

DOI 10.5862/JEST.254.11

УДК 681.518.3

А.М. Панкин, Н.В. Коробкин

АЛГОРИТМЫ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

A.M. Pankin, N.V. Korovkin

ALGORITHMS OF NEW POWER-PRODUCING OBJECTS DIAGNOSIS SYSTEMS

Повышение надежности сложного технологического оборудования обеспечивается созданием нового поколения систем диагностирования (СД) этих объектов, а также подготовкой персонала для проведения диагностических измерений и постановки диагноза о техническом состоянии этих объектов. Для новых АЭС к объектам диагностирования, помимо реактора, отнесены: главные циркуляционные насосные агрегаты, турбогенераторная установка, электроприводная арматура и ряд других изделий и систем. В статье рассматриваются вопросы создания нормативно-технической документации по направлению «Техническая диагностика» и использования единой терминологии при построении СД технических объектов. Особое внимание уделено определению «диагностический признак». В качестве объектов диагностирования здесь рассматриваются «непрерывные» технические объекты. Вводится понятие «диагностическая модель», которая строится на основе математической модели объекта и связывает непосредственно измеряемые величины и диагностические признаки объекта. Изложена методология построения алгоритмов диагностирования при создании технических средств СД, которые проектируются одновременно с новыми объектами. Обращено внимание на то, что использование представленной методологии при создании диагностического программного обеспечения позволит перейти на стратегию «Техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) по фактическому состоянию» вместо ныне существующего подхода «ТО и Р по регламенту».

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ; ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК; ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ; МЕТОДОЛОГИЯ.

The problem of improving the reliability of complex major equipment at Russia's NPPs can be managed by assessing the technical condition of equipment using new generation diagnosis systems. This requires development of algorithms for diagnosing technical objects (TO) and preparation of personnel for performing diagnostic measurements and arriving at diagnosis of the technical condition of TO. The objects of diagnosis in new NPPs include a reactor, reactor coolant pumps, turbine-generator, motor-operated valves, and other systems and components. The paper addresses the issues of preparing standards and specifications for Technical Diagnostics and using unified terminology in developing diagnosis systems for TO. A special attention is made to definition of the term "diagnostic indicator" which can be understood as a structure parameter or characteristic of a TO. In this paper, diagnosis objects are considered as "continuous" objects. The "diagnostic model" notion is introduced. A diagnostic model is constructed based on a mathematical model of the TO and relates direct measurements to diagnostic indicators of the condition of the object. The authors also propose using special algorithms in the diagnosis procedure for the cases when the amount of measured information is insufficient or the structure of a diagnosis object is unknown. In the first case, integrated diagnostic indicators should be used and in the second case, mathematical model coefficients should be identified and their values monitored during the object lifetime. The proposed methodology of developing diagnostic software supports Condition-Based

Maintenance (CBM) strategy which can advantageously replace the currently used Scheduled Maintenance (SM) approach.

TECHNICAL OBJECT; DIAGNOSTIC INDICATOR; DIAGNOSTIC MODEL; DIAGNOSIS SYSTEM; METHODOLOGY.

Введение

Для реализации в РФ стратегии импортозамещения необходимо определить направления, порядок развития которых требуется пересмотреть. Одним из таких направлений является «Техническая диагностика», развитие которой началось с 60-х годов прошлого века и было обусловлено крупными успехами, достигнутыми в то время в трех стратегических областях: космосе, атомной технике, системе ПВО [1, 2]. К сожалению, приходится констатировать, что это направление закончило свое развитие в конце 80-х годов [3], когда по нему был выпущен последний ГОСТ [4], по которому приходится работать и в наше время. Причина понятна (она сказывается и во многих других областях, далеких от технической диагностики): развал Советского Союза и Госстандарта. Тем не менее создание новых сложных и дорогих технических объектов приводит к необходимости одновременно с их проектированием разрабатывать и системы, которые будут после запуска этих объектов в эксплуатацию диагностировать их техническое состояние. Особое значение разработка систем диагностирования имеет для объектов атомной техники.

При создании объектов ядерной энергетики особо важны повышенная надежность и экономичность их основного оборудования. Это особенно актуально для новых АЭС РФ, поскольку они проектируются сроком на 60 лет. Предложено взамен прежнего подхода «Техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) по регламенту» переходить на новую стратегию «ТО и Р по техническому состоянию». Такая стратегия была продекларирована концерном «Росэнергоатом» более десяти лет назад. Для ее реализации необходимо разработать новые методики диагностирования тех объектов и изделий, которые предполагается контролировать в процессе отработки заданного ресурса на АЭС РФ. В случае ЯЭУ к таким объектам, помимо реакторной установки, относятся:

главные циркуляционные насосные агрегаты;
турбогенераторная установка;

электроприводная арматура.

Диагностирование этих и других объектов предполагается выполнять на основе стационарных и переносных технических средств, входящих в системы диагностирования (СД) объектов [6, 7]. Создание таких СД предлагается связать с определенным порядком действий при их построении. Для этого может быть использована методология диагностирования непрерывных технических объектов, которая впервые была представлена еще в 2003 году на одной из конференций Минатома «Создание новой техники для АЭС. Импортозамещение» [8]. Эта методология в настоящее время доработана по ряду позиций [9].

Цели данной статьи:

1. Дать оценку существующего в РФ положения дел с нормативной базой по направлениям «Надежность в технике» и «Техническая диагностика».
2. Представить методологию создания алгоритмов диагностирования непрерывных технических объектов, на основе которой может быть реализована концепция «ТО и Р по техническому состоянию» для широкого класса изделий и систем.

Проблема отсутствия новой нормативной базы

Особо важный момент при разработке новой методологии – необходимость связать по ряду общих определений имеющиеся нормативные базы по технической диагностике и теории надежности.

В первую очередь предлагается договориться о полной и единой терминологии в части понятий и определений технической диагностики, имеющей общее значение для всех классов технических объектов.

Это необходимо сделать по двум причинам:

1. В настоящее время по надежности в технике и технической диагностике рабочими в части основных определений являются государственные стандарты СССР, относящиеся к 1989 году [4, 10]. В связи с последовавшими событиями в

нашей стране они давно не пересматривались. Попытка ввести в 2009 году новый ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» на основе нормативных положений международного стандарта МЭК 60050 (191):1990-12 «Надежность и качество услуг», как известно, не состоялась. В 2012 году действие этого стандарта было приостановлено. Что же касается аналогичного ГОСТ-а по технической диагностике, то, насколько известно, даже квалифицированных попыток его доработки пока вообще не было.

2. При разработке новых систем диагностирования специалисты, которые в этом процессе участвуют, и специалисты, которые будут в дальнейшем их эксплуатировать, должны разговаривать на одном языке, однозначно интерпретировать используемые при общении технические термины. Тогда мы не увидим в названии создаваемых систем слов «система диагностики» вместо правильного названия «система диагностирования». Можно привести и ряд других примеров, но это отдельная тема.

Отдельное внимание при решении вопросов диагностирования авторы обращают на объекты, представляемые электрическими цепями. Это связано с возможностью построения моделей таких объектов на основе хорошо разработанного в теоретической электротехнике математического аппарата для объектов, представляемых как цепи с сосредоточенными или распределенными параметрами [5, 12–17].

Методология диагностирования технических объектов

Ниже представлена методология создания алгоритмов диагностирования, которые могут быть реализованы в диагностическом программном обеспечении будущих систем диагностирования сложных технических объектов. При этом, как уже было отмечено, рассматривается широкий класс «непрерывных» технических объектов. Изложение этой методологии — основная цель статьи. Отмечаются элементы новизны, которые, по мнению авторов, отличают данную методологию от подходов, ранее использованных при создании уже существующих систем технического диагностирования. Поскольку по роду деятельности одному из авторов приходится ре-

шать вопросы создания систем диагностирования для ядерно-энергетических установок, то в качестве объектов диагностирования в первую очередь предполагается рассматривать объекты атомной техники.

В то же время ценность представляемой методологии заключается в ее общем характере, позволяющем уйти от структуры отдельных объектов. Именно такой путь привел в свое время к созданию новой науки — кибернетики, науки, ушедшей от рассмотрения структур отдельных механизмов и систем и начавшей рассматривать множество состояний, в которых эти системы могут или не могут находиться.

Предлагаемая методология диагностирования состоит из последовательности действий, реализуемых на трех этапах [9].

Первый этап можно назвать «Математическое моделирование». Он включает:

описание нового диагностируемого объекта, содержащее структурную и функциональную схемы, характеристики *структурных единиц* объекта, а также *рабочие функции* (и *функции безопасности*), для выполнения которых данный объект создан или создается;

подготовку необходимой информации для разработки математической модели (ММ) объекта на выбранном уровне его детализации;

обоснование выбранного уровня детализации модели с учетом построения возможных связей между рабочими функциями объекта и теми макропараметрами объекта [18, 19], изменение которых в процессе эксплуатации вызовет существенное изменение рабочих функций в границах работоспособности объекта;

построение математической модели объекта на основе изучения физико-механических, химических свойств и параметров элементов объекта, его физической природы и механизма возможных отказов; при построении модели текущие состояния элементов и систем объекта описываются уравнениями, отражающими физические закономерности, имеющие место в жизненном цикле данного объекта;

определение набора наиболее значимых параметров и характеристик объекта, которые подходят на роль диагностических признаков объекта (ДП); уменьшение полученного набора ДП до возможно минимального количества;

оценку диапазонов допустимых значений ДП при нахождении объекта в работоспособном состоянии;

определение набора величин, непосредственно измеряемых в процессе диагностирования объекта, которые могут быть использованы для оценки его *технического состояния*;

построение диагностической модели (ДМ) объекта, описывающей аналитические зависимости между непосредственно измеряемыми величинами и ДП объекта; получение такой модели позволяет перейти при оценке технического состояния объекта от пространства рабочих функций к пространству ДП;

анализ возможности идентификации полного набора ДП;

создание на одном из алгоритмических языков расчетной программы, реализующей алгоритмы построенных моделей диагностируемого объекта.

На этом завершается этап построения диагностического программного обеспечения будущей системы диагностирования (СД), который был определен как «Математическое моделирование». Составные части данного этапа и существующие между ними связи представлены на рис. 1.

Что является новым в представляемой методологии, отличающей ее в части построения алгоритмов диагностирования от существующих традиционных подходов? В первую очередь, необходимо обратить внимание на то, что основными величинами в этой методологии являются не непосредственно измеряемые величины и не функции работоспособности объекта, на что больше всего обращалось внимание в традици-

онных алгоритмах диагностирования, а диагностические признаки объекта. Причем эти величины определены как структурные параметры или характеристики объекта, оказывающие наибольшее влияние на выполнение им своих функций при сохранении его безопасного состояния в режиме эксплуатации. В существующем варианте ГОСТ [4] речь идет о контролируемых параметрах, под которыми можно понимать и какие-то структурные параметры объекта, и параметры его состояния. Параметры состояния предлагается исключить из числа диагностических признаков объекта, поскольку они зависят не только от параметров структуры, но и от входных воздействий, подаваемых на объект диагностирования. А режимы диагностирования включают подачу на объект как рабочих, так и тестовых воздействий [20–23].

Следующий новый элемент методологии – определение диагностической модели объекта, под которой предложено понимать зависимость между непосредственно измеряемыми при диагностировании величинами и косвенно определяемыми диагностическими признаками объекта. Предлагается обратить внимание на то, какая роль отводится оценке погрешности ДП, которая получается как погрешность косвенно измеряемой величины. Оценка этой погрешности приобретает особое значение, когда в процессе эксплуатации объекта его диагностические признаки приближаются к своим граничным значениям. В зависимости от величины погрешности ДП может быть поставлен тот или иной диагноз. Поэтому в методологии предложено ввести новую величину, называемую «информативностью диагностического измерения».



Рис. 1. Этап «Математическое моделирование» рассматриваемой методологии

Набор таких величин просчитывается еще до начала эксплуатации объекта. На основе этих расчетов могут быть определены контрольные точки, в которых должны проводиться измерения после начала эксплуатации объекта. Поскольку обычно количество непосредственно измеряемых величин меньше количества первоначально определенных ДП объекта, то их полная идентификация в ряде случаев невозможна. Поэтому в методологии на примерах объектов диагностирования, представляемых электрическими цепями, предложены пути перехода к новым, укрупненным ДП. В случае неизвестной структуры диагностируемого объекта в качестве ДП предлагается рассматривать коэффициенты модели объекта, построенной на основе имеющегося объема измерительной информации. В этом случае возможна неточная постановка диагноза, поскольку объект рассматривается как «черный ящик».

Вторым этапом рассматриваемой методологии является этап, на котором получается и обрабатывается измерительная информация. Он называется «Процедура диагностирования» и состоит из отдельных процедур, выполняемых каждый раз при проведении новых диагностических измерений. На этом этапе выполняется работа с использованием полученной ранее диагностической модели контролируемого объекта. Цель его – получить заключения о техническом состоянии объекта на момент времени проведения измерений. Для этого выполняется ряд процедур:

получение возможного объема измерительной информации;

оценка погрешностей выполненных измерений;

идентификация ДП с привлечением полученной ранее диагностической модели объекта; оценка погрешностей идентификации ДП; оценка информативности выполненных измерений [11];

постановка диагноза о техническом состоянии объекта на момент времени проведения диагностических измерений.

Составные части этого этапа и существующие между ними связи представлены на рис. 2.

Таким образом, после проведения процедуры диагностирования и получения ожидаемого набора диагностической информации *алгоритм диагностирования* состоит из следующей последовательности действий:

запуска программы идентификации диагностических признаков объекта, в которой реализована его диагностическая модель;

сравнения полученных величин диагностических признаков объекта и оценок их погрешностей с граничными значениями интервалов или областей допустимых значений, при нахождении в которых объект является работоспособным;

расчета информативности выполненного диагностического измерения при приближении какого либо диагностического признака к его предельному значению;

постановки диагноза техническому состоянию контролируемого объекта с учетом всего набора диагностических признаков объекта в момент времени проведения диагностических измерений.



Рис. 2. Этап «Процедура диагностирования» рассматриваемой методологии

На этом завершается этап диагностирования, получивший в технической диагностике название «контроль технического состояния (КТС)» [3].

Результат задачи КТС имеет некоторую вероятность правильной постановки диагноза о том или ином состоянии объекта. На ошибку диагностирования в той или иной степени влияют неадекватность используемой ММ и реального объекта, вычислительные погрешности при идентификации ДП объекта, погрешности измерительного процесса.

Заключительный, **третий этап** методологии диагностирования предполагает переход к следующей задаче технической диагностики, известной под названием «поиск дефекта», если на этапе КТС объект был признан неработоспособным, или же решение задачи прогнозирования остаточного ресурса в противном случае. Для этих задач алгоритмы их решения создаются на основе представленной в методологии математической модели объекта. В этой модели набор структурных параметров, в том числе диагности-

ческих признаков, связан с набором величин, представляющих рабочие функции объекта.

Заключение

Разработка алгоритмов технического диагностирования на основе представленной выше методологии позволяет создавать программное обеспечение для новых систем диагностирования сложных и ответственных технических объектов. Двигаясь вперед и развивая это направление создания новых СД, можно подойти к реализации концепции «техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) по техническому состоянию», которая со временем заменит существующую концепцию «ТО и Р по регламенту».

В противном случае вся процедура диагностирования может быть сведена к проведению допускового контроля ряда измеряемых параметров. У этих параметров не всегда определены границы их допустимых значений, выход за которые должен классифицироваться как переход объекта в неработоспособное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозгалецкий А.В., Калявин В.П. Системы диагностирования судового оборудования: Учеб. пособие. Л.: Судостроение, 1987.
2. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.П. Калявин [и др]. М.: Машиностроение, 1989. 630 с.
3. Калявин В.П. Основы теории надежности и диагностики: Учебник. СПб.: Изд-во «Элмор», 1998. 172 с.
4. ГОСТ 27.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990.
5. Панкин А.М., Коровкин Н.В. Диагностика электроэнергетических устройств и систем: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 302 с.
6. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004. 344 с.
7. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2010. 391 с.
8. Панкин А.М. К созданию малогабаритной системы диагностирования электронных, электротехнических блоков на основе методики диагностирования электрических цепей // Создание новой техники для АЭС. Импортзамещение : II науч.-техн. конф. Сочи, 19–23 мая 2003 г. М., 2003. С. 75–83.
9. Панкин А. М. Введение в теорию диагностирования электротехнических систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 264 с.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990.
11. Панкин А.М., Башарин С.А. Аспекты информативности измерений в задачах диагностирования параметров электрических цепей // Методы и средства технической диагностики : сб. научн. ст. Вып. 17. Йошкар-Ола, 2000. С. 65.
12. Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M. Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2008. Т. 55. № 5. P. 1237–1247.
13. Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M. Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2006. Т. 53. № 1. P. 78–91.
14. Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M. Identification of electric circuits: problems and methods of solution accuracy enhancement. // Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems "Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2005, ISCAS 2005" 2005. P. 980–983.
15. Коровкин Н.В., Адалев А.С. Метод локализации источника помехи в электрической схеме. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 4. С. 98.

16. **Коровкин Н.В., Лысенко Г.С.** Технология локализации источников помех в энергосистемах. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 2. С. 121–130.

17. **Коровкин Н.В., Приходченко Р.В., Тухас В.А.** Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения // Технологии электромагнитной совместимости. 2011. № 1. С. 50–58.

18. **Коровкин Н.В., Миневи́ч Т.Г.** Универсальный метод построения макромоделей устройств по частотным характеристикам // Изв. высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 54–61.

19. **Демирчян К.С., Ракитский Ю.В., Бутырин П.А.** Проблемы численного моделирования процессов в электрических цепях. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 1982. № 2. С. 94.

20. **Боронин В.Н., Коровкин Н.В., Миневи́ч Т.Г.** Определение параметров и расчетных процессов в линиях электропередач // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 2(44). С. 47–59.

21. **Коровкин Н.В., Сморгонский А.В.** Анализ электромагнитной обстановки на электрических подстанциях и станциях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2(95). С. 19–24.

22. **Силин Н.В., Коровкин Н.В., Шамкин И.С.** Электромагнитная паспортизация высоковольтного электроэнергетического оборудования. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2(95). С. 120–125.

23. **Силин Н.В., Коровкин Н.В., Шамкин И.С.** Об особенностях организации эксплуатационного обслуживания высоковольтного оборудования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2(100). Т. 2. С. 19–22.

REFERENCES

1. **Mozgalevskiy A.V., Kalyavin V.P.** Sistemy diagnostirovaniya sudovogo oborudovaniya: ucheb. Posobiye. L.: Sudostroyeniye, 1987. (rus)

2. **Tekhnicheskiye sredstva diagnostirovaniya: Spravochnik / V.V. Klyuyev, P.P. Parkhomenko, V.P. Kalyavin [i dr].** M.: Mashinostroyeniye, 1989. 630 s. (rus)

3. **Kalyavin V.P.** Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki: Uchebnik. SPb.: Izd-vo «Elmor», 1998. 172 s. (rus)

4. **GOST 27.911-89.** Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya. – M.: Izd-vo standartov, 1990. (rus)

5. **Pankin A. M., Korovkin N.V.** Diagnostika elektroenergeticheskikh ustroystv i sistem: ucheb. Posobiye. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. 302 s. (rus)

6. **Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I.** Vibr shumovaya diagnostika VVER. M.: Energoatomizdat, 2004. 344 s. (rus)

7. **Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B .M.** Sistemy diagnostirovaniya VVER. M.: Energoatomizdat, 2010. 391 s. (rus)

8. **Pankin A. M.** K sozdaniyu malogabaritnoy sistemy diagnostirovaniya elektronnykh, elektrotekhnicheskikh blokov na osnove metodiki diagnostirovaniya elektricheskikh tsepey. *Sozdaniye novoy tekhniki dlya AES. Importozameshcheniye: II nauch.-tekh. konf. Sochi, 19–23 maya 2003 g.* M., 2003. S. 75–83. (rus)

9. **Pankin A.M.** Vvedeniye v teoriyu diagnostirovaniya elektrotekhnicheskikh system. SPb.:Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 264 s. (rus)

10. **GOST 27.002-89.** Nadezhnost v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. M.: Izd-vo standartov, 1990. (rus)

11. **Pankin A. M., Basharin S.A.** Aspekty informativnosti izmereniy v zadachakh diagnostirovaniya parametrov elektricheskikh tsepey. *Metody i sredstva tekhnicheskoy diagnostiki :sb. nauchn. st.* Vyp. 17. Yoshkar-Ola, 2000. S. 65. (rus)

12. **Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M.** Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* 2008. T. 55. № 5. S. 1237–1247. (eng)

13. **Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M.** Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* 2006. T. 53. № 1. S. 78–91. (eng)

14. **Korovkin N.V., Adalev A.S., Hayakawa M.** Identification of electric circuits: problems and methods of solution accuracy enhancement. M., Proceedings – IEEE International Symposium on Circuits and Systems “Proceedings. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2005, ISCAS 2005*” 2005. P. 980–983. (eng)

15. **Korovkin N.V., Adalev A.S.** Metod lokalizatsii istochnika pomekhi v elektricheskoy scheme. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika.* 2009. № 4. S. 98. (rus)

16. **Korovkin N.V., Lysenko G.S.** Tekhnologiya lokalizatsii istochnikov pomekh v energosistemakh. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika.* 2013. № 2. S. 121–130. (rus)

17. **Korovkin N.V., Prihodchenko R.V., Tukhas V.A.** Problemy poiska istochnika pomekh v elektrosetyakh obshchego naznacheniya. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti.* 2011. № 1. S. 50–58. (rus)

18. **Korovkin N.V., Minevich T.G.** Universalnyy metod postroyeniya makromodeley ustroystv po chastotnym kharakteristikam. *Izv. Vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika.* 2006. № 3. S. 54–61. (rus.)

19. **Demirchyan K.S., Rakitskiy Yu.V., Butyrin P.A.** Problemy chislennogo modelirovaniya protsessov v elektricheskikh tsepyakh. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika.* 1982. № 2. S. 94. (rus)

20. **Boronin V.N., Korovkin N.V., Minevich T.G.** Opredeleniye parametrov i raschetnykh protsessov v liniyakh elektroperedach. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2006. № 2(44). S. 47–59. (rus)

21. **Korovkin N.V., Smorgonskiy A.V.** Analiz elektromagnitnoy obstanovki na elektricheskikh podstantsiyakh i stantsiyakh. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 2(95). S. 19–24. (rus)

22. **Silin N.V., Korovkin N.V., Shamkin I.S.** Elektromagnitnaya pasportizatsiya vysokovoltного elektroenergeticheskogo oborudovaniya. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 2(95). S. 120–125. (rus)

23. **Silin N.V., Korovkin N.V., Shamkin I.S.** Ob osobennostyakh organizatsii ekspluatatsionnogo obsluzhivaniya vysokovoltного oborudovaniya. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 1(100). T. 2. S. 19–22. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ПАНКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук докторант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: panke@sbor.net

PANKIN Aleksandr M. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: panke@sbor.net

КОРОВКИН Николай Владимирович – доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

KOROVKIN Nikolai V. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com