

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 62-83:501.1

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н.А. Малёв¹, А.И. Мухаметшин¹, О.В. Погодицкий¹, П.В. Чичков²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «Казанский Гипроннавиапром», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Задача анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей в переходных и установившихся режимах является актуальной на этапах проектирования и эксплуатации. Программные продукты для регистрации и обработки измерительной информации, а также проведения необходимых технических вычислений, такие как LabView, MatLab Simulink и другие открывают широкие возможности для решения поставленной задачи и позволяют получить достоверные результаты. **МЕТОДЫ.** В работе проводится исследование электромеханических преобразователей постоянного тока со встроенными тахогенераторами, измерение и фиксация выходных координат которых обеспечивается экспериментальными установками различной конфигурации с последующей обработкой результатов контроля функционирования с применением прикладных программ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработанные экспериментальные установки различаются по составу и стоимости аппаратного обеспечения, необходимости применения того или иного программного сопровождения, форме представления результатов контроля функционирования объектов исследования и точности полученных результатов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Настоящее исследование направлено на сравнительный анализ двух экспериментальных установок, позволяющих получить математические модели электромеханических преобразователей постоянного тока, необходимые для реализации метода контроля функционирования, с точки зрения материальных затрат на аппаратно-программное обеспечение, времени обработки результатов эксперимента и соответствия полученных результатов требуемой точности формирования математических моделей.

Ключевые слова: *двигатель постоянного тока, анализ, эксперимент, математическая модель, моделирование, переходные процессы, аппаратно-программное обеспечение.*

Для цитирования: Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 5. С. 142-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HARDWARE AND SOFTWARE OF THE MONITORING METHOD OF FUNCTIONING ELECTROMECHANICAL DC CONVERTERS

NA. Malev¹, AI. Mukhametshin¹, OV. Pogoditsky¹, PV. Chichkov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC «Kazan Giproniaviaprom», Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. The task of analysis and monitoring of the functioning of electromechanical converters in transient and static modes is relevant at the design and operation stages. Software products for recording and processing measurement information, as well as for performing the necessary technical calculations, such as LabView, MatLab Simulink and others, offer great opportunities for solving the task and allow obtaining reliable results. **METHODS.** The study of electromechanical DC converters with built-in tachogenerators carried out, the measurement and fixing of the output coordinates of which is provided by experimental sets of various configuration with subsequent processing of the results of functional monitoring using application programs. **RESULTS.** The developed experimental sets differ in the composition and cost of hardware, the need to use one or another software support, the form of presenting the results of monitoring the functioning of research objects and the accuracy of the results. **CONCLUSION.** The present study aimed at a comparative analysis of two experimental sets. These sets allow obtaining mathematical models of electromechanical DC converters necessary for the implementation of the monitoring method of the functioning. The analysis performed from the point of view of material costs for hardware and software, the processing time of the experimental results and the correspondence of the obtained results to the required accuracy of the formation of mathematical models.

Keywords: DC motor, analysis, experiment, mathematical model, modeling, transients, hardware and software.

For citation: Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, Chichkov PV. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):142-154. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154.

Введение

Задача анализа влияния нестабильных параметров на качество функционирования электромеханических преобразователей в составе рабочих комплексов путем вычисления соответствующих оценок [1,2,3] является актуальной задачей, поскольку позволяет определить отклонения реальных значений параметров объектов исследования от проектных (расчетных), обеспечивающих требуемое качество функционирования [4,5,6,7]. Компьютерные технологии на основе современных прикладных программ открывают возможность более глубокого изучения вопросов, связанных с разработкой методов анализа динамических свойств электромеханических преобразователей, а также подходов и алгоритмов контроля функционирования электрических машин в процессе эксплуатации. В первую очередь к таким прикладным программам следует отнести пакеты *MatLab* с широко развитыми техническими приложениями (*Simulink*, *Simscape* и др.), виртуальную лабораторию *LabView*, табличный процессор *Excel* и т.п. программы, которые позволяют существенно усовершенствовать технологию исследования электромеханических преобразователей и применить экспериментально-аналитический метод к их анализу с последующим получением качественных оценок параметров объектов исследования [8,9,10,11]. Обработка результатов эксперимента кроме программных средств требует наличия соответствующей аппаратной составляющей, в частности датчиков входных и выходных координат электромеханических преобразователей, аналого-цифровых преобразователей и различных средств сопряжения объектов исследования с персональным компьютером.

Методы

Для контроля функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации целесообразно использовать уточненную математическую модель объекта, полученную по результатам исследований с применением экспериментальной установки. В качестве объектов исследования рассматриваются общепромышленный двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г, а также серводвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа *PIVT-6-25/3A*. Паспортные данные двигателей сведены в табл. 1, 2[3,12]. Оба двигателя укомплектованы встроенными тахогенераторами.

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 4ПБ112М2Г

$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, кВт	I_{a1} , А	$\eta_{ном}$, %	n_1 , об/мин	$2p$	n_{max} , об/мин	$J_{ном}$, кг·м ²
220	3	16,2	80	3000	2	4000	0,0235

Таблица 2

Паспортные данные двигателя PIVT-6-25/3A						
$U_{\text{ном}}$, В	K_m , Н·м/А	T_a , с	M_{max} , Н·м	T_m , с	n_2 , об/мин при $M = M_{\text{max}}$	I_{a2} , А при $M = M_{\text{max}}$
30	0,072	0,002	0,225	0,025	3000	4,5

Измерение активного сопротивления якорной цепи произведено с помощью измерительного моста постоянного тока типа ММВ с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$. Результаты измерения составили, соответственно:

$$\begin{aligned} R_{a1} &= 1,358 \text{ Ом;} \\ R_{a2} &= 5,15 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (1)$$

Индуктивности якорных обмоток определены на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} L_{a1} &= k_i \frac{30U_{\text{ном}}}{\pi p I_{\text{ном}} n_{\text{ном}}} = 0,5 \frac{30 \cdot 220}{\pi \cdot 2 \cdot 16,2 \cdot 3000} = 0,0108 \text{ Гн;} \\ L_{a2} &= T_a R_{a2} = 0,002 \cdot 5,15 = 0,0103 \text{ Гн,} \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – электромагнитная постоянная времени.

Коэффициенты противо-ЭДС

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{a1}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{220 - 16,2 \cdot 1,358}{314} = 0,63 \text{ В} \cdot \text{с/рад;} \\ c_2 &= K_m = 0,072 \text{ В} \cdot \text{с/рад.} \end{aligned} \quad (3)$$

Момент инерции двигателя PIVT-6-25/3A определим на основании известной электромеханической постоянной времени

$$T_m = \frac{J_{\text{ном}} R_a}{c^2}, \text{ откуда } J_{\text{ном}2} = \frac{T_m c_2^2}{R_a} = \frac{0,025 \cdot 0,072^2}{5,15} = 2,516 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (4)$$

Передаточная функция двигателя постоянного тока, выраженная через параметры [1, 3]:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{\Omega_{\text{ном}}(s)}{U_{\text{ном}}(s)} = \frac{1/c}{\frac{L_a J_{\text{ном}}}{c^2} s^2 + \frac{R_a J_{\text{ном}}}{c^2} s + 1}. \quad (5)$$

Задача использования экспериментальных установок состоит в регистрации динамических характеристик электромеханических преобразователей и проверке соответствия полученных результатов математической модели вида (5).

Схема экспериментальной установки для исследования двигателя 4ПБ112М2Г показана на рис. 1.

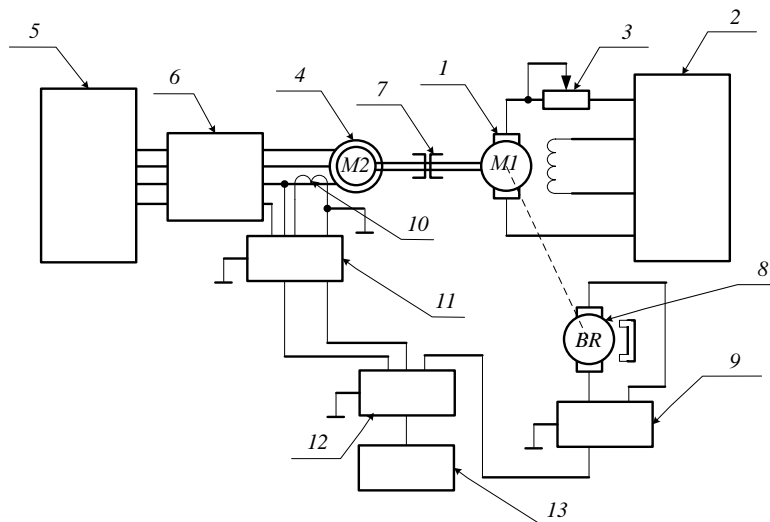


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования электрических машин с обработкой информации в среде *Labview*: 1 – двигатель постоянного тока; 2 – станция управления ДПТ; 3 – реостат; 4 – асинхронный двигатель; 5 – станция управления АД; 6 – комплектное измерительное устройство; 7 – муфта; 8 – тахогенератор; 9 – делитель напряжения; 10 – трансформатор тока; 11 – блок согласования; 12 – аналого-цифровой преобразователь; 13 – персональный компьютер

Установка включает в себя испытуемый двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) *M1* типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 с жестко установленным на валу тахогенератором ТП80-20-0,2. Вал двигателя с помощью двух упругих втулочно-пальцевых полумуфт 7 соединен с асинхронным электродвигателем (АД) типа АИР90Л2У2. ДПТНВ *1* и АД *4* жестко закреплены на станине посредством болтовых соединений. При необходимости двигатели могут быть разъединены. Управление работой ДПТНВ производится со станции управления *2*. В якорной цепи ДПТНВ предусмотрена возможность подключения добавочных сопротивлений и индуктивностей. Управление АД осуществляется со станции управления *5*. Для калибровки измерительных каналов в силовую цепь управления АД подключается переносное комплектное измерительное устройство *K50* *6*. В качестве датчика скорости в измерительном канале используется входящий в состав ДПТНВ тахогенератор *8*, с крутизной статической характеристики 20 мВ·мин. Сигнал с тахогенератора поступает на делитель напряжения *9* с коэффициентом передачи 0,0167 и далее на вход восьмиканального последовательного аналого-цифрового преобразователя напряжения NI 4472 *12* с частотой дискретизации 20 кГц, который, в свою очередь, подключен к шине *PCI* персонального компьютера. Измерение тока, протекающего по фазному проводу АД, производится при помощи трансформатора тока (ТТ) УТТ-5 *10*, с коэффициентом трансформации 0,1. Ток со вторичной обмотки ТТ подается в блок согласования *11*, который состоит из преобразователя тока *ZMCT* 103С, преобразователя напряжения *ZMPT* 101В и двух операционных усилителей *LM358*. Кроме того, на блок согласования *11* подводится фазное напряжение АД. Данный блок выполняет операцию формирования информационных сигналов на выходах операционных усилителей для последующей обработки в АЦП.

На рис. 2 показана функциональная схема экспериментальной установки для исследования серводвигателя постоянного тока типа *PIVT-6-25/3A* с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 3 мВ·мин. Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа *BCA-5K*.

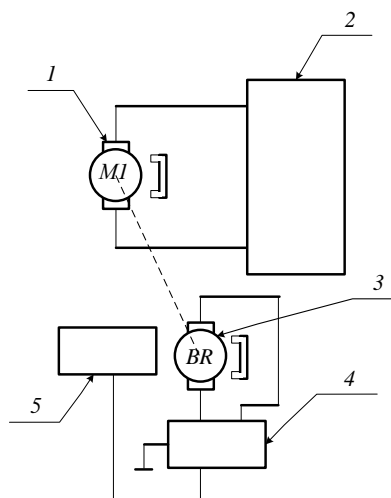


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования электрических машин с обработкой информации с помощью платформы *Arduino Nano*:
1 – двигатель постоянного тока; *2* – станция управления ДПТ; *3* – тахогенератор;
4 – микроконтроллер; *5* – персональный компьютер

Обработка результатов измерения осуществляется с помощью платформы *Arduino Nano* на микроконтроллере *ATmega 328*, поддерживающим последовательный интерфейс *UARTTTL* (5 В). Установленная на платформе микросхема *FTDI FT232RL* передает данный интерфейс через *USB*, а драйверы микросхемы предоставляют виртуальный *COM*-порт программе на персональном компьютере.

Результаты и обсуждение

Для анализа переходных процессов с применением функциональной схема на рис. 1 разработан виртуальный прибор в среде графического программирования *NI Labview* [13,14], позволяющий измерить выходные координаты ДПТНВ.

Виртуальный прибор состоит из лицевой панели, служащей для визуализации показаний и соответствующей программы в виде блок-диаграммы (рис. 3).

Блок-диаграмма содержит в своем составе блок сбора данных, блок распределения, блок первичной обработки, блоки визуализации и блоки архивирования. Для

конфигурирования измерительных каналов служит блок «DAQ Assistant», который позволяет индивидуально настраивать частоту опросов измерительных каналов. Блоки «Select Signals» служат для разделения входных сигналов. Учет преобразований сигналов с датчиков и их калибровка производится при помощи блоков суммирования и умножения с выставлением калибровочных коэффициентов. Визуализация измерений производится блоками Scope (на рис. 3 блоки «Speed», «Voltage», «Current»). Блоками «Write to Measurement File» осуществляется архивирование замеров.

Экспериментальные замеры переходных процессов при пуске двигателя постоянного тока типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 осуществлялись при отсоединенном АД. Результаты эксперимента при пуске вхолостую при номинальных значениях параметров якорной цепи были сохранены в ПЗУ персонального компьютера в форме таблицы, содержащей 20000 строк [15].

Следует отметить, что для обработки результатов эксперимента в среде Excel написана соответствующая программа, обеспечивающая рациональный выбор количества экспериментальных точек, не влияющий на снижение точности результатов [16].

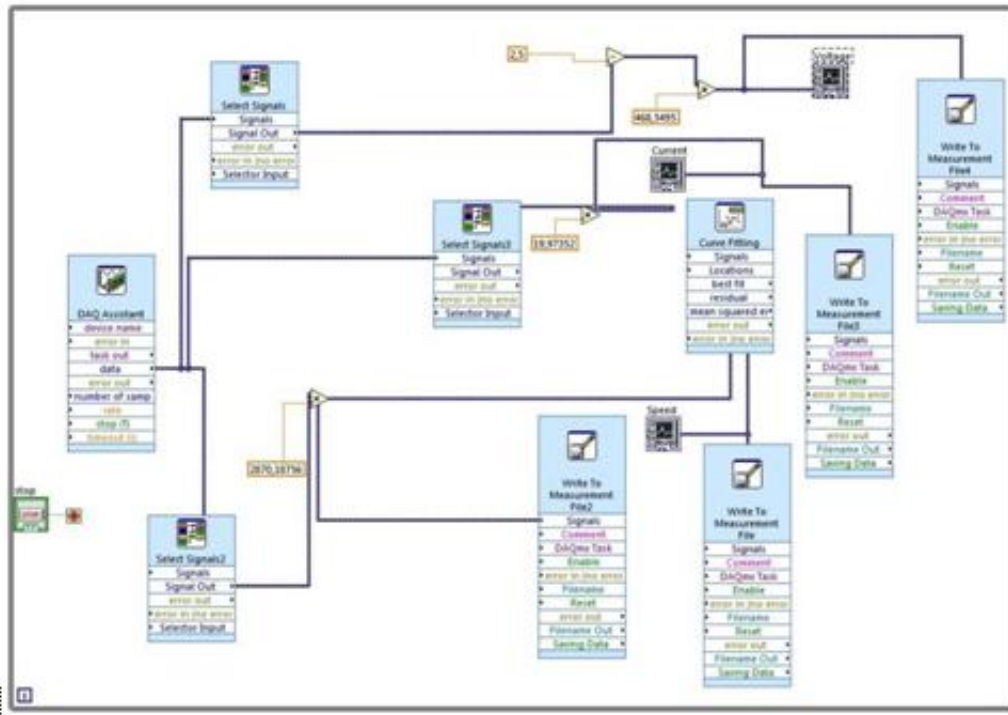


Рис. 3. Блок-диаграмма визуализации измерений

Полученному переходному процессу соответствует математическая модель ДПТНВ второго порядка (5) с преобразователем в виде аperiodического звена первого порядка

$$W_{п1}(s) = \frac{K_{п1}}{T_{п1}s + 1} \quad (6)$$

и следующими значениями ее параметров: коэффициентом передачи – $K_{п1} = 22$; постоянной времени $T_{п1} = 0,00183$ с.

Прделанные исследования подтвердили работоспособность экспериментальной установки и применимость программного обеспечения для дальнейшей работы. Далее было проведено детальное исследование ДПТНВ с целью сравнительной оценки зависимостей угловой скорости, полученной экспериментально $n_{дпт.э1}(t)$ и в среде *MatLab* с использованием *Simulink* – модели объекта $n_{дпт.м1}(t)$.

Графики переходных процессов $n_{дпт.э1}(t)$ и $n_{дпт.м1}(t)$ представлены на рис. 4.

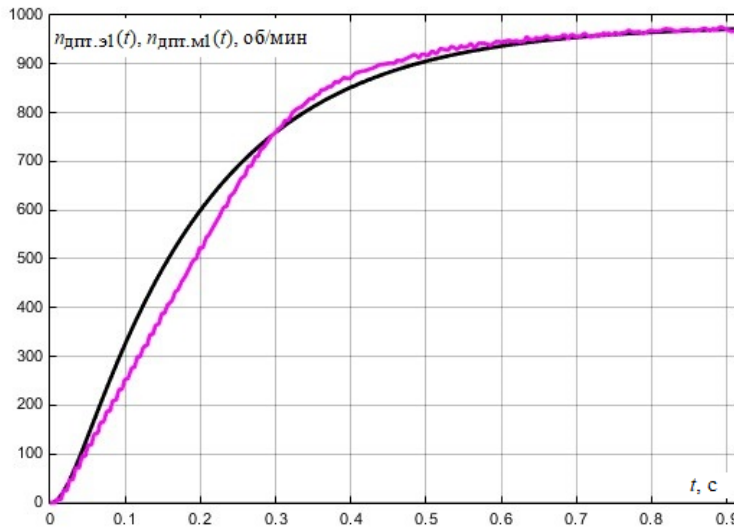


Рис. 4. Графики переходных процессов $n_{дпт.э1}(t)$ (сиреневый) и $n_{дпт.м1}(t)$ (чёрный)

Как видно из рис. 4, переходные процессы продолжаются в течение 0,92 с, что соответствует времени эксперимента. По окончании эксперимента значения угловых скоростей $n_{дпт.э1}^{уст}(t) = 972,6$ об/мин, $n_{дпт.м1}^{уст}(t) = 971,7$ об/мин, при этом относительная погрешность в установившемся режиме не превышает 0,1%.

Вторая экспериментальная установка (рис. 2) для исследования динамических процессов ДПТНВ имеет более компактную техническую реализацию. Отличительной особенностью установки является наличие микроконтроллера, в котором реализована рабочая программа обработки и регистрации информации о переходных процессах выходных координат электромеханического преобразователя.

Результаты экспериментального исследования процесса пуска двигателя постоянного тока типа *PiVT-6-25/3A* были зарегистрированы микроконтроллером *ATmega 328* с последующей обработкой на персональном компьютере в среде *Excel*. Таблица с полученными экспериментальными данными содержит 103 строки при эксперименте на том же временном интервале 0,92 с.

Полученный переходный процесс, также, как и графики на рис. 4, имеет аperiodический характер и описывается аналогичной математической моделью ДПТНВ второго порядка (5) с соответствующими значениями параметров (см. формулы (1) – (4)). Преобразователь описывается моделью вида

$$W_{п2}(s) = \frac{K_{п2}}{T_{п2}s + 1}, \quad (7)$$

где коэффициент передачи – $K_{п2} = 7$; постоянной времени $T_{п2} = 0,005$ с.

Графики экспериментального переходного процесса $n_{дпт.э2}(t)$ и переходного процесса *Simulink*-модели $n_{дпт.м2}(t)$ представлены на рис. 5.

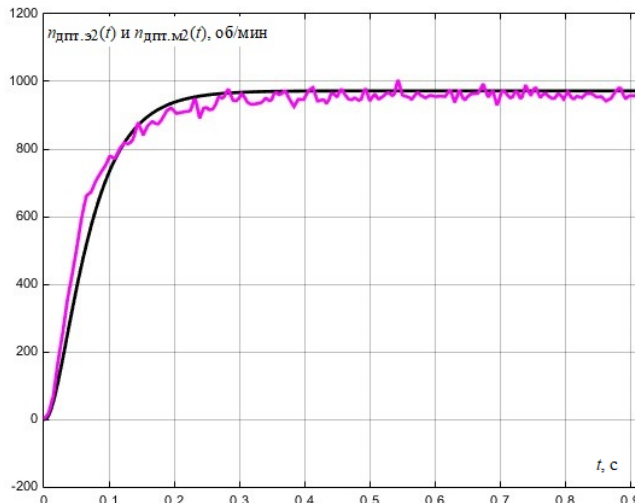


Рис. 5. Графики переходных процессов $n_{дпт.э2}(t)$ (сиреневый) и $n_{дпт.м2}(t)$ (чёрный)

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что установившиеся значения угловых скоростей составляют $n_{\text{ДПТ.Э}}^{\text{уст}}(t) = 969,5$ об/мин, $n_{\text{ДПТ.М}}^{\text{уст}}(t) = 972,2$ об/мин соответственно. При этом относительная погрешность в установившемся режиме не превышает 0,2%.

Экспериментальные зависимости $n_{\text{ДПТ.Э1}}(t)$ и $n_{\text{ДПТ.Э2}}(t)$ характеризуются флуктуациями измеряемой величины, вызванными электромагнитными процессами в тахогенераторе и погрешностями аналого-цифрового преобразования.

Кроме того, в переходном режиме на временных интервалах 0,03...0,3 с и 0,3...0,6 с (см. рис. 4) имеют место несовпадения экспериментальной кривой и кривой, полученной, с использованием *Simulink*-модели, что подтверждает наличие динамической погрешности. Подобные отклонения между экспериментальным и модельным графиками на рис. 5 находятся на временном интервале 0,01...0,12 с. Оценку динамической погрешности произведем на основе вычисления невязки (разности) ε между кривыми $n_{\text{ДПТ.Эi}}(t)$ и $n_{\text{ДПТ.Ми}}(t)$ с применением линейного интегрального критерия [статья]

$$Q(\varepsilon_i) = \int_0^{\infty} [n_{\text{ДПТ.Эi}}(t) - n_{\text{ДПТ.Ми}}(t)] dt . \quad (8)$$

На рис. 6 показаны графики невязки между кривыми, полученными на выходе *Simulink*-моделей и экспериментальными кривыми для двух экспериментов.

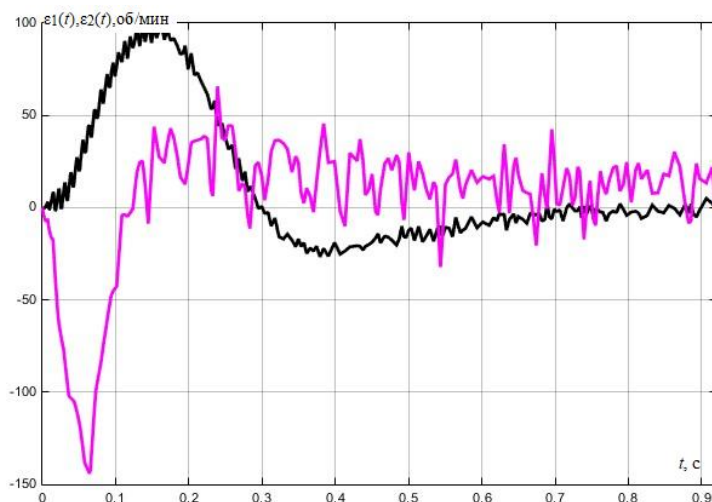


Рис.6. Графики невязки для двигателя 4ПБ112М2ГУХЛ4 $\varepsilon_1(t)$ (черный) и двигателя *PIVT*-6-25/3А $\varepsilon_2(t)$ (сиреневый)

Так, невязка $\varepsilon_1(t)$ характеризуется максимальным отклонением около 100 об/мин на 0,15 секунде, что соответствует наибольшей разнице между экспериментальными и модельными переходными процессами пуска ДПТНВ типа 4ПБ112М2ГУХЛ4. При этом максимальная амплитуда флуктуаций составляет 10 об/мин. По мере завершения переходного процесса величина невязки устанавливается около нулевого значения.

График невязки $\varepsilon_2(t)$ ДПТНВ типа *PIVT*-6-25/3А достигает экстремума -145 об/мин на 0,065 секунде, и затем колеблется около нулевого значения с максимальной амплитудой флуктуаций около 60 об/мин.

Из сравнения зависимостей $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ видно, что невязка $\varepsilon_1(t)$, полученная при проведении эксперимента по схеме на рис. 1, отличается как меньшей амплитудой флуктуаций, так и меньшим максимальным отклонением, что, при прочих равных условиях, говорит о большей точности экспериментальных данных и, соответственно, большей точности при реализации метода контроля функционирования электромеханических преобразователей, основанного на вычислении линейного интегрального критерия (8).

В этой связи графики $Q(\varepsilon_i) = f(t)$ позволяют не только оценить динамическую погрешность аппроксимации переходных процессов операторными моделями, но и сделать заключение о целесообразности применения одной из экспериментальных установок для реализации метода контроля функционирования электромеханических преобразователей. Зависимости линейного интегрального критерия $Q(\varepsilon_1)$, $Q(\varepsilon_2)$ от времени показаны на рис. 7.

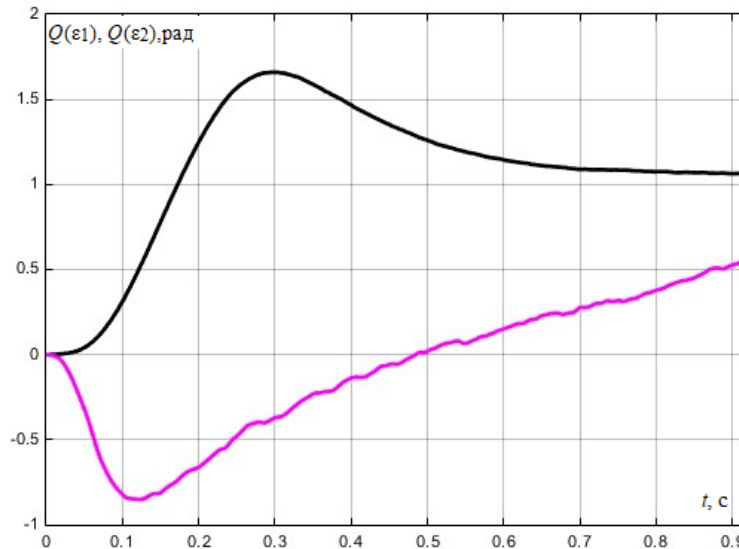


Рис. 7. Временные зависимости линейного интегрального критерия для двигателя 4ПБ112М2ГУХЛ4 $Q(\epsilon_1)$ (черный) и двигателя PIVT-6-25/3A $\epsilon_2(t)$ (сиреневый)

Из приведенных зависимостей видно, что по окончании переходного процесса установившиеся значения линейного интегрального критерия $Q(\epsilon_1)$, $Q(\epsilon_2)$ составляют 1,07 рад и 0,56 рад соответственно, что свидетельствует о меньшей динамической погрешности второго эксперимента. Таким образом, по соотношению компактности и простоты аппаратного обеспечения, а также точностных характеристик для реализации метода многопараметрического контроля ЭМП постоянного тока целесообразно использовать экспериментальную установку, изображенную в виде функциональной схемы на рис. 2. Далее в обозначениях индекс «2» также будет соответствовать данной экспериментальной установке.

В целях снижения флуктуаций полезного сигнала (см. рис. 5) целесообразно применить фильтрацию шумов, обеспечивающую повышение качества процесса регистрации выходных координат ЭМП и уменьшение уровня ошибок в измерительном канале. Операторное уравнение сглаживающего фильтра, синтезированного по критерию минимума интеграла невязки представлено выражением

$$W_f(s) = \frac{a_1s + a_0}{c_2s^2 + c_1s + c_0} = \frac{0,06s + 1}{0,0005s^2 + 0,06s + 1} \quad (9)$$

Применение в экспериментальной установке на рис. 2 микроконтроллера позволяет реализовать полученный алгоритм фильтрации в цифровой форме. Дискретную аппроксимацию фильтра (9) произведем с помощью билинейного преобразования [17, 18, 19] и при частоте дискретизации 622 Гц получим.

$$W_f(z) = \frac{b_2z^2 + b_1z + b_0}{d_2z^2 + d_1z + d_0} = \frac{0,057z^2 + 0,0009z - 0,0561}{z^2 - 1,8849z + 0,8868} \quad (10)$$

Выражению (10) соответствует схема непосредственного программирования, показанная на рис. 8.

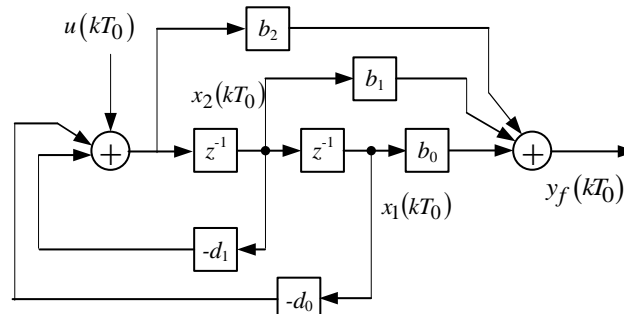


Рис. 8. Схема непосредственного программирования цифрового сглаживающего фильтра

На основе схемы на рис. 8 получены разностные уравнения цифрового фильтра в форме Коши

$$\begin{aligned} x_1[(k+1)T_0] &= x_2(kT_0); \\ x_2[(k+1)T_0] &= -d_0x_1(kT_0) - d_1x_2(kT_0) + u(kT_0); \\ y_f(kT_0) &= (b_0 - d_0b_2)x_1(kT_0) + (b_1 - d_1b_2)x_2(kT_0) + b_2u(kT_0), \end{aligned} \quad (11)$$

по которым составлена рабочая программа, реализующая алгоритмы обработки регистрируемой выходной координаты исследуемого ЭМП и фильтрации полученного сигнала.

Платформа *Arduino Nano* программируется с помощью соответствующего ПО *Arduino* без использования внешних программаторов за счет загрузчика *Nanow/Atmega 328* [20, 21]. Экспериментальные данные с тахогенератора обрабатываются 10-разрядным АЦП, встроенным в микроконтроллер, а результаты преобразования рассчитываются оператором *тари* формируют переменную, соответствующую скорости вращения ДПТ. Программа позволяет сохранить информацию о выходной координате ДПТ без учета фильтрации, а также отфильтрованные данные, которые передаются в персональный компьютер по протоколу связи *UART* с помощью команд *Serial.print()*, формируя массив значений времени и неотфильтрованного и отфильтрованного значений скорости на интервале эксперимента.

Результаты моделирования, характеризующие влияние синтезированного сглаживающего фильтра на переходный процесс выходной координаты ЭМП типа *PIVT-6-25/3A* показаны на рис. 9.

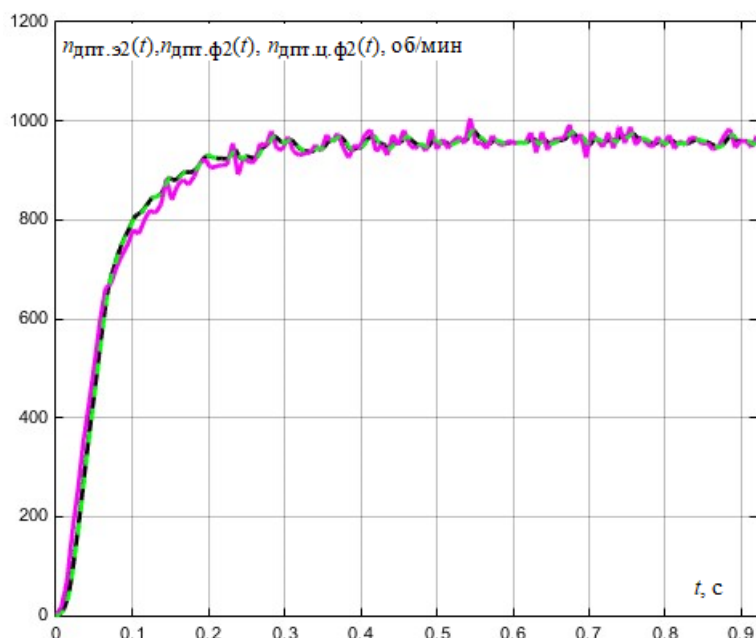


Рис. 9. Графики переходных процессов $n_{дпт.э2}(t)$ (сиреневый), $n_{дпт.ф2}(t)$ (черный), $n_{дпт.ц.ф2}(t)$ (зелёный)

Из полученных графиков (рис. 9) видно, что флуктуации скорости вращения ЭМП с учетом сглаживающих фильтров вида (9) и (10) находятся в допустимых пределах (не более 5%). Кроме того, погрешности дискретной аппроксимации аналоговой модели пренебрежимо малы.

Экспериментальное исследование переходного процесса пуска двигателя *PIVT-6-25/3A* отражено на рис. 10, 11.

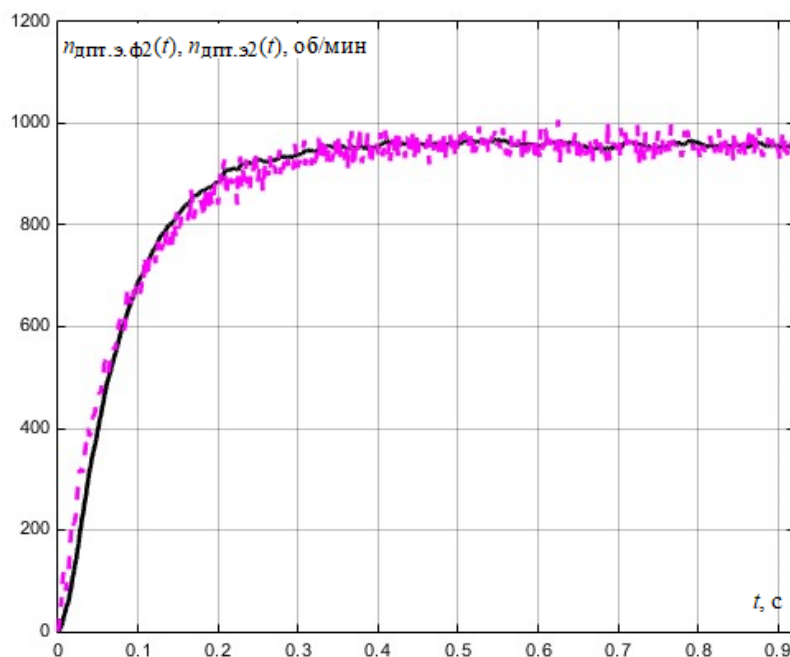


Рис. 10. Графики переходных процессов $n_{\text{дпт.э.ф2}}(t)$ с фильтром (черный), $n_{\text{дпт.э2}}(t)$ (сиреневый)

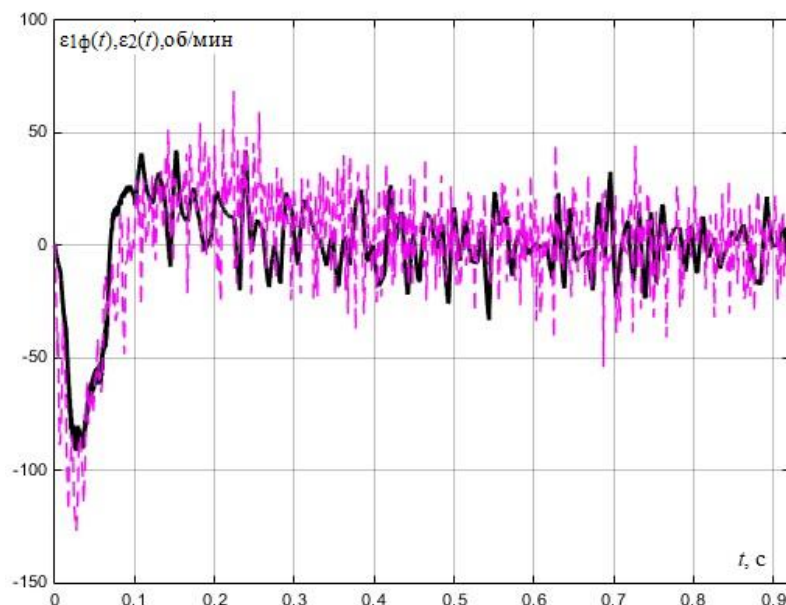


Рис. 11. Графики невязки для двигателя PIVT-6-25/3A со сглаживающим фильтром $\varepsilon_1(t)$ (черный) и без фильтра $\varepsilon_2(t)$ (сиреневый)

Следует отметить, что с целью повышения информативности эксперимент проводился с большей частотой дискретизации (622 Гц) по сравнению с результатами, представленными на рис. 5, 6 (частота дискретизации 103 Гц) и, соответственно, с большим количеством точек регистрируемой выходной координаты, как показано на рис. 10.

На рис. 11 изображены графики невязки, показывающие влияние сглаживающего цифрового фильтра на уменьшение флуктуаций регистрируемой координаты ЭМП, что проявляется в уменьшении высокочастотной составляющей шумов (около 4 кГц), а также снижении амплитуды выбросов практически в два раза.

Для подтверждения правильности проведенных расчетов также была получена временная зависимость линейного интегрального критерия, показанная на рис. 12.

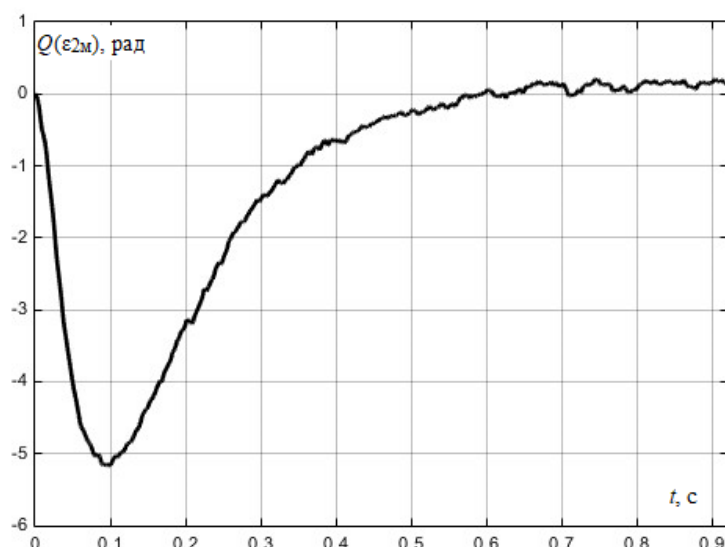


Рис. 12. Временные зависимости линейного интегрального критерия для двигателя PIVT-6-25/3A: модель $Q(\varepsilon_{2m})$ (черный), эксперимент $Q(\varepsilon_{2s})$ (сиреневый)

Из приведенного графика следует, что отклонение экспериментальной кривой $Q(\varepsilon_{2s})$ достигает максимального значения около 5 рад на 0,1 с, а к окончанию переходного процесса не превышает 0,13 рад, что подтверждает правильность аналитических расчетов.

Выводы

Проведенные исследования с двигателями постоянного тока типа 4ПБ112М2ГУХЛ4 и PIVT-6-25/3A на соответствующих экспериментальных установках (рис. 1 и рис. 2), показали преимущества второй установки, которая является более компактной и экономически оправданной с точки зрения аппаратного обеспечения, а программное обеспечение микроконтроллера *Arduino Nano* не требует специальной лицензии и отличается относительной простотой. Первая установка, благодаря применению сложного аппаратно-программного обеспечения, обеспечивает высокую точность процесса исследования, что выражается в сравнительно низком уровне шумов и флуктуаций регистрируемой координаты ЭМП. Первоначальные исследования второй установки показали, что величина линейного интегрального критерия, необходимая для реализации метода многопараметрического контроля функционирования ЭМП постоянного тока, сглаживается инерционностями элементов экспериментальной установки. Тем не менее, в целях снижения погрешности результатов исследования был применен цифровой фильтр, синтезированный по критерию минимума интеграла невязки, что обеспечило заданную пятипроцентную ошибку, вызванную влиянием шумов. Таким образом, применение сравнительно простого микроконтроллера *Arduino Nano*, выполняющего функции аналого-цифрового преобразования, регистрации и фильтрации измерительной информации позволяет использовать разработанную экспериментальную установку для анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока с нестабильными параметрами на этапах проектирования и в процессе эксплуатации.

Литература

1. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Городнов А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(4):113-122.
2. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
3. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., et al. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019). V. 124.
4. Саушев А.В., Широков Н.В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2016. №2 (36). С. 143-156.
5. Frisk E., Krysander M., and D. Jung. A toolbox for analysis and design of model based diagnosis systems for large scale models. IFAC-PapersOnLine. 2017. V. 50. №1. pp. 3287-3293.

6. Delgado-Arredondo P.A., Morinigo-Sotelo D, et al. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. V. 83, pp. 568–589.
7. Jardine A.K., Lin D and Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*. 2006. V. 20. №. 7, pp. 1483–1510.
8. Dmitriev B.F., Cherevko A.I., Gavrilov D.A. Universal MatLab-Simulink model of a generalized electrical machine. *Russian Electrical Engineering*. 2005. Vol. 76. № 7. P. 1-8.
9. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Кучеров В.А., и др. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-2. С. 98.
10. Седова И.Ю., Юдина О.И. Исследование параметров математической модели для расчета добавочных потерь в двигателе постоянного тока при импульсном питании. Сев.-Кавк. гос. техн. ун-т. Ставрополь, 2007.
11. Шмарин Я.А., Кодкин В.Л. Экспериментальное исследование синхронного двигателя с постоянными магнитами // *Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия-2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ*. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. 118 с.
12. Матвеева О.Л., Селиверов Д. И. Современные электродвигатели для стрелочных приводов // *Актуальные вопросы технических наук: материалы 2 Междунар. науч. конф. г. Пермь, февраль 2013 г. Пермь: Меркурий, 2013. С. 102-104.*
13. Smedley Trevor J., Cox Philip T. Visual Languages for the Design and Development of Structured Objects // *Journal of Visual Languages and Computing. VLC*. 1997. Vol. 8, № 1. pp. 5784.
14. Meurice L., Nagy C., Cleve A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. In: Nurcan, S. Soffer, P. Bajes, M. Eder, J. (eds.) CAiSE 2016. LNCS. 2016. V. 9694. pp. 491-506. Springer, Cham.
15. Бориско С.Н., Кислов О.В., Кобзарь А.А., и др. Анализ результатов обработки информационных сигналов с частотой модуляции, близкой к частоте Найквиста // *Двойные технологии. ЗАО "Передовые специальные технологии и материалы"*. 2019. №1. С.53–56.
16. Бильфельд Н.В. Программное использование функций Excel // *Новый университет. Серия: Технические науки*. 2013. № 3. С. 3-7.
17. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Развитие метода билинейного преобразования для синтеза цифровых фильтров. *Материалы МНТК «INTERMATIC-2017» Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 20–24 ноября 2017 г. Москва. В сборнике: Информационные технологии и телекоммуникации. С. 1183-1185.*
18. Kwaha B.J., Kolawole E.A., Batu A.M. The design and implementation of a digital infinite impulse response (IR) lowpass Butterworth filter – A comparison of Matlab and Bilinear transformation methods // *Indian Journal of Science and Technology*. 2011. V. 4. № 4. pp. 451-455.
19. Зиятдинов С.И., Аграновский А.В., Осипов Л.А. Синтез комплексного фильтра с заданной передаточной функцией // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 7. С. 542-546.
20. Омельченко Е.Я., Танич В.О., Маклаков А.С., Карякина Е.А. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino. Магнитогорск: «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. С.28-33.
21. Milan Matijevic, and Vladimir Cvjetkovic. Overview of architectures with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems in Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016 International Conference on 2016. pp. 56-63.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Мухаметшин Азат Ильдусович – ассистент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Чичков Павел Владимирович – ведущий инженер отдела автоматизации, АО «Казанский Гипронеавиапром».

References

1. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):113-122.

2. Malev NA, Pogoditsky OV, Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019;1:60-67.
3. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. V. 124.
4. Saushev AV, Shirokov NV. Diagnosis of the state of electrical systems in the space of parameters of their elements. *Bulletin of the SUSRF after admiral S.O. Makarov*. 2016;2 (36):143-156.
5. Frisk E, Krysander M and. Jung D. *A toolbox for analysis and design of model based diagnosis systems for large scale model*. IFAC-PapersOnLine. 2017;50(1):3287–3293.
6. Delgado-Arredondo PA, Morinigo-Sotelo D, Osornio-Rios RA. J. G. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017;83:568–589.
7. Jardine AK, Lin D, and Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*. 2006;20,(7):1483–1510.
8. Dmitriev BF, Cherevko AI, Gavrilov DA. Universal MatLab-Simulink model of a generalized electrical machine. *Russian Electrical Engineering*. 2005;76(7):1-8.
9. Lankin AM, Lankin MV, Kucherov VA, et al. Application of the algorithm nature-model tests for the diagnosis of electrical systems. *Modern problems of science and education*. 2015;1-2:98.
10. Study of the parameters of the mathematical model for calculating the additional losses in a DC motor with pulsed power / Sedova I.Yu., Yudina O.I. ; Sev.-Kavk. state tech. un-t – Stavropol, 2007.
11. Shmarin YaA, Kodkin VL. Experimental study of synchronous motors with permanent magnets. - *BULLETIN of the CIGRE Russian National Committee*. Issue N.7. Materials of the Youth Section of the RNC CIGRE: a collection of competitive reports “Energy-2015” in the field of electricity and electrical engineering in the areas of CIGRE research. Ivanovo, 2015. 118 p.
12. Matveeva OL, Seliverov D.I. *Modern electric motors for switch drives*. Actual problems of technical sciences: materials of the 2th Intern. scientific conf. (Perm, February 2013). Perm: Mercury, 2013. pp. 102–104.
13. Smedley Trevor J. Cox Philip T. Visual Languages for the Design and Development of Structured Objects. *Journal of Visual Languages and Computing*. VLC. 1997;8(1):57–84.
14. Meurice L. Nagy C. Cleve A. Static analysis of dynamic database usage in Java systems. CAiSE 2016. LNCS. 2016;9694:491-506. Springer, Cham.
15. Borisko SN, Kislov OV, Kobzar AA, et al. Results analysis of informative signals with a modulation frequency close to the Nyquist frequency processing Dual Technologies. *CJSC Advanced Special Technologies and Materials*. 2019;1:53–56.
16. Bilfeld N.V. Programming application of Excel functions. *New University. Series: Engineering*. 2013;3:3–7.
17. Kreindelin VB, Grigoryeva E.D. *Development of the bilinear conversion method for the synthesis of digital filters*. Materials of ISTC “INTERMATIC-2017” Fundamental Problems of Radioelectronic Instrument Making. November 20–24, 2017 Moscow. In the collection: Information Technologies and Telecommunications. pp. 1183-1185.
18. Kwaha BJ, Kolawole EA., Batu A.M. The design and implementation of a digital infinite impulse response (IIR) lowpass Butterworth filter. A comparison of Matlab and Bilinear transformation methods *Indian Journal of Science and Technology*. 2011; 4(4):451–455.
19. Ziatdinov SI, Agranovsky AV, Osipov LA. Synthesis of a complex filter with specified transfer function. *Instrumentation*. 2016;59(7):542–546.
20. Omelchenko EYa, Tanich VO, Maklakov AS, et al. *A brief overview and prospects for the use of the Arduino microprocessor platform*. Magnitogorsk: "Magnitogorsk State Technical University" Electrotechnical systems and complexes. 2017. pp. 28–33.
21. Milan Matijevic, and Vladimir Cvjetkovic. *Overview of architectures with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems*. Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), International Conference on, 2016. pp. 56-63.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: maleev@mail.ru. **Azat I. Mukhametshin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Pavel V. Chichkov – JSC «Kazan Giproniaviaprom», Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

27 марта 2020г.