

УДК 621.317.629.12

Д.В. Умяров

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СУДОВ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

АО КБ «Вымпел», г. Н. Новгород

Предложены математические имитационные модели и инженерная методика расчета коэффициента ТНДи в электроэнергетических системах судов с электродвижением. Применение статических преобразователей электроэнергии в системах электродвижения судов обеспечивает высокие технико-экономические показатели, повышает маневренность судна, позволяет оптимизировать компоновку машинных помещений, обеспечивает снижение совокупного расхода топлива судном. Однако появляется необходимость обеспечивать электромагнитную совместимость мощного статического преобразователя электроэнергии с питающей сетью, управляемым электродвигателем. Современные отечественные инструменты имитационного математического моделирования позволяют на этапе проектирования выполнить оценку величины коэффициента несинусоидальности кривой напряжения и тока. На основе полученных результатов расчета можно сформировать требования к параметрам главных электрических машин (генераторов и двигателей) и выбрать фильтры. Результаты расчета коэффициента гармонических искажений напряжения по имитационным математическим моделям сопоставлены с измерениями в процессе заводских ходовых испытаний судов, в результате чего подтверждена пригодность разработанных моделей для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** гармонические искажения, имитационное математическое моделирование, несинусоидальность, проектирование, спектральный состав, электродвижение, электромагнитная совместимость.

### 1. Введение

Мощность статических преобразователей в системах электродвижения судов близка к мощности генераторов электростанции судна. Руководящими документами предписывается выполнять оценку несинусоидальности кривой напряжения судовой сети, если суммарная мощность, потребляемая статическими преобразователями, превышает 5 % от суммарной полной мощности генераторов [1].

Несинусоидальность потребляемого тока приводит к возникновению на импедансах сети и синхронных генераторов падений напряжения, которые искажают форму напряжения сети. Степень искажения напряжения судовой электроэнергетической системы определяется мощностью статических преобразователей, их схемой, индуктивным сопротивлением генератора и сети высшим гармоникам, глубиной регулирования напряжения и др.

Наличие высших гармоник в напряжении судовой сети негативно сказывается на работе как источников, так и потребителей электроэнергии [1-3]. В электрических машинах высшие гармоники вызывают дополнительные потери, что приводит к повышению общей температуры и местным нагревам. В кабельных линиях высшие гармоники приводят к ускорению процесса старения изоляции и дополнительным потерям в линиях. Под действием высших гармоник может быть нарушена нормальная работа систем защиты и автоматики, возникать ложные срабатывания, сбои в работе устройств синхронизации и автоматического распределения нагрузки. Негативно воздействуют высшие гармоники и на сами статические преобразователи, ухудшаются условия коммутации, возникают сбои в системе управления, что может увеличивать пульсации на стороне выпрямленного тока.

## **II. Обеспечение электромагнитной совместимости на этапе проектирования**

На этапе проектирования судов требуется проверить соответствие системы электродвижения требованиям, предъявляемым Российским морским регистром судоходства. Одной из важнейших характеристик системы электродвижения является электромагнитная совместимость установки с судовой сетью. Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства, коэффициент гармонических искажений напряжения не должен превышать 10 % [1, 2].

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_c$  – действующее напряжение сети;  $U_n$  – напряжение гармонической составляющей  $n$ -го порядка;  $n$  – порядок высшей гармонической составляющей.

В настоящее время для оценки коэффициента гармонических искажений напряжения используются имитационные математические модели. Математические модели позволяют провести количественную и каче-

ственную оценку работы гребной электроустановки, а в ряде случаев сопоставить результаты моделирования с данными, полученными на существующих образцах альтернативных систем. Моделирование также дает возможность опробовать и отработать новые технические решения без создания прототипов.

### III. Краткий обзор современных систем электродвижения

В настоящее время электрические гребные установки применяются преимущественно на следующих типах судов: круизные суда, паромы, буровые суда с системой динамического позиционирования, плавучие нефтедобывающие платформы, танкеры, кабелеукладочные суда, трубоукладчики, ледоколы и другие ледоходные суда, суда снабжения и вспомогательные суда военно-морского флота. В настоящее время проводятся также исследования и оценка возможности использования электрических гребных установок в проектировании новых судов для существующих и новых областей применения. Классификационная структура систем электродвижения показана на рис. 1.

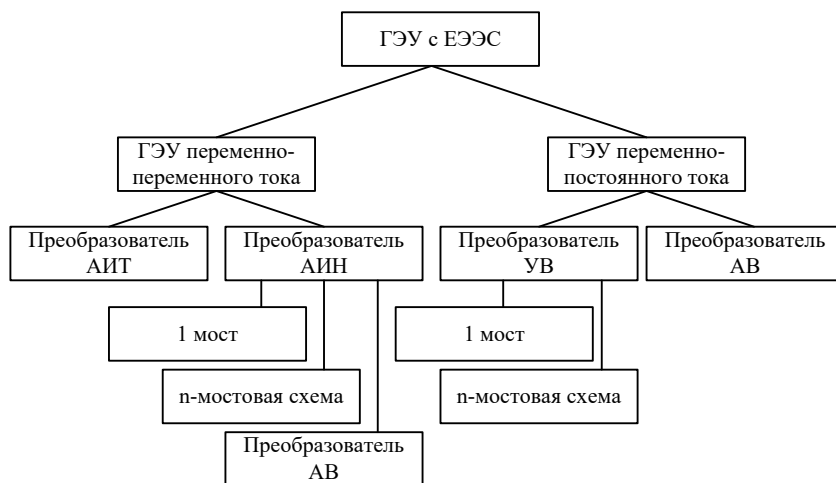


Рис. 1. Классификационная структура статических преобразователей в системах электродвижения судов:

ГЭУ – гребные электроустановки; ЕЭЭС – единые электроэнергетические системы;

АИТ – автономный инвертор тока; АИН – автономный инвертор напряжения;

УВ – управляемый выпрямитель; АВ – активный выпрямитель

Ниже кратко описаны наиболее часто встречающиеся структуры систем электродвижения судов среднего и большого водоизмещения.

Схема переменного-постоянного тока для модернизации судов с высоким ледовым классом показана на рис. 2. Она применяется в случае, если судну требуется ремонт энергоустановки и продление срока эксплуатации. Традиционно схема имеет в составе электростанцию с синхронными генераторами  $G$ ; согласующие трехобмоточные трансформаторы  $Tr$ ; управляемые выпрямители (УВ) на тиристорах для регулирования напряжения на якоре гребного двигателя; резистор для динамического торможения  $R_T$  и сглаживающий дроссель  $L_{др}$ ; реверсивные тиристорные возбудители (РТВ) для регулирования тока возбуждения; сдвоенный гребной малооборотный электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, работающий на гребной винт (ГВ) фиксированного шага.

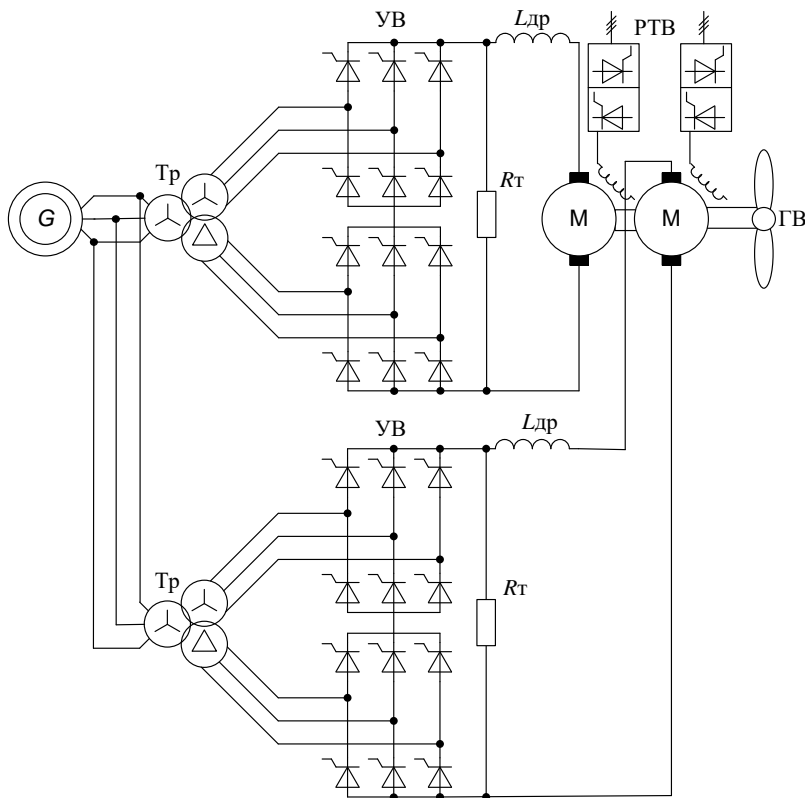


Рис. 2. Система электродвижения переменного-постоянного тока морского транспортного судна мощностью 7 МВт:

$Tr$  – трансформатор; УВ – управляемый выпрямитель;  
 РТВ – реверсивные тиристорные возбудители; ГВ – гребной винт

Данная структура позволяет сохранить гребной двигатель и движитель, сохранить параметры главных двигателей и обслуживающих систем. Новое оборудование пропульсивной установки может быть размещено в существующих помещениях судна без значительной реконструкции корпуса судна.

Недостатком данной структуры является сравнительно большое значение коэффициента гармонических искажений напряжения судовой сети ТНДu, сравнительно большие потери электроэнергии и сравнительно низкий коэффициент мощности гребной электроустановки особенно на малых скоростях хода судна.

Система электродвижения (СЭД) переменного тока с 12-пульсным выпрямителем и согласующим трансформатором показана на рис. 3.

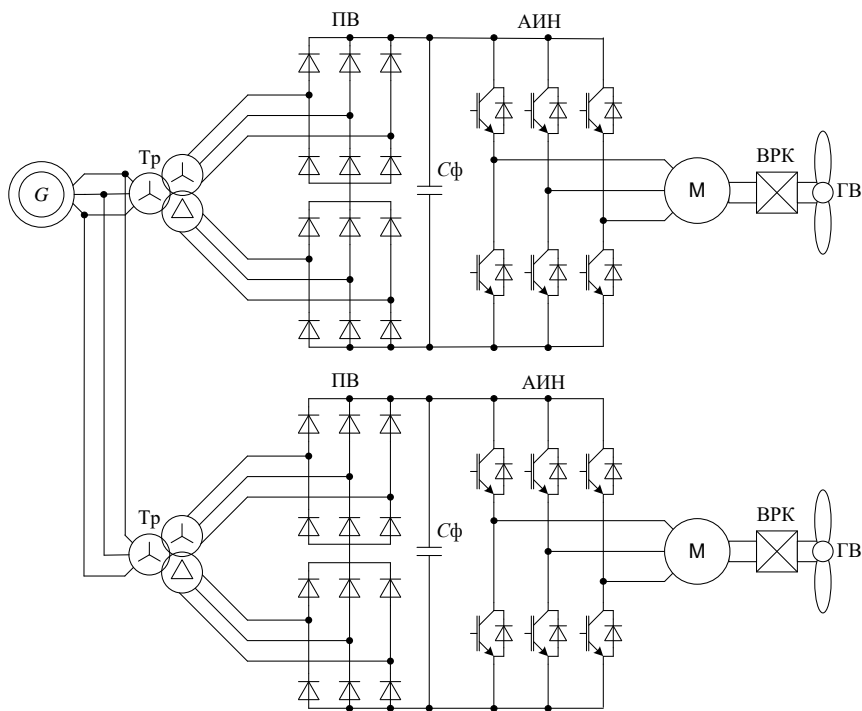


Рис. 3. Система электродвижения буксира-спасателя мощностью 4 МВт с двухуровневым инвертором и 12-пульсным выпрямителем:  
 Tr – трансформатор; ПВ – пассивный выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; ВПК – винторулевая колонка; ГВ – гребной винт

В основе схемы лежит наиболее распространенный тип преобразователей частоты с пассивным выпрямителем (ПВ) и двухуровневым инвертором напряжения, работающим в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этой схеме две трехфазные мостовые схемы, фазные ЭДС которых сдвинуты на  $30^\circ$  из-за разных схем соединений вторичных обмоток трансформатора, работают на общую нагрузку. Это улучшает форму общего тока, потребляемого из сети. В результате пульсации на нагрузке становятся 12-кратными, а 5-я и 7-я низшие гармоники первичных токов каждого из мостов взаимно компенсируются в общем токе, потребляемом из сети. Низшими гармониками, генерируемыми в сеть, становятся 11-я и 13-я [1]. Достоинством схемы является относительная простота. К недостаткам относятся большие масса, габариты, тепловыделения.

Многоуровневые преобразователи частоты применяются в системах электродвижения большой (более 7 МВт) мощности судов большого водоизмещения, как рациональное решение задачи эффективного обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя с двигателем и с судовой сетью [1]. Схема электроэнергетической системы ледокола мощностью 15 МВт с системой электродвижения на базе многоуровневого преобразователя частоты показана на рис. 4.

За счет большего количества уровней фазного напряжения инвертора его форма близка к синусоидальной, входной и выходной ток также практически синусоидальный. Увеличение количества уровней выходного напряжения требует увеличения количества силовых ключей и приводит к увеличению тепловыделений, массы и габаритов преобразователя и системы электродвижения в целом.

СЭД с преобразователями частоты с активным выпрямителем напряжения (АВН) хорошо зарекомендовала себя на судах с высоким ледовым классом (рис. 5). Активные выпрямители напряжения позволяют потреблять из сети ток заданной формы и обеспечивать при регулировании  $\cos\varphi \approx 1,0$ . Значительным достоинством конструкции систем электродвижения на базе этих преобразователей является отсутствие согласующего трансформатора на входе, что снижает массу, габариты и тепловыделения такой системы электродвижения в целом.

#### **IV. Математическая имитационная модель единой электроэнергетической системы судна с электродвижением**

На этапе разработки технического проекта составляется имитационная математическая модель судовой электроэнергетической системы. Она может быть сформирована в среде схемотехнического моделирования, в качестве которой выбрана перспективная отечественная система SimInTech.

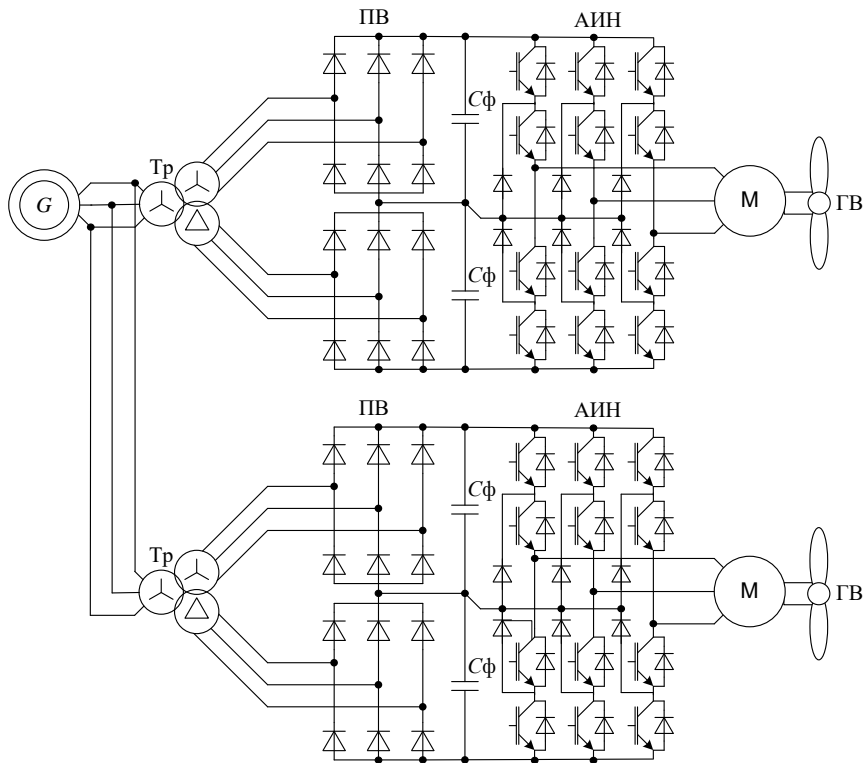


Рис. 4. Система электродвижения ледокола мощностью 15 МВт с трехуровневым преобразователем частоты:

Tr – трансформатор; ПВ – пассивный выпрямитель;  
АИН – автономный инвертор напряжения; ГВ – гребной винт

SimInTech – среда модельно ориентированного проектирования систем автоматического управления, создания математических моделей, алгоритмов и интерфейсов управления, а также автоматической генерации кода для программируемых контроллеров и графических дисплеев. Среда схемотехнического моделирования содержит библиотеки моделей элементов судовой электроэнергетической системы и типовые модели систем и обеспечивает передачу топологии набранной схемы с параметрами элементов в программы комплексного программного обеспечения. Программа позволяет выполнить анализ электромагнитных и электромеханических процессов [1].

При создании имитационной математической модели принимаются допущения. Допущения в математических моделях электрических маши-

нах: отсутствует насыщение; опускаются индуктивности намагничивания и собственные емкости трансформаторов; отсутствуют потери мощности на вихревые токи и гистерезис, отсутствует гистерезис и вытеснение тока в обмотках; синусоидальное распределение в пространстве намагничивающей силы и магнитной индукции; независимость индуктивностей рассеяния от положения ротора; полная симметрия статора. Допущения в математических моделях статических преобразователей: не учитываются собственные емкости вентилялей; не учитываются индуктивности и активные сопротивления конденсаторов; не учитываются индуктивности и активные сопротивления соединительных проводов. Перечисленные допущения позволяют сохранить действительную картину процессов, протекающих в системе.

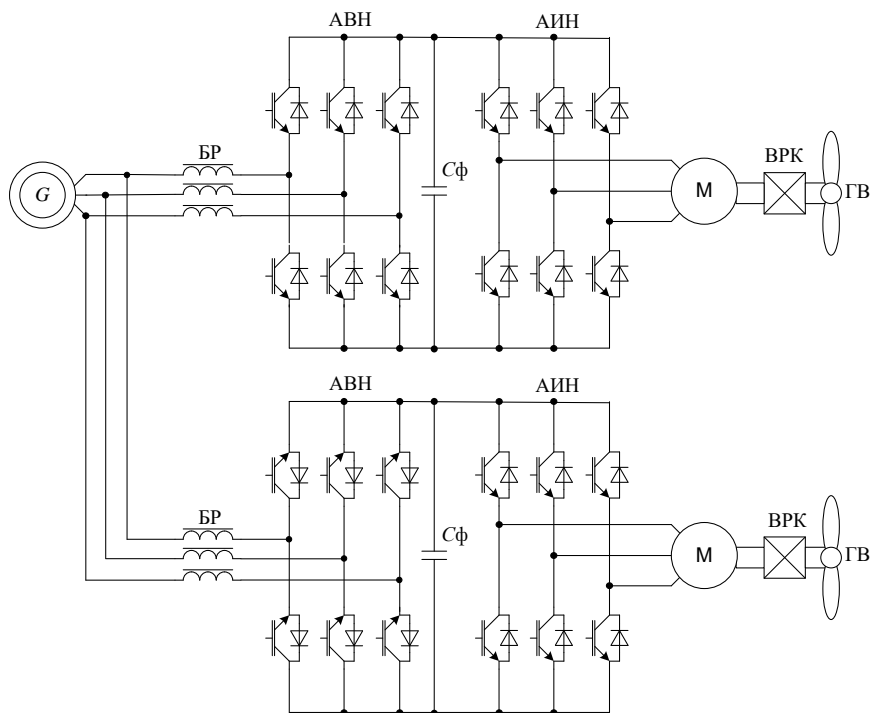


Рис. 5. Система электродвижения ледокола мощностью 7 МВт с преобразователем частоты с активным выпрямителем напряжения: БР – реактор; ПВ – активный выпрямитель; АВН – автономный инвертор напряжения; ВРК – винторулевая колонка; ГВ – гребной винт



На рис. 6 показан фрагмент имитационной математической модели электроэнергетической системы судна с электродвижением в среде SimInTech, а на рис. 7 – график расчетной кривой напряжения судовой сети при работе системы электродвижения в установившемся режиме и фрагмент диалогового окна инструмента «Спектральный анализ».

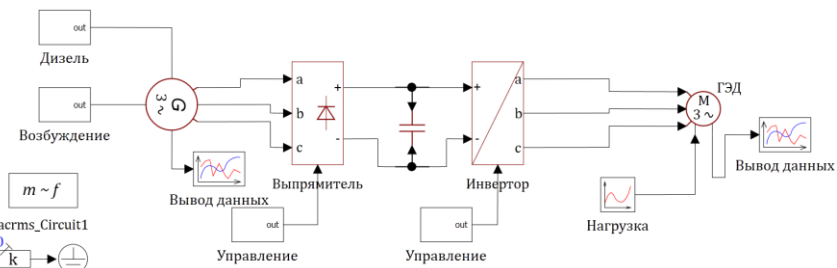


Рис. 6. Фрагмент имитационной математической модели единой электроэнергетической системы судна с электродвижением

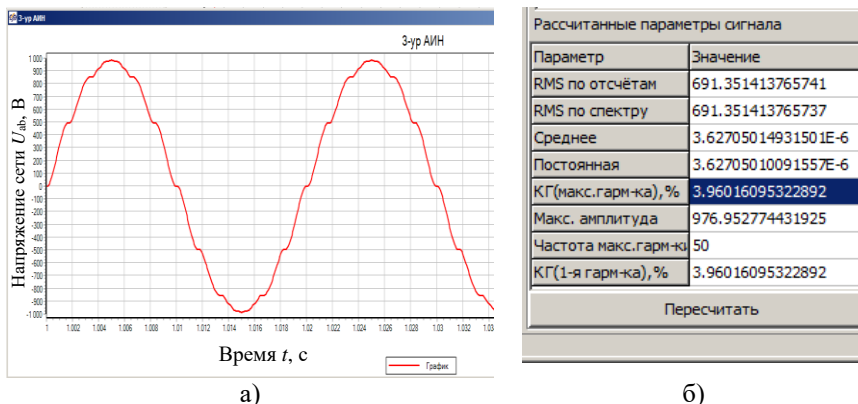


Рис. 7. Расчетная кривая напряжения судовой сети при работе 3-уровневого преобразователя частоты (а) и фрагмент диалогового окна инструмента «Спектральный анализ» в SimInTech (б)

Разработанные имитационные математические модели позволяют выполнять расчетную оценку основного критерия качества электроэнергии судовой сети – коэффициента гармонических искажений напряжения. Обобщая опыт постройки судов с различными типами систем электродвижения, можно сравнить последние по нескольким критериям: удельная масса системы (кг/кВт); удельный объем системы ( $\text{м}^3/\text{МВт}$ ); потери (% от мощности двигателя) и величина искажений напряжения судовой сети

*THD*. Данные показатели для рассмотренных структур систем электродвижения (СЭД) представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Сравнение вариантов гребных электроустановок

Показатель	СЭД ~/= тока с УВ		СЭД ~ тока с преобразователем частоты с неуправляемым 12-пульсным выпрямителем и 2-х уровневый инвертором	СЭД ~ тока с 3-х уровневый инвертором	СЭД ~ тока с ПЧ с АВН
	расчет	опыт			
Удельная масса системы, кг/кВт	22,0		9,5	7,1	6,6
Удельный объем системы, м <sup>3</sup> /МВт	25,2		12,9	18,1	10,1
Частота ШИМ инвертора, Гц	–		2000	1000	1000
Искажения напряжения судовой сети THDu, %	расчет	8,1	7,0	3,3	2,3
	опыт	8,7	8,1	3,8	2,6
Потери (% от мощности двигателя)	13,9		9,88	9,182	9

Данная информация полезна при проектировании новых судов и выборе типа и структуры системы электродвижения.

#### В. Заключение

1. Предложенные математические имитационные модели и инженерная методика расчета коэффициента THDu в электроэнергетических системах судов с электродвижением отличаются от существующих следующим: учитывается, что мощность статических преобразователей систем электродвижения близка к мощности генераторов электростанции; длина линий электропередач между источниками и потребителями мала (сопротивление линии передачи менее 0,5 % от сопротивления генератора); учитывается несимметричность по продольной и поперечной осям магнитного сопротивления синхронного генератора.

2. Выполнен сравнительный анализ различных топологий электроэнергетической системы судна с системой электродвижения по критериям удельной массы киловатта полезной мощности, удельного объема пространства киловатта полезной мощности, удельным потерям

электроэнергии на один киловатт полезной мощности, величине коэффициента ТНДu несинусоидальности кривой напряжения в судовой силовой распределительной сети. Показано, что системы электродвижения до 7 МВт/1 кВ целесообразно строить на базе преобразователя частоты с активным выпрямителем, более 7 МВт/1 кВ – на базе ПЧ с многоуровневым инвертором.

3. Экспериментальными исследованиями на судах в процессе их ходовых испытаний подтверждена достоверность результатов расчетов, выполненных с использованием разработанных автором математических имитационных моделей.

© Умяров Д.В., 2019

### Библиографический список

- [1] РД 5.6130. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета коэффициента несинусоидальности кривой напряжения.
- [2] Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990. – 263 с.
- [3] Грунтович Н.В. Анализ влияния высших гармоник на надежность эксплуатации кабельных линий // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции. Декабрь 22, 2011, Нижний Новгород, Россия. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. С. 75-79.
- [4] Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. Москва: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
- [5] Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI «Электрооборудование», 2018. – 226 с.
- [6] Шейнхович В.В., Климанов О.Н., Пайкин Ю.И., Зубарев Ю.Я. Качество электрической энергии на судах: Справочник. Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
- [7] Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- [8] Храмшин Р.Р., Храмшин Т.Р., Храмшина Е.А., Корнилов Г.А. Многоуровневый высоковольтный преобразователь частоты для электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 3. С. 191-196.
- [9] Sim In Tech – среда создания математических моделей. [Электронный ресурс]. URL: <http://simintech.ru/> (дата обращения 18.09.2019).

D.V. Umiarov

## ENSURING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRIC RECEIVERS IN POWER SYSTEMS OF VESSELS WITH ELECTRIC MOTION AT DESIGN STAGE

JSC DO «Vypel»  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The use of static electric power converters in ship electric propulsion systems provides high technical and economic indicators, increases the maneuverability of the ship, allows optimizing the layout of engine rooms, and reduces the total fuel consumption of the ship. However, it becomes necessary to ensure electromagnetic compatibility of a powerful static power converter with a power supply controlled by an electric motor. Modern domestic tools of simulation mathematical modeling allow to evaluate the value of the coefficient of non-sinusoidality of the voltage and current curves at the design stage. Based on the obtained calculation results, it is possible to formulate requirements for the parameters of the main electrical machines (generators and motors), and select filters parameters. Comparison of the results of calculating the harmonic distortion coefficient of the voltage using simulation mathematical models with measurements in the process of factory ship sea trials confirms the suitability of the developed models for engineering calculations.

**Keywords:** design, electromagnetic compatibility, electric motion, harmonic distortion, non-sinusoidality, simulation mathematical modeling, spectral composition.

### References

- [1] RD 5.6130. Sudovyie elektroenergeticheskiye sistemy. Metody rascheta koefitsiyenta nesinusoidal'nosti krivoy napryazheniya. (RD 5.6130. Ship electric power systems. Methods for calculating the coefficient of non-sinusoidality of the voltage curve) (in Russian).
- [2] Ya.F. Anisimov and E.P. Vasiliev, *Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok (Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and marine electrical installations)*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1990 (in Russian).
- [3] N.V. Gruntovich, «Analiz vliyaniya vysshikh garmonik na nadezhnost' ekspluatatsii kabel'nykh liniy (Analysis of the influence of higher harmonics on the reliability of cable lines operation) », in proc. *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki (Actual problems of the electric power industry)*, 2011 (in Russian).
- [4] A. Kusko and M.T. Thompson, *Power quality in electrical systems*. McGraw-Hill, 2007.
- [5] Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. XI «Elektrooborudovaniye» («Russian Maritime Register of Shipping.

- Rules for the classification and construction of ships. Part XI. Electrical Equipment», 2018 (in Russian).
- [6] V.V. Sheinkhovich, O.N. Klimanov, Yu.I. Paykin and Yu.Ya. Zubarev, *Kachestvo elektricheskoy energii na sudakh: Spravochnik (Electric Energy Quality on Ships)*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1988 (in Russian).
- [7] M.V. Gelman, M.M. Dudkin and K.A. Preobrazhenskiy, *Preobrazovatel'naya tekhnika (Conversion technology)*. Chelyabinsk: Publishing Centre SUSU, 2009 (in Russian).
- [8] R. Hramshin, T. Hramshin, E. Hramshina, G. Kornilov, «The multilevel high-voltage converter of frequency for the electric drive», *News of the Tula state university. Technical sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 191-196, 2010.
- [9] Sim In Tech is a mathematical model creation environment. [Online]. Available at: <http://simintech.ru/> [Accessed: Sept. 18, 2019].