

DOI 10.15589/jnn20150219

УДК 621.313.332

Б92

SIMPLIFIED MODEL OF ASYNCHRONOUS ENGINE  
FOR STUDY OF THE STARTING MODESУПРОЩЁННАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ

**Volodymyr S. Buriak**  
educatocom@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0724-2961

**Yazid Al Shaikh**  
vip.yazid@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-0982-2807

**В. С. Буряк**  
ст. преп.

**Язид Аль Шайх**  
асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** There has been described a problem encountered at an attempt of adequately modelling the dynamic modes of functioning of the ship autonomous electric power system during commutation of powerful consumers by the example of asynchronous engines (AE) in MATLAB/Simulink. It is determined that the use of the exact mathematical description of AE in modelling is complicated by bulkiness of the system of differential and algebraic nonlinear equations describing its work, and, as result of this, by long duration of calculations. The way out of this situation is the development of the simplified mathematical model of AE that would allow adequate modelling of the AE connecting and disconnecting processes and work out more effective algorithms of managing these processes. A mathematical model that adequately reflects the physical essence of the AE connecting and disconnecting process is suggested.

**Keywords:** commutation of powerful consumers; asynchronous engine; mathematical model of asynchronous engine; modelling adequacy

**Анотація.** Описано проблему, що виникає при спробі адекватно промоделювати в MATLAB/Simulink динамічні режими роботи судової автономної електроенергетичної системи при комутації потужних споживачів на прикладі асинхронних двигунів (АД). Запропоновано математичну модель, яка відображає фізичну сутність процесу ввімкнення–вимкнення асинхронного двигуна.

**Ключові слова:** комутація потужних споживачів; асинхронний двигун; математична модель асинхронного двигуна; адекватність моделювання

**Аннотация.** Описана проблема, возникшая при попытке адекватно промоделировать в MATLAB/Simulink динамические режимы работы судовой автономной электроэнергетической системы при коммутации мощных потребителей на примере асинхронных двигателей (АД). Предложена математическая модель, которая отражает физическую суть процесса включения–отключения асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** коммутация мощных потребителей; асинхронный двигатель; математическая модель асинхронного двигателя; адекватность моделирования

## REFERENCES

- [1] Belyakov Yu.S. *Matematicheskoe modelirovanie skhem elektricheskikh setey, metody rascheta avariynykh rezhimov* [Mathematical modelling of electric network circuits, methods of calculation of emergency modes]. SPb., PEIPK Publ., 2002. 123 p.
- [2] Bushuev V.V. *Dinamicheskie svoystva elektroenergeticheskikh sistem*. [Dynamic properties of electric power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 170 p.
- [3] Veretennikov L.P. *Issledovanie protsessov v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh. Teoriya i metody*. [Study of processes in the ship electric power systems. Theory and methods]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. 536 p.

- [4] Vinokur V.M., Kavalerov B.V. *Programmnyy modeliruyushchiy kompleks dlya rascheta staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov mini-EES proizvolnoy konfiguratsii*. [Programmatic modelling complex for the calculation of the static and dynamic modes of mini electric power systems of random configuration]. Perm, Perm gos. tekhn. un-t Publ., 2010.
- [5] Yepifanova, O.V. *Optimizatsiya rezhimov raboty avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tikhokhodnymi generatorami s dizelnym privodom* Cand. Diss. [Optimization of the operation modes of the autonomous power supply systems with powerful low-speed generators with a diesel drive. Cand. Diss.]. SPb., 2007.155 p.
- [6] Krasnov V.V., Meshchaninov A.P., Meshchaninov P.A. *Osnovy teorii i rascheta sudovykh elektroenergeticheskikh sistem : Modelirovanie dlya issledovaniya spetsialnykh rezhimov* [Fundamentals of theory and calculation of ship electric power systems: Modelling for study of special modes]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 328 p.
- [7] Nguen Van Tkhan. *Optimizatsiya parametrov regulyatorov gazodizelgeneratornykh agregatov sudovykh elektrostantsiy pri rezko peremennykh nagruzkakh* Cand. Diss. [Optimization of the parameters of the regulators of the gas diesel generator units of marine power stations at abruptly variable loads]. Nikolaev, 2011. 193 p.
- [8] Pronina A.K., Putilina K.P., Peterson N.A. *Kachestvo elektroenergii v avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh v perekhodnykh rezhimakh raboty* [Quality of electric power in the autonomous electric power systems in transient operation modes]. *Zbirnyk naukovykh prats SNUYaYetaP — Collection of scientific publications of Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry*, 2014, issue 3, pp. 130–138.
- [9] Khvatov O.S., Kharitonychev M.Yu. *Dinamicheskie rezhimy avtonomnoy sudovoy valogeneratornoy ustanovki na osnove mashiny dvoynogo pitaniya* [Dynamic modes of the autonomous marine shaft generator unit on the basis of double-way feed machine]. *Vestnik VGAVT — Bulletin of Volga State Academy of Water Transport*, 2005, issue 13, pp. 147–152.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Динамические режимы работы судовых электростанций становятся всё более актуальными в связи с возрастанием их загрузки и мощностей потребителей, в основном асинхронных двигателей (АД). Их коммутация приводит к значительным всплескам — провалам напряжений питающей сети, а при применении полупроводниковой пускорегулирующей аппаратуры — к значительным и недопустимым искажениям напряжений. Всё это негативно сказывается на работе судовых электронных систем, систем автоматики и компьютерной техники. [8]

Для устранения этих проблем необходимо создать достаточно простые математические модели АД, которые позволили бы адекватно промоделировать процессы включения–отключения АД и разработать более эффективные алгоритмы управления этими процессами.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Асинхронный двигатель является весьма сложным динамическим звеном, параметры которого нелинейно зависят от нагрузки на его валу и скольжения  $s$ . Точное математическое описание АД весьма громоздко и имеет вид системы дифференциальных и алгебраических нелинейных уравнений [1, 2, 6]. Использование точного описания при моделировании динамических режимов затруднено большой длительностью вычислений.

Существует и другой способ представления математической модели асинхронного двигателя — передаточной функцией. В литературных источниках [3, 4, 9], например, исследована передаточная функция АД, управляемого напряжением на статоре, выходом которой есть скорость вала. Такая передаточная функция даже при линеаризации «в малом» имеет в числителе полином третьего, а в знаменателе — пятого порядков. В передаточной функции АД для скольжений от 0,8 до 1,2 присутствует возможность упрощения, максимальное проявление которого имеет в числителе второй порядок, а в знаменателе — третий, и требует расчёта как минимум шести параметров, зависящих от рабочих координат АД. При этом сокращение длительности вычислений при моделировании несущественно.

В [7] автором предложена исключительно простая динамическая модель АД, ориентированная на получение аналитической зависимости пускового тока от времени. Однако более детальное её рассмотрение показывает, что она противоречит физическим процессам пуска, состоящим в том, что пусковой ток должен иметь как реактивную составляющую, так и активную. В противном случае не будет создаваться пусковой момент, определяемый только активной составляющей пускового тока. Данное противоречие следует также из однолинейной схемы замещения АД, в которой приведенное активное сопротивление обмотки якоря связано со скольжением и возрастает с разгоном двигателя в десятки раз. Поэтому используемая автором [7] однолинейная схема замещения

пускового режима асинхронного двигателя должна быть уточнена.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — разработка простой динамической модели АД, которая соответствует реальным процессам, имеющим место при коммутации мощных нагрузок в автономной электроэнергетической системе (ЭЭС), и позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на моделирование при использовании MATLAB/Simulink, что открывает возможности для поиска эффективных алгоритмов управления устройствами судовой силовой электроэнергетики.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

На рис. 1 изображена однолинейная схема замещения асинхронного двигателя, которая уточнена последовательным введением активного сопротивления  $R'_{2/s}$ .

В данной схеме синхронный генератор (СГ) представлен через электродвижущую силу (ЭДС)  $E_G$  и эквивалентное сопротивление  $X_G$ , а АД — через эквивалентное сопротивление  $X_D$ , приведённое активное сопротивление  $R'_{2/s}$  ( $s$  — скольжение) и его противо-ЭДС  $E_D$ , которая является линейной функцией от угловой скорости двигателя  $\omega$ , а также зависит от конструкции самого двигателя. Зависимость  $E_D$  от конструкции двигателя можем считать постоянной  $k_D$ , тогда  $E_D = k_D f(\omega)$ . Поскольку скольжение  $s$  в процессе пуска колеблется от 1 до величины, равной 0,02 ... 0,05, то, соответственно, активная составляющая тока возрастет, обеспечивая создание вращающего момента. Однако следует учитывать, что в момент пуска активная составляющая тока не будет доминирующей в пусковом токе. Таким образом, определить с активной составляющей пускового тока, или, что то же самое, с величиной  $\cos \phi$  в мо-

мент пуска двигателя и с характером её изменения в процессе пуска.

Для большинства электродвигателей, задействованных в судовой электростанции, возникает ситуация, когда они работают на вентиляторную характеристику (насосы, вентиляторы и т. п.).

Изменения управляющего или возмущающего воздействия вызывают в механической части электропривода переходные процессы, в течение которых скорости движения связанных масс отклоняются от начальных значений, определяемых начальными условиями, к установившимся значениям, заданным новыми воздействиями на систему.

В качестве простейших примеров рассмотрен ряд переходных процессов  $M(t)$ ,  $\omega(t)$  в механической части электропривода, представленной жёстким механическим звеном (рис. 2).

Допустим, начальная скорость равна нулю:  $\omega_{нач} = 0$ , а к ротору двигателя в момент времени  $t = 0$  прикладывается электромагнитный момент двигателя, изменяющийся по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T$ :

$$M = \Delta M e^{-t/T} + M_c$$

Основное уравнение движения электропривода относительно дифференциала скорости имеет решение:

$$d\omega = \varepsilon dt,$$

где  $\varepsilon = \frac{M - M_c}{J_\Sigma}$  — ускорение масс механической части.

Следует проинтегрировать обе части полученного равенства при заданном законе изменения движущего момента:

$$\int_0^{\omega} d\omega = \int_0^t \frac{M - M_c}{J_\Sigma} dt = \int_0^t \varepsilon_{нач} e^{-t/T} dt.$$

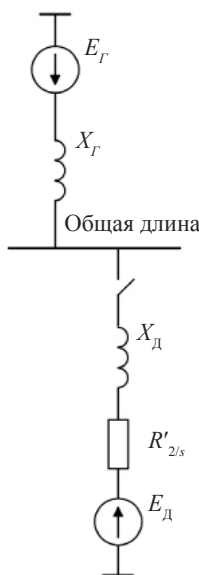


Рис. 1. Однолинейная схема замещения АД

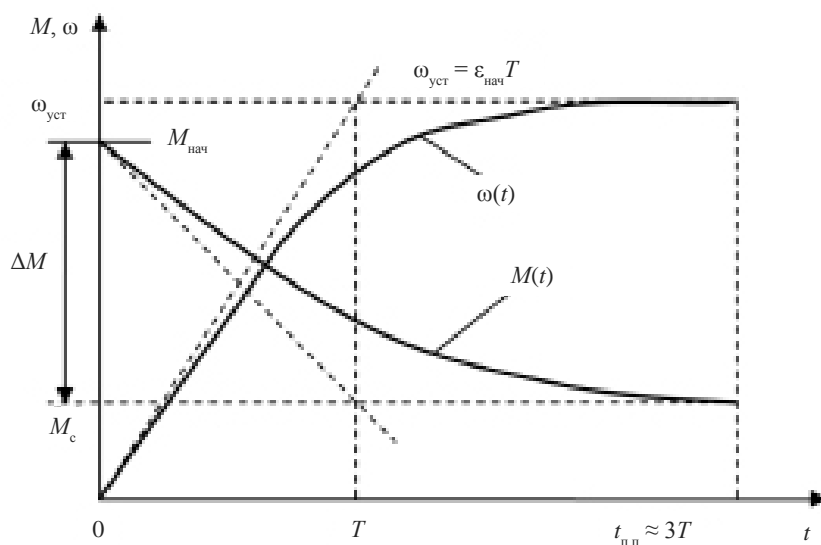


Рис. 2. Переходные процессы  $M(t)$ ,  $\omega(t)$  в механической части электропривода

В результате получено:

$$\omega = \varepsilon_{\text{нач}} T(1 - e^{-t/T}),$$

где:

$\varepsilon_{\text{нач}} (d\omega/dt)_{\text{нач}} = (M_{\text{нач}} - M_C)/J_{\Sigma} = \Delta M/J_{\Sigma}$  — начальное ускорение;

$M_{\text{нач}} = \Delta M + M_C$  — начальный момент двигателя.

Если  $\omega$  изменится по экспоненциальному закону, то, соответственно, противо-ЭДС  $E_d$  тоже изменится по такому же закону.

По рис. 1 при пуске асинхронного двигателя начальный пусковой ток  $I_{\text{п}}$  целесообразно записать как:

$$I_{\text{п}} = \frac{E_{\Gamma}}{X_{\Gamma} + X_{\text{д}} + R_2'/s},$$

а в процессе пуска:

$$I_{\Gamma}(t) = \frac{E_{\Gamma}}{X_{\Gamma} + X_{\text{д}} + R_2'/s} - \frac{E_{\text{д}}}{X_{\Gamma} + X_{\text{д}} + R_2'/s} = \frac{E_{\Gamma}}{X_{\Gamma} + X_{\text{д}} + R_2'/s} - \frac{k_{\text{д}} \varepsilon_{\text{нач}} T(1 - e^{-t/T})}{X_{\Gamma} + X_{\text{д}} + R_2'/s}$$

Тогда зависимость пускового тока асинхронного двигателя от времени можно реализовать с помощью MATLAB/Simulink-модели, представленной

на рис. 3, а, б. Результаты моделирования динамики переходного процесса показаны на рис 4:

Рис. 5 отражает сравнение выходных напряжений переходных процессов точной (а) и упрощённой Matlab-модели (б) при подключении асинхронной нагрузки мощности 75 кВт к синхронному генератору типа ГМС13-31-12 с номинальной мощностью  $P_{\text{н}} = 250$  кВт в момент времени моделирования  $t = 5$  с.

По результатам сравнения отметим, что погрешность по амплитуде и времени провалов составляет соответственно 5,8% и 7%.

При условии подключения/отключения АД мощностью 75 кВт к газодизель-генератору (ГДГА) мощностью 250 кВт, разработанной упрощенной модели генератора нужно всего 1 с для обрабатывания 10 с машинного времени моделирования. Таким образом, разработанная упрощенная динамическая модель синхронного генератора является в переходных процессах, которые обусловлены коммутацией нагрузок, адекватной реальной математической модели и позволяет в дальнейшем решать задачи оптимизации управления, исходя из минимизации всплесков-провалов сетевых напряжений при коммутации нагрузки.

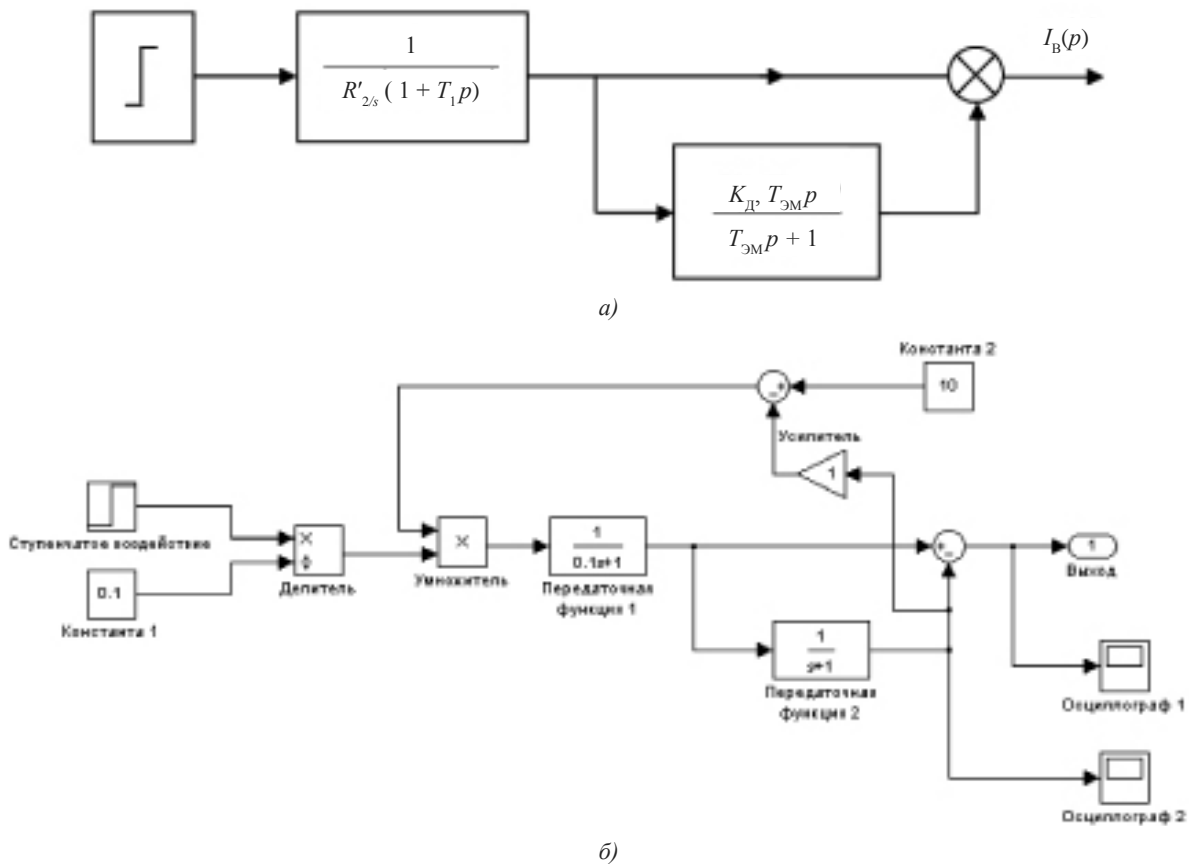
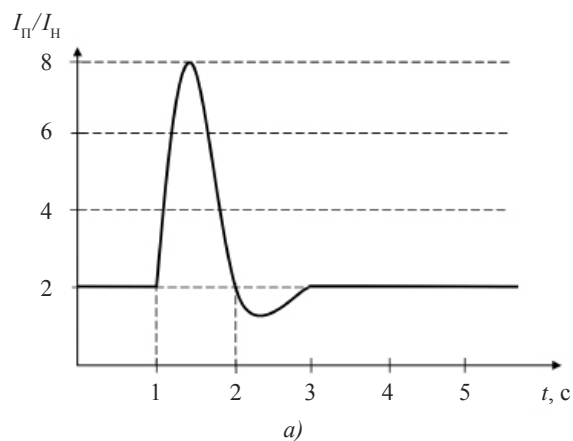
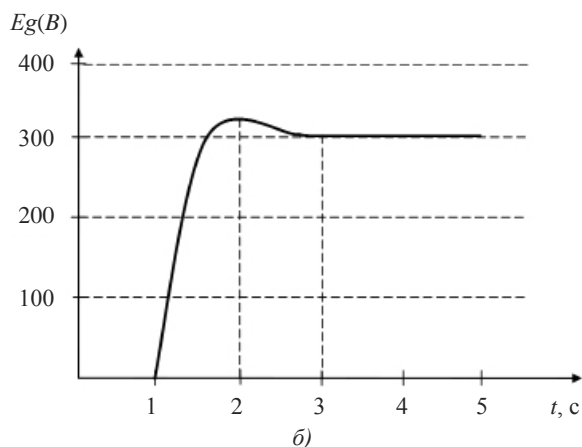


Рис. 3. Математическая модель асинхронного двигателя: а — в виде структурной схемы; б — в виде модели MATLAB / Simulink



а)

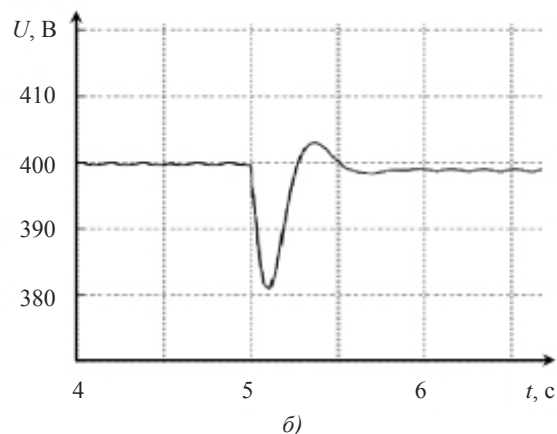
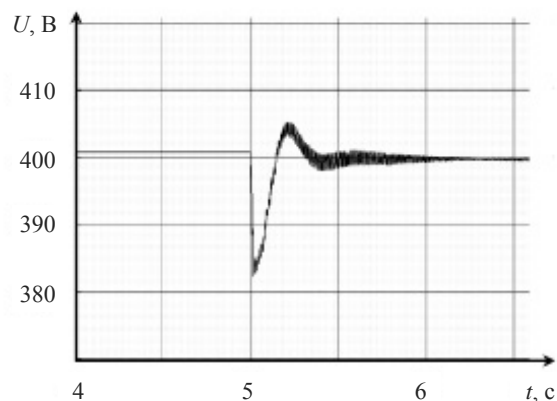


б)

**Рис. 4.** Результаты моделирования динамики переходного процесса:

а — осциллограмма пускового тока; б — противо-ЭДС

**ВЫВОДЫ.** Предложенная упрощенная динамическая модель асинхронного двигателя дает возможность с допустимой погрешностью моделировать динамические процессы в судовой электростанции с целью определения величин всплесков и провалов напряжений и частоты. При этом время расчета



б)

**Рис. 5.** Точная (а) и упрощенная (б) Matlab-модели при подключении асинхронной нагрузки

переходных процессов в Matlab-модели автономной электростанции сокращается в десятки раз. Использование такой модели позволяет решать задачи оптимизации параметров регуляторов как системы возбуждения генератора, так и системы стабилизации оборотов приводного двигателя.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Беляков, Ю. С.** Математическое моделирование схем электрических сетей, методы расчёта аварийных режимов [Текст] / Ю. С. Беляков. — СПб. : Изд-во ПЭИПК, 2002. — 123 с.
- [2] **Бушуев, В. В.** Динамические свойства электроэнергетических систем [Текст] / В. В. Бушуев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 170 с.
- [3] **Веретенников, Л. П.** Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы [Текст] / Л. П. Веретенников. — Л. : Судостроение, 1975. — 536 с.
- [4] **Винокур, В. М.** Программный моделирующий комплекс для расчёта статических и динамических режимов мини-ЭЭС произвольной конфигурации [Текст] / В. М. Винокур, Б. В. Кавалеров. — Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010.
- [5] **Епифанова, О. В.** Оптимизация режимов работы автономных систем электроснабжения с мощными тихоходными генераторами с дизельным приводом [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.14.02 / Епифанова Ольга Викторовна ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». — СПб., 2007. — 155 с.

- [6] **Краснов В.В.** Основы теории и расчёта судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов [Текст] / В.В. Краснов, А.П. Мещанинов, П.А. Мещанинов. — Л. : Судостроение, 1989. — 328 с.
- [7] **Нгуен Ван Тхань.** Оптимизация параметров регуляторов газодизельгенераторных агрегатов судовых электростанций при резко переменных нагрузках [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 / Нгуен Ван Тхань ; Нац. ун-т кораблестроения им. адмирала Макарова. — Николаев, 2011. — 193 с. : рис. — Библиогр. : арк. 184–193.
- [8] **Пронина, А.К.** Качество электроэнергии в автономных электроэнергетических системах в переходных режимах работы [Текст] / А.К. Пронина, К.П. Путилин, Н.А. Петерсон // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. — 2013. — Вип. 3. — С. 130–138.
- [9] **Хватов, О.С.** Динамические режимы автономной судовой валогенераторной установки на основе машины двойного питания [Текст] / О.С. Хватов, М.Ю. Харитонычев // Вестник ВГАВТ. — 2005. — Вып. 13. Судовая и промышленная энергетика. — С. 147–152.

---

© В.С. Буряк, Язід Аль Шайх

Надійшла до редколегії ???.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *В.М. Рябенський*