

30. Millo, Federico, Marco Gianoglio Bernardi, Emanuele Servetto, and Diego Delneri. "Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 18 January 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

31. Kaltoft, Johan, and Mikkel Preem. "Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

32. Higashida, Masanori, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiro Yoshizawa, Hirotaka Takata, and Takamichi Hosono. "Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NOx Regulation Tier III for twostroke diesel engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spb-engine-prof@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Aleksandr Pavlovich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
app.polab@inbox.ru
Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spb-engine-prof@mail.ru

УДК 62-83:629.1

**А. В. Саушев,
Д. И. Троян**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

В статье приводится анализ методов идентификации динамических систем применительно к электроприводам портовых перегрузочных машин. Показано, что электроприводы этих машин являются сложными электромеханическими системами, механическая часть которых содержит элементы с упругими связями и является многомассовой. Проанализированы особенности этих систем, требующие при решении задач моделирования и идентификации учета зазоров в зубчатых передачах; упругостей, возникающих в валах; изменение моментов инерции в зубчатых венцах; изменение жесткости упругих элементов в муфтах. Предложено использование принципа декомпозиции и выделение основных элементов электроприводов, подлежащих идентификации. На основе теории управления предложены методы идентификации элементов электроприводов портовых перегрузочных машин. Показано, что для этой цели возможно использование частотных методов и методов, работающих во временной области. Установлено, что перспективными являются методы активной идентификации на основе теории планирования эксперимента и статистические методы, основанные на разложении импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра.

Ключевые слова: идентификация, электропривод, портовые перегрузочные машины, метод.

ОДНИМ из перспективных методов оценки технического состояния электроприводов является идентификация по динамическим характеристикам, которая отличается широкими возможностями фильтрации помех и возмущений. Под идентификацией системы понимают определение структуры и параметров ее математической модели, которые обеспечивают наилучшую близость выходных величин модели и объекта при одинаковых входных воздействиях [1]. Задача идентификации динамических систем в общем случае сводится к определению оператора модели системы, преобразующего ее входные воздействия в выходные величины.

В настоящее время значительную часть грузов, проходящих через морские порты, составляют навалочные грузы. Для разгрузки угля применяется такое высокопроизводительное средство как вагоноопрокидыватель [2]. В его состав входят следующие механизмы: поворота ротора вагоноопрокидывателя, системы зажима вагонов, дробильной машины, ленточных питателей. С целью непрерывной доставки навалочного груза на склад и перемещения его со склада используют систему ленточных конвейеров и комбинированный штабелеукладчик стакер-реклаймер. Погрузка угля на судно осуществляется с помощью судопогрузочной машины. Большую часть грузопотока также составляют тарно-штучные грузы. Для размещения на складе контейнеров и погрузки их на автомобильный транспорт используются козловые краны на пневмоходу RTG. В состав этих кранов входят такие механизмы как: механизм передвижения крана, механизм передвижения тележки, главные лебедки и вспомогательные лебедки. Разгрузка контейнеров с судна и погрузка их на судно производится при помощи причальных контейнерных перегружателей STS. В состав перегружателей STS входят следующие механизмы: передвижения крана, вылета стрелы, передвижения тележки, лебедка и механизм выравнивания положения спредера.

Все перечисленные механизмы составляют сложные механические системы, которые в большинстве случаев являются многомассовыми. Рассмотрим более подробно вагоноопрокидыватель, который в настоящее время является наиболее мощным и эффективным средством для автоматической механизированной разгрузки навалочных грузов. На рис. 1 представлен внешний вид роторного стационарного четырехопорного вагоноопрокидывателя типа ВРС-125, предназначенного для разгрузки сыпучих материалов из железнодорожных полувагонов, грузоподъемностью от 63 до 125 т, путем опрокидывания полувагонов во вращающемся роторе.



Рис. 1. Вагоноопрокидыватель роторный стационарный четырехопорный

Электропривод механизма поворота ротора является важнейшим узлом данной машины. На рис. 2 приведена кинематическая схема электропривода, из которой следует, что он представ-

ляет собой сложную электромеханическую систему с большим числом упругих элементов и связей между ними [3]. Анализ показывает, что особенностью электроприводов портовых перегрузочных машин (ПТМ) является необходимость учета при их моделировании и идентификации следующих факторов: зазоров в зубчатых передачах; упругостей, возникающих в валах; изменение моментов инерции в зубчатых венцах; изменение жесткости упругих элементов в упругих муфтах. Следует также иметь в виду, что механическая часть электропривода, как правило, представляет собой многомассовую разветвленную механическую схему со связями, параметры которой требуется идентифицировать [4].

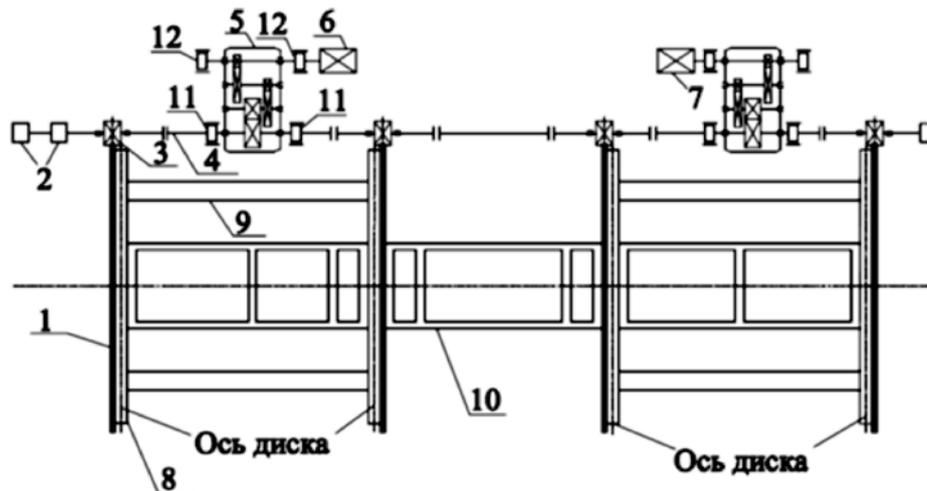


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода механизма опрокидывания вагоноопрокидывателя ВРС-125:

- 1 — зубчатый венец; 2 — командоаппарат; 3 — шестерня; 4 — промежуточный вал; 5 — редуктор; 6 — электродвигатель подачи; 7 — электродвигатель выдачи; 8 — кольцевой диск; 9 — продольная трубчатая ферма; 10 — верхняя балка; 11 — кулачковая муфта; 12 — упругая муфта

Целью работы является анализ методов идентификации электромеханических систем применительно к электроприводам ПТМ и разработка стратегии их практического применения. Для решения задач идентификации динамических систем разработано достаточно много методов. Дадим их краткую характеристику применительно к электроприводам ПТМ.

По способу тестирования исследуемого объекта методы идентификации делятся на активные и пассивные. Применение активных методов предполагает подачу на вход объекта специально сформированных воздействий — детерминированных или случайного характера. При использовании пассивных методов идентификации параметры модели находят по результатам статистической обработки наблюдений естественных изменений величин на входе и выходе объекта. Для идентификации электроприводов ПТМ следует, по возможности, применять активные методы [1], [5].

Для идентификации применяют как детерминированные, так и статистические методы обработки данных наблюдений, что определяется характером анализируемых сигналов. Детерминированные методы могут быть использованы только при активной идентификации [1], [6]. По временным затратам методы идентификации подразделяют на оперативные и ретроспективные. При оперативной идентификации обеспечивается отслеживание меняющихся параметров объекта. В процессе оперативной идентификации время переходного процесса в идентификаторе и время переходного процесса системы являются величинами одного порядка. Введение идентификатора понижает чувствительность системы к изменению параметров элементов электроприводов ПТМ. Методы ретроспективной идентификации позволяют многократно обращаться к накопленным экспериментальным данным и подбирать наиболее эффективные алгоритмы их анализа [1]. При синтезе алгоритмов идентификации электроприводов ПТМ принципиально возможны как разомкнутые, так и замкнутые схемы [7], [8].

Результатом решения задачи идентификации электропривода является математическая модель, представленная во временной или частотной области. Построение математической модели электропривода может производиться аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим методами. При этом полученная модель должна быть адекватна объекту по поведению, т. е. по динамическим свойствам, в соответствии с выбранным при идентификации критерием подобия.

При всем разнообразии приемов и алгоритмов, применяемых для выполнения идентификации электроприводов ПТМ, есть некоторая общая специфика, заключающаяся в том, что в большинстве случаев необходимо учитывать априорные данные об электроприводе. При этом задача синтеза алгоритма идентификации электроприводов основывается на представлении о том, что обрабатываемый сигнал (например, экспериментальная переходная функция) состоит из низкочастотной полезной составляющей и высокочастотного шума.

В качестве примера, на рис. 3, *а* приведены спектральные плотности полезного сигнала и шума. Для увеличения отношения «сигнал-шум» целесообразно использовать такой алгоритм, действие которого аналогично действию фильтра нижних частот [9]. Частотная характеристика фильтра на графике показана пунктирной линией.

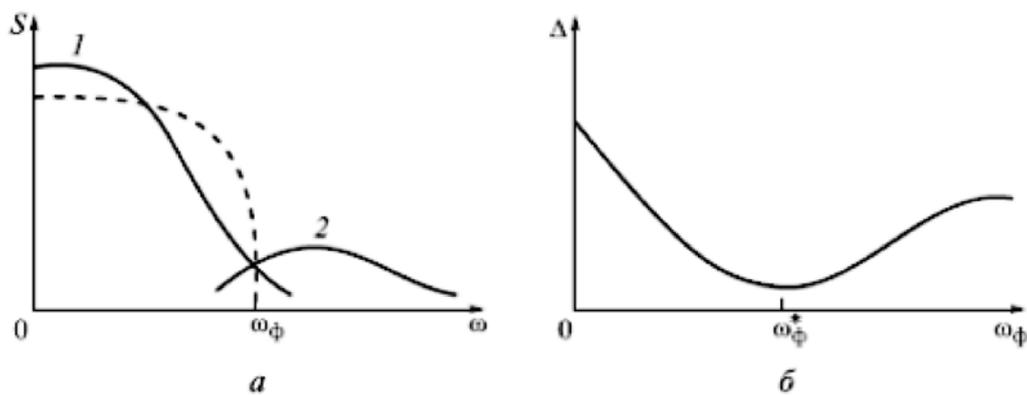


Рис. 3. Сглаживание экспериментальных характеристик:
а — спектральные плотности полезного сигнала (1) и шума (2)
(пунктирной линией показана частотная характеристика фильтра);
б — погрешность результата фильтрации

Из рис. 3, *б* видно, что погрешность Δ результата зависит от частоты среза фильтра ω_ϕ (увеличение погрешности на частотах $\omega_\phi < \omega_\phi^*$ связано с тем, что отфильтровывается полезная часть сигнала). В каждом фильтрующем алгоритме имеется параметр, аналогичный ω_ϕ . При этом важен вид зависимости, представленной на рис. 3, *б*. Ее характер является универсальным для фильтрующих алгоритмов.

Важным моментом является формализация постановки задачи идентификации. В теории управления часто используют прием, состоящий в том, что задача формулируется как оптимизационная в рамках триады, в которой получение удовлетворительного решения может потребовать нескольких итераций с корректировкой структуры и (или) изменением критерия. После выбора структуры оператора и критерия осуществляется переход к третьей составляющей — поиску параметров математической модели. Этот этап является формализованной процедурой, которая состоит в применении того или иного метода численного определения параметров, что можно трактовать как задачу нахождения экстремума функции многих переменных.

$$Q(\mathbf{X}) \rightarrow \text{extr},$$

где \mathbf{X} — множество параметров электропривода, подлежащих идентификации.

В рамках такого подхода задачу идентификации можно рассматривать как задачу аппроксимации экспериментальных данных динамическим оператором выбранной структуры по выбран-

ному критерию. Для нахождения экстремума могут быть использованы различные поисковые методы нелинейного программирования [10]. При таком представлении различные трудности, возникающие в процессе идентификации, можно представить в виде геометрической интерпретации. Например, сопоставить сложность функции $Q(\mathbf{X})$ со сложностью топологии гиперповерхности, оценить трудность реализации численного алгоритма с учетом особенностей поверхности. Описанный прием может оказаться полезным для многих задач, так как открывает путь к типизации их постановки.

Для идентификации электроприводов находят применение частотные методы [11] – [13] и методы, работающие в пространстве состояний [14], [15].

Спектральные методы идентификации основаны на использовании аппарата матричных операторов. Эти методы являются дальнейшим развитием частотных методов и основываются на разложении сигналов объекта по ортонормированным функциям [6], [16]. Результатом идентификации является определение ядра интегрального уравнения электропривода, которое в простейшем случае линейных одномерных систем совпадает с функцией веса. Эти методы можно отнести к непараметрическим методам идентификации. Они могут применяться для идентификации электроприводов как нестационарных систем, параметры которых, и в частности ядро интегрального уравнения, изменяются во времени.

Для идентификации динамических систем все более широкое применение находит статистическая идентификация в базисе ортогональных функций [6]. Применительно к системам управления электроприводов может применяться процедура вычисления коэффициентов разложения их импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра [17] — [20]. При этом импульсная переходная функция идентифицируемой системы представляется моделью в виде ряда

$$\omega(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} \beta_{ja} l_{ja}(\tau), \quad (1)$$

где β_{ja} — коэффициент разложения, $l_{ja}(\tau)$ — базисные функции Лагерра.

Модель (1) удобно использовать в тех случаях, когда необходимо знать реакцию системы на то или иное воздействие, а ее структура и параметры (вид передаточной функции, постоянные времени, коэффициенты усиления) не представляют интереса. Такой подход характерен, например, для анализа и синтеза самонастраивающихся электроприводов [1], [7].

Для идентификации электроприводов ПТМ могут найти применение энергетический метод, позволяющий исследовать нелинейные элементы системы [21], [22]; методы, основанные на использовании корреляционного анализа [23], [24], искусственной нейронной сети [25]; планирование эксперимента [10], [26].

Для обеспечения возможности отдельного определения диссипативных параметров вязкого трения при их совместном действии в колебательной системе, что характерно для большинства электроприводов ПТМ, можно воспользоваться методом свободных колебаний, заключающемся в регистрации любых трех последовательных амплитуд отклонений системы от положения равновесия, по которым определяют искомые параметры [6].

Для повышения точности идентификации диссипативных параметров [4] можно использовать метод построения (демодуляции) мгновенной амплитуды (огibaющей) затухающего вибросигнала путем применения интегрального преобразования Гильберта [27].

В практике эксплуатации электроприводов ПТМ моменты сопротивления могут являться функциями времени. В этом случае для идентификации параметров можно воспользоваться подходом, изложенным в работе [28], основанным на введении в систему обратной связи по выходу и организации гармонических колебаний, частота которых позволяет оценить неизвестный параметр.

Процесс решения задачи идентификации технического состояния элементов механической системы электропривода при прецедентном подходе представляет собой идентификацию (распознавание) проблемной ситуации по заданному (вводимому пользователем) набору идентификационных признаков [4]. При этом основное внимание уделяется следующим этапам: поиск и извле-

чение похожих ситуаций (аналогов) и повторное использование решений, принятых в похожих ситуациях (включая их адаптацию к новой проблемной ситуации) [29].

Для идентификации диссипативных параметров сухого и вязкого трения при их совместном действии в колебательной системе применяются метод вибродиагностики амплитуд трех последовательных затухающих колебаний и метод построения функции мгновенной амплитуды [29]. Например, для массового контроля подшипников и измерения суммарной вибрации в машинах применяют измерительный прибор 805 Vibration Meter. Этот прибор позволяет измерять параметры состояния подшипника, суммарные вибрации машины, жесткость вибрации и обладает встроенной памятью. Доступны также три типа измерений: вибрация подшипника, суммарная вибрация и температура. Также одним из способов повышения эффективности статистического контроля состояния электроприводов ПТМ, характеризующихся большим числом идентифицируемых параметров, является применение карт Хотеллинга [30].

Математические модели систем с распределенными параметрами, разветвленной и лестничной структурой применяются для идентификации механической системы электропривода сложной конфигурации [31].

Анализ структур построения электроприводов ПТМ и методов идентификации их параметров показывает, что для решения рассматриваемой задачи следует использовать принцип декомпозиции, который предполагает рассмотрение системы в виде совокупности составляющих ее элементов. При этом целесообразно выделять электрическую и механическую части электропривода, а последнюю из них, используя метод аналогии [4], представлять в виде механической цепной схемы. Такой подход позволит использовать эффективные методы, пригодные для идентификации как электрической, так и механической систем электропривода.

Рассмотрим алгоритмы идентификации элементов электроприводов ПТМ.

С точки зрения теории автоматического регулирования электрическая система привода включает в себя звенья первого (регуляторы, силовой преобразователь), второго (электродвигатель постоянного тока) и более высоких порядков (синхронный и асинхронный электропривод). В качестве звена первого порядка рассмотрим наиболее часто применяемый в электроприводах ПТМ ПИ-регулятор, имеющий частотную характеристику

$$W_{\text{рег}}(j\omega) = \frac{u_{\text{вых}}(j\omega)}{u_{\text{вх}}(j\omega)} = K_{\text{рег}} \frac{1 + j\omega T_{\text{рег}}}{j\omega T_{\text{рег}}}.$$

Целью идентификации подобного звена является определение статического коэффициента преобразования $K_{\text{рег}}$ и постоянной времени $T_{\text{рег}}$. Эта операция может быть выполнена несколькими способами: по амплитудно-фазовой характеристике или логарифмической частотной характеристике звена. Однако наибольшая точность идентификации достигается при использовании квадрата модуля частотной характеристики [32]

$$|W_{\text{рег}}(j\omega)|^2 = K_{\text{рег}}^2 + \frac{K_{\text{рег}}^2}{T_{\text{рег}}^2} \frac{1}{\omega^2}. \quad (2)$$

Функция (2) линеаризуется в координатах $y = |W_{\text{рег}}(j\omega)|^2$ и $x = 1/\omega^2$:

$$y = a + bx,$$

где коэффициенты $a = K_{\text{рег}}^2$; $b = (K_{\text{рег}} / T_{\text{рег}})^2$.

Таким образом, можно рекомендовать следующий порядок идентификации ПИ-регуляторов электропривода:

- при помощи экспериментальных данных измерения амплитудных значений входного и выходного сигналов определяется амплитудно-частотная характеристика звена;
- в координатах $(x - y)$ наносятся экспериментальные точки квадрата модуля этой характеристики на график;

– проводится прямая линия, аппроксимирующая множество экспериментальных точек и, например, по графику, определяются параметры a и b аппроксимирующей прямой.

Параметр a равен отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат. Параметр b является угловым коэффициентом прямой $b = (m_y / m_x) \operatorname{tg} \alpha$; m_y, m_x — масштабы по осям.

Далее находятся параметры исследуемого звена

$$K_{\text{пер}} = \sqrt{a}; T_{\text{пер}} = \frac{K_{\text{пер}}}{\sqrt{b}} = \sqrt{\frac{a}{b}}.$$

Линеаризация экспериментальных точек, как правило, автоматизируется методом наименьших квадратов [10]. Применительно к асинхронному электроприводу, рекуррентный метод наименьших квадратов, в силу своей природы, сам способен сглаживать помехи, наложенные на переменные состояния, и выполнять функцию фильтра.

Пусть в результате эксперимента получено n значений амплитудно-частотной характеристики A_j при частотах $\omega_j (j = 1 \dots q)$.

Определим координаты $y_j = (A_j)^2$ и $x_j = 1/\omega_j^2$. Составим разность

$$e = y_j - \bar{y}_j,$$

где $\bar{y}_j = a + bx_j$ — уравнение аппроксимирующей прямой.

Выберем коэффициенты a и b таким образом, чтобы сумма квадратов разностей, взятая по всем экспериментальным точкам, была наименьшей

$$\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_j)^2 = \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2. \quad (3)$$

Для этого продифференцируем исходное уравнение (3) по неизвестным коэффициентам a и b и приравняем произведение нулю. В результате получим систему двух линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} aV_0 + bV_1 = C_0 \\ aV_1 + bV_2 = C_1, \end{cases} \quad (4)$$

где $V_k = \sum_{j=1}^n x_j^{(k)}$; $C_k = \sum_{j=1}^n y_j x_j^{(k)}$.

Решив систему (4), определим искомые коэффициенты:

$$a = \frac{C_0 V_2 - C_1 V_1}{V_0 V_2 - V_1^2}; \quad b = \frac{C_1 V_0 - C_0 V_1}{V_0 V_2 - V_1^2}.$$

Силовой преобразователь в электроприводе обычно приближенно описывается аperiodическим звеном первого порядка [8]. Поэтому рассмотренная методика идентификации пригодна для определения как статического коэффициента преобразования, так и малой постоянной времени тиристорного преобразователя. Однако в этом случае следует использовать обратную частотную характеристику

$$W_n^{-1}(j\omega) = \frac{u_{\text{упр}}(j\omega)}{u_{\text{я}}(j\omega)} = \frac{1}{K_n} + j\omega \frac{\tau}{K_n},$$

где $u_{\text{упр}}$ — напряжение управления электродвигателем электропривода; $u_{\text{я}}$ — напряжение на якоре электродвигателя электропривода; K_n — статический коэффициент преобразования.

Квадрат модуля обратной частотной характеристики

$$y = |W_n^{-1}(j\omega)|^2 = \left(\frac{1}{K_n}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{K_n}\right)^2 \omega^2.$$

Обозначив $\omega^2 = x$, получим уравнение прямой линии

$$y = a + bx, \text{ где } a = (1/K_n)^2; \quad b = (\tau/K_n)^2.$$

Коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов [10].

Далее вычисляются параметры силового преобразователя:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{\sqrt{a}}; \tau = K_{\Pi} \sqrt{b} = \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

Рассмотрим еще один способ идентификации параметров электродвигателя постоянного тока и тиристорного преобразователя, не требующий трудоемких измерений фазовых сдвигов сигнала [27].

Частотная характеристика подлежащего идентификации объекта имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{K}{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + 1},$$

где $K = K_{\Pi} K_{\text{д}}$; $a_1 = \tau + T_{\text{м}}$; $a_2 = T_{\text{м}}(\tau + T_{\text{я}})$; $a_3 = \tau T_{\text{я}} T_{\text{м}}$; τ — малая постоянная времени; $T_{\text{я}}$ — электромагнитная постоянная цепи якоря; $T_{\text{м}}$ — электромеханическая постоянная; $K_{\text{д}}$ — статический коэффициент преобразования.

Найдем полином с постоянными коэффициентами и придадим ему вид квадрата модуля обратной частотной характеристики

$$\bar{y} = |W^{-1}(j\omega)|^2 = b_3\omega^6 + b_2\omega^4 + b_1\omega^2 + b_0, \quad (5)$$

где $b_0 = 1/K^2$; $b_1 = (a_1^2 - 2a_2)/K^2$; $b_2 = (a_2^2 - 2a_1a_3)/K^2$; $b_3 = a_3^2/K^2$.

Подберем коэффициенты полинома (5) так, чтобы они обеспечивали среднеквадратическое приближение к экспериментальной характеристике $y = y(\omega)$, представленной $(n + 1)$ экспериментальными значениями.

Для каждой экспериментальной точки определим погрешность аппроксимации $\varepsilon_k = \bar{y}(\omega_k) - y(\omega_k)$.

На основе метода наименьших квадратов вычислим сумму квадратов разностей $\sum_{k=0}^n \varepsilon_k^2 = \sum_{k=0}^n (\bar{y} - y)^2 = E$ и продифференцируем это выражение по всем искомым коэффициентам. Приравняв производные нулю, получим систему линейных уравнений относительно коэффициентов b_j :

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial b_0} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k = 2(V_0 b_0 + V_2 b_1 + V_4 b_2 + V_6 b_3 - U_0) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^2 = 2(V_2 b_0 + V_4 b_1 + V_6 b_2 + V_8 b_3 - U_2) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_2} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^4 = 2(V_4 b_0 + V_6 b_1 + V_8 b_2 + V_{10} b_3 - U_4) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_3} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^6 = 2(V_6 b_0 + V_8 b_1 + V_{10} b_2 + V_{12} b_3 - U_6) = 0 \end{cases},$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} V_0 & V_2 & V_4 & V_6 \\ V_2 & V_4 & V_6 & V_8 \\ V_4 & V_6 & V_8 & V_{10} \\ V_6 & V_8 & V_{10} & V_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_2 \\ U_4 \\ U_6 \end{bmatrix},$$

где $V_j = \sum_{k=0}^n \omega_k^{(j)}$; $U_j = \sum_{k=0}^n y_k \omega_k^{(j)}$.

В сокращенной форме эту систему линейных уравнений можно записать в виде

$$\mathbf{Vb} = \mathbf{U}.$$

Решение данной системы имеет вид

$$\mathbf{b} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{U}. \quad (6)$$

Процедура обращения матрицы \mathbf{V} достаточно трудоемка. Существенно упростить ее можно только путем введения ограничений, накладываемых на методику проведения эксперимента.

Рассмотрим случай идентификации при равных интервалах частотного диапазона $\Delta\omega$, начиная с исходной частоты ω_0 . При этом

$$\omega_k = \omega_0 + k\Delta\omega, \quad (7)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$.

Если дополнительно принять $\Delta\omega = \omega_0$, то полученные формулы еще более упростятся

$$\omega_k = (1 + k)\omega_0,$$

где $k = 1, 2, \dots, n$.

Это позволяет получить простые выражения для всех функций V_j

$$V_j = \omega_0^j \sum_{k=1}^z k^j,$$

где $z = n + 1$ — общее число экспериментальных точек, по которым производится идентификация.

Для фиксированного числа измерений функции V_j имеют конкретные числовые значения [21]. Так, например, для числа $z = 5$ измерений получаем $V_0 = 5$; $V_2 = 55\omega_0^2$; $V_4 = 979\omega_0^4$; $V_6 = 20515\omega_0^6$; $V_8 = 462979\omega_0^8$; $V_{10} = 10874275\omega_0^{10}$; $V_{12} = 261453379\omega_0^{12}$.

На основе (8) можно конкретизировать и функции U_j

$$U_j = \omega_0^{(j)} \sum_{k=0}^n (1+k)^{(j)} y_k = \omega_0^{(j)} \bar{U}_j. \quad (8)$$

Для случая пяти измерений получим

$$\begin{cases} \bar{U}_0 = \sum_{k=0}^4 y_k \\ \bar{U}_2 = y_0 + 4y_1 + 9y_2 + 16y_3 + 25y_4 \\ \bar{U}_4 = y_0 + 16y_1 + 81y_2 + 256y_3 + 625y_4 \\ \bar{U}_6 = y_0 + 64y_1 + 729y_2 + 4096y_3 + 15625y_4. \end{cases} \quad (9)$$

После несложных преобразований с учетом (7) и (8) запишем решение системы (6) следующим образом

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,82 & -0,638 & 5,37 \cdot 10^{-2} & -1,25 \cdot 10^{-3} \\ -0,638 & 0,315 & -2,95 \cdot 10^{-2} & 7,21 \cdot 10^{-4} \\ 5,37 \cdot 10^{-2} & -2,95 \cdot 10^{-2} & 2,94 \cdot 10^{-3} & -7,41 \cdot 10^{-5} \\ -1,25 \cdot 10^{-3} & 7,21 \cdot 10^{-4} & -7,41 \cdot 10^{-5} & 1,905 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_4 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для обеспечения независимости матрицы $[V]$ от начальной частоты ω_0 , в (10) введены новые коэффициенты

$$B_j = b_j \omega_0^{(2j)}. \quad (11)$$

Таким образом, комбинация уравнений (9) – (11) позволяет по экспериментальным данным (в данном случае должно быть произведено пять измерений с равными частотными интервалами) определить коэффициенты b_j в исходной характеристике (5).

Далее определим параметры идентифицируемой системы через коэффициенты b_j .

Вычислим коэффициент $K = 1/\sqrt{b_0}$. Составим систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} (\tau T_M T_\gamma)^2 = b_3 K^2 \\ (T_M T_\gamma)^2 + \tau^2 T_M^2 - 2\tau^2 T_M T_\gamma = b_2 K^2 \\ T_M^2 + \tau^2 - 2T_M T_\gamma = b_1 K^2. \end{cases} \quad (12)$$

Обозначив $(T_M T_\gamma)^2 = q$ перейдем к системе двух уравнений

$$\begin{cases} \tau^2 q = b_3 K^2 \\ q + \tau^2 b_1 K^2 - \tau^4 = b_2 K^2. \end{cases}$$

В полученную систему параметр q входит линейно и легко исключается. Поэтому получаем уравнение третьей степени относительно коэффициента τ^2

$$\tau^6 - b_1 K^2 \tau^4 + b_2 K^2 \tau^2 - b_3 K^2 = 0. \quad (13)$$

Можно показать, что для реальных параметров тиристорного преобразователя и большинства электродвигателей уравнение (13) имеет единственный действительный корень, который легко выделить.

После решения уравнения (13) и определения значения малой постоянной времени τ , вычисляются постоянные электродвигателя.

Из первого уравнения (12) найдем $(T_M T_\gamma)^2 = q = (b_3 K^2) / \tau^2$.

Откуда

$$T_M = \sqrt{b_1 K^2 + 2\sqrt{q} - \tau^2}, \quad T_\gamma = \frac{\sqrt{q}}{T_M}. \quad (14)$$

Выполним идентификацию системы тиристорный преобразователь-двигатель по квадрату модуля обратной частотной характеристики.

Исходные данные для расчета следующие:

$$k = 0; 1; 2; 3; 4; f_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \text{ Гц}; y = |W^{-1}(j\omega)|^2 \cdot 10^3 = 3,95; 4,2; 5,05; 7,24; 12,04.$$

Начальное значение частоты и ее приращение равны между собой. При этом $f_0 = 5$ Гц, а угловая частота $\omega_0 = 2\pi f_0 \approx 31,4$ рад/с.

На основании (10) определим функции \bar{U}_j :

$$\bar{U}_0 = \sum_{k=0}^4 y_k = (3,95 + 4,2 + 5,05 + 7,24 + 12,04) \cdot 10^{-3} = 0,032.$$

$$\bar{U}_2 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^2 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 4 + 5,05 \cdot 9 + 7,24 \cdot 16 + 12,04 \cdot 25) \cdot 10^{-3} = 0,483.$$

$$\bar{U}_4 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^4 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 16 + 5,05 \cdot 81 + 7,24 \cdot 256 + 12,04 \cdot 625) \cdot 10^{-3} = 9,859.$$

$$\bar{U}_6 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^6 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 64 + 5,05 \cdot 729 + 7,24 \cdot 4096 + 12,04 \cdot 15625) \cdot 10^{-3} = 221,734.$$

Используя выражения (10) определим коэффициенты B_j :

$$B_0 = 1,82 \cdot 0,032 - 0,638 \cdot 0,483 + 5,37 \cdot 10^{-2} \cdot 9,859 - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 221,734 = 2,347 \cdot 10^{-3}.$$

$$B_1 = -0,638 \cdot 0,032 + 0,315 \cdot 0,483 - 2,95 \cdot 10^{-2} \cdot 9,859 + 7,21 \cdot 10^{-4} \cdot 221,734 = 7,587 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_2 = 5,37 \cdot 10^{-2} \cdot 0,032 - 2,95 \cdot 10^{-2} \cdot 0,483 + 2,94 \cdot 10^{-3} \cdot 9,859 - 7,41 \cdot 10^{-5} \cdot 221,734 = 2,487 \cdot 10^{-5}.$$

$$B_3 = -1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,032 + 7,21 \cdot 10^{-4} \cdot 0,483 - 7,41 \cdot 10^{-5} \cdot 9,859 + 1,905 \cdot 10^{-6} \cdot 221,734 = 9,437 \cdot 10^{-8}.$$

Откуда статический коэффициент преобразования объекта $K^2 = 1/B_0 = 426,112$. Следовательно $K = 1/\sqrt{B_0} = 20,642$.

Вычислим коэффициенты кубического уравнения (13). Прежде чем перейти к решению уравнения (13), целесообразно изменить масштаб вычисления по постоянной времени τ . Если τ вычисляется в миллисекундах, то все коэффициенты увеличиваются, и не будет больших отрицательных степеней. При этом

$$\tau^6 - 3,279 \cdot 10^{-4} \tau^4 + 1,09 \cdot 10^{-8} \tau^2 - 4,195 \cdot 10^{-14} = 0.$$

Полученное уравнение может быть решено любым известным численным методом. В результате вычислений получим: $\tau = 2,984 \text{ мс} = 2,984 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Дальнейшие вычисления постоянных времени удобнее производить в секундах. Найдем вспомогательную величину — произведение двух постоянных времени:

$$b_3 = \frac{4,195 \cdot 10^{-14}}{K^2} = 0; T_m T_{\text{я}} = \sqrt{q} = \frac{K \sqrt{b_3}}{\tau} = 6,864 \cdot 10^{-5}.$$

Используя формулу (14), определим электромеханическую и электромагнитную постоянные времени

$$T_m = \sqrt{3,279 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot (6,864 \cdot 10^{-5}) - \tau^2} = 0,021 \text{ с};$$

$$T_{\text{я}} = \sqrt{q} / T_m = 6,864 \cdot 10^{-5} / 0,021 = 3,269 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Отметим, что точные значения параметров следующие: $K = 16$; $\tau = 3 \cdot 10^{-3}$; $T_m = 0,1 \text{ с}$; $T_{\text{я}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Значения вычисленных параметров незначительно отличаются от найденных значений, что подтверждает достаточно высокую точность рассмотренного метода идентификации.

Для идентификации параметров машин переменного тока можно воспользоваться методикой, изложенной в работе [33], или рассмотренными методами статистической идентификации. Алгоритмы, реализующие методы идентификации параметров электропривода, должны обеспечивать возможность решения задачи в реальном масштабе времени.

Анализ, разработка и применение методов идентификации объектов управления и способов оценки их текущего состояния позволяют повысить эффективность эксплуатации технических систем. Для идентификации электроприводов ПТМ следует использовать рассмотренные в статье детерминированные методы, а также статистические методы, основанные на разложении импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А. А.* Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. — М.: Академия, 2009. — 352 с.
2. *Андрианов Е. Н.* Моделирование механических систем морской перегрузочной техники методом электрической аналогии / Е. Н. Андрианов, А. В. Саушев, Д. И. Троян // Морской вестник. — 2015. — № 1 (53). — С. 49–52.
3. *Саушев А. В.* Моделирование электромеханической системы вагоноопрокидывателя в речном порту Усть-Луга / А. В. Саушев, Д. И. Троян // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 2 (61). — С. 61–69.
4. *Саушев А. В.* Математическое описание механической системы электропривода / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2010. — 137 с.
5. *Дейч А. М.* Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.
6. *Бессонов А. А.* Методы и средства идентификации динамических объектов / А. А. Бессонов, Ю. В. Загашвили, А. С. Маркелов. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
7. *Егунов Н. Д.* Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / Н. Д. Егунов, К. А. Пупков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 2. — 640 с.

8. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
9. *Водовозов А. М.* Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2009. — Т. 52. — № 12. — С. 40–43.
10. *Саушев А. В.* Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2012. — 273 с.
11. *Романов С. А.* Частотная идентификация электромеханической системы / С. А. Романов, И. С. Полющенко // Труды XII межд. науч.-технич. конф. «Информационные технологии, энергетика и экономика»: в 3 т. Сер. Электрознергетика, электротехника и теплотехника, математическое моделирование и информационные технологии в производстве. — Смоленск: Универсум, 2015. — С. 140–145.
12. *Кузнецов Н. К.* Идентификация параметров и моделирование динамики трехмассовой мехатронной системы / Н. К. Кузнецов, А. Ю. Перельгина, Р. В. Кононенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2010. — № 3(43). — С. 6–12.
13. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А. С. Глазырин, В. В. Тимошкин, С. В. Цурпал, Т. А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 316. — № 4. — С. 174–177.
14. *Малафеев С. И.* Колебательные методы идентификации параметра демпфирования / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2007. — № 5. — С. 35–41.
15. *Винокуров С. А.* Синтез регуляторов для электромеханических систем с бесконтактным двигателем постоянного тока по импульсной переходной характеристике / С. А. Винокуров, А. А. Киселева, В. Е. Букатова // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2007. — № 2. — С. 77–80.
16. *Петров В. Л.* Идентификация моделей электромеханических систем с использованием спектральных методов анализа в базисах непрерывных ортонормированных функций / В. Л. Петров // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2003. — № 10. — С. 29–36.
17. *Маркелов А. С.* Взаимосвязь структуры и параметров линейной САУ с коэффициентами разложения передаточной функции в ряд Лагерра / А. С. Маркелов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1982. — № 4. — С. 160–165.
18. *Нивин А. Е.* Синтез ортогональных фильтров при статистической идентификации динамических систем / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2013. — Т. 56. — № 10. — С. 5–10.
19. *Нивин А. Е.* Идентификация системы управления электропривода на основе функций Лагерра / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 46–50.
20. *Петров В. Л.* Математическое обеспечение для идентификации электромеханической системы горных машин на основе представления оператора рядом функций Лаггера / В. Л. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 1. — С. 19–21.
21. Расширение возможностей энергетического метода в задачах идентификации нелинейностей электромеханических систем / Д. И. Родькин, Д. А. Мосюндз, А. П. Черный [и др.] // Электромеханические системы, методы оптимизации и моделирования. — 2012. — № 2 (18). — С. 10–16.
22. *Родькин Д. И.* Энергетический метод идентификации электромеханических устройств и систем / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — 2011. — № 3. — С. 10–20.
23. *Акиншин Р. Н.* Алгоритм идентификации параметров электропривода на основе корреляционного метода / Р. Н. Акиншин, П. И. Абрамов, Э. А. Амирбеков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2013. — № 193. — С. 123–125.
24. *Боловин Е. В.* Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей / Е. В. Боловин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2015. — Т. 58. — № 1. — С. 7–27.
25. *Анисимов А. А.* Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А. А. Анисимов, М. Н. Горячев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2008. — № 3. — С. 55–58.
26. *Солодов В. С.* Применение методов планирования эксперимента для идентификации судового комплекса / В. С. Солодов, Ю. И. Юдин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 187–190.

27. Николайчук О. А. Применение прецедентного подхода для автоматизированной идентификации технического состояния деталей механических систем / О. А. Николайчук, А. Ю. Юрин // Автоматизация и современные технологии. — 2009. — № 5. — С. 3–9.

28. Арановский С. В. Метод идентификации электромеханической системы при переменном моменте трения / С. В. Арановский, С. Ю. Ловлин, С. А. Александрова // Информационно-управляющие системы. — 2012. — № 1. — С. 8–11.

29. Клячкин В. Н. Диагностика многопараметрического технологического процесса по результатам статистического контроля / В. Н. Клячкин // Автоматизация и современные технологии. — 2009. — № 2. — С. 20–24.

30. Клячкин В. Н. Повышение эффективности статистического контроля многопараметрического технологического процесса на основе карты Хотеллинга с предупреждающей границей / В. Н. Клячкин, Ю. А. Кравцов // Автоматизация и современные технологии. — 2013. — № 10. — С. 35–37.

31. Петров Ю. С. Математическая модель системы электровзрывания как соединение линии с распределенными параметрами и лестничной цепи / Ю. С. Петров, Ю. В. Саханский // Автоматизация процессов управления. — 2013. — № 3 (33). — С. 44–51.

32. Михайлов О. П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков / О. П. Михайлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.

33. Идентификация активного сопротивления статора и ротора асинхронного двигателя / С. Пересяда, С. Ляшевский, С. Ковбаза, М. Коноплинский // Электротехнические и компьютерные системы. — 2013. — № 9 (85). — С. 7–15.

IDENTIFICATION OF ELECTRIC DRIVES OF PORT RELOADING CARS

The analysis of methods of identification of dynamic systems in relation to electric drives of port reloading cars is provided. It is shown that electric drives of these cars are difficult electromechanical systems which mechanical part contains elements with elastic communications and is multimass. The features of these systems demanding at the solution of problems of modeling and identification of the accounting of gaps in tooth gearings are analysed; the uprugost arising in shaft; change of the moments of inertia in gear wreaths; change of rigidity of elastic elements in couplings. Use of the principle of decomposition and allocation of basic elements of the electric drives which are subject to identification is offered. On the basis of the theory of management methods of identification of elements of electric drives of port reloading cars are offered. It is shown that for this purpose use of the frequency methods and methods working in a time domain is possible. It is established that methods of active identification on the basis of the theory of planning of experiment and the statistical methods based on decomposition of pulse transitional functions in a row on system of the orthonormalized transformed Laguerre's functions are perspective.

Keywords: identification, electric drive, port reloading machines, method.

REFERENCES

1. Alekseev, A. A., Ju. A. Korablev, and M. Ju. Shestopalov. *Identifikacija i diagnostika sistem*. M.: Akademija, 2009.
2. Andrianov, E. N., A. V. Saushev, and D. I. Trojan. “Modelirovanie mehanicheskikh sistem morskoy peregruzochnoj tehniki metodom jelektricheskoy analogii.” *Morskoy vestnik* 1(53) (2015): 49-52.
3. Saushev, A. V., and D. I. Trojan. “Modelling of electromechanical system of car dumper in river port Ust-Luga.” *River transport (XXIst century)* 2(61) (2013): 61–69.
4. Saushev, A. V. *Matematicheskoe opisanie mehanicheskoy sistemy jelektricheskogo privoda*. SPb.: SPGUVK, 2010.
5. Dejch, A. M. *Metody identifikacii dinamicheskikh obektov*. M.: Jenergija, 1974.
6. Bessonov, A. A., and et. al. *Metody i sredstva identifikacii dinamicheskikh obektov*. – L.: Jenergoatomizdat, 1989.
7. Egupov, N. D., and K. A. Pupkov. *Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. Tom. 2. Statisticheskaja dinamika i identifikacija sistem avtomaticheskogo upravlenija*. M.: MG TU im. N. Je Baumana, 2004.
8. Samosejko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravlenija jelektricheskimi privodami*. SPb.: Jelmor, 2007.

9. Vodovozov, A. M., and A. S. Eljukov. "Algorithms of parametrical identification of electromechanical systems protected against hindrance." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* 52.12 (2009): 40–43.
10. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelectrotehnike*. SPb.: FBOU VPO SPGUVK, 2012.
11. Romanov, S. A., and I. S. Poljushhenkov. "Chastotnaja identifikacija jelectromehaničeskoj sistemy." *Trudy XII mezhd. nauchno-tehnich. konf. «Informacionnye tehnologii, jenergetika i jekonomika» v 3-h tomah. Ser. Jelectroznergetika, jelectrotehnika i teplotehnika, matematičeskoe modelirovanie i informacionnye tehnologii v proizvodstve*. Smolensk: Universum, 2015: 140-145.
12. Kuznecov, N. K., A. Ju. Perejgina, and R. V. Kononenko. "Parameters identification and simulation of three-mass mechatronic system dynamics." *Bulletin of Irkutsk State Technical University* 3(43) (2010): 6-12.
13. Glazyrin, A. S., V. V. Timoshkin, S. V. Curpal, and T. A. Glazyrina. "Identifikacija parametrov mehaničeskoj sistemy na primere vibracionnogo jelectromehaničeskogo preobrazovatelja jenergii." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 316.4 (2010): 174-177.
14. Malafeev, S. I., and A. I. Kopejkin. "Oscillatory method of the damping parameter definition." *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah* 5 (2007): 35-41.
15. Vinokurov, S. A., A. A. Kiseleva, and V. E. Bukatova. "Sintez reguljatorov dlja jelectromehaničeskikh sistem s beskontaktnym dvigatelem postojannogo toka po impulsnoj perehodnoj harakteristike." *Jelectrotehničeskie komplekсы i sistemy upravlenija* 2 (2007): 77-80.
16. Petrov, V. L. "Identifikacija modelej jelectromehaničeskikh sistem s ispolzovaniem spektralnyh metodov analiza v bazisah nepreryvnyh ortonormirovannyh funkcij." *Mechatronics, automation, control* 10 2003: 29–36.
17. Markelov, A. S. "Vzaimosvjaz" struktury i parametrov linejnoj SAU s koeficientami razložhenija peredatočnoj funkcii v rjad Lagerra." *Izv. AN SSSR. Tehničeskaja kibernetika* 4 (1982): 160-165.
18. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. "Synthesis of orthogonal filters in statistical identifications of dynamic system." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* 56.10 (2013): 5-10.
19. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. "Identifikacija sistemy upravlenija jelectroprivoda na osnove funkcij Lagerra." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2013): 46-50.
20. Petrov, V. L. "Matematičeskoe obespečenie dlja identifikacii jelectromehaničeskoj sistemy gornyh mashin na osnove predstavlenija operatora rjadom funkcij Lagerra." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 1 (2002): 19-21.
21. Rodkin, D. I., D. A. Mosjundz, A. P. Chernyj, and T. V. Korenkova. "Rasshirenie vozmožnostej jenergetičeskogo metoda v zadachah identifikacii nelinejnostej jelectromehaničeskikh sistem." *Jelectromehaničeskie sistemy, metody optimizacii i modelirovanija* 2(18) (2012): 10-16.
22. Rodkin, D. I., and Ju. V. Romashihin. "Energy Method for Identification of Electromechanical Devices and Systems." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 3 (2011): 10-20.
23. Akinshin, R. N., P. I. Abramov, and Je. A. Amirbekov. "Electric drive parameter identification algorithm on the basis of correlation method." *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii* 193 (2013): 123-125.
24. Bolovin, E. V. "Critical expert analysis of the induction motor parameters identification methods." *Scientific Bulletin of NSTU* 58.1 (2015): 7-27.
25. Anisimov, A. A., and M. N. Gorjachev. "Identification of electromechanical systems with using of artificial neural network." *Vestnik IGEU* 3 (2008): 55-58.
26. Solodov, V. S., and Ju. I. Judin. "Primenenie metodov planirovanija jeksperimenta dlja identifikacii sudovogo kompleksa." *Vestnik of MSTU* 9.2 (2006): 187-190.
27. Nikolajchuk, O. A., and A. Ju. Jurin. "An application of case-based reasoning for technical state automatic identification of the mechanical systems details." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 5 (2009): 3-9.
28. Aranovskij, S. V., S. Ju. Lovlin, and S. A. Aleksandrova. "Identification Method for the Electromechanical System with the Variable Friction Torque." *Informacionno-upravliaiushchie sistemy* 1 (2012): 8-11.
29. Kljachkin, V. N. "Diagnostics of the multiparameter technological process on the basis of statistical control results." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 2 (2009): 20-24.

30. Kljachkin, V. N., and Ju. A. Kravcov. "Povyshenie jeffektivnosti statisticheskogo kontrolja mnogoparametriceskogo tehnologicheskogo processa na osnove karty Hotellinga s preduprezhdajushhej granicej." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 10 (2013): 35-37.

31. Petrov, Ju. S., and Ju. V. Sahanskij. "A mathematical model of the electric-blasting system as a connection of line with distributed parameters and the chain ladder." *Automation of Control Processes* 3(33) (2013): 44-52.

32. Mihajlov, O. P. *Dinamika jelektromehanicheskogo privoda metallovezhshih stankov*. M.: Mashinostroenie, 1989.

33. Peresada, S., S. Ljashevskij, S. Kovbaza, and M. Konoplinskij. "Identification of stator and rotor resistances of induction motors." *Electrotechnic and computer systems* 9(85) (2013): 07-15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Троян Дмитрий Игоревич — аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Научный руководитель:
Саушев Александр Васильевич
ep-gumrf@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Alexander Vasilyevich —
Candidate of Engineering, associate professor,
senior research associate.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Trojan Dmitry Igorevich — postgraduate.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Supervisor:
Saushev Alexander Vasilyevich
ep-gumrf@bk.ru