УДК 621.311

Д. М. Кахайли, Г. С. Ясаков, Д. Б. Яковлев
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Обеспечение качества электроэнергии в единых корабельных электроэнергетических системах при наличии мощных статических преобразователей

Рассматриваются вопросы обеспечения качества электроэнергии в единых корабельных электроэнергетических системах при наличии мощных статических полупроводниковых преобразователей в системе электродвижения, в том числе влияние изменения значения частоты вращения гребного электродвигателя в системе электродвижения по частотному закону на всех ступенях преобразования электроэнергии в единых корабельных электроэнергетических системах.

Единые корабельные электроэнергетические системы (ЕКЭС), гребной асинхронный двигатель (ГЭД), система электродвижения (СЭД), синхронные генераторы, электродвигатели (ЭД), система «АЗИПОД», преобразователи частоты, конденсаторы, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), пассивный и активный фильтры

В проектировании и создании корабельных электроэнергетических систем (КЭС) наблюдается тенденция обеспечения общекорабельных потребителей, систем электродвижения (СЭД) и, возможно, перспективных видов оружия от единых источников электроэнергии, как правило синхронных генераторов, т. е. создание единых электроэнергетических систем (ЕКЭС). Обеспечение систем электродвижения, как правило, осуществляется с помощью мощных статических преобразователей. Общеизвестны преимущества статических преобразователей перед электромашинными. Существенным их недостатком оказывается генерация в систему высших гармоник. Проблема усугубляется, если мощность преобразователей соизмерима с мощностью источников электроэнергии [1]. Такое соотношение реализуется при наличии систем электродвижения. Высшие гармоники ухудшают энергетические показатели комплекса, создают проблему электромагнитной совместимости, ухудшают виброшумовые характеристики электроприводов, повышают тепловыделения и пр. Встает задача поиска различных методов борьбы с высшими гармониками. Желательно в исследованиях охватить всю совокупность элементов, влияющих друг на друга, т. е. всю систему в целом. В эквивалентной единой корабельной электроэнергетической системе, представленной на рис. 1 (где $ЭСГ_1$ – эквивалентный синхронный генератор; $ЭСН_5$ – эквивалентная статическая нагрузка; $ЭАД_3$ – эквивалентная асинхронная нагрузка; $ГЭД_4$ – гребной электродвигатель; Z_{0g1} – комплексное сопротивление генератора; Z_{0CH_5} – комплексное сопротивление статической нагрузки; Z_{0ag3} – комплексное сопротивление асинхронной нагрузки; Z_{0ag4} – комплексное сопротивление гребного электродвигателя; c_{cf}, c_{ccd}, c_{c93} – емкости в системе возбуждения ГЭД, инвертора, выпрямителя; r_{cf}, r_{lf}, r_{ccd}, r_{cd}, r_c – активные сопротивления в системе возбуждения ГЭД, инвертора, выпрямителя; l_{93}, l_{cd}, l_f – катушки индуктивности в системе возбуждения ГЭД, инвертора, выпрямителя; k_{rc}, k_{rcd} – ключи в цепи управления инвертора, выпрямителя; Д – дроссель), суммарная мощность СЭД и подруливающих устройств, как правило, составляет 80–90 % от мощности ЕКЭС. Система преобразования электроэнергии может (со звеном постоянного тока) в общем случае содержать выпрямитель, преобразователь постоянного тока (повышающий или понижающий напряжение) и инвертор с различным уровнем преобразования. Наличие мощных статических преобразователей вызывает необходимость контролировать качество электроэнергии на главных распределительных щитах, от которых получают электроэнергию общекорабельные системы и качество электроэнергии в системе электродвижения [2].

Определенный интерес для принятия решения о фильтрации гармоник вызывает гармонический состав непосредственно после инвертора.

Интегральными показателями качества электроэнергии являются коэффициенты несинусоидальности токов и напряжений [3]. Обычно качество электроэнергии по синусоидальности питающего напряжения характеризуется коэффициентом искажения, определяющее отношение интегрального действия высших гармоник к первой гармонике:

$$\mathrm{THD} = K_{\text{нес}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \Big/ U_1 ,$$

где n – порядок высшей гармоники; U_n – действующее значение гармоники n-го порядка, или приближенно:

$$\mathrm{THD} = K_{\text{нес}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{p} U_n^2} \Big/ U_N ,$$

где p – номер последней учитываемой гармоники ($p > 50$); U_N – номинальное напряжение сети.

На показатели качества электроэнергии влияет множество параметров и факторов. К ним относятся: параметры генераторов, мощность эквивалентной асинхронной нагрузки общекорабельных систем, наличие фильтров на ГРЩ, использование частоты широтно-импульсной модуляции, тип полупроводниковых приборов, количество уровней инверторов, режим работы СЭД и др. Часть параметров и показателей могут быть заданы вышестоящей по иерархической лестнице системой, а часть может выбираться или варьироваться в про-

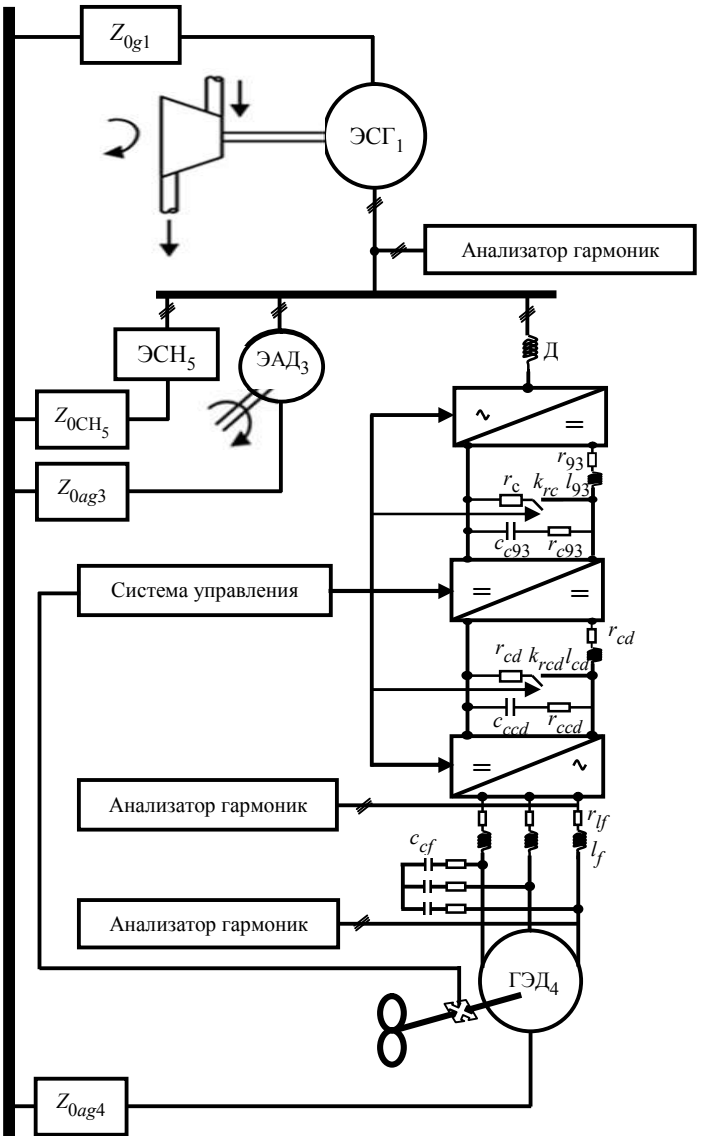

Рис. 1

цессе поиска рациональных решений [4]. В данном случае исследовалась система электродвижения с асинхронным двигателем.

Для исследования разработана модель ЕКЭС с анализом гармонического состава в трех точках. Даже при общепринятых допущениях моделирования модель получилась достаточно сложной как совокупность дифференциальных, алгебраических и логических уравнений.

Особенностью данной модели является:

– математическое описание и моделирование всей системы в фазных координатах в относительных единицах (за базисные единицы приняты параметры генератора – система относительных единиц Парка);

– все полупроводниковые элементы (в основном IGBT) функционируют в режиме ключа;

– объединение всех элементов в общую систему с соблюдением всех законов электродинамики осуществляется с помощью уравнений связи, в основу которых положены законы Кирхгофа в дифференциальной форме;

– для исследований электромеханических процессов используются уравнения турбины или дизеля с различными регуляторами частоты вращения;

– анализ гармонического состава в интересах общекорабельных потребителей и в интересах СЭД осуществляется с помощью аппарата дискретного анализа Фурье;

– эквивалентирование синхронных генераторов, асинхронных двигателей и статических нагрузок осуществляется как детерминированными, так и статистическими методами.

В данной модели учитывались следующие параметры и факторы: параметры генератора ($ЭСГ_1$) в соответствии с паспортными данными эквивалентируемых генераторов, предварительная асинхронная нагрузка ($ЭСН_5$), широтно-импульсная модуляция в системе управления, фильтры и параметры гребного электрического асинхронного двигателя ($ГЭД_4$).

Основные данные модели: $P_{ЭСГ_1}$ = 3000 кВт, U_n = 400 В, $\cos\varphi$ = 0.8, $x''_d = 0.13$ о. е, x'_d = = 0.25 о. е, x_d = 1.94 о. е, f_{inv} = 2000 Гц, $f_{dc\text{-}dc}$ = = 2000 Гц, $P_{ЭАД_3}$ = 300 кВт, $P_{ЭСН_5} \approx 250$ кВт и $P_{ГЭД_4}$ = 1500 кВт.

Рассмотрим влияние изменения значения частотой вращения $ГЭД_4$ в СЭД по закону U/f^2 = = const на THD_U и THD_I.

Для изучения влияния изменения значения частотой вращения $ГЭД_4$ в СЭД по закону $U/f^2 = \text{const}$ в установившемся режиме на THD_U и THD_I на всех ступенях преобразования электрической энергии в ЕКЭС, определим влияние рассматриваемых факторов, влияющих на эти два коэффициента, а затем будем изменять значение частоты вращения $ГЭД_4$ от w_4 = 0.2 о. е. до $w_4 = 1$ о. е., при фиксированных мощностях $P_{ЭАД_3} = 300$ кВт и $P_{ЭСН_5} \approx 250$ кВт. После каждого значения частотой вращения $ГЭД_4$ в СЭД проведены расчеты THD_U и THD_I на всех ступенях преобразования электрической энергии в ЕКЭС. Полученные результаты представлены на рис. 2. Коэффициенты несинусоидальности представлены в процентах, нагрузка – в относительных единицах. Из этих графиков можно сделать следующий вывод: при заданном диапазоне рассматриваемых мощностей и заданных параметрах фильтров увеличение частоты вращения $ГЭД_4$ в СЭД по закону $U/f^2 = \text{const}$ в установившемся режиме ухудшает THD_U и THD_I на ГРЩ и улучшает THD_U в СЭД.

На рис. 2 (А) и 2 (А1) представлена зависимость коэффициента несинусоидальности напряжения (THD_U) и тока (THD_I) соответственно от частоты вращения ГЭД, полученная с использованием анализатора гармоник на главном распределительном щите. Видно, что увеличение частоты вращения гребного электродвигателя приводит к ухудшению качества питающего напряжения и тока. На рис. 2 (В), (В1) и 2 (С), (С1) представлены зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения и тока от частоты вращения на инверторе и гребном электродвигателе соответственно. С учетом многократного преобразования электроэнергии коэффициент несинусоидальности значительно снижается, что позволяет выбирать рациональные решения для борьбы с высшими гармониками.

Из вышеизложенного следует:

1. На основании известных дифференциальных, алгебраических и логических уравнений элементов ЕКЭС разработана достаточно сложная, но универсальная математическая модель для исследования режимов, в том числе исследования гармонического состава токов и напряжений, а также обеспечения качества электроэнергии в общекорабельной сети и СЭД.

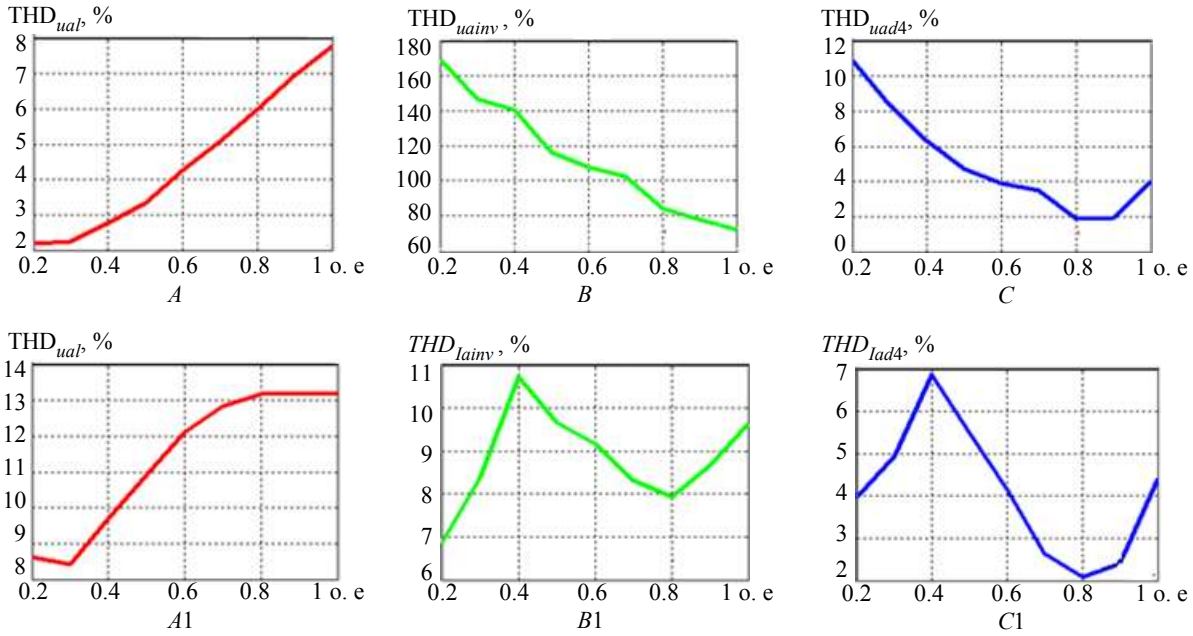

Рис. 2

2. Учитывая параметры генераторов, частоту и коэффициент модуляции ШИМ, вероятную асинхронную нагрузку, параметры фильтров, длину кабеля питания между преобразователем и ГЭД и другие факторы, необходимо выбирать рациональные решения для борьбы с высшими гармониками. Зачастую не столь значительные первоначальные затраты позволяют достичь большей эффективности комплексов и экономии в дальнейшем. Поэтому важно, чтобы уже на этапе проектирования были учтены все факторы, определяющие надлежащее функционирование, повышение надежности и обеспечение качества электроэнергии на ГРЩ и в СЭД.

3. Увеличение значения частотой вращения ГЭД$_4$ в СЭД по закону $U/f^2 = \text{const}$ в установившемся режиме ухудшает THD$_U$ и THD$_I$ на ГРЩ и улучшает THD$_U$ в СЭД.

4. В большинстве случаев использование пассивных фильтров на ГРЩ, СПП$_9$ с ШИМ и в СЭД является рациональным решением, обеспечивающим качество электроэнергии в ЕКЭС. Однако пассивные фильтры имеют большие массогабаритные показатели, не способны полностью исключить высшие гармоники. Определенные достижения могут быть осуществлены с относительно малыми затратами за счет систем управления комплексами.

5. В динамических режимах при наличии пассивных фильтров и при использовании СПП с ШИМ могут возникнуть резонансные явления, которые необходимо учитывать в процессе проектирования и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин И. М., Григорьев А. В., Хомяк В. А. Комплексный подход при создании судовых электроэнергетический систем и установок // Судостроение. 2008. № 2. С. 84.

2. Ясаков Г. С., Рамадан А. Обеспечение качества электроэнергии и улучшение электромагнитной обстановки в перспективных корабельных электроэнергетических системах: тр. 9 РАРАН. Актуальные проблемы защиты и безопасности ВМФ. Т. 4. СПб., 2009. С. 109–117.

3. Кумаков Ю. А. Инверторы напряжения с мультиуровневой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. 2005. № 6. С. 36.

4. Концепция построения двухзвенных непосредственных преобразователей частоты для электроприводов переменного тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, А. И. Калыгин, К. Н. Корюков, И. А. Мухаматшин // Электротехника. 2002. С. 30–39.

D. M. Kahajli, G. S. Jasakov, D. B. Jakovlev
Military-marine academy

MAINTENANCE OF QUALITY OF THE ELECTRIC POWER IN UNIFORM SHIP ELECTROPOWER SYSTEMS IN THE PRESENCE OF POWERFUL STATIC CONVERTERS

Questions of maintenance of quality of the electric power in uniform ship electropower systems in the presence of powerful static semi-conductor converters in electromovement system, including, influences of change of value by frequency of rotation of the rowing electric motor in electromovement system under the frequency law at all steps of transformation of the electric power in uniform ship electropower systems are considered.

Uniform ship electropower systems (EKES), the rowing asynchronous engine (GED), electromovement system (SED), synchronous generators, electric motors (ED), system "AZIPOD", frequency converters, condensers, pulse-width modulation (SHIM), the passive and active filters

УДК 621.311

В. М. Лебедев, Г. С. Ясаков
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Выбор типа гребного электродвигателя для единых корабельных электроэнергетических систем

Рассматривается совокупность критериев по выбору типа гребного электродвигателя (ГЭД), что является одним из основных вопросов при разработке системы электродвижения подводной лодки (СЭД ПЛ). Задача сравнительной оценки и выбора типа ГЭД для СЭД ПЛ многовариантна и рассматривается в многокритериальной постановке с учетом объективно существующих факторов неопределенности и уровня информационной обеспеченности о показателях качества системы.

Единые корабельные электроэнергетические системы, гребной электродвигатель, метод анализа иерархии, функция желательности Харрингтона, вентильный индукторный двигатель

Анализ научно-технических материалов по состоянию и перспективам развития морского кораблестроения ведущих морских держав показывает, что одной из важнейших задач, решаемых в ближайшей перспективе, является внедрение на кораблях новых видов оружия (лазерного, импульсного, электромагнитного), а также внедрения на авианосцах электромагнитных разгонных и тормозных устройств. Для решения данной задачи корабли проектируются с единой корабельной электроэнергетической системой (ЕКЭС), обеспечивающей как движение корабля, так и электропитание всех корабельных механизмов и систем оружия. Кроме того, применение ЕКЭС позволяет получить ряд преимуществ:

– повышение экономичности (за счет работы генераторов на постоянном режиме максимального КПД);

– повышение эксплуатационной надежности (за счет глубокого перераспределения энергии);

– повышение уровня автоматизации (за счет внедрения цифрового управления ЕКЭС и гребного электродвигателя (ГЭД));

– улучшение маневренности и возможность применения винтов фиксированного шага (за счет регулирования оборотов и направления вращения ГЭД);

– снижение шумности в режимах поиска подводных лодок (за счет исключения редукторных передач);

– бóльшие возможности по гибкости размещения гребной электрической установки (за счет размещения элементов ЕКЭС независимо друг от друга в отсеках корабля);