

УДК 621.317.629.12

Г.И. Коробко, П.В. Ахлестин

**АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ  
НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВОЙ СЕТИ**

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»

Применение в судовой электроэнергетической системе мощных нелинейных потребителей, соизмеримых с мощностью источников, ведёт к увеличению нелинейных искажений напряжения. Это негативно влияет на работу многих элементов электростанции и, в первую очередь, на систему автоматики и радионавигацию. Решение проблемы для качественного питания наиболее ответственных потребителей обеспечивается, как правило, через пассивные или активные специальные устройства. Аналитическое сравнение вариантов компенсации нелинейных искажений напряжения показало целесообразность применения в сети дизель – электрохода преобразователя частоты или активного компенсатора. Эти оба способа обеспечивают низкий коэффициент нелинейных искажений напряжения (<2,0%), малые массогабаритные показатели и низкую стоимость. Увеличение мощности нелинейных потребителей на судах с гребными электрическими установками приводит к увеличению коэффициента нелинейных искажений напряжения в сетях единой электроэнергетической системе более 10%. В связи с этим актуальным направлением является разработка, создание и внедрение активных устройств компенсации искажений напряжения как в судовых, так и автономных сетях.

*Ключевые слова:* судовая электроэнергетическая система, высшие гармоники, наиболее ответственные потребители, активный компенсатор, преобразователь частоты, пассивный фильтр.

В настоящее время всё больше электрических потребителей на судах используют полупроводниковые преобразователи. Это мощные насосы (пожарные, балластные - осушительные, грузовые), для которых требуются системы плавного пуска и устройства регулирования частоты вращения, осуществляющиеся с помощью преобразователей частоты. Увеличение мощности и количества полупроводниковых преобразователей в судовой единой электроэнергетической системе (ЕЭС), приводит к увеличению коэффициента нелинейных искажений -  $K_{ни}$ , который регламентирован Российским Морским Регистром Судоходства - РМРС [1] и Российским Речным Регистром – РРР [2]. Предельно допустимое значение коэффициента нелинейных искажений -  $K_{ни}$  составляет 10%.

Рассмотрим однопалубный теплоход "Prospero", построенный для компании Rederi AB Donsötank в 2000 г. [3]. Назначение судна: перевозка сырой нефти, нефтепродуктов и химических продуктов, в том числе продуктов метанольной группы, без ограничения по температуре вспышки, с обеспечением перевозки груза с поддержанием температуры 60°C. Судно имеет единую электроэнергетическую систему с электродвижением. На рис. 1 представлена функциональная схема ЕЭС химовоза "Prospero", в состав которой входят:

1) четыре дизель - генератора – ДГ-1 ÷ ДГ-4, мощностью 2100 кВА, предназначенных для обеспечения электроэнергией шин ЕЭС;

2) дизель - генератор ДГ- 5, мощностью 560 кВА, предназначенного для обеспечения питания шин ГРЩ;

3) гребная электрическая установка – ГЭУ (Main Propulsion), мощностью 5100 кВт, работающей на повышенном напряжении от двух преобразователей частоты UZ1 и UZ2. Наличие двух преобразователей частоты, повышает надёжность питания ГЭУ за счёт резервирования;

4) четырнадцать преобразователей частоты – ПЧ (auxiliary freq. convertors) с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, которые предназначены для насосов грузовой и балластной систем;

5) подруливающее устройство (Bow Thr. motor), мощностью 620 кВт с преобразователем частоты UZ3;

б) система электродвигатель – генератор MG-1 и MG-2, которая необходима для обеспечения высоким качеством напряжения наиболее ответственных потребителей - НОП: система автоматики, пожарная и авральная сигнализация, радионавигация и др. Система MG включает в себя синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов и синхронный генератор. Наличие двух систем MG повышает надёжность питания НОП за счёт резервирования;

7) пять трансформаторов - T1÷T3 при повышении напряжения на ГЭУ, предназначенных для питания преобразователей частоты UZ1÷ UZ3, и T4÷T5 – для понижения напряжения на шинах ГРЩ.

Большая мощность потребителей (ГЭУ, ПУ, насосов и др.) с преобразователями частоты приводит к увеличению  $K_{\text{НИ}}$  напряжения в сетях ЭЭС более 10%.

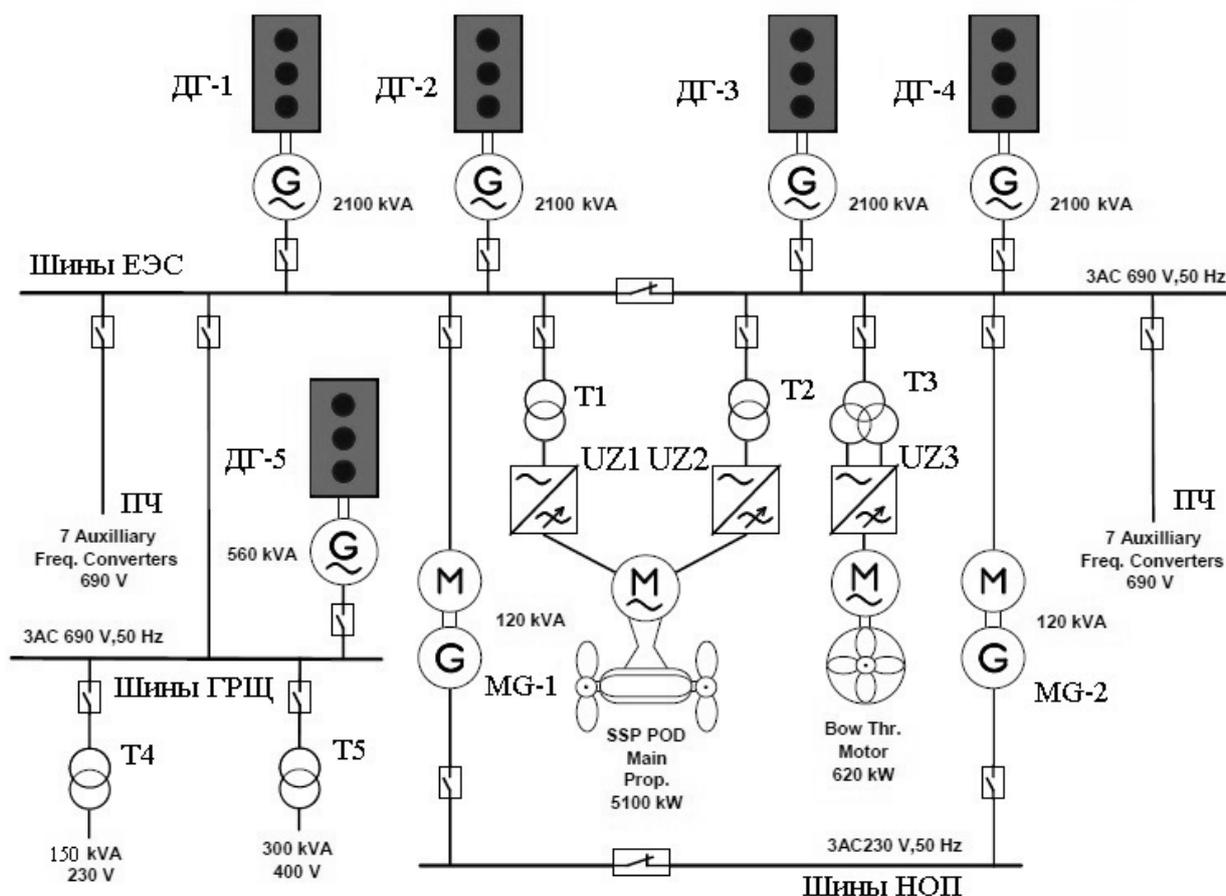


Рис. 1. Функциональная схема ЭЭС химовоза с электродвижением “Prospero”

Поэтому система MG вырабатывает электроэнергию высокого качества и подаёт напряжение на отдельную шину для питания НОП. У данной системы есть недостатки:

- высокие массогабаритные показатели;
- низкий коэффициент полезного действия,  $\eta_{\text{общ}} \approx 0,9$ ;
- сравнительно высокая стоимость.

### Пассивные фильтры для питания НОП

На рис. 2, а представлен вариант с общим фильтром. Для увеличения надёжности системы с одиночным фильтром - Ф устанавливают резервный фильтр – РФ такой же мощности. На судах применяется вариант, когда свой фильтр используется на каждый наиболее ответственный потребитель – П, как показано на рис. 2, б. Этот вариант имеет преимущество пе-

ред предыдущем: при выходе из строя одного или нескольких фильтров имеется возможность заменить их, при наличии ЗИПа.

При высоком  $K_{ни}$  в сетях ЕЭС необходимо устанавливать фильтры, мощность которых должна быть на 20% больше номинальной мощности приёмников. При этом возрастают их массогабаритные показатели.

Фильтр представляет собой несколько параллельно и последовательно соединенных индуктивностей и ёмкостей [4]. Типы пассивных фильтров показаны на рис. 3. Схема узкополосного резонансного фильтра показана на рис. 3, а. Он позволяет ослабить высшие гармоники, частоты которых близки к частоте 50 Гц. Схема широкополосного фильтра второго порядка показана на рис. 3, б. На заданной частоте, которая устанавливается с помощью R и C, фильтр имеет небольшое сопротивление, благодаря чему происходит ослабление гармоник выше несущей частоты (обычно до 10-й гармоники). Частотную характеристику можно варьировать, у этого фильтра с помощью R. На рис. 3, в показан широкополосный фильтр третьего порядка; его преимущество перед резонансным фильтром второго порядка заключается в том, что потеря энергии на основной частоте и частотах низших гармонических составляющих будет ниже.

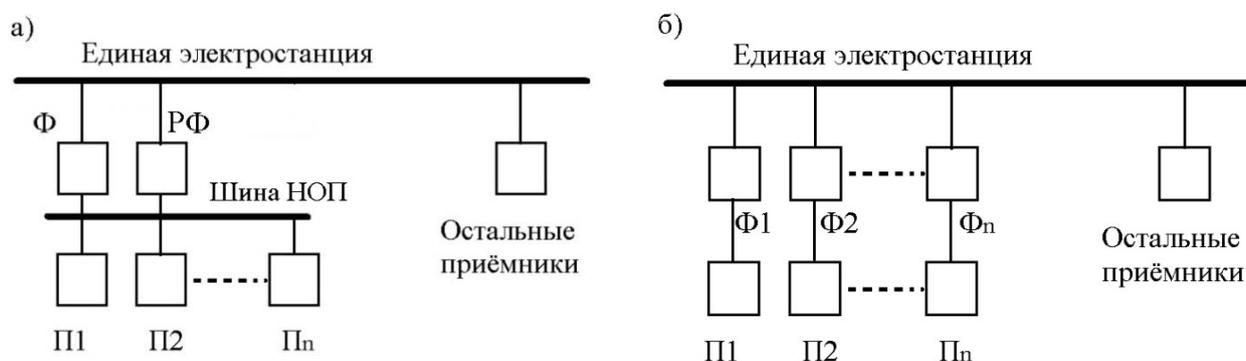


Рис. 2. Блок - схема применения для питания шин НОП с общим фильтром (а); множеством фильтров (б)

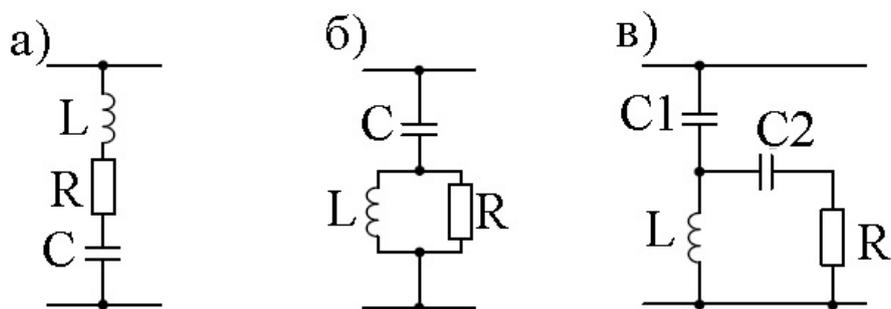


Рис. 3. Типы пассивных фильтров высших гармоник

### Дизель - генератор для питания шин наиболее ответственных потребителей

Для питания НОП устанавливается дополнительный дизель - генератор, показанный на рис. 4. У этого варианта, помимо недостатков системы МГ, существуют собственные минусы: необходимость применения переключки между ЕЭС и шиной НОП для бесперебойного питания наиболее ответственных потребителей при выходе из строя дополнительного дизель-генератора; требуется установить пассивный фильтр в переключку.

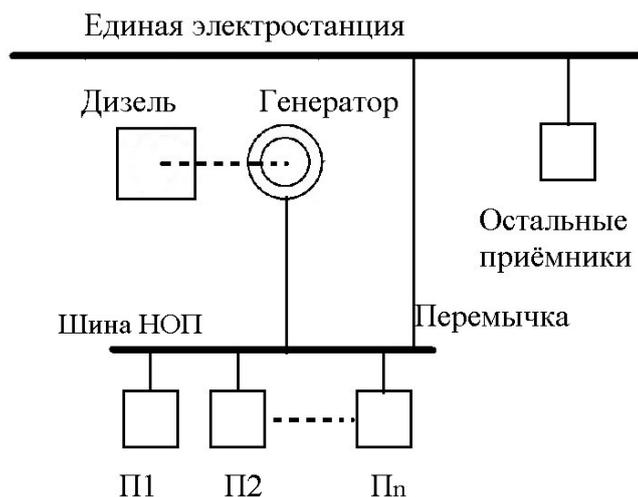


Рис. 4. Блок - схема дополнительного дизель - генератора, работающего на шину НОП

### Применение преобразователя частоты для питания шины НОП

Блок - схема преобразователя частоты (ПЧ), работающего на шину НОП, показана на рис. 5 [5]. ПЧ состоит из выпрямителя – В, инвертора – И и фильтра –  $L_{\phi}C_{\phi}$ .



Рис. 5. Блок – схема преобразователя частоты, работающего на шину НОП

Для компенсации нелинейных искажений на выходе ПЧ используется синусный фильтр. Он представляет собой Г-образный фильтр низких частот, состоящий из дросселя и конденсатора малого номинала. Этот вариант позволяет снизить  $K_{НИ} \leq 1\%$  при невысокой стоимости и небольших массогабаритных показателях.

ПЧ сам является источником нелинейных искажений. Однако на судах большой мощности ЕЭС они практически незаметны.

### Применение активного компенсатора для питания шин НОП

Блок-схема активного компенсатора - АК[6] в ЕЭС представлена на рис. 6. Принцип действия активного компенсатора, состоит в передаче в сеть высших гармоник напряжения, которые компенсирует высшие гармоники напряжения на шинах единой электростанции в противофазе. АК состоит из блока управления - БУ, блока питания – БП и вольтдобавочных трансформаторов – ВДТ.

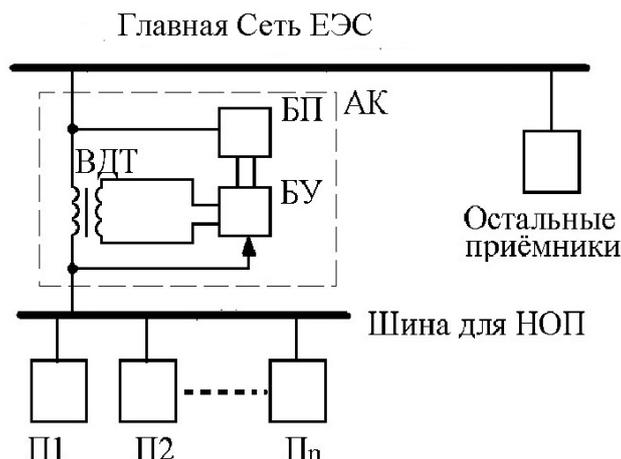


Рис. 6. Блок - схема активного компенсатора в ЭЭС

Блок управления состоит из устройства выделения сигнала суммы высших гармоник напряжения единой электростанции и широтно-импульсного преобразователя, блок питания состоит из трёхфазного мостового выпрямителя.

Активный компенсатор, подключенный к главной сети ЭЭС с  $K_{ни}$  10% и более, снижает коэффициент нелинейных искажений напряжения на шинах НОП до  $3 \div 4\%$ . АК имеет небольшие массогабаритные показатели и сравнительно низкую стоимость. При установке в активный компенсатор специальный вольтодобавочный гибридный трансформатор тока – напряжения может снизить  $K_{ни}$  до  $1 \div 2\%$ ; более чем в два раза уменьшаются массогабаритные показатели трансформаторов.

Недостатками системы с АК являются: низкая надёжность из-за большого количества элементов и ввиду начального этапа внедрения АК в судовые сети, малое применение по сравнению с остальными устройствами.

Два последних метода уменьшения коэффициента нелинейных искажений показывают, что на судах с ЭЭС применение преобразователя частоты для питания НОП практически не оказывает негативного влияния на напряжение судовой электростанции.

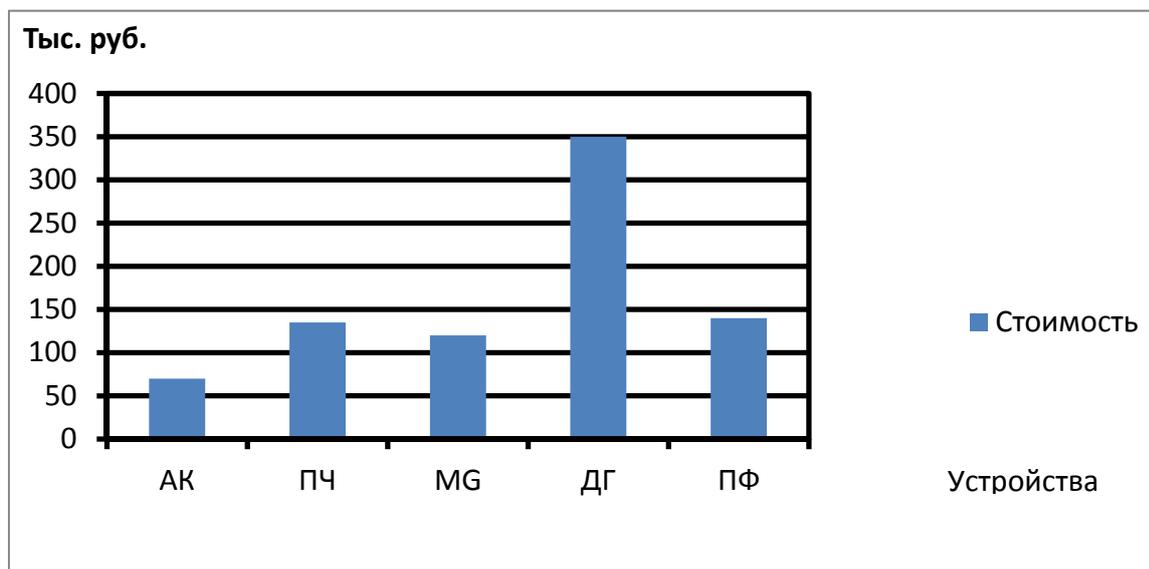


Рис. 7. Стоимость устройств мощностью 30 кВт, для компенсации нелинейных искажений на шинах НОП

При большой мощности наиболее ответственных потребителей применение активного компенсатора позволяет снизить уровень  $K_{\text{НИ}}$  до требуемых значений, даже не смотря на то, что мощность источников нелинейных искажений может достигать 85–90 % мощности ЭЭС.

Экономический эффект от применения различных способов компенсации нелинейных искажений представлен на рис. 7. Наиболее выгодный способ - применение активного компенсатора – АК, примерная стоимость не будет превышать 60 000 – 70 000 рублей с учётом применения нового типа вольтодобавочных трансформаторов. Стоимость системы МГ не будет превышать 130 000 рублей. Если применять пассивные фильтры, то стоимость устройства компенсации будет в два раза больше, чем с АК. Применение преобразователя частоты с синусным фильтром не превысит двукратную стоимость АК. Отдельный дизель - генератор для питания шин НОП будет стоить 300 000 – 450 000 рублей, в зависимости от производителя. Данная стоимость была получена для мощности наиболее ответственных потребителей 25 кВА, требуемая мощность устройства активной компенсации, фильтра или дополнительного дизель - генератора составляет 30 кВА.

#### Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т. 3. – СПб., 2015.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т. 3. – М., 2008.
3. Reference list siship cis drive LV Siemens. Каталог электроходов на низком напряжении Siemens, 2014 г.
4. **Боярская, Н. П.** Широкополосные силовые фильтры гармоник / Н.П. Боярская, В. П. Довгун, Е. С. Шевченко, Д. Э. Егоров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 34-38.
5. **Коробко, И.Г.** Регулирование выходного напряжения преобразователя частоты дизель – генераторного агрегата с изменяемой частотой вращения // Вестник ВГАВТ. – 2016. – №48. – С. 279-285.
6. **Лебедев, В.В.** Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: дисс. ... канд. техн. наук, 2014. Нижний Новгород.

*Дата поступления  
в редакцию 20.10.2017*

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

#### ANALYSIS OF THE VARIANTS OF COMPENSATION OF NONLINEAR DISTORTION OF VOLTAGE IN THE SHIPBOARD NETWORK

FGBOU VO "Volga State University of Water Transport"

**The state of the question:** The use of powerful nonlinear consumers in the ship power system commensurate with the power of the sources leads to an increase in the nonlinear voltage distortions. This negatively affects the operation of many elements of the power plant and, first of all, the automation system and radio navigation. The solution of the problem for high-quality nutrition of the most responsible consumers is provided, as a rule, through passive or active special devices.

**Methods of research:** Analytical comparison.

**Results:** An analytical comparison of the options for compensating of nonlinear voltage distortions showed the expediency of using a frequency converter or an active compensator in the network of a diesel electric motor. These two methods provide a low coefficient of voltage nonlinear distortion (<2.0%), small weight and dimensions and low cost.

**Conclusions:** The increase in the power of non-linear consumers on ships with propulsion systems leads to an increase in the coefficient of nonlinear voltage distortion in networks of a single electric power system of more than 10%. In this regard, the current direction is the development, creation and implementation of active voltage distortion compensation devices, both in shipboard and autonomous networks.

*Key words:* ship electric power system, higher harmonics, the most responsible consumers, active compensator, frequency converter, passive filter.