

УДК 621.3+62-5

Игорь Сергеевич Полющенко

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

Разработка контроллера цифрового датчика положения и его программного обеспечения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для работы систем управления электроприводов, замкнутых по целевой регулируемой координате – скорости движения или положению исполнительного механизма, необходима информационно-измерительная подсистема, образованная аппаратными и программными средствами, которые осуществляют детектирование, захват и обработку сигналов от датчиков. Функционально завершенными и самостоятельными элементами такой подсистемы являются контроллеры каждого из датчиков, в том числе цифровых датчиков положения, также используемых для измерения скорости движения. При разработке такого контроллера необходимо учитывать требования к системе управления, характеристики датчиков и их сигналов, форму представления результата измерения положения, способ сопряжения датчика с системой управления, особенности аппаратных и программных вычислительных ресурсов, в том числе время выполнения. В связи с этим разработка контроллера цифрового датчика положения и его программного обеспечения является актуальной задачей.

Методы и материалы. При разработке контроллера применены методы вычислительной математики и системного анализа, методы модельно-ориентированного программирования, методы разработки и отладки программного обеспечения, а также методы экспериментального исследования.

Результаты. Предложено алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения для преобразования углового положения вала электропривода, при вращении циклически изменяющегося в пределах одного оборота, в угол его поворота, имеющий широкие пределы изменения. Также, алгоритмически описано измерение скорости вращения вала электропривода путем расчета приращения его углового положения в течение интервала наблюдения. Разработано программное обеспечение контроллера, которое может послужить типовым элементом для микропроцессорных систем управления электроприводов.

Выводы. При разработке контроллера цифрового датчика положения, как и других элементов информационно-измерительной подсистемы замкнутых электроприводов, требуется учет характеристик различных технических средств и требований к системе управления. Успешной разработкой способствует применение современных микроконтроллеров, имеющих встроенные специализированные модули для детектирования, захвата и обработки сигналов, а также применение детализированных вычислительных алгоритмов и математических методов, наименее затратных по времени выполнения.

Ключевые слова: цифровой датчик положения, электропривод, система управления, модельно-ориентированное программирование, вычислительный алгоритм

Igor Sergeevich Polyushchenkov

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

Development of controller for digital position sensor and its software

Abstract

Background. For the operation of electric drives control systems, closed on the target coordinate of control – speed or position of actuator, an informational and measuring subsystem, formed by hardware and software to detect, capture and process signals from sensors, is required. The functionally completed and independent elements of such a subsystem are the controllers of each of the sensors, including digital position sensors, also used to measure the speed of motion. When developing such a controller, it is necessary to take into account the requirements for control system, performances of sensors and their signals, the form of position measurement result, the technique of the sensor interfacing with the control system, the features of hardware and software computing resources, including execution time. Thus, the development of a digital position sensor controller and its software is an actual problem.

Materials and methods. When developing the controller, methods of computational mathematics and system analysis, methods of model-based programming, methods of software developing and debugging, as well as methods of experimental research were applied.

Results. An algorithmic description of the digital position sensor controller is proposed for converting the angular position of the electric drive shaft, which changes cyclically within one revolution during rotation, into its rotation angle, which has wide limits of change. Also, the measuring of rotation speed of the electric drive shaft is algorithmically described by cal-

culating the increment of its angular position during the observation interval. The software for this controller has been developed, which can serve as a typical element for microprocessor control systems for electric drives.

Conclusions. When developing a controller for a digital position sensor, as well as other elements of the informational and measuring subsystem of closed-loop electric drives, it is necessary to take into account the performances of various technical means and requirements for the control system. Successful development is contributed by the use of modern microcontrollers with built-in specialized modules for detecting, capturing and processing signals, as well as the use of detailed computational algorithms and mathematical methods that are the least expensive in terms of execution time.

Key words: digital position sensor, electric drive, control system, model-based programming technique, computational algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.052-061

Введение. Замкнутые системы автоматического управления электроприводов обладают более высоким уровнем технического совершенства по сравнению с системами, разомкнутыми по целевой координате. Если использовать терминологию Теории электропривода [1, 2], то в зависимости от назначения и области применения они могут осуществлять ограничение координат, стабилизацию координат при воздействии возмущающих факторов, а также обработку динамически изменяющихся во времени задающих воздействий.

Функциональная схема замкнутой системы управления электропривода показана на рис. 1. В зависимости от положения переключателя П она может быть либо следящей, воспроизводя заданную координату положения $\varphi_3(t)$, либо осуществлять стабилизацию скорости вращения ω на уровне ее заданной величины ω_3 . Работа такой системы управления в режиме слежения и в режиме стабилизации скорости вращения описывается согласно [1, 2]. В схеме электропривода обозначены следующие ее элементы: электрический двигатель ЭД, датчик положения ДП, регулятор положения РП, регулятор скорости РС, контур регулирования тока КРТ, имеющий сигнал задания i_3 , исполнительный механизм ИМ, по координатам движения которого замкнута система управления.

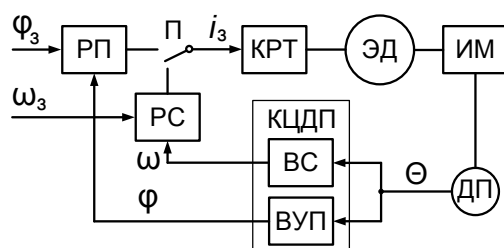


Рис. 1. Замкнутая система автоматического управления электропривода

Следует пояснить, что под угловым положением вала электропривода понимается угол Θ в пределах одного его оборота от нуля, выбранного в качестве условного начала отсчета, до 360 градусов, или до 2π радиан. Угловое положение может измеряться в импульсах от датчика положения ДП или в дискретах цифрового кода. В отличие от него, угол поворота φ ,

будучи выражен в тех же единицах измерения, при вращении вала в зависимости от специфики системы управления может изменяться в более широком диапазоне, который в пределе ограничен лишь диапазоном используемого числового формата, например int16 или int32.

Для замыкания обратных связей необходима информационно-измерительная подсистема, состоящая из датчиков, а также аппаратных и программных средств, которые осуществляют детектирование, захват и обработку их сигналов. В связи со сказанным на рис. 1 как элемент такой подсистемы показан контроллер цифрового датчика положения КЦДП, состоящий из вычислителя скорости ВС и вычислителя угла поворота ВУП. Под таким контроллером понимается функционально завершенная и самостоятельная совокупность аппаратных и программных средств, которая может послужить типовым элементом систем управления без значительной доработки в зависимости от специфики электропривода.

При разработке указанного выше контроллера необходимо учитывать физические и конструктивные характеристики датчиков, от которых зависят диапазон, точность и дискретность измерения координат, форма представления результата этого измерения, своевременность обновления информации, способ сопряжения с системой управления, так как от них, в свою очередь, зависят характеристики и функциональность системы управления электропривода в целом.

Целью данного исследования является разработка контроллера цифрового датчика положения для использования его в составе микропроцессорной системы управления электропривода. Согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, контроллер датчика положения должен осуществлять вычисление угла поворота электропривода и скорости его вращения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- составить алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения с учетом функциональности аппаратных модулей, обычно имеющихся в составе микроконтроллеров, которые используются в системах управле-

ния электроприводов, а также с учетом дискретности измерения углового положения и итерационности выполнения вычислений;

- в соответствии с алгоритмическим описанием контроллера составить его программное обеспечение в виде конфигурируемой подпрограммы с применением вычислений, наименее затратных по времени;

- экспериментально проверить предлагаемые технические решения в составе системы управления электропривода.

Методы исследования. В системах управления электроприводов в качестве датчиков положения широко распространены инкрементальные энкодеры [3]. Функциональная схема (рис. 2) и временные диаграммы (рис. 3) иллюстрируют устройство инкрементального энкодера, принцип его работы и сопряжение с микроконтроллером, например, из семейства STM32 [4]. Для генерирования счетных импульсов при его вращении на кодовом диске инкрементального энкодера имеются две последовательности дискретных элементов. Эти элементы могут иметь различную физическую основу. Например, на рис. 2 показан оптический кодový диск, для генерирования и детектирования импульсов от которого используются оптические источники BL1 и BL2, а также приемники UC1 и UC2.

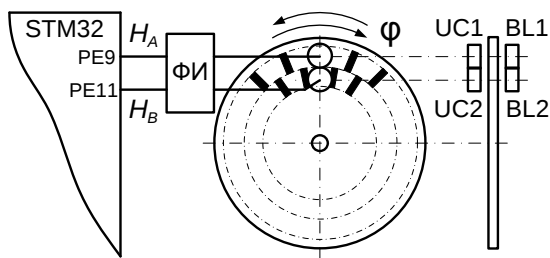


Рис. 2. Устройство инкрементального энкодера и его сопряжение с микроконтроллером

Формирователь импульсов ФИ предназначен для преобразования импульсов, генерируемых при вращении кодového диска, к виду квадратурных импульсных последовательностей H_A и H_B (рис. 3), которые имеют высокую крутизну фронтов и нормированную величину логических уровней. Согласно этим временным диаграммам, последовательность импульсов H_A либо опережает последовательность импульсов H_B , либо отстает от нее на четверть периода их следования в зависимости от направления вращения вала.

При измерении углового положения Θ микроконтроллер осуществляет подсчет фронтов импульсов H_A и H_B с учетом взаимной ориентации этих последовательностей по порядку следования в зависимости от направления вращения. В связи с этим, угловое положение вала Θ , показанное на рис. 3, имеет ступенчатую форму, а каждому ее уровню соответствует

приращение или уменьшение счета на единицу по отношению к соседним уровням.

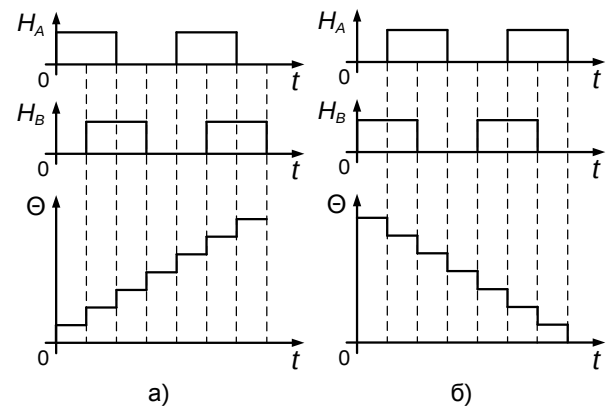


Рис. 3. Временные диаграммы инкрементального энкодера при прямом (а) и реверсном (б) направлениях вращения

Для инкрементального энкодера началом отсчета является положение вала, при котором включено электрическое питание системы управления. В качестве условного начала отсчета у инкрементальных энкодеров имеется индексная метка [3], которая может использоваться для обозначения границы очередного оборота. Если на одном обороте энкодера имеется $\Theta_{\max}$ фронтов импульсов H_A и H_B , то его дискретность Q определяется следующим образом:

$$Q = \frac{2\pi}{\Theta_{\max}}. \quad (1)$$

Ввод сигналов непосредственно в микроконтроллер электропривода по двум сигнальным линиям позволяет своевременно получать информацию об угловом положении вала исполнительного механизма без временных задержек по отношению к его вращению и протеканию вычислительного процесса в системе управления, что нехарактерно для цифровых последовательных интерфейсов I2C (Inter-Integrated Circuit) и SPI (Serial Peripheral Interface) [5]. Эти интерфейсы часто используются для сопряжения контроллеров различных датчиков, в том числе датчиков положения с системами управления электроприводов.

В контроллерах цифровых датчиков положения возможны различные соотношения программных и аппаратных средств. Если программные средства обладают значительной гибкостью и универсальностью для осуществления разнообразных вычислительных алгоритмов при обработке сигналов и в целом информации, то аппаратные средства благодаря своей специализации по детектированию и захвату сигналов могут способствовать значительному снижению вычислительных ресурсов микроконтроллера, используемых системой управления электропривода. Сравним некоторые из них. Так, использование системных прерываний при перепаде уровней логических сиг-

налов позволяет детектировать счетные импульсы H_A и H_B энкодера, но их подсчет в зависимости от направления вращения, как и определение самого направления вращения, в этом случае должен осуществляться программно, что вызывает значительную вычислительную нагрузку микроконтроллера. Эта нагрузка, завися от параметра $\Theta_{\max}$ энкодера, возрастает при росте скорости вращения. Использование же специализированных модулей, встроенных в микроконтроллеры, для их сопряжения с инкрементальными энкодерами позволяет аппаратно осуществить как детектирование квадратурных импульсов, так и их счет с учетом направления вращения. Такой режим их работы имеет название Quadrature Encoder Pulse (QEP)

При включении контроллера цифрового датчика положения в состав системы управления электропривода его вычисления должны иметь некоторый приоритет по отношению к другим вычислениям, осуществляемым в этой системе. Кроме того, интервалы повторения его вычислений должны иметь стабильную величину. Эти требования выполняются при формировании интервалов по прерыванию при переполнении одного из таймеров, встроенных в микроконтроллер. В соответствии с этим, на рис. 4 показана модельная схема обработчика прерывания при переполнении таймера, составленная с использованием модельных блоков из библиотеки Waijung Blockset [6] в составе Matlab, которая предназначена для модельно-ориентированной разработки программного обеспечения для микроконтроллеров семейства STM32.

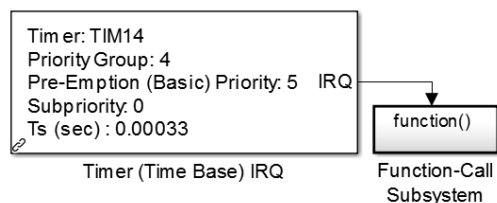


Рис. 4. Модельная схема обработчика прерывания при переполнении таймера

Согласно этой схеме, при возникновении указанного прерывания вызывается к выполнению модельная подсистема вида Function-Call Subsystem, внутри которой могут быть расположены схемы из модельных блоков или пользовательские модельные блоки, разработанные на основе подпрограмм на языке C, как это сделано в [7].

Рассмотрим преобразование углового положения вала электропривода в угол его поворота. В библиотеке Waijung Blockset из состава Matlab имеется модельный блок обработчика инкрементального энкодера вида Encoder Read. Модельная схема, содержащая этот блок, показана на рис. 5. Такая модельная схема должна быть помещена в подсистему вида Function-Call Subsystem обработчика прерыва-

ния при переполнении таймера (рис. 4). Модельный блок Encoder Read использует один из многофункциональных таймеров, встроенных в микроконтроллер STM32, в режиме QEP для счета импульсов квадратурных последовательностей H_A и H_B инкрементального энкодера (рис. 3). При этом модельный блок Encoder Read вычисляет угловое положение вала электропривода, на котором установлен энкодер, в пределах от нуля до значения счета $\Theta_{\max}$, соответствующего одному его обороту, которое задается в пользовательском меню данного блока.

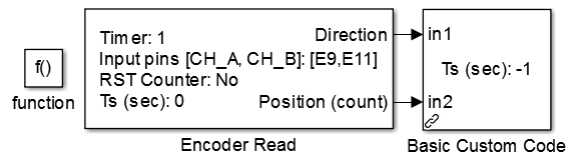


Рис. 5. Модельная схема обработчика инкрементального энкодера

Ранее при разработке микропроцессорной системы управления электропривода – сервоконтроллера на базе двигателей различных типов [7] – доступ к параметру $\Theta_{\max}$ был обеспечен непосредственно в программном обеспечении этой системы для ее конфигурирования в зависимости от типа инкрементального энкодера. Такой доступ осуществляется при восстановлении параметров системы из памяти постоянного запоминающего устройства и при их задании по цифровым линиям связи системой управления верхнего уровня.

Описанная особенность модельного блока Encoder Read и счетчика квадратурных импульсов в режиме QEP ограничивает их применение для измерения угла поворота вала электропривода φ в более широких пределах, чем один его оборот $\Theta_{\max}$.

В связи со сказанным выше при разработке системы управления электропривода [7] был осуществлен способ преобразования углового положения вала Θ в угол его поворота φ , который иллюстрируется временными диаграммами, показанными на рис. 6. Для простоты скорость вращения ω имеет три уровня, которые устанавливаются мгновенно, что, однако, позволяет продемонстрировать характерные закономерности. Также для простоты ступенчатость зависимостей $\Theta(t)$ и $\varphi(t)$, обусловленная дискретным счетом импульсов, на рис. 6 не показана. Два уровня скорости равны по величине, но противоположны по направлению, а третий уровень скорости равен нулю.

Так как модельный блок Encoder Read, используя счетчик в режиме QEP, вычисляет угловое положение Θ в пределах одного оборота вала, то при постоянной скорости его вращения $\omega > 0$ зависимость $\Theta(t)$, показанная на рис. 6, циклически линейно возрастает от нуля

до величины $\Theta_{\max}$, соответствующей полному обороту. При $\omega < 0$ зависимость $\Theta(t)$ циклически линейно убывает от $\Theta_{\max}$ до нуля. При $\omega = 0$ угловое положение вала остается постоянной величиной. Продолжительность интервала T_ω равна времени совершения валом одного оборота. Для расчета приращения $\Delta\Theta$ углового положения Θ , измеренного за некоторый интервал времени выборки $T_s \rightarrow 0$, используется следующее выражение:

$$\Delta\Theta = \Theta(t + T_s) - \Theta(t). \quad (2)$$

Величина $\Delta\Theta$ пропорциональна скорости вращения вала ω за исключением границ каждого из оборотов, то есть при переходах Θ от нуля к $\Theta_{\max}$ и от $\Theta_{\max}$ к нулю. На этих границах величина $\Delta\Theta$ принимает значения, которые в пределах при $T_s \rightarrow 0$ стремятся к $\pm\Theta_{\max}$, а знак $\Delta\Theta$ при этом противоположен знаку скорости ω . Очевидно, что те же закономерности имеют место и при произвольно изменяющейся скорости вращения вала ω в пределах каждого из интервалов T_ω .

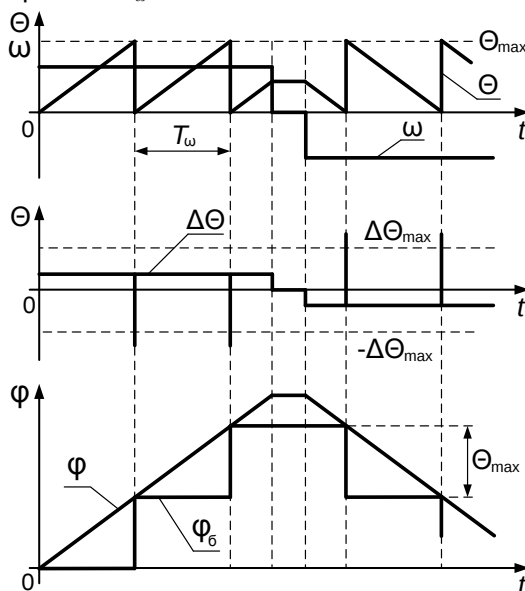


Рис. 6. Преобразование углового положения вала электропривода в угол его поворота

Таким образом, чтобы детектировать совершение валом электропривода очередного оборота, требуется при каждой итерации выборки его углового положения Θ , которые происходят через равные интервалы времени T_s , по (2) вычислить приращение $\Delta\Theta$ и сравнить его с некоторой пороговой величиной $\pm\Delta\Theta_{\max}$, причем такой, что $|\Delta\Theta_{\max}| < \Theta_{\max}$. Далее, исходя из сравнения $\Delta\Theta$ и $\pm\Delta\Theta_{\max}$, детектируется завершение очередного оборота вала, направление этого оборота и начало нового его оборота, что иллюстрируется на рис. 6, согласно которому угол поворота φ вала вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \varphi_0 + \Theta = m\Theta_{\max} + \Theta, \quad (3)$$

где φ_0 – базовый угол поворота; m – число полных оборотов вала от начала вращения по отношению к началу отсчета (причем m может принимать целые числовые значения).

Очевидно, что величина $\Delta\Theta_{\max}$ должна быть выбрана в зависимости от предполагаемой или расчетной максимальной скорости вращения таким образом, чтобы при ней величина $\Delta\Theta$ выходила за пределы $\pm\Delta\Theta_{\max}$ только на границах оборотов. Опыт разработки электропривода [7] с учетом оценки дискретности энкодеров привел к выводу, что целесообразным является соотношение $|\Delta\Theta_{\max}| \approx 0,6\Theta_{\max}$.

Рассмотренный выше способ преобразования углового положения вала в угол его поворота не требует использования индексной метки энкодера, что упрощает осуществление вычислений и их согласование с захватом и выборкой сигналов в зависимости от времени, а также способствует снижению времени их выполнения.

Далее рассмотрим измерение скорости вращения электропривода с использованием инкрементального энкодера. Для этого существует два принципиально различающихся способа. Согласно одному из них, требуется измерять продолжительность интервалов между импульсами энкодера, которая обратно пропорциональна скорости вращения. В современных микроконтроллерах, в том числе STM32, имеются встроенные модули, которые позволяют осуществить такой захват импульсов с аппаратным фиксированием временных интервалов между ними, однако они не ориентированы на обработку квадратурных импульсных сигналов инкрементальных энкодеров [4, 6]. Программно-аппаратное осуществление этого способа измерения скорости с совместным использованием различных встроенных модулей микроконтроллера достаточно сложное и связано с его значительной вычислительной нагрузкой, возрастающей при увеличении скорости вращения вала и параметра $\Theta_{\max}$ энкодера.

Согласно другому способу, для измерения скорости требуется вычислять приращение числа счетных импульсов энкодера или цифрового кода углового положения за некоторый интервал времени наблюдения. Этот способ может быть осуществлен при использовании счетчика QEP и таймера, формирующего интервалы времени по прерыванию при переполнении, то есть тех же аппаратных модулей, что и при вычислении угла поворота вала в зависимости от его углового положения. При этом возникает задача выбора продолжительности интервала наблюдения. Очевидно, что при некоторой дискретности энкодера Q и некоторой скорости вращения вала ω за интервал наблюдения меньшей продолжительности микроконтроллер получает меньшее количество импульсов, чем за интервал большей продолжительности. Следовательно, с уве-

личением продолжительности этого интервала увеличивается и разрешающая способность измерения скорости. Однако при этом снижается частота обновления информации о скорости, что эквивалентно действию фильтра низких частот, включенного в замкнутый контур электропривода, что может послужить возмущающим фактором для системы управления, вызывая рост колебательных процессов при движении. Степень влияния такой инерционности может быть оценена в зависимости от соотношения продолжительности интервала наблюдения и динамики настройки регулятора скорости РС замкнутого контура. Это влияние может оказаться невелико.

Описанное обстоятельство является основанием для изменения продолжительности интервала наблюдения в зависимости от величины скорости вращения.

Рассмотрим подробнее вычисление скорости вращения электропривода в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 7. Эта схема иллюстрирует вычисление скорости вращения электропривода $\omega_{0,k}$ в зависимости от приращения углового положения $S_{0,k}$, вычисленного счетчиком импульсов СИ H_A и H_B энкодера, за интервал наблюдения $T_{0,k}$ переменной продолжительности. Далее путем усреднения N значений скорости, вычисленных на N предыдущих интервалах наблюдения, по методу скользящего среднего вычисляется скорость вращения ω_k . Элементы схемы, среди которых счетчик импульсов, элемент для расчета скорости (ЭРС), вычислитель интервалов наблюдения (ВИН), элемент задания (ЭЗ) и вычислитель скользящего среднего отсчетов скорости, обозначенный Σ , реализованы программно и являются совокупностями команд, операторов и синтаксических конструкций языка С.

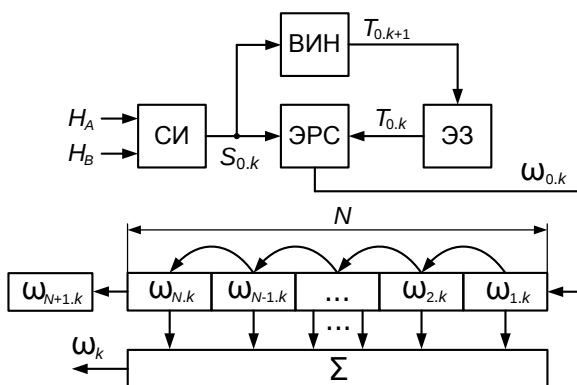


Рис. 7. Функциональная схема вычисления скорости вращения электропривода

Переменные, обозначенные на рис. 7, имеют следующие индексы: k — порядковый номер измерения скорости; n — порядковый номер измерения скорости в выборке из N значений, используемых при вычислении скользящего среднего, причем $1 \leq n \leq N$. Согласно рис. 7,

переменные, используемые при вычислении значения скорости вращения $\omega_{0,k}$, которое не входит в указанный массив из N элементов, имеют индекс $n = 0$.

Интервал наблюдения $T_{0,k}$ для k -го измерения скорости является кратным по отношению к базовому интервалу T_6 :

$$T_{0,k} = T_6 h_{0,k}, \quad (4)$$

где $h_{0,k}$ — число интервалов T_6 на интервале наблюдения $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ и $h_{\min} \geq 1$.

Базовый интервал T_6 должен формироваться со стабильной продолжительностью по приоритетному прерыванию при переполнении таймера. Его продолжительность выбирается в зависимости от временных характеристик системы управления, например, от счета системного времени или итераций выполнения вычислений регулятором скорости.

Продолжительность интервала наблюдения для очередного $(k+1)$ -го измерения скорости вычисляется элементом ВИН, показанным на рис. 7, в зависимости от приращения углового положения $S_{0,k}$, полученного при предыдущем k -м измерении скорости на интервале $T_{0,k}$:

$$h_{0,k+1} = h_{0,k} + 1 \text{ при } S_{0,k} < S_{\min}; \quad (5)$$

$$h_{0,k+1} = h_{0,k} - 1 \text{ при } S_{0,k} > S_{\max}; \quad (6)$$

$$T_{0,k+1} = T_6 h_{0,k+1}. \quad (7)$$

Для выполнения $(k+1)$ -й итерации измерения скорости элемент задания ЭЗ устанавливает у ЭРС очередное значение $T_{0,k+1}$, вычисленное в результате выполнения k -й итерации измерения. Временные диаграммы на рис. 8 иллюстрируют вычисление продолжительности интервала наблюдения по формулам (5)–(7).

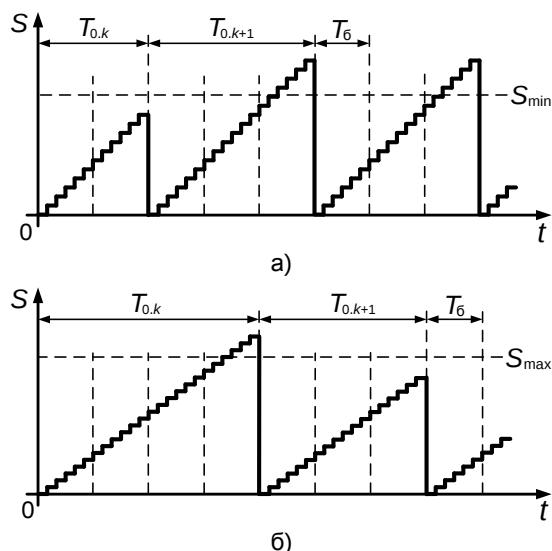


Рис. 8. Вычисление продолжительности интервала наблюдения: а — по (5) и (7); б — по (6) и (7)

Скорость вращения вала при k -м измерении на интервале наблюдения $T_{0,k}$ в размерности [рад/с] рассчитывается элементом ЭРС как отношение приращения углового положения

$S_{0,k}$ вала к продолжительности интервала наблюдения:

$$\omega_{0,k} = \frac{2\pi S_{0,k}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}. \quad (8)$$

Согласно (8), граничным значениям $S_{\min}$ и $S_{\max}$ из (5) и (6) соответствуют следующие значения скоростей:

$$\omega_{\min} = \frac{2\pi S_{\min}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}; \quad (9)$$

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi S_{\max}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}. \quad (10)$$

После расчета по (8) очередного значения скорости $\omega_{0,k}$ согласно алгоритму скользящего среднего и схеме на рис. 7 оно помещается в массив из N элементов путем их сдвига в сторону увеличения индекса n :

$$\omega_{n+1,k} = \omega_{n,k}. \quad (11)$$

Таким образом, очередное значение скорости $\omega_{0,k}$, вычисленное на интервале наблюдения $T_{0,k}$, становится элементом $\omega_{1,k}$ массива, а элемент $\omega_{N+1,k}$ удаляется из него, как показано на рис. 7. Несмотря на то, что элементы массива, начиная с $n = 2$, получены при предшествующих измерениях, они имеют одинаковый индекс k , так как они все используются для расчета средней скорости вращения ω_k при k -м измерении.

Расчет средней скорости по ее значениям, полученным в результате N последовательных измерений, осуществляется элементом Σ , показанным на рис. 7, согласно следующему выражению:

$$\omega_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega_{n,k}. \quad (12)$$

При очередном k -м измерении скорости среди элементов массива (рис. 7), по сравнению с предыдущим измерением, заменяются только два элемента, имеющие индексы $n = 1$ и $n = N+1$. Поэтому для вычисления скользящего среднего для N значений скорости целесообразно использовать более простое выражение:

$$\omega_k = \omega_{k-1} - \omega_{N+1,k} + \omega_{1,k}, \quad (13)$$

где ω_{k-1} – среднее значение скорости при $(k-1)$ -м ее измерении.

Расчет по (13), по сравнению с (12), позволяет несколько снизить вычислительные затраты микроконтроллера. Важно отметить, что в этом случае $\omega_{0,k}$ при расчете по (8) необходимо разделить на N . При этом величина N может быть учтена в множителе $T_{0,k}$, как в [8].

Дискретность $\delta_{n,k}$ и разрешающая способность $\mu_{n,k}$ измерения скорости для n -го ее значения из массива N элементов составляет:

$$\delta_{n,k} = \frac{1}{\mu_{n,k}} = \frac{2\pi}{\Theta_{\max} T_{n,k}} = \frac{Q}{T_6 h_{n,k}}, \quad (14)$$

где $T_{n,k}$ – интервал наблюдения при измерении значения скорости $\omega_{n,k}$; $h_{n,k}$ – кратность интервала T_6 по отношению к интервалу наблюдения $T_{n,k}$; Q – дискретность измерения положения энкодером, рассчитанная по (1).

Дискретность δ_k и разрешающая способность μ_k измерения скорости ω_k , вычисленной как скользящее среднее N ее значений, последовательных во времени, определяется как

$$\delta_k = \frac{1}{\mu_k} = \frac{\delta_{n,k}}{N}. \quad (15)$$

Для оценки точности измерения скорости может послужить отношение ее величины к дискретности измерения при некоторых значениях индексов n и k :

$$W_{n,k} = \frac{\omega_{n,k}}{\delta_{n,k}} = \frac{\Theta_{\max} T_{n,k} \omega_{n,k}}{2\pi} = S_{n,k}, \quad (16)$$

где $S_{n,k}$ – приращение углового положения на интервале наблюдения $T_{n,k}$ при скорости вращения $\omega_{n,k}$.

Из выражения (16) следует, что при некоторой фиксированной величине $W_{n,k} = S_{n,k}$ скорость вращения $\omega_{n,k}$, которая измерена с дискретностью $\delta_{n,k}$ и разрешающей способностью $\mu_{n,k}$, обратно пропорциональна продолжительности интервала наблюдения $T_{n,k}$. Поэтому при увеличении скорости вращения продолжительность интервала наблюдения может быть сокращена при сохранении дискретности и разрешающей способности измерения. При снижении же скорости вращения продолжительность интервала наблюдения должна быть увеличена для сохранения величин $\delta_{n,k}$ и $\mu_{n,k}$. Однако при этом следует учитывать, что $h_{n,k}$ принимает дискретные значения от $h_{\min}$ до $h_{\max}$, базовый интервал T_6 имеет фиксированную продолжительность, а величина $h_{\max}$ ограничена внесением задержек в контур регулирования скорости. Поэтому диапазон поддержания $W_{n,k}$ ограничен и имеет интервалы, в которых величина $W_{n,k}$ изменяется в некоторых пределах при изменении скорости вращения.

На основании сказанного требуется определить граничные значения приращений углового положения $S_{\min}$ и $S_{\max}$, которые показаны на рис. 8 и используются при вычислениях продолжительностей интервалов наблюдения по (5) и (6). Из (16) следует приведенное ниже соотношение, согласно которому граничные значения $S_{\min}$ и $S_{\max}$ не зависят от скорости вращения:

$$S_{\min} < W_{n,k} < S_{\max}. \quad (17)$$

Из (9), (10) и (17) следует, что граничные значения $S_{\min}$ и $S_{\max}$ следует выбирать в зависимости от значений параметров, входящих в эти выражения, а также в зависимости от желаемой точности измерения с учетом своевременности обновления информации для систе-

мы управления электропривода о его скорости движения.

Таким образом, $W_{n,k}$, являясь оценкой точности измерения скорости, обозначает, с какой дискретностью $\delta_{n,k}$ и разрешающей способностью $\mu_{n,k}$ измерена скорость $\omega_{n,k}$. Если на некотором интервале наблюдения $T_{n,k}$ величина $W_{n,k} = S_{n,k}$ возросла более $S_{\max}$, то продолжительность $T_{n,k}$ завышена и при следующем измерении скорости величину $T_{0,k+1}$ целесообразно снизить, чтобы, сохранив точность измерения, сократить задержку по времени в системе управления. Если же $W_{n,k} = S_{n,k}$ меньше $S_{\min}$, то точность измерения скорости при данном значении k снижена. Поэтому целесообразно увеличить продолжительность следующего интервала наблюдения $T_{0,k+1}$, чтобы вернуть величину $W_{n,k}$ в диапазон (17).

Результаты исследования. На основе приведенного выше алгоритмического описания контроллера разработано оригинальное программное обеспечение [8] на языке C, а именно подпрограмма, которая может послужить элементом программного обеспечения микропроцессорных систем управления электроприводов, разработанных как с использованием модельно-ориентированных средств, так и в виде структурированного текста. На основе этой подпрограммы разработан пользовательский модельный блок вида Basic Custom Code [6], достаточно универсальный для систем управления следящих электроприводов и систем стабилизации скорости. Настройка этого блока в зависимости от особенностей системы управления осуществляется путем задания параметров подпрограммы, среди которых число импульсов (или дискрет кода), приходящихся на один оборот энкодера $\Theta_{\max}$, интервал времени T_s между выборками углового положения, продолжительность базового интервала наблюдения T_6 , кратная величине интервала выборки T_s , и диапазон его изменения от $h_{\min}$ до $h_{\max}$.

Использование этого модельного блока в программном обеспечении разработанного электропривода [7] позволило обеспечить его функциональность, а именно движение в режиме слежения и в режиме стабилизации скорости вращения исполнительного механизма. Период выборки углового положения T_s и базовый интервал наблюдения T_6 имеют продолжительность 330 мкс, что равно интервалу времени между итерациями выполнения подпрограмм регуляторов положения и скорости.

В качестве экспериментального результата применения преобразования углового положения в угол поворота электропривода следует указать полное исключение пропуска импульсов энкодера, в том числе на границах его оборота при переходе углового положения Θ от $\Theta_{\max}$ к нулю или от нуля к $\Theta_{\max}$. Это актуально при динамических процессах движения,

имеющих небольшой размах, в окрестности указанного углового положения, которое происходит при удержании заданного положения следящим электроприводом [9, 10]. Дискретность измерения положения Q , рассчитанная по (1), сохраняется во всем диапазоне изменения угла поворота φ в пределах числового формата int32 при вращении электропривода.

Чтобы оценить влияние дискретности измерения скорости вращения при использовании описанных технических решений на стабилизацию скорости электропривода, рассмотрим экспериментальные графики скорости $\omega(t)$ при ее нулевой заданной величине $\omega_3 = 0$, показанные на рис. 9. Электропривод с бесколлекторным двигателем постоянного тока, согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, замкнут по скорости его вращения, причем $T_6 = 330$ мкс, $N = 10$, а встроенный в двигатель энкодер имеет $\Theta_{\max} = 2048$. Графики получены с помощью приложения для персонального компьютера, которое предназначено для управления электроприводом [7] и отображения координат его движения.

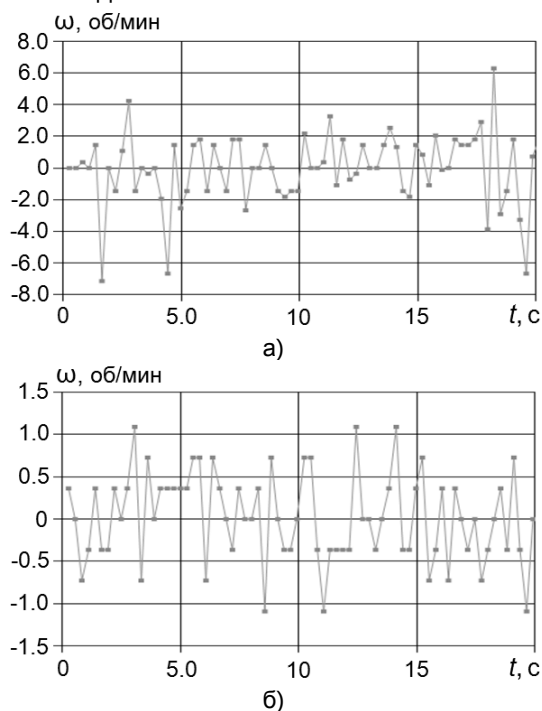


Рис. 9. График скорости замкнутой системы электропривода при ее заданной величине $\omega_3 = 0$: а – при $h_{\max} = 1$; б – при $h_{\max} = 4$

График, показанный на рис. 9,а, получен при $h_{\max} = 1$, а график на рис. 9,б получен при $h_{\max} = 4$. Согласно графикам, динамические процессы работы регулятора скорости по ее стабилизации [9, 10] на заданном уровне $\omega_3 = 0$ приводят к некоторым кратковременным отклонениям от него. При $\omega \rightarrow 0$ продолжительность интервала наблюдения $T_{0,k}$, согласно (5)–(7), автоматически принимает максимальную величину $h_{0,k} = h_{\max}$. Поэтому при $h_{\max} = 1$ коррек-

ция интервала наблюдения в зависимости от скорости вращения электропривода не осуществляется, а интервал наблюдения имеет минимальную продолжительность $T_{n,k} = T_6$ при всех итерациях ее измерения. Сопоставление графиков приводит к выводу, что увеличение дискретности δ_k , рассчитанной по (14) и (15) в зависимости от $h_{n,k}$, является возмущающим фактором для замкнутой системы стабилизации скорости электропривода. Пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора скорости в обоих случаях одинаковые. Увеличение δ_k ожидаемо приводит к увеличению размаха отклонений скорости $\omega(t)$ от ее заданной нулевой величины, как показано на рис. 9,а, по сравнению с графиком на рис. 9,б. Многократное повторение таких экспериментов показало стабильное воспроизведение описанной выше закономерности в зависимости от величины $h_{\max}$.

Среднее значение скорости движения электропривода $\omega(t)$ в обоих случаях примерно равно заданному нулевому значению, поэтому при продолжительном наблюдении валы исполнительного механизма и электрического двигателя визуально неподвижны. Величина заданной скорости выбрана равной нулю, то есть $\omega_s = 0$, чтобы при получении графиков исключить влияние неравномерности нагрузки при вращении исполнительного механизма, которая вызывает дополнительные динамические процессы работы регулятора скорости.

При замыкании системы стабилизации по скорости исполнительного механизма, согласно схеме на рис. 1, был применен энкодер ЛПР-137А, имеющий $\Theta_{\max} = 10000$.

Описанный и осуществленный способ преобразования углового положения вала в угол его поворота применим и при использовании других типов цифровых датчиков, имеющих в качестве результата измерения углового положения его цифровой код. Сказанное относится к сельсинам, синусно-косинусным вращающимся трансформаторам и магнитным энкодерам [3], которые имеют встроенные вычислительные элементы для получения цифрового кода измеренного ими углового положения и встроенные средства для сопряжения с системами управления по цифровым линиям связи и сетевым интерфейсам I2C и SPI. Однако в этом случае могут возникнуть сложности с обеспечением своевременного обновления информации об угловом положении электропривода в связи с ограниченной интенсивностью и сравнительно низким приоритетом получения данных от таких датчиков. Это вносит задержки, в том числе, случайной продолжительности в контур регулирования положения, снижая качество управления, и ставит под вопрос возможность корректного измерения скорости вращения электропривода для ее стабилизации.

В качестве иллюстрации сказанного на рис. 10 показана модельная схема для сопряжения системы управления электропривода с цифровым датчиком положения, подключенным к ней по сетевой шине I2C. Такая схема в составе программного обеспечения контроллера цифрового датчика положения должна быть помещена в подсистему Function-Call Subsystem, показанную на рис. 4, которая вызывается по прерыванию при переполнении таймера.

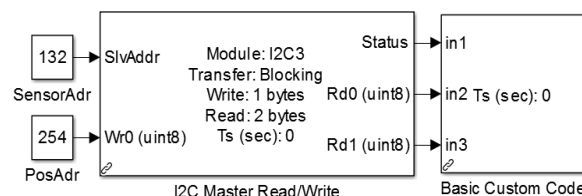


Рис. 10. Модельная схема обработчика датчика положения при сопряжении по шине I2C

С помощью переменной SensorAdr указан адрес датчика на шине I2C, а с помощью переменной PosAdr указан адрес старшего из двух байтов переменной целочисленного типа uint16, расположенной в памяти цифрового датчика. В ней записан код из 14 бит измеренного углового положения. Принятая от датчика в форме двух байтов Rd0 и Rd1, эта переменная может быть использована для вычисления угла поворота вала с помощью модельного блока вида Basic Custom Code на основе программного обеспечения контроллера [8].

Выводы. Предложенное алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения и разработанное на его основе программное обеспечение позволяют осуществлять преобразование углового положения вала электропривода, циклически изменяющегося при вращении в зависимости от его направления в пределах оборота от нуля до 360 градусов или 2π радиан, в угол поворота, который имеет более широкие пределы изменения.

Выполненное в контроллере измерение скорости вращения электропривода путем вычисления приращения его углового положения в течение интервала наблюдения, продолжительность которого для каждой итерации измерения автоматически вычисляется в зависимости от величины скорости вращения на предыдущем интервале, позволяет сохранить разрешающую способность в более широком диапазоне скорости вращения.

Использование встроенных в микроконтроллер специализированных модулей, предназначенных для детектирования и захвата сигналов, а также детально проработанных вычислительных алгоритмов на основе математических методов способствует успешной разработке программного обеспечения, в том

числе, снижению затрат по времени его выполнения и включению его в состав системы управления.

Список литературы

1. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
3. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.
4. **STM32 Arm Cortex Microcontrollers** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.st.com (дата обращения 16.12.2022).
5. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
6. **Waijung Blockset** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://waijung.aimagin.com> (дата обращения 16.12.2022).
7. **Polyuschenkov I.** Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.
8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668748. Программа для преобразования углового положения в угол поворота и вычисления скорости вращения / И.С. Полющенко; зарег. в реестре программ для ЭВМ 11.10.2022.
9. **Егупов Н.Д.** Методы классической и современной теории управления: учебник в 3 т. Т. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.
10. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 396 с.

References

1. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.
2. Terkhov, V.M., Osipov, O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 304 p.
3. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.
4. STM32 Arm Cortex Microcontrollers. Available at: www.st.com (Date of appeal 16.12.2022).
5. Denisenko, V.V. *Kompyuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 608 p.
6. Waijung Blockset. Available at: <http://waijung.aimagin.com> (Date of appeal 16.12.2022).
7. Polyuschenkov, I. Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.
8. Polyuschenkov, I.S. *Programma dlya preobrazovaniya uglovogo polozheniya v ugol povorota i skorosti vrashcheniya* [Software program to convert angular position into rotation angle and to calculate rotation speed]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022668748 [Program for converting angular position into rotation angle and calculating rotation speed. Certificate of Software Registration no. 2022668748], 2022.
9. Egupov, N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii upravleniya*. V 3 t., t. 2 [Classic and Modern Methods of Control Theory. In 3 vol., vol. 2]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im N.E. Bauman, 2000. 736 p.
10. Rotach, V.Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. 396 p.