

С.Ю. Труднев, А.А. Марченко

*Камчатский государственный технический университет,
Петропавловск-Камчатский, 683003
e-mail: trudnev@mail.ru*

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Статья посвящена вопросам повышения качества электроэнергетических систем. Разработана математическая модель дизель-генераторного агрегата и статического преобразователя. Проанализирован динамический режим судовой электроэнергетической системы на примере виртуальной модели, разработанной в программе Matlab. Выявлен положительный эффект интеграции современных статических преобразователей в генераторные агрегаты. Обоснована необходимость совершенствования существующих судовых электростанций, которые смогут обеспечить выходные параметры качества электрической энергии с минимальными отклонениями. Доказана эффективность внедрения статического преобразователя в судовую электростанцию.

Ключевые слова: генератор, модель, Matlab, нагрузка, дизель.

S.U. Trudnev, A.A. Marchenko (Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003)
Analysis and research of parallel operation of synchronous generator and static converter

The article deals with enhancement of electric power systems. The mathematical model of diesel generator set and static converter is developed. We analyzed the dynamic mode of ship electric power system on the example of the virtual model developed in the program Matlab. The positive effect of the integration of modern static converters in generator sets is detected. The necessity of improving the existing marine plants that will ensure the quality of the output parameters of electrical energy with minimal deviations is reasoned. The efficiency of the implementation of the static converter in the ship's power plant is proved.

Key words: generator, model, Matlab, loading, diesel.

Один из самых важных показателей эффективности действия электроэнергетической системы (ЭЭС) – качество электроэнергии в переходных и установившихся режимах, которые сопровождаются большим количеством статических и динамических процессов. Статический режим характеризуется незначительным изменением качества электрической энергии в пределах точности регулирования систем автоматического управления. Переходный процесс, относящийся к динамическому режиму, сопровождается значительными и резкими изменениями напряжения частоты при отключении или включении приемников в сеть, а источников на параллельную работу и при авариях.

Качество электроэнергии принято характеризовать рядом показателей: отклонения напряжения от номинального значения, длительные отклонения частоты, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и тока [1]. Работа всех потребителей электрической энергии, прежде всего, напрямую зависит от качества потребляемой ими энергии. Следовательно, напряжение и частота напряжения должны строго соответствовать номинальным значениям, а мощность, вырабатываемая источниками, должна превышать электрическую мощность, потребляемую приемниками. На практике отключение и включение потребителей происходит случайным образом, поэтому поддержание качества электрической энергии на должном уровне является проблематичным. Для улучшения параметров регулирования в ЭЭС получили широкое применение различные регуляторы частоты и напряжения, но даже они не всегда способны достаточно быстро и точно отработать динамическое возмущение. Проблему можно решить путем подключения в ЭЭС дополнительного источника переменного тока. Необходимо разработать математическую и имитационную модель, которая позволит решить вопрос о возможной параллельной работе синхронного генератора и статического преобразователя.

Рассмотрим математическую модель дизель-генератора:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = m_{\text{дв}} - m_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции; $m_{\text{дв}}$ – движущий момент дизеля, о. е.; $m_{\text{эл}}$ – электромагнитный момент нагрузки, о. е.

Электромагнитный момент нагрузки на валу синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, может быть представлен как сумма двух составляющих – синхронного момента m_c и асинхронного момента m_a .

$$m_{\text{эл}} = m_c + m_a. \quad (2)$$

Составляющая m_c пропорциональна углу θ , углу между вектором электродвижущей силы генератора и вектором напряжения сети, а составляющая m_a пропорциональна скорости вращения:

$$m_c = \delta\theta; \quad m_a = c\omega = c \frac{d\theta}{dt}, \quad (3)$$

где δ – жесткость характеристики $m = f(\theta)$ генератора; c – коэффициент демпфирования.

Коэффициенты пропорциональности δ и c могут быть определены при заданных параметрах генератора, так как составляющие m_c и m_a могут быть выражены через параметры генератора и угол G .

Значение m_c и коэффициента δ получим из выражения мощности трехфазного явнополюсного генератора:

$$P = \frac{UE}{x_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (4)$$

где x_d – продольное синхронное индуктивное сопротивление генератора; x_q – поперечное синхронное индуктивное сопротивление.

Для малых приращений углов $\Delta\theta$ можно принять $\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta$, тогда уравнение (4) запишется в виде:

$$P = \frac{UE}{x_d} \sin \theta + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \Delta\theta. \quad (5)$$

Разделив обе части уравнения мощности (5) на ω и учитывая, что для наиболее тяжелого режима работы генератора $E = 2U$, получим уравнение синхронного момента m_c в относительных единицах, приняв за базовые величины напряжение сети U и скорость ω :

$$m_c = \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) \Delta\theta. \quad (6)$$

Из уравнения (6) очевидно, что в пределах принятых допущений в относительных единицах имеем:

$$\delta = \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right).$$

Асинхронный момент m_a представим в виде суммы трех составляющих:

$$m_a = m_a' + m_a'' + m_a''',$$

где m'_d – составляющая асинхронного момента, обусловленная изменением общего потока контуров ротора по продольной оси; m''_d – составляющая, обусловленная изменением потоков рассеяния контуров ротора; m''_q – составляющая, обусловленная потоками ротора по поперечной оси.

Все три составляющие m'_d , m''_d и m''_q , а следовательно, и величина m_a выражаются через параметры генератора, что позволяет определить значение коэффициента c .

Выражая в левой части уравнения (1) угловую скорость ω через угол θ и учитывая выражения для m_c и m_a , получим уравнение дизель-генератора, работающего параллельно с сетью:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + \delta\theta = m_{дв}, \quad (7)$$

где J – приведенный момент инерции, определяемый через J_Σ с учетом пересчета значений ω в значения θ для конкретного генератора при известном числе пар полюсов p .

Рассмотрим математическую и имитационную модель статического преобразователя:

$$\begin{aligned} U_a &\approx \sin w \cdot t, \\ U_b &\approx \sin(w \cdot t - 120^\circ), \\ U_c &\approx \sin(w \cdot t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (8)$$

Анализируя уравнения (8), можно судить о том, что выходная характеристика статического преобразователя зависит от трех параметров: амплитудное отклонение напряжения (U_m), циклическая частота колебаний (w) и начальная фаза колебания, зависящая от времени включения.

На рис. 1 представлена имитационная модель автоматизированной электроэнергетической системы (АЭЭС), разработанная в программе Matlab.

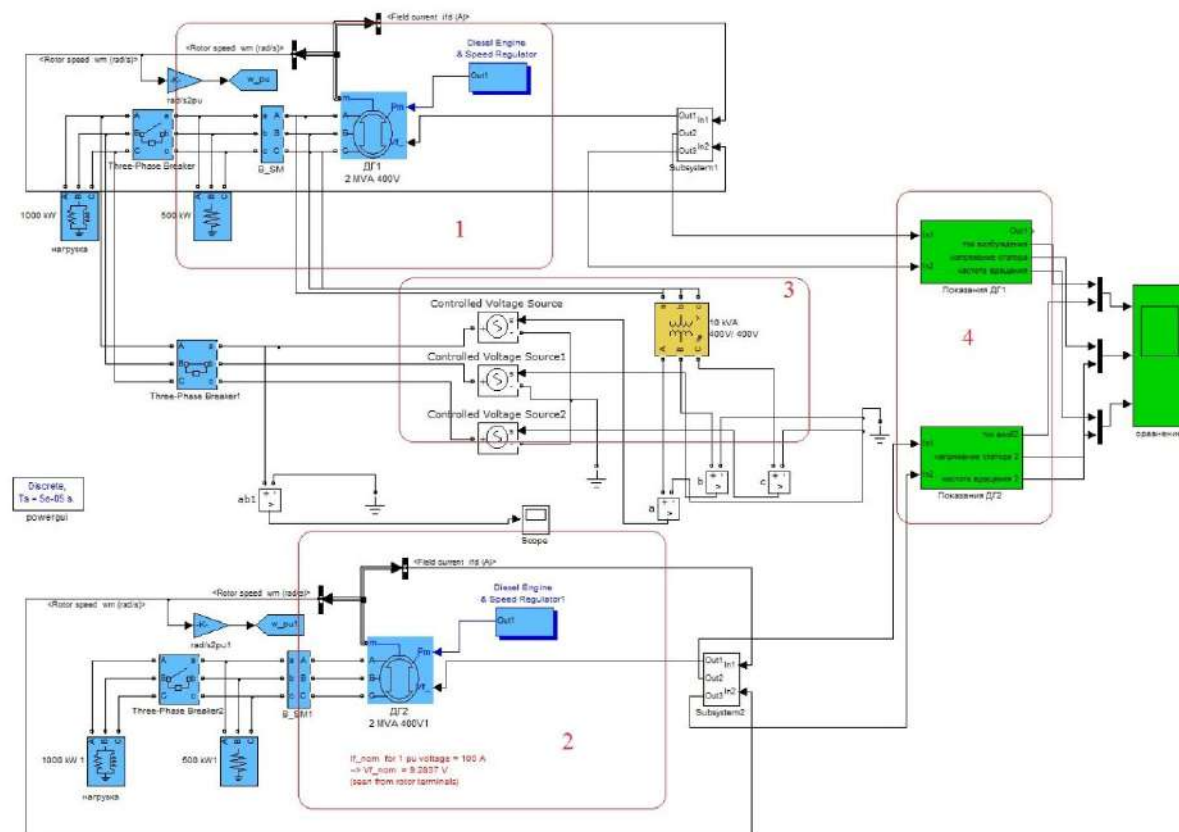


Рис. 1. Имитационная модель АЭЭС

Модель включает в себя 4 основных блока: дизель-генератор № 1, дизель-генератор № 2, статический преобразователь, блок измерительных устройств для сравнения показателей двух генераторов.

Дизель-генераторы № 1 и № 2 состоят из пяти основных блоков:

- 1) статическая нагрузка, активная мощность которой составляет 50% от мощности генератора;
- 2) синхронный генератор мощностью $S = 2000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$;
- 3) дизель (Diesel Engine & Speed regulator);
- 4) система автоматического регулирования напряжения (Subsystem) [2].

Согласно теории об устойчивости электроэнергетических систем при включении мощного потребителя будет нарушена динамическая устойчивость электроэнергетической системы. Исходя из условий нормальной работы потребителей, устройства автоматического регулирования должны обеспечивать постоянство частоты и напряжения питающей сети в пределах требований Морского регистра и Межгосударственных стандартов [3–5]. С другой стороны, требования Межгосударственного стандарта и Морского регистра сильно отличаются, а значит качество электрической энергии, а также устройства судовой и береговой автоматики будут разными. В системах берегового электроснабжения масса и габариты источника не играют большую роль, а значит и качество вырабатываемой электроэнергии будет значительно выше, чем в судовых АЭС. Анализируя вышесказанное, а также учитывая математическую модель ДГ, можно судить о том, что для улучшения параметров качества электрической энергии целесообразно внедрение статического безынерционного источника электрической энергии в судовые ЭЭС. Благодаря управляемому статическому преобразователю такой источник способен практически мгновенно взять на себя нагрузку и без дополнительных условий войти в синхронизм.

В подтверждение этого был произведен следующий эксперимент: на дизель-генераторы № 1 и № 2 в момент времени $t = 3 \text{ с}$ на протяжении некоторого времени была подключена импульсная нагрузка, соизмеримая с мощностью одного генератора ($P_{\text{нагрузки}} = 70\% \cdot P_{\text{генератора}}$). Отличием между работой двух генераторов было то, что в тот же момент времени $t = 3 \text{ с}$ параллельно был подключен импульсный источник трехфазного питания (рис. 1). В ходе эксперимента были построены характеристики по устойчивости, представленные на рис. 2.

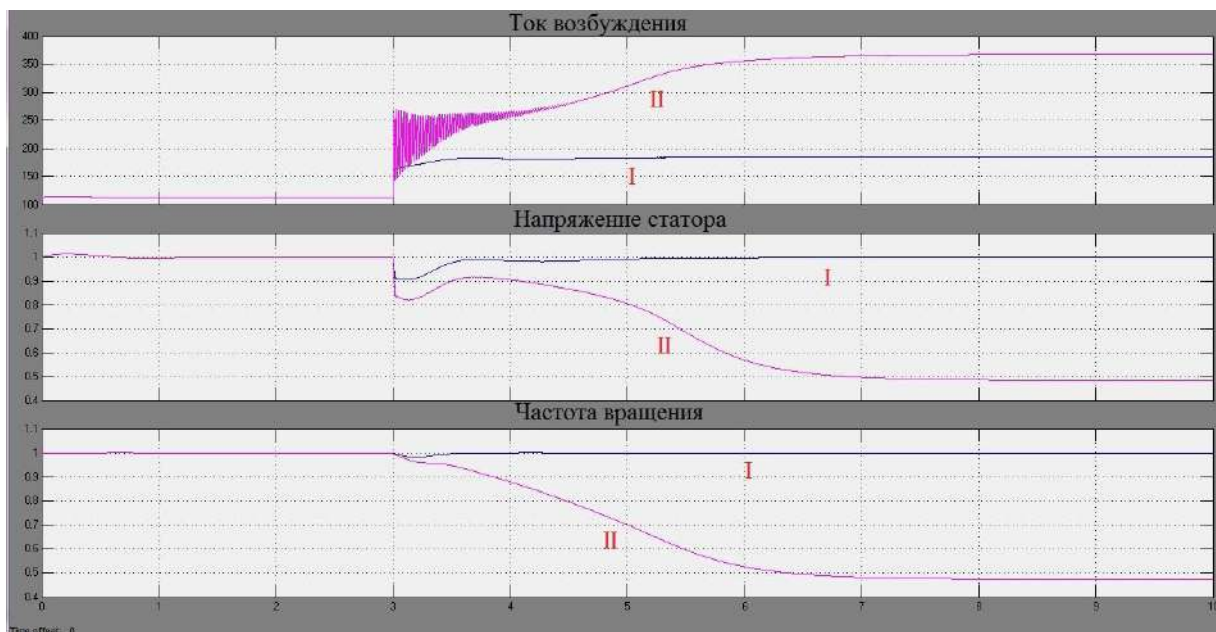


Рис. 2. Сравнительная характеристика ДГ № 1 и ДГ № 2:
I – выходная характеристика ДГ № 1; II – выходная характеристика ДГ № 2

Как видно на всех трех характеристиках (тока возбуждения от времени, напряжения на статоре от времени и частоты вращения от времени), параметры качества электрической энергии ДГ № 1 значительно выше параметров качества электрической энергии ДГ № 2. Значит, можно судить о том, что внедрение безынерционных статических преобразователей в ЭЭС позволит существенно увеличить качество электрической энергии без значительных увеличений массы и габаритов энергосистемы в целом.

Откладывание реализации энергосберегающих мероприятий наносит значительный экономический ущерб предприятиям и негативно отражается на общей экологической и социально-

экономической ситуации. Помимо этого, дальнейший рост издержек рыбопромыслового флота и в других отраслях народного хозяйства сопровождается растущим дефицитом финансовых ресурсов, что задерживает обновление производственной базы предприятий в соответствии с достижениями научно-технического прогресса [6]. Уменьшение энергетической составляющей в издержках производства позволит получить дополнительные средства для обеспечения приемлемого уровня морального и физического износа технологического оборудования.

Литература

1. Качество электрической энергии на судах: справочник / В.В. Шейнихович, О.Н. Климанов, Ю.И. Пайкин, Ю.Я. Зубарев. – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB Sim Power Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; 2008. – 88 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Транспорт, 2010. – 280 с.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 29322-92. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
6. Труднев С.Ю. Разработка и исследование модели устройства активной защиты генераторного агрегата от кратковременных перегрузок // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 2. – С. 23–31.

УДК 620.193:629.5.023

**В.А. Швецов¹, П.А. Белозёров², Н.В. Адельшина³, О.А. Белавина¹,
О.Е. Петренко¹, Д.В. Шунькин¹, В.В. Кириносенко⁴**

¹Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, 683003;

²Министерство обороны РФ, Петропавловск-Камчатский, 683000;

³Военно-восточный округ Министерства обороны РФ, Петропавловск-Камчатский, 683000;

⁴ОАО «Камчатскэнерго», Петропавловск-Камчатский, 683030

e-mail: oni@kamchatgtu.ru

ВЛИЯНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА СТАЛЬНЫХ КОРПУСОВ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

Согласно ГОСТ 9.056-75 при эксплуатации систем защиты корпуса судна (корабля) от коррозии необходимо периодически измерять потенциал корпуса судна. Однако экипажи судов и кораблей эту работу не выполняют. Одной из причин невыполнения экипажами своих обязанностей является отсутствие на судах квалифицированных специалистов-операторов. Цель исследования – установить возможность использования членов экипажей с различным уровнем квалификации для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов. Для достижения поставленной цели были выполнены планируемые эксперименты и необходимые математико-статистические расчеты. В результате исследования показано, что измерения потенциала по методике, предложенной авторами, способен выполнить любой оператор, независимо от его квалификации, при этом результаты измерений отличаются высокими метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: коррозия стальных корпусов кораблей и судов, электрохимическая защита корпуса судна от коррозии, измерения защитного потенциала корпуса судна, электрод сравнения, методика измерения потенциала стальных корпусов кораблей и судов.

V.A. Shvetsov¹, P.A. Belozerov², N.V. Adelshina³, O.A. Belavina¹, O.E. Petrenko¹, D.V. Shunkin¹, V.V. Kirnosenko⁴ (¹Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003; ²Russian Military Department, Petropavlovsk-Kamchatsky; ³Military-eastern region of Russian Military Department, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000; ⁴Open joint-stock company «Kamchatskenergo», Petropavlovsk-Kamchatsky, 683030) **Impact of operator's qualification on results of protective potential measurements of steel hulls of vessels and ships**