



УДК 629.12: 681.518.5

А. А. Леута, Ч. Ч. Нгуен

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Настройка и испытания аппаратуры автоматики судовых электроэнергетических объектов

*Необходимость разработки и внедрения технологии программно-физического моделирования на основе статических преобразователей обеспечивает повышение эффективности и безопасности настройки и испытаний аппаратуры судовой электроавтоматики и систем автоматизированного управления. Рассмотрены основные этапы и результаты разработки данной технологии, способствующие автоматизации, а также ресурсо- и энергосбережению в подготовке и введении в эксплуатацию объектов судовой электроэнергетики.*

**Судовая электроэнергетика, автоматика, технологии настройки и испытаний аппаратуры, математическое и программно-физическое моделирование, многопараметрическая оптимизация настройки систем автоматического регулирования и управления, вращающиеся и статические преобразователи**

Настройка и испытания аппаратуры автоматики судовых электроэнергетических объектов являются неотъемлемой частью процессов завершения их производства, предъявления и передачи заказчику, когда качество настройки аппаратуры автоматики принято проверять и подтверждать натурными испытаниями. Вследствие этого постоянное совершенствование применяемых технологий настройки и испытаний аппаратуры представляется актуальным и способствующим повышению эффективности и безопасности процесса ввода в эксплуатацию судовых электроэнергетических объектов.

Среди применяемых технологий настройки и испытаний аппаратуры судовой электроавтоматики наиболее эффективна технология имитационного физического моделирования таких объектов судовой электроэнергетики, как силовые агрегаты судовых источников электроэнергии, аппаратура и узлы главных распределительных щитов, задающих и исполнительных механизмов [1]. При этом от имитаторов требуется воспроизведение электрических сигналов по напряжениям и токам в объемах, отвечающих целям испытаний.

Особенностями объектов судовой электроэнергетики (трехпроводное трехфазное напряжение, номинальные значения и значения показателей параметров качества электроэнергии) определяются особые требования к свойствам и характеристикам применимых средств имитационного моделирования, отличающихся от аналогичных для других промышленных объектов. На профильных предприятиях, производящих электроаппаратуру судовой автоматики, применяется технология, традиционно основанная на использовании вращающихся электромашинных преобразователей в качестве средств имитации компонентов судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Но эта технология имеет ряд существенных недостатков, связанных как с применением электрических машин, так и с ограничениями в имитации аварийных режимов и неисправностей. Кроме того, для повышения эффективности процессов и достоверности получаемых оценок, используемая технология требует развития в плане автоматизации, т. е. в уменьшении влияния человеческого фактора.

С развитием силовой электроники стало возможным устранение недостатков технологии, связанных с использованием электромашинных



Рис. 1

преобразователей заменой их статическими преобразователями, а развитие микроконтроллеров делает эффективной автоматизацию управления имитационной моделью СЭЭС в ходе проведения экспериментов при настройке и испытаниях аппаратуры САУ. Реализация этих новых возможностей порождает новую технологию программно-физического моделирования (ПФМ) объектов судовой электроэнергетики [2]–[6], в которой аппаратура, генерирующая физические (электрические) сигналы, функционирует под внутренним и внешним программным управлением в соответствии с задачами моделирования. Развитие этой технологии связано с необходимостью проведения ряда исследований и разработок в области методического, схемотехнического и программного обеспечения. Для осуществления этого специально разработана и предложена обобщенная схема проведения исследований при разработке технологий ПФМ и автоматизации процессов настройки и испытаний аппаратуры автоматики СЭЭС (рис. 1) где можно видеть три основных контура (этапа) выполнения разработки технологии ПФМ. Все три контура объединяет одна общая цепочка.

Исследования и разработки, проводимые с применением методов математического моделирования [7], [8] в рамках первого (нижнего) кон-

тура обобщенной схемы (рис. 1), показывают возможности решения задач в области создания необходимого методического обеспечения технологии ПФМ, а также автоматизации процессов настройки и испытаний аппаратуры автоматики судовых электроэнергетических объектов. В качестве примера рассмотрим результаты моделирования САУ СГА в MATLAB (рис. 2) при исследовании влияния настроечных параметров на качество переходных процессов в экспериментах «Наброс и сброс нагрузки», где обозначено:  $U$  – напряжение;  $\omega$  – частота;  $P$  – выход регулятора напряжения;  $mp$  – топливоподача. На рис. 2, а показано влияние варьирования параметров системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора в процессе настройки регулятора, а на рис. 2, б – влияние варьирования параметров системы регулирования частоты (скорости вращения дизель-генератора). По внешнему виду кривых переходных процессов можно судить о качестве настройки моделей систем регулирования напряжения и частоты. Таким образом, очевидно, что простым методом «проб и ошибок» рано или поздно удастся настроить системы, если стараться добиться отсутствия перерегулирования и колебательности, при скорейшем достижении установившегося значения с минимальным отклонением. Однако как быстро и с

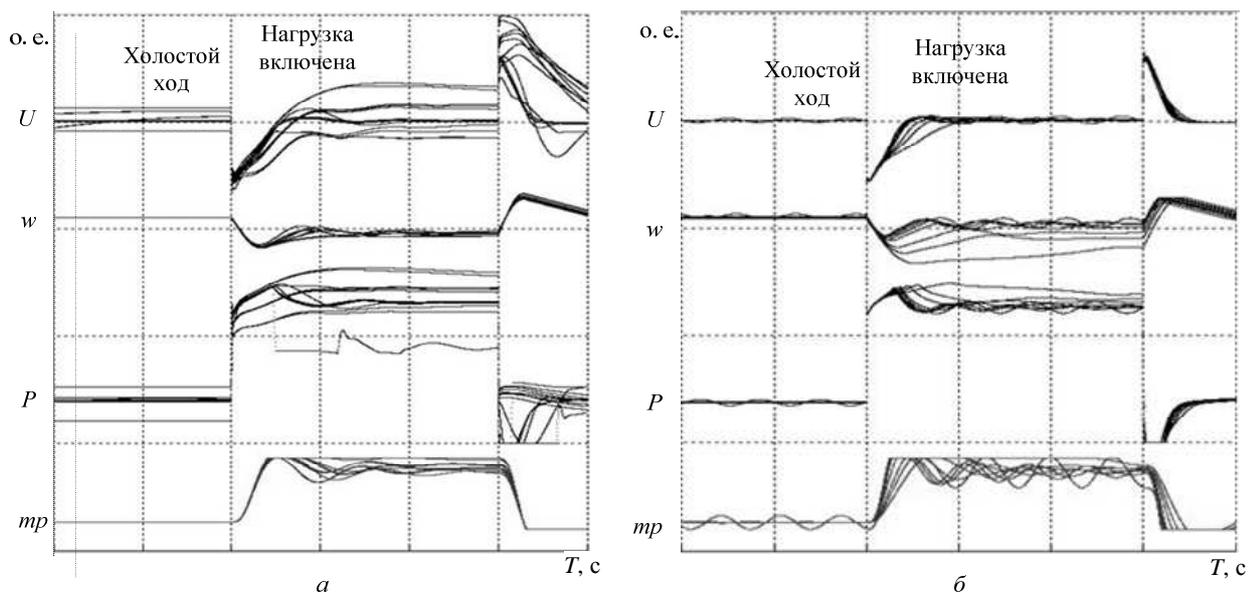


Рис. 2

какой точностью можно получить конечный результат, зависит от индивидуальных качеств и опыта настройщика, т. е. существенную роль играет человеческий фактор.

В качестве выводов по проведенным на первом этапе исследованиями можно указать, что используемые при этом математические модели [8] как отдельных компонентов, так и систем в целом, должны быть модифицированы для надления их особыми свойствами, позволяющими, во-первых, наблюдать изменение качества функционирования в зависимости от изменения параметров систем управления и регулирования, как показано на рис. 2, и, во-вторых, осуществлять настройку модели с применением методов оптимизации [9], для чего должны быть реализованы возможности автоматической оценки качества модели и автоматического поиска и замены значений для настроечных параметров компонентов регулирования и управления.

При этом выявлено, что для автоматизации оценки качества функционирования систем регулирования (напряжения, частоты вращения и т. п.) наиболее эффективно использование не совокупности таких отдельных показателей, как максимальные отклонения при провалах ( $\Delta U_1$ ) и перерегулировании ( $\Delta U_2$ ), значение установившейся ошибки ( $\Delta U_3$ ), наличие колебаний и продолжительность процессов ( $T_1, T_m$ ), приведенных на рис. 3, а численных значений функционала  $F(\bar{X})$  (заштрихованная площадь), вычисляемого по выражению (1) в ходе экспериментов с различными параметрами настройки модели ( $\bar{X}$ ):

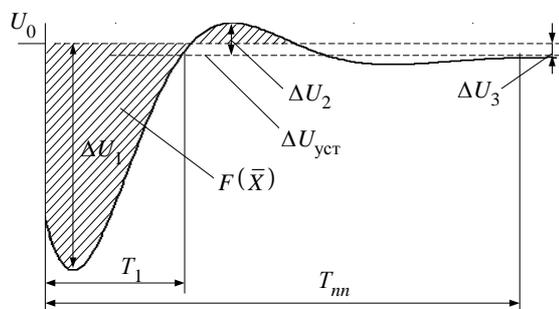


Рис. 3

$$F(\bar{X}) = \int_0^t |u(t) - u_{уст}| t dt + P(\Delta U_2), \quad (1)$$

где  $u(t)$  — мгновенное значение регулируемого параметра;  $u_{уст}$  — заданное значение регулируемого параметра (уставка);  $P(\Delta U_2)$  — функция, учитывающая наличие перерегулирования. Очевидно, что чем меньше значение  $F$ , тем лучше качество системы регулирования. Однако при нескольких параметрах настройки систем не очевидно, какое сочетание этих параметров дает наилучший результат настройки САР.

Переходные процессы с перерегулированием признаются менее качественными и потому не желательны. В связи с этим в функцию  $P(\Delta U_2)$ , учитывающую перерегулирование, следует вводить и подбирать коэффициент штрафа за перерегулирование  $\gamma$  и вычислять  $P(\Delta U_2)$  по площади перерегулирования или по максимальному значению  $\Delta U_2$  (например, по следующему выражению):

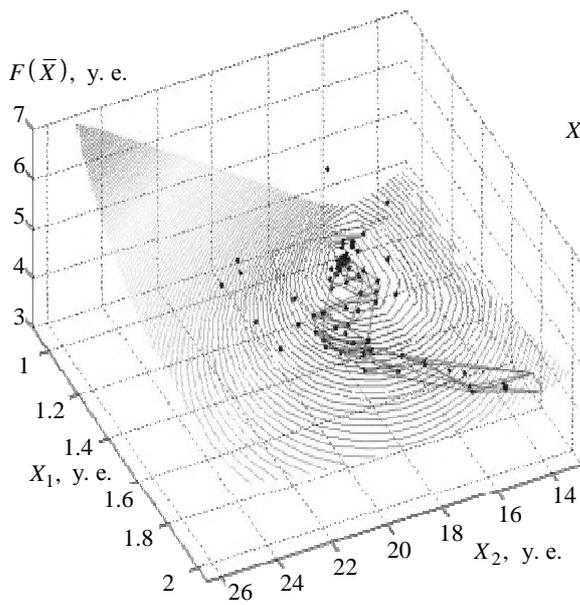


Рис. 4

$$P(\Delta U_2) = \gamma \max [0, u(t) - u_{уст}]. \quad (2)$$

Исследования на математических моделях объектов судовой электроэнергетики показали, что поверхности функционалов качества настройки САР СГ, вычисляемые по выражениям (1) и (2), имеют ярко выраженные экстремумы (или области экстремумов), поэтому автоматизация поиска минимума  $F(\bar{X})$  и соответствующих ему оптимизированных значений настроечных параметров САР эффективно реализуется при использовании многопараметрических методов деформируемого многогранника, как показано на рис. 4. Экспериментально выявлено также, что модификация известного метода оптимизационного поиска смещением центра тяжести многогранника к вершине с наименьшим значением  $F(\bar{X})$  в некоторых случаях позволяет добиться цели за меньшее количество экспериментов (рис. 5), т. е. быстрее на 15–20 % времени, что имеет важное значение в практике проведения настройки и испытаний реальной аппаратуры с точки зрения энерго- и ресурсосбережения.

Следует особо подчеркнуть, что рассмотренные методы оптимизации – наиболее подходящие из всех и алгоритмически одинаково эффективны как для моделей САР и САУ, так и для реальной аппаратуры. Причем если в рассмотренном примере исследований на математических моделях для наглядности иллюстраций был организован поиск оптимума в пространстве двух координат,

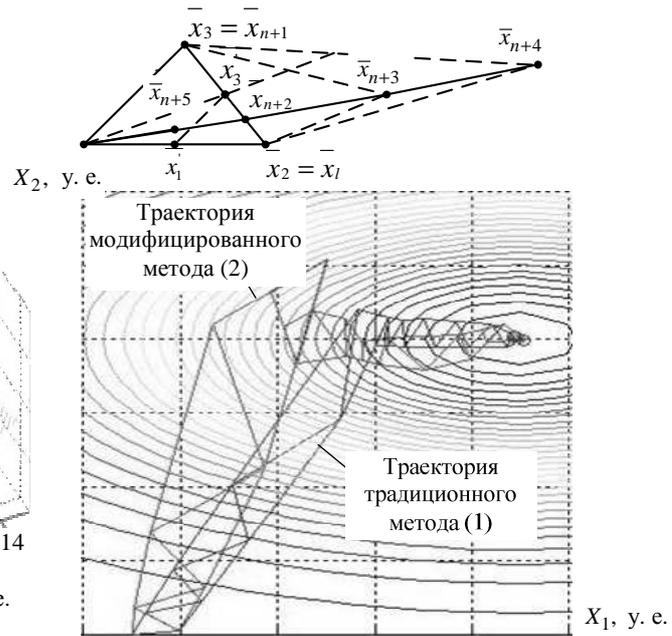


Рис. 5

то в реальной аппаратуре настроечных параметров значительно больше – поэтому и выбраны многопараметрические численные методы.

Важнейший результат проведенных исследований и разработок на математических моделях представляет переносимость разработанных методик на следующие этапы – второй и третий контуры обобщенной схемы рис. 1. Сначала для получения необходимых характеристик имитаторов, а затем для реализации технологий ПФМ и автоматизации оценки качества и настройки реальной аппаратуры автоматике как конечной цели данной разработки.

В процессе выполнения последующих этапов разработки определены требования к свойствам и характеристикам аппаратуры физического моделирования объектов судовой электроэнергетики и обосновано использование при этом не вращающихся электромашинных, а специально разработанных для этих целей статических преобразователей. Эти специальные преобразователи, в отличие от промышленных образцов, должны иметь возможность не только стабилизировать выходные параметры (частота, напряжения, токи), но и изменять эти параметры во времени (как по амплитуде и частоте, так и по форме и фазе).

Разработанные структурные схемы, выполненное математическое моделирование и схемотехническое макетирование подтверждает эффективность такого нововведения за счет большей гибкости в управлении параметрами выходных сигналов, снижения рисков аварий в ходе проведения натуральных экспериментов при расширении

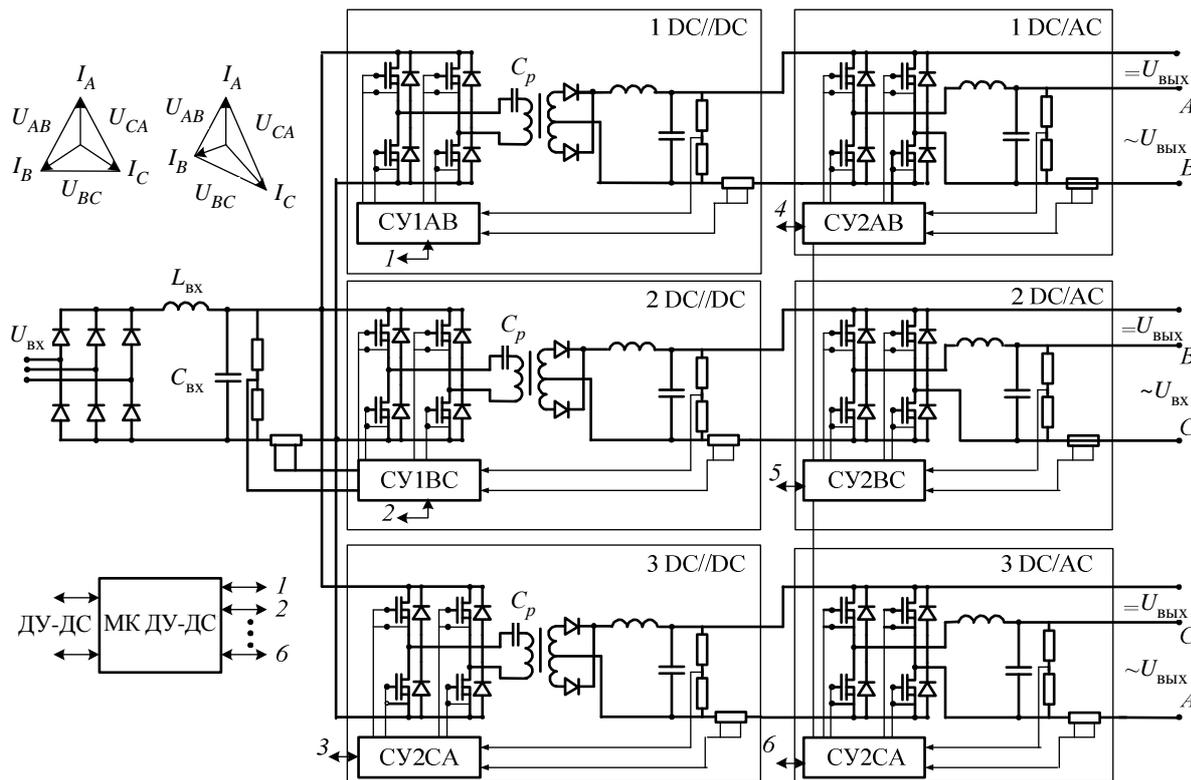


Рис. 6

функциональных возможностей имитации любых режимов, включая аварийные. В качестве примера на рис. 6 приведена схема статического преобразователя, способного имитировать параметры 3-фазной судовой электросети как в статических, так и в динамических режимах.

Особенность данного преобразователя представляет общий входной каскад выпрямления с фильтрацией входного напряжения и три параллельно функционирующих канала преобразования выпрямленного напряжения  $U_{BX}$  в выходные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  или в напряжения пропорциональные фазным токам  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ . Каждый канал представляет собой структуру DC//DC/AC-преобразования с автономным по каскадам микропроцессорным управлением [10]. Такая структура обеспечивает независимое управление первыми каскадами каждого канала с помощью систем управления СУ1AB, СУ1BC и СУ1CA, т. е. управление амплитудой выходного напряжения в статических режимах или огибающей в динамических режимах. В то же время, с помощью систем управления СУ2AB, СУ2BC и СУ2CA обеспечивается управление и формирователями кривых мгновенных значений выходного напряжения, например в виде синусоиды или периодической кривой со спектральными составляющими. Все независимо функционирующие

СУ1 и СУ2 имеют возможность получать данные об изменении режима работы от общего микроконтроллерного блока дистанционного управления и сигнализации (МК ДУ-ДС), обеспечивающего связи с системами верхнего уровня. Таким образом, можно безопасно и независимо изменять параметры любого из выходов преобразователя, что требуется при имитации таких режимов в СЭЭС, как несимметрия (см. векторные диаграммы трехфазной системы на рис. 6) или обрывы фаз.

Некоторые результаты моделирования и макетирования работы имитаторов приведены на рис. 7, где представлены: осциллограмма, полученная в реальной СЭЭС (рис. 7, а); кривые имитационного математического моделирования (рис. 7, б и в); осциллограммы физического моделирования вращающимися преобразователями (рис. 7, г) и осциллограммы, полученные при использовании технологии программно-физического моделирования на основе статических преобразователей (рис. 7, д и е). Сравнение этих кривых показывает, что наиболее точное воспроизведение форм кривых удастся получить по технологии ПФМ, а в сочетании с внешним управлением формой огибающих кривых при имитации переходных процессов это обеспечивает наиболее адекватные условия настройки и испытаний как аппаратуры автоматики, так и встроенного программного обеспечения.

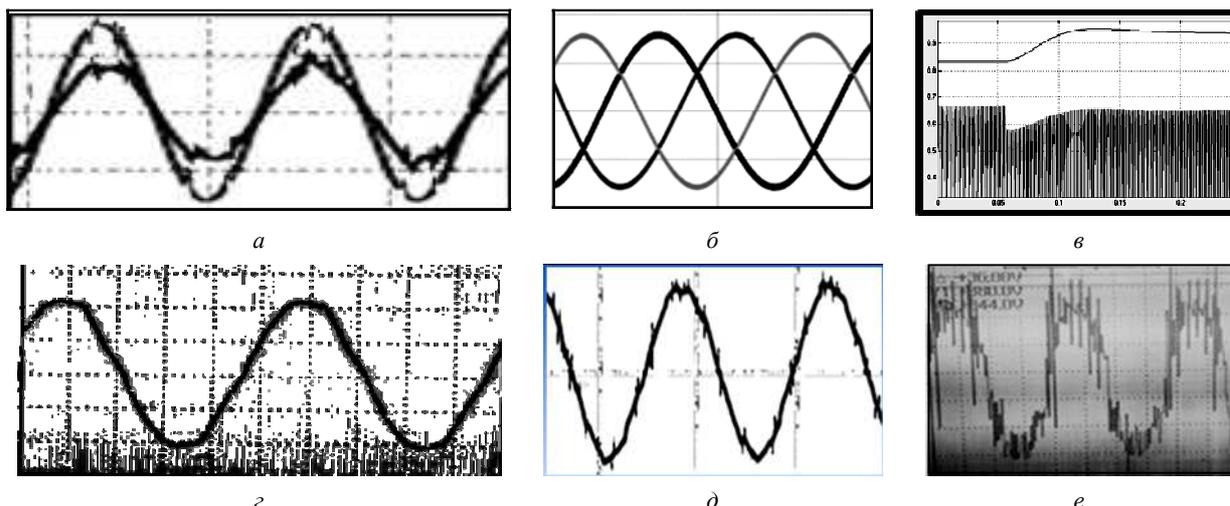


Рис. 7

Кроме этого, используя два таких алгоритмически взаимосвязанных преобразователя (один для сигналов по напряжениям, а другой – по токам в узле СЭЭС), можно безопасно и эффективно имитировать для аппаратуры автоматики ситуации с любым уровнем нагрузки, перегрузки и/или любого вида короткого замыкания в сети при фактическом отсутствии тепловыделяющих нагрузочных устройств.

Схемы преобразователей на рис. 5 универсальны и легко модифицируются при необходимости. Это позволяет имитировать сигналы всех типов и видов объектов судовой электроэнергетики любой мощности как постоянного, так и переменного трехфазного или однофазного тока, включая и единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС) с электродвижением. Состав и номенклатура комплекта необходимых имитаторов определяется по штатным схемам внешних подключений испытываемой аппаратуры. Безопасность проведения экспериментальных проверок функционирования аппаратуры автоматики гарантируется тем, что имитируемые сигналы по напряжениям и токам взаимосвязаны не на физическом, а только на программном (алгоритмическом) уровне воспроизведения ситуаций.

Приведенные возможности дают существенные преимущества перед традиционной техноло-

гией физической имитации СЭЭС (на электромашиных преобразователях), поскольку не только расширяют, но и никак не ограничивают диапазон и разнообразие видов проведения натуральных экспериментов для настройки и испытаний реальной аппаратуры автоматики СЭЭС как для локальных регуляторов или набора функциональных устройств ГРЩ, так и для интегрированных САУ ЭЭС.

Сравнение результатов осциллографирования в реальных СЭЭС, имитационного математического и физического моделирования вращающимися преобразователями с результатами использования технологии программно-физического моделирования на основе статических преобразователей показывает, что технология ПФМ позволяет создавать наиболее адекватные условия проверки работоспособности и качества функционирования аппаратуры автоматики судовых электроэнергетических объектов.

Предлагаемая технология программно-физического моделирования компонентов СЭЭС на основе статических преобразователей представляется наиболее эффективной, безопасной и отвечающей идеям энерго- и ресурсосбережения при подготовке и вводе объектов судовой электроэнергетики в эксплуатацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лернер Д. М., Леута А. А., Ставицкий А. М. Применение имитационных испытаний – путь интенсификации испытаний судового электрооборудования // Экономия топливных ресурсов при испытании судовых ЭЭС: сб. НТО им. акад. А. Н. Крылова. 1987. Вып. 433. С. 30–33.

2. Леута А. А., Турусов С. Н. Опыт и перспективы программно-физического моделирования энергообъектов при создании САУ // ЭЭС: тез. докл. VII Меж-

дунар. науч.-техн. конф. «Проблемы повышения технического уровня электроэнергетических систем и электрооборудования кораблей, плавучих сооружений и транспортных средств». СПб., 2000. С. 25–26.

3. Губанов Ю. А., Леута А. А. Комплект аппаратно-программных средств для проведения испытаний систем управления корабельными электроэнергетическими системами // Системы управления и обра-

ботки информации: науч.-техн. сб. НПО «Аврора». СПб., 2001. С. 129–139.

4. Губанов Ю. А., Леута А. А. Программно-физическое моделирование: основа новой технологии проектирования систем управления судовыми электроэнергетическими системами (ЭЭС) // Сб. докл. на Шестой междунар. конф. «НЕВА-2001». Секция D: Энергетические установки для судов и морских сооружений. СПб., 2001. С. 78–79.

5. Губанов Ю. А., Леута А. А. Методы и средства моделирования для имитации физических параметров корабельных ЭЭС в испытательных и тренажерных комплексах // II Междунар. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN`2001. СПбНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2001. С. 127–130.

6. Губанов Ю. А., Ефимова М. И., Леута А. А. Технология программно-физического моделирования корабельных электроэнергетических систем в процессе управления. Modelling and Analysis of safety and Risk in Complex Systems / Proc. of the Second Intern. Scientific School MA SR – 2002. Saint Petersburg, 2002. P. 312–314.

7. Токарев Л. Н. Системы автоматического регулирования. Примеры схем и структур, статические и динамические характеристики, математические модели, элементы теории регулирования. СПб.: НОТАБЕНЕ, 2001. 191 с.

8. Леута А. А., Нгуен Ч. Ч., Нгуен М. Д. Математическая модель компонентов судовых электроэнергетических систем как составная часть технологии испытаний систем автоматического управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 2. С. 25–30.

9. Леута А. А., Нгуен Ч. Ч., Нгуен М. Д. Комплект математических моделей компонентов судовых электроэнергетических систем как средство наладки и испытаний аппаратуры автоматического и автоматизированного управления // Молодой ученый. Сер. Техн. науки. 2011. Т. 1, № 7 (30). С. 32–37.

10. Леута А. А., Кузнецов М. А., Нгуен Ч. Ч. Опыт разработки электропривода // Сб. докл. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 / Мордовский ун-т. Саранск, 2014. С. 88–92.

A. A. Leuta, Ch. Ch. Nguyen

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## SETTING AND TESTING AUTOMATIC EQUIPMENT OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER OBJECTS

*Need of development and implementation of technology of program and physical modeling on the basis of static converters ensures increase in efficiency and safety of equipment's setting and testing of the ship electro-automatic and automated management systems. The main stages and results of this technology's development, which contributes automation, and also resource-and energy saving in preparation and putting into operation of the ship power objects are considered.*

**Ship's electric power, automation, technology of equipment's setting and testing, mathematical and programm-physical modeling, multiparametric optimization of setting of automatic regulation and control systems, rotating and static converters**

УДК 681.5

И. И. Суляев, Д. Х. Имаев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Моделирование медеплавильной печи как объекта управления температурой расплава

*Рассматривается задача разработки математической модели процесса плавления медно-никелевого сырья в печи Ванюкова как объекта управления температурой расплава. Проведен системный анализ объекта, систематизирована априорная информация о процессе и выбран технологический режим, для которого предложена структура линейной динамической модели. Представлены результаты компьютерной имитации системы стабилизации температуры расплава и методика активной идентификации металлургической печи.*

**Печь Ванюкова, температура расплава, управление, декомпозиция, режим, модель динамики**

Целью управления печью Ванюкова (ПВ) для плавления медно-никелевых руд является стабилизация технологических переменных: уровня, плот-

ности и температуры расплава в шахте печи [1]–[4]. Стабилизация достигается согласованным изменением подачи шихты, окислительного дутья (техно-