$ , чем объясняется остаточная величина коэффициента нелинейных искажений (5,5 %).

С помощью модели было исследовано влияние изменения мощности нелинейной нагрузки на величину коэффициента искажений напряжения. Мощности ступеней нагрузки составили 80, 110, 125 и 65 кВт, а моменты времени их подключения – 0,04, 0,13, 0,22 и 0,31 с соответственно. Результаты моделирования пред-

ставлены на рис. 6, где показано изменение коэффициента нелинейных искажений в СЭЭС без устройства компенсации (кривая 1) и с устройством (кривая 2).

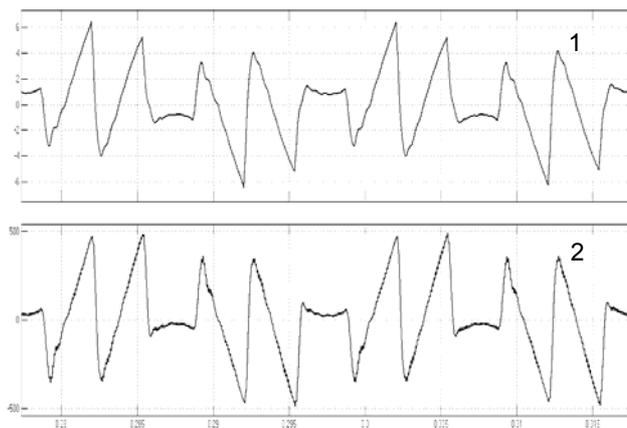


Рис. 5. Осциллограммы напряжений: 1 – сигнал задания ( $U_{за}$ ); 2 – выходное напряжение ШИП ( $U_{Та}$ )

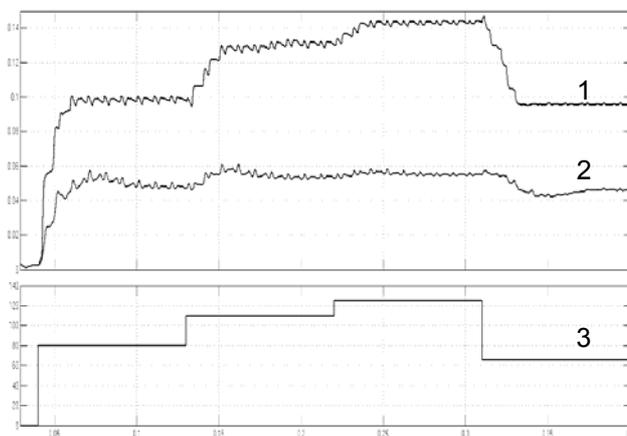


Рис. 6. Результаты моделирования работы СЭЭС: 1 – коэффициент нелинейных искажений без устройства компенсации; 2 – коэффициент нелинейных искажений с устройством компенсации; 3 – ступенчатое изменение нагрузки

Анализ осциллограмм (рис. 6) показывает, что использование устройства компенсации позволяет значительно снизить коэффициент нелинейных искажений и поддерживать его величину при различной мощности нелинейной нагрузки примерно на одном уровне (около 5 %).

#### Список литературы

1. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 2000. – 252 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

#### References

1. Anisimov, Ya.F., Vasil'ev, E.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovyykh elektroustanovok* [Electromagnetic coexistence of semiconductor

transformers and ship electric installations]. Leningrad, Sudostroenie, 1990. 264 p.

2. Zhezhelenko, I.V., Saenko, Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Electric energy quality indexes and their control at industrial plants]. Moscow, Energoizdat, 2000. 252 p.

3. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Electric device simulation in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

*Коробко Григорий Иванович,*

ФБОУВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»,

кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: tv-out@narod.ru

*Лебедев Василий Владимирович,*

ФБОУВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»,

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: valeb1@yandex.ru