

УДК 621.3+62-5

Игорь Сергеевич Полющенко

ООО НПО «Рубикон – Инновация», кандидат технических наук, инженер отдела № 36, Россия, Смоленск, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Разработка программного обеспечения для проверки исправности аппаратных средств электропривода

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные электроприводы имеют конструкционную форму электронных блоков с микропроцессорным управлением. При серийном производстве электроприводов требуется их технический контроль, а именно, проверка исправности аппаратных средств, в том числе логических и аналоговых входных и выходных цепей, силовых цепей, цифровых интерфейсов, встроенных датчиков и специализированных микросхем. Для осуществления таких проверок и их автоматизации требуется разработка программных и аппаратных средств из состава контрольно-проверочного и управляющего оборудования, а также специализированного программного обеспечения для электропривода, подлежащего проверке. В связи с этим разработка такого программного обеспечения для электропривода является актуальной.

Материалы и методы. Применены методы алгоритмизации процессов управления, системного анализа, модельно-ориентированной разработки программного обеспечения и его отладки, а также методы экспериментальных исследований.

Результаты. Предложен алгоритм выполнения проверок аппаратных средств электропривода, представляющий последовательность действий и вычислений, связанных с вводом, выводом и обработкой логических и аналоговых сигналов, формированием токов и напряжений в силовых цепях, а также контролем доступа к встроенным элементам, распределенным между электроприводом, подлежащим проверке, контрольно-проверочной аппаратурой и персональным компьютером, используемым в качестве управляющего устройства, координация информационных сообщений между которыми осуществляется по цифровым интерфейсам. В программное обеспечение электропривода введен режим проверки, обособленный от работы электропривода по его назначению в основном режиме, для чего предусмотрены обработчики аппаратных средств, а также набор параметров и команд.

Выводы. Осуществление технического контроля электропривода позволяет своевременно выявить его неисправности непосредственно после изготовления. Предложенный алгоритм проверок аппаратных средств электропривода и автоматизация их выполнения способствует внедрению его технического контроля в технологический процесс производства.

Ключевые слова: электропривод, технический контроль электропривода, микропроцессорное управление, микроконтроллер, модельно-ориентированное программирование

Igor Sergeevich Polyuschenkov

LLC R&D Company "Rubicon – Innovation", Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Engineer, Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Software development for checking the serviceability of electric drive hardware parts

Abstract

Background. Modern electric drives have the structural form of electronic units with microprocessor control. In the process of serial production of electric drives, their technical control is required, namely, checking the serviceability of hardware, including logical and analog input and output circuits, power circuits, digital interfaces, built-in sensors and specialized microchips. To carry out such tests and automate them, it is necessary to develop software and hardware for the test and control equipment, as well as specialized software for the electric drive subject to checking. Thus, the development of such software for the electric drive is relevant.

Materials and methods. The authors have applied the methods of algorithmization of control processes, methods of system analysis, methods of model-based development of software and its debugging, as well as the methods of experimental research.

Results. An algorithm is proposed to check the hardware of an electric drive, representing a sequence of actions and calculations associated with the input, output and processing of logical and analog signals, the formation of currents and voltages in power circuits, as well as access control to built-in elements distributed between the electric drive as a subject to check, the test and control equipment and the personal computer used as a control device, the coordination of

messages which is carried out via digital interfaces. A test mode is introduced into the electric drive software, isolated from the operation of the electric drive for its intended purpose in the main mode. Hardware handlers as well as a set of parameters and commands are provided.

Conclusions. Technical control of the electric drive allows us to promptly identify its faults immediately after manufacture. The proposed algorithm to test the hardware of the electric drive and automation of its implementation facilitates introduction of its technical control in the technological process of production.

Key words: electric drive, technical control of electric drive, microprocessor control, microcontroller, model-based software development

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.075-085

Введение. При разработке программного обеспечения и конструкции электропривода (ЭП) его электронный блок (ЭБ), который является совокупностью вычислительных и измерительных элементов, а также элементов силовой электроники, существует, как правило, в единственном экземпляре или в количестве нескольких прототипов. На этом этапе разработчики электропривода, а именно электромеханик, выполняющий функции программиста [1], а также конструктор-схемотехник и конструктор-технолог имеют возможность тщательно отладить работу аппаратных средств электронного блока, убедившись в надлежащем качестве элементов и их монтажа. Кроме того, у них есть возможность вручную настроить параметры измерительных и силовых цепей, оказывающих существенное влияние на работу электропривода. После завершения разработки электропривода в начале его серийного изготовления технологический процесс уже не предусматривает детального исследования исправности каждого экземпляра электронного блока электропривода (ЭБЭП) его разработчиками. Какими бы квалифицированными и ответственными ни были монтажники и техники, непосредственно изготавливающие эти электронные блоки, нельзя исключить брак, например, при монтаже электронных элементов. Сами эти элементы вполне могут оказаться неисправными или не соответствовать заявленным характеристикам. Кроме того, многие неисправности электронных блоков, возникшие при их изготовлении, могут быть не выявлены при визуальном осмотре. Эти обстоятельства ставят вопрос о необходимости программных и аппаратных средств, которые позволят осуществить технический контроль электронного блока электропривода, состоящий из автоматизированных проверок его исправности [2].

При проверке исправности ЭБ необходимо убедиться, что его входы корректно вводят сигналы, а на его выходах корректно формируются сигналы, электрические и временные характеристики которых характерны для работы электропривода. Кроме того, требуется проверить вычислительные и измерительные элементы внутренней структуры электропривода, такие как встроенные датчики и специализированные микросхемы. Для контроля выходных сигналов ЭБ, установки сигналов на его входах

и создания электрических нагрузок в силовых цепях предназначена контрольно-проверочная аппаратура (КПА), которая также имеет конструкцию в виде электронного блока с микропроцессорным управлением. Кроме того, для автоматизации технического контроля требуется управляющее устройство, имеющее пользовательский интерфейс и средства сопряжения с электронным оборудованием, например персональный компьютер (ПК) [2–5].

Сказанное в полной мере относится к двухдвигательному электроприводу панорамных стеклоочистителей, разработка полноценного прототипа которого описана в [6].

Целью исследования является разработка программного обеспечения этого электропривода для проверки его аппаратных средств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить состав аппаратных средств электронного блока электропривода, требующих проведения проверки работоспособности, а также состав оборудования, необходимого для автоматизации его технического контроля, и порядок взаимодействия этого оборудования;
- составить алгоритмическое описание проверок аппаратных средств электропривода, распределив между его электронным блоком и другим оборудованием выполнение вычислений, формирование, ввод и обработку сигналов;
- разработать программное обеспечение, входящее в состав программных средств электропривода и выполняющее возложенные на него задачи по проверке исправности аппаратных средств.

Методы исследования. В [6] описывается проектирование электропривода на базе микроконтроллера STM32, который осуществляет согласованное управление движением двух панорамных стеклоочистителей, имеющих индивидуальные электрические двигатели. При разработке его программного обеспечения использовалась модельно-ориентированная технология программирования [1]. Этот электропривод был применен в составе электрооборудования автобуса, разработанного «Группой ГАЗ», установочная партия которого выпущена Ликинским автобусным заводом. При серийном выпуске этого автобуса потребуется и серийный выпуск электропривода для стеклоочисти-

телей, что делает актуальным осуществление его технического контроля.

Электронный блок электропривода стеклоочистителей, согласно [6], имеет следующие аппаратные средства, предназначенные для соединения с внешними устройствами:

- логические входы для подключения датчиков направления движения стеклоочистителей и подключения трех переключателей для задания режимов работы электропривода;
- логические выходы контрольных сигналов готовности и положения парковки;
- аналоговые входы для подключения угловых датчиков положения стеклоочистителей;
- два неперверсивных силовых транзисторных преобразователя, имеющих датчики тока с аналоговыми выходами, для питания электрических двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов;
- интерфейс сетевой шины CAN (Controller Area Network) [7] для подключения к бортовому компьютеру автотранспортного средства;
- последовательный интерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [7], преобразуемый к USB, для технологического подключения к персональному компьютеру.

Также ЭБ этого электропривода содержит встроенные аппаратные элементы, подключаемые к его микроконтроллеру:

- датчик питающего напряжения и термодатчики с аналоговыми выходами;
- микросхема энергонезависимого запоминающего устройства (ПЗУ) с интерфейсом I2C (Inter-Integrated Circuit) [7].

Согласно [2–5], принципиально возможны несколько способов взаимодействия между проверяемым электронным блоком, блоком КПА и персональным компьютером в качестве управляющего устройства с пользовательским интерфейсом. В зависимости от порядка взаимодействия перечисленного оборудования между ним распределяются задачи, последовательностью которых образованы проверки, и, следовательно, программные средства, осуществляющие их выполнение и координацию. Исходя из сказанного, на рис. 1 показана функциональная схема взаимодействия электронного блока электропривода с блоком КПА и персональным компьютером. Такая схема является наиболее удобной для реализации, так как, по сравнению с блоком КПА, основная часть программного обеспечения, связанного с выполнением проверок, входит в состав электропривода, а сам блок КПА подчинен ему. При этом в программном обеспечении электропривода целесообразно выделить режим проверки, имеющий систему параметров и переменных, используемых при выполнении вычислений, а также систему команд. В то же время работа электропривода согласно его назначению, описанная в [6], отнесена к основному режиму. Для переключения между этими режи-

мами предназначена специальная команда, передаваемая электроприводу от персонального компьютера.

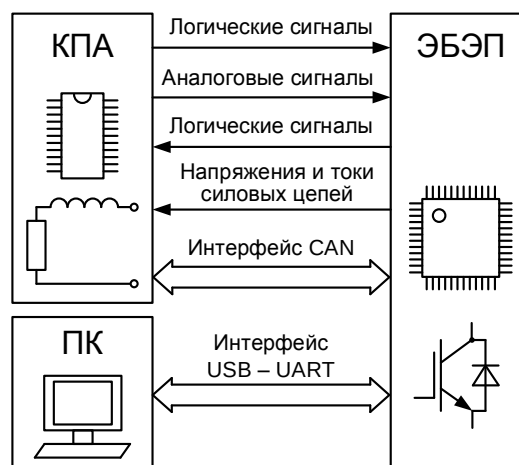


Рис. 1. Функциональная схема взаимодействия электронного блока электропривода, блока контрольно-проверочной аппаратуры и персонального компьютера при техническом контроле

В схеме, показанной на рис. 1, входы и выходы ЭБ электропривода соединены соответственно с выходами и входами блока КПА в зависимости от направления передачи сигналов. Ввод аналоговых сигналов в электронный блок электропривода осуществляют аналого-цифровые преобразователи (АЦП), встроенные в его микроконтроллер. Вывод аналоговых сигналов блоком КПА осуществляется на выходах с цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Очевидным признаком исправности входных цепей электронного блока электропривода является корректный ввод эталонных сигналов, подаваемых на них блоком КПА. В то же время признаком исправности выходных цепей электропривода является корректный результат измерения их эталонных сигналов с помощью блока КПА, поэтому установка сигналов, их ввод и измерение, а также сопоставление результатов этих измерений с эталонными значениями должны быть скоординированы по последовательности выполнения и времени [8].

Для проверки силовых цепей и их датчиков тока предназначены нагрузочные RL -цепи из состава блока КПА, а для проверки датчиков и микросхемы ПЗУ, встроенных в электронный блок электропривода, блок КПА не требуется.

Разработка и исследование ЭБЭП в режиме проверки при взаимодействии с блоком КПА и персональным компьютером позволили выбрать компоновку программного обеспечения электропривода для этого режима, которая иллюстрируется блок-схемой, показанной на рис. 2. Согласно ей, программное обеспечение имеет обработчики приоритетных прерываний и фоновый цикл, вычисления в котором выполняются с низшим приоритетом в зависимости от счета системного таймера SysTick.



Рис. 2. Блок-схема программного обеспечения электронного блока электропривода в режиме проверки

Задачи, выполняемые электроприводом в режиме проверки, были распределены между теми же элементами компоновки программного обеспечения, что и для основного его режима [6]. При этом ввод и вывод сигналов, управление формированием сигналов, имеющих широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), для силовых цепей, выполнение вычислений, а также получение и отправка сообщений по цифровым интерфейсам осуществляются по системным прерываниям, которые вызываются при перепополнении таймеров или при программной установке системных флагов. Так, обработка сообщений, принятых электроприводом от персонального компьютера по интерфейсу UART, согласно функциональной схеме на рис. 1, осуществляется в индивидуальном обработчике прерывания при перепополнении таймера 4 с интервалом повторения 500 мкс. Для отправки ответных сообщений предназначен обработчик прерывания, который вызывается при программной установке системного флага exti4. Отправка сообщений по сети CAN, которые требуются для взаимодействия электронного блока электропривода и блока КПА, осуществляется с помощью программной установки системного флага exti0. Обращение к приемному буферу CAN для обнаружения в нем сообщений, принятых от блока КПА, выполняется по прерыванию при перепополнении таймера 6 через интервал 10 мс. Чем больше номера прерываний, указанных на рис. 2, тем ниже их приоритеты выполнения, как в микроконтроллере STM32 [9], использованном при разработке электропривода стеклоочистителей [6].

Рассмотрим выполнение проверок ЭБ электропривода, а также их автоматизацию с учетом схем, показанных на рис. 1 и рис. 2.

Для проверки входных логических цепей ЭБЭП персональный компьютер с помощью специального приложения отправляет ему сообщение с указанием вида проверки, т. е. проверяемого входа, и эталонного значения сигнала, который должен быть установлен на выходе КПА. Получив это сообщение, ЭБ электропривода преобразует его к формату обмена по сетевой шине CAN и пересылает блоку КПА. Вместе с этим ЭБЭП начинает отсчет интервала времени ожидания ответного сообщения, который имеет продолжительность несколько секунд. Получив сообщение от ЭБЭП с видом проверки и эталонным уровнем сигнала, блок КПА устанавливает его на выходе, соединенном с проверяемым входом электропривода, и отправляет ему ответное сообщение, подтверждая выполнение заданного действия. Закончив отсчет времени ожидания, ЭБЭП проверяет получение этого сообщения в приемном буфере CAN. Если оно получено, то ЭБЭП измеряет сигнал на проверяемом входе и сравнивает его с эталонным уровнем. В зависимости от результата этого сравнения электропривод отправляет персональному компьютеру ответное сообщение об исправности или неисправности логического входа, указав измеренный уровень сигнала. При этом требуется последовательно задать оба возможных логических уровня 0 или 1 эталонного сигнала и по окончании проверки вернуть сигнал на входе электропривода в ис-

ходное нулевое значение. Отсутствие ответного сообщения от блока КПА трактуется как неисправность подключения к сетевой шине CAN.

Проверка аналоговых входов ЭБ электропривода осуществляется подобным же образом, имитируя с помощью блока КПА подключение к ним датчиков положения, но с использованием нескольких значений эталонных аналоговых сигналов, коды которых с учетом их возможных диапазонов указываются в сообщениях. Эти сигналы выводятся на аналоговых выходах блока КПА, имеющих ЦАП.

Соответствие измеренных и эталонных уровней логических сигналов может быть установлено при их строгом равенстве. В то же время при оценке соответствия измеренных уровней аналоговых сигналов, преобразуемых АЦП микроконтроллера в цифровые коды, и их эталонных уровней на выходах блока КПА требуются некоторые диапазоны допуска.

Для проверки исправности выходных логических цепей электропривода персональный компьютер отправляет ему сообщение с указанием вида проверки, т. е. проверяемого выхода, и эталонного уровня сигнала. Получив это сообщение, ЭБ электропривода устанавливает на этом проверяемом выходе сигнал эталонного уровня, начинает отсчет интервала времени

ожидания и по сети CAN отправляет блоку КПА сообщение с запросом измерить этот сигнал. После получения этого сообщения блок КПА спустя некоторый интервал времени, требуемый для окончания переходных процессов после установки сигнала, измеряет его уровень и отправляет ответное сообщение с результатом измерения. Закончив отсчет интервала времени ожидания, электронный блок электропривода проверяет получение ответного сообщения от блока КПА. Далее электронный блок электропривода сравнивает эталонный уровень сигнала, который ранее был установлен на его проверяемом выходе, и измеренное значение этого сигнала, полученное в ответном сообщении от блока КПА. Затем ЭБЭП отправляет сообщение персональному компьютеру с результатом проверки, указав измеренный уровень сигнала. Если ответное сообщение от блока КПА с результатом измерения сигнала не было получено, то соединение по сети CAN считается неисправным. Для проверки логических выходов требуется использовать оба возможных значения сигналов 0 и 1, а по окончании проверки установить исходное нулевое значение.

Описанные проверки входов и выходов электропривода с некоторыми упрощениями иллюстрируются блок-схемой, показанной на рис. 3.

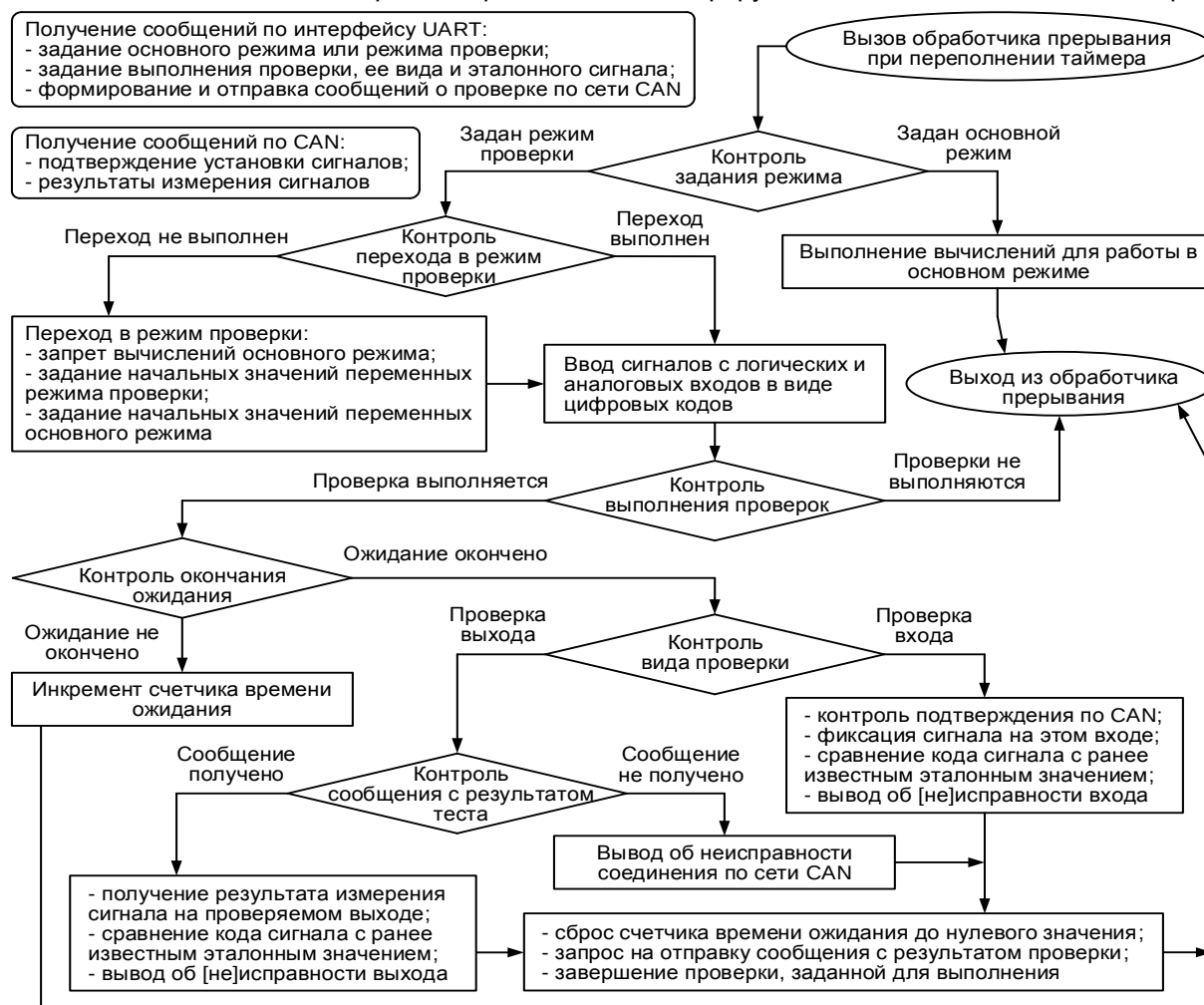


Рис. 3. Блок-схема программного обеспечения электропривода для проверки его входов и выходов

Вычисления выполняются итерационно по прерыванию при переполнении таймера 12, показанного на блок-схеме на рис. 2, через интервал времени 1 мс. Для контроля выполнения проверок и перехода между их стадиями используются программные флаги.

В отдельной секции блок-схемы на рис. 3 показано, что задание основного режима работы электропривода и режима проверки, а также вида проверок и их эталонных сигналов осуществляется с помощью сообщений, которые отправляются персональным компьютером по интерфейсу UART. Также на рис. 3 показана секция с указанием назначения сообщений по CAN для выполнения проверок входов и выходов.

Определение исправности микросхемы ПЗУ и интерфейса I2C для связи с ней основано на последовательных обращениях к проверяемой области ее памяти, чтобы выполнить чтение и запись данных, а также на контроле их результатов, как показано в блок-схеме на рис. 4. Действия распределены во времени, и, согласно рис. 2, выполняются в фоновом цикле, имея минимальный приоритет. Стрелки, соединяющие секции блок-схемы этой проверки, показывают последовательность вычислений, между которыми присутствуют интервалы времени.

Признаком исправности ПЗУ является успешная модификация данных во всех регистрах проверяемой области памяти. После успешной ее проверки осуществляется восстановление исходных значений регистров, которые предварительно были прочитаны и сохранены в оперативной памяти микроконтроллера. Для определения исправности интерфейса I2C, соединяющего микросхему ПЗУ и микроконтроллер, осуществляется контроль программных флагов из состава его обработчиков, сгенерированных из модельных блоков вида I2C Master Read/Write, которые были использованы при модельно-ориентированной разработке программного обеспечения согласно блок-схеме, показанной на рис. 4.

Очевидным признаком исправности интерфейсов UART и CAN электронного блока электропривода является их бесперебойная работа при проведении описанных выше проверок, в которых они используются.

Для проверки двух силовых цепей электропривода на основе нереверсивных транзисторных схем [10] в блоке КПА для них имеются нагрузочные *RL*-цепи. На рис. 5 показано подключение одной из силовых цепей к нагрузке.

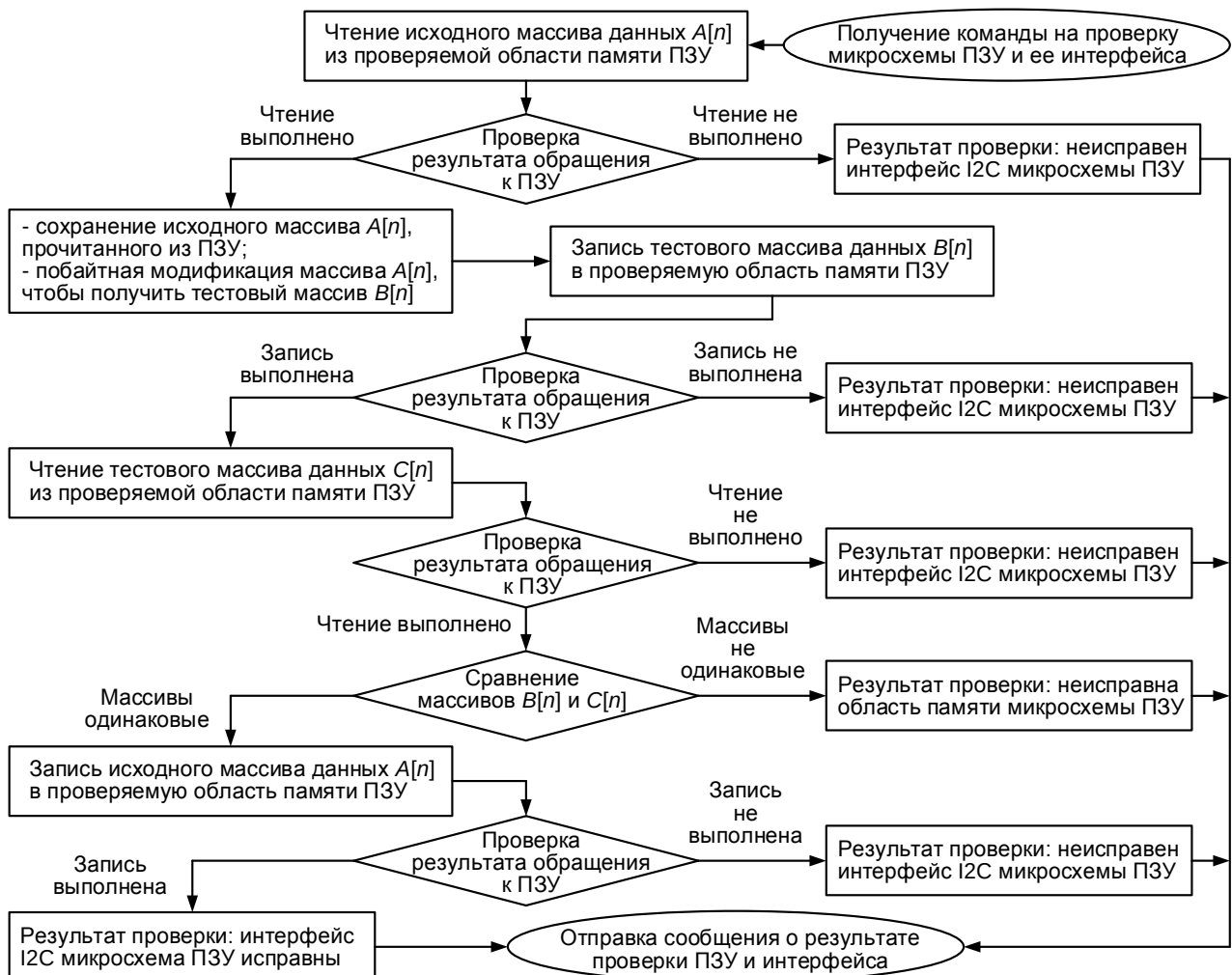


Рис. 4. Блок-схема проверки исправности микросхемы ПЗУ и ее интерфейса I2C

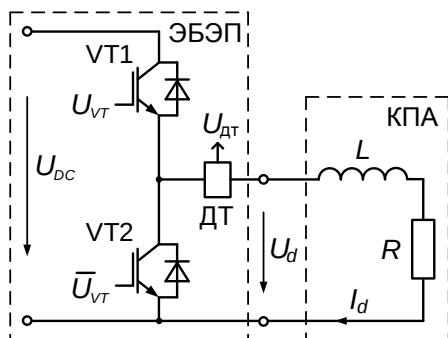


Рис. 5. Схема подключения силовой цепи электронного блока электропривода к нагрузке из блока КПА

Транзисторы VT1 и VT2 силового преобразователя противофазно управляются сигналом U_{VT} , имеющим широтно-импульсную модуляцию, и его инверсией. Напряжение U_d , приложенное к RL -нагрузке, линейно зависит от скважности ШИМ $\gamma = 0 - 0,95$ сигнала U_{VT} , ограничиваясь величиной напряжения питания U_{DC} :

$$U_d = \gamma U_{DC}. \quad (1)$$

Номинальная величина напряжения U_{DC} равна 25 В, что с учетом отклонения в некоторых пределах соответствует бортовой сети, обычной для транспортных средств. Частота ШИМ является важным параметром данного электропривода и может быть задана величиной от 2,5 кГц до 17,5 кГц с шагом 2,5 кГц. Индуктивность L в цепи нагрузки предназначена для сглаживания тока, а с ростом ее величины сокращается зона прерывистых токов [10]. Активное сопротивление $R = 2$ Ом цепи нагрузки предназначено для ограничения тока.

Если силовая схема электропривода, показанная на рис. 5, исправна, то в силовой цепи ее нагрузки протекает заданный ток I_d , который корректно измеряется датчиком ДТ, входящим в состав его электронного блока.

Очевидно, что при проверке датчика тока требуется определить, соответствует ли его коэффициент передачи $k_{ДТ}$ [11] эталонной или паспортной величине, которая используется при настройке электропривода [6]. Этот коэффициент рассчитывается следующим образом:

$$k_{ДТ} = \frac{U_{ДТ} - U_{ДТ0}}{I_d}, \quad (2)$$

где $U_{ДТ}$ – выходной сигнал датчика при протекании тока I_d ; $U_{ДТ0}$ – выходной сигнал ДТ при отсутствии тока в силовой цепи, т. е. при $I_d = 0$.

Однополярное напряжение питания датчика тока, благодаря которому его удобно сопрягать с АЦП, приводит к тому, что при отсутствии тока в силовой цепи сигнал $U_{ДТ}$ имеет ненулевую величину, т. е. смещение $U_{ДТ0}$. Его величина, входя в (2), оказывает влияние на измерение тока и корректность автоматического регулирования координат [6, 11]. Из-за физи-

ческих свойств самих датчиков и ограниченной точности элементов их внешних цепей действительная величина $U_{ДТ0}$ требует индивидуального измерения для всех таких датчиков каждого электропривода. Это измерение, осуществляемое автоматически в режиме проверки электропривода при получении им команды, имеет несколько этапов, последовательных по времени, что отражено в различных обработчиках в блок-схеме, показанной на рис. 2. После получения сообщения с запросом на измерение смещений датчиков тока работа генератора ШИМ запрещается, чтобы разомкнуть силовые цепи, исключив протекание по ним токов. Далее осуществляется серия измерений выходного сигнала $U_{ДТ}$ датчика тока первой из силовых схем, а затем вычисляется среднее значение этих измерений, которое и считается равным смещению $U_{ДТ0}$. Такие же действия осуществляются и для датчика тока из второй силовой схемы электропривода. Затем вновь разрешается работа генератора ШИМ. Значительное отклонение измеренной величины $U_{ДТ0}$ от половины напряжения питания датчика тока является признаком неисправности самого датчика или его внешних цепей. Измеренные значения смещений датчиков тока сохраняются в ПЗУ и используются в качестве параметров электропривода при работе в основном режиме.

Проверку коэффициента передачи требуется осуществить индивидуально для каждого из датчиков тока электропривода. В основу этой проверки положено обстоятельство, что по (1) при некоторой скважности ШИМ напряжение U_d пропорционально ей, а ток I_d определяется законом Ома. Если активное сопротивление R цепи нагрузки и напряжение питания U_{DC} силовой схемы имеют известные величины, то в случае заведомо исправного ЭБ электропривода для каждого j -го значения скважности γ_j могут быть получены значения тока $I_{dэ,j}$, а значит, и сигнала $U_{ДТэ,j}$, которые далее используются как эталон при проверках других его экземпляров.

Чтобы проверить коэффициент $k_{ДТ}$ датчика тока одной из силовых схем, электроприводу в сообщениях от персонального компьютера последовательно задаются скважности $\{\gamma_j\}$ от нуля до 90 % с шагом 10 %, для которых известны эталонные значения $\{U_{ДТэ,j}\}$. Между заданием очередного значения скважности и измерением сигнала датчика тока, коды которого вводятся в микроконтроллер электропривода [6], необходим интервал времени для завершения переходных процессов. Совпадение каждого j -го измеренного значения сигнала $\{U_{ДТ,j}\}$ с j -м заранее известным эталонным значением $\{U_{ДТэ,j}\}$ в пределах некоторого допуска означает, что коэффициент передачи датчика тока соответствует эталонной величине и, следовательно, сам он исправен.

Исправность датчика тока, определенная в ходе описанной его проверки, является также и косвенным признаком исправности транзисторов силовой схемы. Неисправность же транзисторов, приводя к некорректным величинам тока, детектируется как неисправность датчика.

Важно заметить, что описанная проверка датчиков тока, индивидуальная для каждого из них, должна проводиться и при тех же значениях напряжения U_{DC} и сопротивления R , для которых была получена эталонная зависимость $\{U_{дтэ.ж}\}$ от $\{I_{ж}\}$. Для контроля этого условия в ЭБ электропривода встроенный датчик измеряет напряжение U_{DC} . Его сигнал подается на вход микроконтроллера, имеющий АЦП.

Также при проверке датчиков тока в качестве параметра используется уровень их сигнала $U_{дт.мах}$, который превышает все эталонные значения $\{U_{дтэ.ж}\}$. Этот уровень предназначен для релейного токоограничения при защите силовой схемы от перегрузки, если ток достигает пропорциональную ему величину. Кроме того, при проверке силовых схем действует защита от превышения аварийного тока, задаваемого в качестве параметра, поэтому превышение аварийного тока приводит к закрытию транзисторов и запрету генерирования ШИМ, чтобы разомкнуть силовые цепи. Для защиты силовых цепей в режиме проверки электропривода также предусмотрен интервал, имеющий программируемую в широких пределах продолжительность и ограничивающий время протекания токов. По истечении этого интервала времени автоматически задается нулевая скважность ШИМ, которая остается такой до задания ее нового ненулевого значения в сообщении от персонального компьютера.

Помимо проверки силовой схемы, подключение электропривода к нагрузочным цепям согласно схеме на рис. 5 предназначено для его испытания на нагрев при продолжительном протекании тока в различных искусственно создаваемых климатических условиях. Такое испытание требуется на этапе разработки конструкции ЭБ электропривода, чтобы оценить эффективность теплоотвода, определив изменение температуры тепловыделяющих элементов при изменении тока нагрузки и превышение их температуры над температурой окружающего воздуха. Ввод сигналов от термодатчиков, встроенных в электронный блок электропривода, осуществляется по прерыванию при переполнении таймера. Для каждого из них предусмотрено программная регистрация аварийного события с запретом работы транзисторов силовых схем.

Проверка измерения напряжения питания U_{DC} датчиком, встроенным в ЭБ электропривода, осуществляется визуальным контролем соответствия его показаний величине напряжения, установленного на источнике, в том числе

при его регулировании в допустимых пределах. Проверка термодатчиков также осуществляется визуальным контролем их показаний при известной температуре окружающего воздуха, учитывая продолжительность работы электропривода с протеканием токов в силовых цепях.

Результаты исследования. Рассмотрим некоторые решения, примененные при разработке программного обеспечения для электропривода в режиме проверки. Согласно блок-схеме, показанной на рис. 2, от него требуется выполнение ввода, вывода и обработки сигналов, осуществление вычислений в зависимости от программных и системных флагов, а также отправка и получение сообщений. Программное обеспечение блока КПА здесь не рассматривается, ограничиваясь его алгоритмическим описанием, приведенным выше при описании проверки электропривода.

Для разработки программного обеспечения электропривода были использованы средства модельно-ориентированного программирования, а именно библиотека Waijung Blockset из состава Matlab, предназначенная для микроконтроллеров семейства STM32. При этом модельные блоки и конструкции из них, примеры которых показаны на рис. 6, использовались для компоновки программного обеспечения в виде графической исполняемой модели, а также для инициализации встроенных модулей микроконтроллера и доступа к ним в процессе выполнения кода, который автоматически генерируется из этой модели. Математическое программное обеспечение, зависящее от аппаратных средств электропривода и его назначения, было разработано на языке C и включено в исполняемую модель с помощью специальных модельных блоков вида Basic Custom Code.

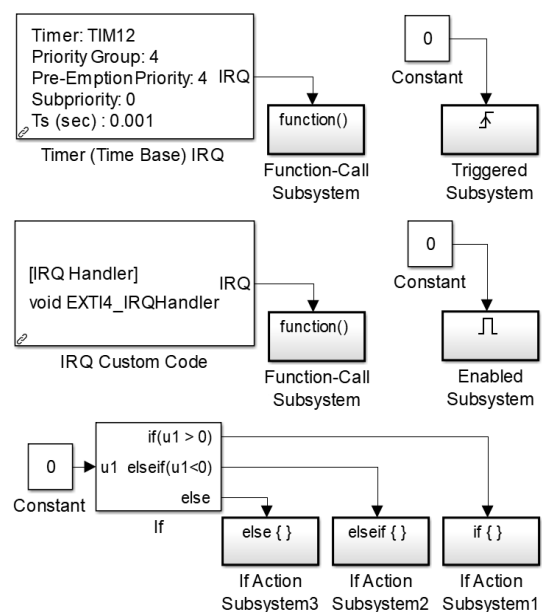


Рис. 6. Модельные конструкции для компоновки программного обеспечения в виде исполняемой модели

Подпрограммы и модельные схемы, разработанные для режима проверки электропривода и его основного режима, были помещены в общие для них элементы компоновки программного обеспечения из состава исполняемой модели. Чтобы проиллюстрировать сказанное, на рис. 7 показана модельная схема для ввода и обработки логических и аналоговых сигналов.

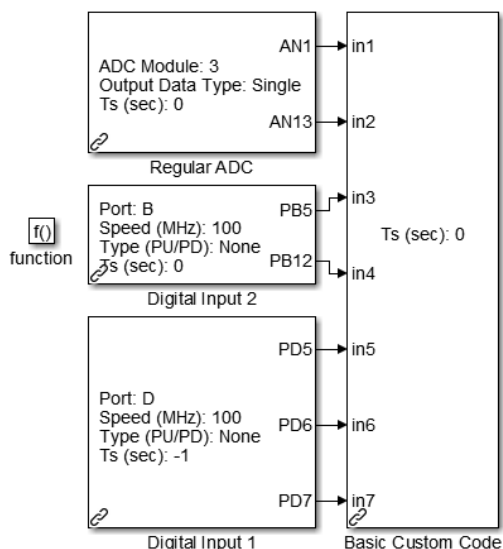


Рис. 7. Модельная схема для ввода и обработки логических и аналоговых сигналов

Подпрограмма, включаемая в состав этой модельной схемы с помощью блока вида Basic Custom Code, была разработана на языке С. В исполняемой модели эта схема помещена в обработчик прерывания таймера 12, поэтому подпрограмма, сгенерированная из этой схемы, выполняется при каждом его переполнении и осуществляет вычисления по обработке введенных сигналов согласно блок-схеме, показанной на рис. 2, для режима проверки либо для основного режима работы электропривода [6] в зависимости от программного флага, указывающего на режим. Аналогичным образом устроены и другие обработчики прерываний, показанные на блок-схеме на рис. 2, если выполнение вычислений должно осуществляться в зависимости от режима электропривода.

Модельный блок вида Advanced PWM, показанный на рис. 8, предназначен для применения таймера в качестве генератора сигналов с ШИМ, формирующего их противофазно на каждой из пар используемых выходов.

Подпрограмма, генерируемая при наличии этого блока в исполняемой модели, позволяет осуществить доступ к заданию скважности ШИМ по мере вычисления ее значения в подпрограммах, управляющих работой электропривода. Если генератор ШИМ выключен, то на всех его выходах установлен логический сиг-

нал, равный нулю. При этом транзисторы силовой схемы, показанной на рис. 5, управляемые этим генератором, закрыты, а цепь нагрузки разомкнута.

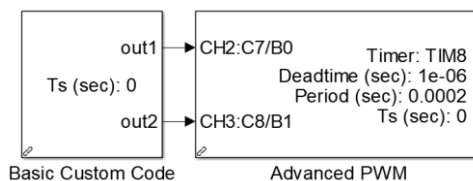


Рис. 8. Модельный блок генератора ШИМ

Чтобы автоматизировать описанный выше технический контроль ЭБ электропривода, разработано приложение для персонального компьютера, экранная форма которого показана на рис. 9. Оно отправляет электроприводу сообщения с запросами на выполнение проверок, принимает ответные сообщения с результатами и отображает полученную информацию. Выполнение предусмотренных проверок может осуществляться автоматически в предусмотренной последовательности либо вручную с их заданием и указанием параметров оператором персонального компьютера. Элементы для управления, задания параметров и отображения информации в экранной форме приложения сгруппированы в функциональные секции.

В экранной форме приложения предусмотрено задание параметров, от которых существенно зависит работа электропривода, в том числе, в режиме проверки. Среди этих параметров частота ШИМ и величина аварийного тока, достижение которой требует немедленно отключения электропривода. Также в экранной форме приложения отображаются напряжение питания электропривода и температура в контролируемых зонах тепловыделения его электронного блока, измеряемые встроенными датчиками. Эти данные персональный компьютер получает от электропривода по запросу. Кроме того, приложение отображает полученные от электропривода величины токов, протекающих в цепях питания электрических двигателей, а также индикацию неисправностей – перегрева и превышения аварийного тока. С помощью специальной команды, предусмотренной в программном обеспечении электропривода, приложение получает идентификационный номер микроконтроллера [9], используемый в качестве идентификатора электронного блока в базе его выпущенных экземпляров.

Чтобы показать работоспособность программного обеспечения электропривода, разработанного по блок-схеме на рис. 2 для режима проверки, осуществлялась имитация неисправностей его аппаратных средств. После выявления они были отображены приложением.

Подключение
Порт: COM25
Скорость (бит/с): 115200
Адрес: 0
Отключить

Тестовый режим
Тестовый режим: ☐
Частота ШИМ, КГц: 7.5
Установить
Время протекания тока: 5 Se
Установить

Автоматическое тестирование
Настройки
Пауза между тестами (мс): 1000
Допуск для проверки датчиков угла (дискр.): 30
Допуск для проверки датчиков тока (дискр.): 70
Задать
Начать тест
Очистить

Настройки устройства
Аварийный ток (А): 25
Задать
Сброс ошибок
"Водительский" дворник
Величина тока, у.е. (0 - 2047): 0
Скважность, % (0 - 95): 0
Задать
"Пассажирский" дворник
Величина тока, у.е. (0 - 2047): 0
Скважность, % (0 - 95): 0
Задать

Тестирование
Тип проверки: 1 - проверка водительского концевик.
Контрольное значение: 0
Проверить
Очистить

Смещения датчиков тока
Рассчитать
Общий датчик тока
Водит. датчик тока
Пасс. датчик тока
Записать в ПЗУ

Текущие значения
Uпит (В) = 24,5
Io (А) = 0,0
Tмс = 31
Iв (А) = 0,0
Tb = 25
In (А) = 0,0
Превышение аварийного тока
Перегрев микроконтроллера
Перегрев платы

Тип	Set	Get
7	180	200
7	225	249
7	270	299
7	315	348
7	360	396
7	405	445
7	445	493
7	0	1

Проверка датчика тока пассажирского двигателя

Тип	Set	Get
8	0	0
8	35	40
8	85	88
8	130	135
8	175	182
8	220	228
8	265	272
8	305	317
8	350	360
8	395	403
8	437	445
8	0	0

Проверка общего датчика тока

Тип	Set	Get
9	0	1
9	4	4
9	17	20
9	40	41
9	70	74
9	110	114
9	160	163
9	220	220
9	285	287
9	360	362
9	445	441
9	0	0

Проверка ПЗУ
Результат: 0 - всё исправно
Отчёт

Рис. 9. Экранная форма приложения для технического контроля электронного блока электропривода

Исходя из функциональности этого приложения, оператору с помощью его элементов управления требуется установить соединение электропривода с персональным компьютером по линии связи USB – UART, перевести его в режим проверки и задать параметры – аварийный уровень тока, частоту ШИМ и допуски для измерения сигналов на аналоговых входах. Далее, начав проверки по заранее предусмотренной программе, требуется контролировать их выполнение по цветовой и мнемонической индикации результатов. Убедившись в исправности электропривода, следует сохранить в ПЗУ его параметры, так как ранее были заданы аварийный уровень тока и частота ШИМ, а действительные смещения датчиков тока были измерены в ходе выполнения их проверки. Затем требуется вывести электропривод из режима

проверки и отключить его соединение с персональным компьютером. Экспериментально показано, что выполнение технического контроля электропривода, автоматизированного с помощью этого приложения и подкрепленного детальной инструкцией, оказалось доступным для регулировщиков электронной аппаратуры.

Выводы. В целях осуществления автоматизированного технического контроля аппаратных средств разработанного электропривода, вычисления и действия, которыми выполняются проверки, распределены между его электронным блоком, контрольно-проверочной аппаратурой и персональным компьютером.

Выполнение каждой из проверок образовано последовательностью действий, связанных с вводом, выводом и обработкой логических и аналоговых сигналов, а также с форми-

рованием напряжений и токов в силовых цепях. Координация выполнения проверок между оборудованием осуществляется сообщениями, передаваемыми по цифровым интерфейсам.

Для технического контроля исправности электронного блока электропривода в его программном обеспечении предусмотрен обособленный режим проверки, вычисления для которого распределены по интервалам повторения и приоритетам в зависимости от их значимости и необходимости своевременного выполнения.

Список литературы

1. **Полющенко И.С.** Модельно-ориентированное программирование как инструмент инженера-электромеханика // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 60–70. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.060-070.
2. **Липатов Г.И.** Автоматизация измерений, контроля и испытаний: учеб. пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – 138 с.
3. **Гелль П.** Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс. – М.: ДМК, 1999. – 144 с.
4. **Бутырин П.А.** Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
5. **Пейч Л.И.** LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с.
6. **Полющенко И.С.** Разработка системы управления электропривода панорамных стеклоочистителей и ее исследование // Известия МГТУ «МАМИ». – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 345–356. DOI: 10.17816/2074-0530-109188.
7. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
8. **Sommerville Ian.** Software engineering. – 9th ed. – Wokingham etc.: Addison–Wesley, 2011.
9. **Mastering STM32** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leanpub.com/mastering-stm32-2nd> (дата обращения 27.11.2024).
10. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.

11. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.

References

1. Polyushchenkov, I.S. Model'no-orientirovannoe programmirovaniye kak instrument inzhenera-elektromekhanika [Model-based programming as a technique of electromechanical engineer]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 60–70. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.060-070.
2. Lipatov, G.I. *Avtomatizatsiya izmereniy, kontrolya i ispytaniy* [Automation of measurements, control and testing]. Voronezh, 2011. 138 p.
3. Gell', P. *Kak prevratit' personal'nyy komp'yuter v izmeritel'nyy kompleks* [How to turn a personal computer into a measuring complex]. Moscow: DMK, 1999. 144 p.
4. Butyrin, P.A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: komp'yuternye izmereniya i virtual'nye pribory na osnove LabVIEW 7* [Automation of physical research and experiment: computer measurements and virtual tools based on LabVIEW 7]. Moscow: DMK Press, 2005. 264 p.
5. Peych, L.I. *LabVIEW dlya novichkov i spetsialistov* [LabVIEW for beginners and experts]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 384 p.
6. Polyushchenkov, I.S. *Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivoda panoramnykh stekloochistiteley i ee issledovanie* [Development and research of the control system of the electric drive of panoramic windscreen wipers]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. 345–356. DOI: 10.17816/2074-0530-109188.
7. Denisenko, V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 608 p.
8. Sommerville, Ian. *Software engineering*. Wokingham etc.: Addison – Wesley, 2011.
9. *Mastering STM32*. Available at: <https://leanpub.com/mastering-stm32-2nd> (Date of appeal 27.11.2024).
10. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.
11. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.