

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-109188>

Оригинальное исследование



Разработка системы управления электропривода панорамных стеклоочистителей и ее исследование

И.С. Полющенко

НПО «Рубикон – Инновация», Смоленск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Задача согласованного управления стеклоочистителями автомобильной техники при отсутствии между ними механического соединения связана со стремлением сделать более компактным оборудование. Современные микропроцессорные средства управления позволяют решить эту задачу с использованием электропривода, а также задачи логического управления и взаимодействия с управляющим оборудованием верхнего уровня.

Цель работы – комплексное решение задачи согласованного управления движением панорамных стеклоочистителей, не имеющих механической связи, а также вспомогательных задач управления с помощью средств электропривода при учете различных факторов.

Методы и материалы. Предложен алгоритм согласования движения стеклоочистителей в неследящей системе автоматической стабилизации скоростей вращения электрических двигателей с позиционированием в контрольных точках траекторий. Среди факторов, потребовавших учета при разработке, конструкция механизма стеклоочистителей, характер механической нагрузки на них, типы датчиков и их расположение, желаемая динамика и точность регулирования координат, протекание электромагнитных процессов в силовом преобразователе, ограничение вычислительных ресурсов управляющего микроконтроллера.

Результаты. Электропривод обеспечивает визуально гармоничное и согласованное движение стеклоочистителей, устойчивое к изменению нагрузки, которое вызвано состоянием стекла, а также моментами силы тяжести, действующей на стеклоочистители. Логическое управление от дискретных переключателей обеспечивает выбор режимов движения, а соединение по цифровым линиям обеспечивает обмен данными с управляющим оборудованием. Применены технические решения, обеспечивающие простую настройку электропривода.

Заключение. Приведенное решение задач согласования движения стеклоочистителей, автоматического регулирования координат с учетом динамики управления движением, логического управления, а также сопряжения с управляющим оборудованием верхнего уровня имеет практическую ценность для разработки различных систем управления.

Ключевые слова: электропривод; система управления; автоматическое регулирование; микропроцессорное управление; согласованное управление движением.

Для цитирования:

Полющенко И.С. Разработка системы управления электропривода панорамных стеклоочистителей и ее исследование // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Том 16, № 4. С. 345–356. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-109188>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-109188>

Original study article

Development and research of the control system of the electric drive of panoramic windscreen wipers

Igor S. Polyuschenkov

R&D Company "Rubicon - Innovation", Smolensk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The issue of coordinated control of vehicles' windscreen wipers, not linked to each other with mechanical joints, is related to aiming to make the equipment more compact. Modern microprocessor controlling are helpful to solve this issue with use of electric drive as well as problems of logical control and interaction with high-level controlling equipment.

AIMS: The comprehensive solution of the issue of coordinated control of movement of panoramic windscreen wipers without mechanical links as well as the solution of secondary problems of control with use of tools of electric drive considering various factors.

METHODS: The algorithm of windscreen wipers movement coordination in nontracking system of automatic stabilization of electric motors rotation velocities with positioning in trajectories' control points. Among the factors, necessary to consider in development, there are design of mechanism of windscreen wipers, the characteristic of mechanical load on them, type and location of sensors, required dynamics and accuracy of coordinates adjustment, behavior of electromagnetic processes in power converter and restriction of computing capabilities of a microcontroller.

RESULTS: The electric drive ensures visually balanced coordinated movement of windscreen wipers, which is resistant to load change caused by the condition of the windscreen as well as torques of gravity force acting on the windscreen wipers. The logical control based on discrete switches ensures selection of the movement mode, whereas the connection through digital circuits ensures data exchange with the controlling equipment. Technical solutions ensuring simple tuning of the electric drive are implemented.

CONCLUSIONS: The given solution of issues of coordination of windscreen wipers movement, automatic adjustment of coordinates considering dynamics of movement control, logical control and coupling with the high-level controlling equipment has practical value for development of various control systems.

Keywords: *electric drive; control system; automatic adjustment; microprocessor control; coordinated control of movement.*

Cite as:

Polyuschenkov IS. Development and research of the control system of the electric drive of panoramic windscreen wipers. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2022;16(4):345–356. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-109188>

Received: 02.07.2022

Accepted: 13.09.2022

Published: 15.12.2022

ВВЕДЕНИЕ

Управление движением взаимосвязанных механизмов находит применение в различных технических системах. Если при наличии кинематического соединения между механизмами согласованное их движение происходит естественным образом независимо от структуры электропривода, который может быть даже простейшим, то при отсутствии такого соединения для согласования их движения требуются специальные технические решения. Они должны наилучшим образом обеспечивать выполнение требований по точности, диапазону и динамике регулирования координат. Их выбор должен осуществляться совместно с разработкой конструкции механизмов и выбором наиболее подходящих управляющих и измерительных средств. Сказанное относится к оборудованию вспомогательных механизмов транспортных средств. Для них характерны особые схемотехнические решения силовых и измерительных цепей, характеристики питающих сетей, конструктивные исполнения датчиков и прочее. Современная микропроцессорная техника и средства разработки программного обеспечения позволяют осуществить сложные алгоритмы управления, в частности, согласованное управление движением элементов электромеханических систем.

Целью проекта, материалы которого приведены в статье, является разработка системы управления электропривода панорамных стеклоочистителей автобуса, между которыми отсутствует механическое соединение. Такая задача возникает в связи со стремлением достигнуть большей компактности при компоновке оборудования, расположенного в ограниченном пространстве. При этом согласованное движение стеклоочистителей должно обладать визуальной гармоничностью и быть устойчивым к воздействию механической нагрузки, изменяющейся в характерных для них пределах. Другим требованием к системе управления является простота ее настройки при использовании минимального набора коэффициентов, имеющих очевидный физический смысл. Материал, изложенный в данной статье, опирается на ранее проведенные исследования, описанные в [1] и [2], в том числе, на предыдущий этап разработки [2], который в дальнейшем был значительно расширен и детализирован.

Сложность оценки аналогичных разработок (например, [3]) связана с тем, что основным источником информации о них является техническая документация, в которой, как правило, алгоритмы управления и, тем более, их математическое описание не раскрываются. Некоторые сведения о примененных в них технических решениях могут быть получены в результате их исследования, а также при анализе силовых и измерительных схем и цепей.

СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ

Очевидно, что в общем случае задачи управления электроприводом могут быть разделены на три группы. Среди этих групп автоматическое регулирование координат, логическое управление и взаимодействие с управляющим оборудованием. Задачи второй и третьей групп, как правило, являются вспомогательными по отношению к задачам первой группы, благодаря которым обеспечивается точность и динамика управления движением. Так и в предлагаемой системе управления именно путем автоматического регулирования координат достигается согласованное движение стеклоочистителей. Рассмотрим его подробно.

В [1] обсуждалась разработка достаточно универсальной по назначению двухдвигательной синхронно-следящей системы электропривода, которая может быть использована, в том числе, для управления движением панорамных стеклоочистителей. При таком использовании указанной системы электропривод стеклоочистителя со стороны водителя осуществляет реверсивные движения в режиме слежения, следуя по заданной траектории, а электропривод стеклоочистителя со стороны пассажира следует за ним также в режиме слежения. Возможен вариант управления, при котором оба электропривода движутся по траектории, задающейся индивидуально для каждого из них. Изменяясь во времени, эта траектория имеет треугольную форму, либо форму трапеции с небольшим верхним основанием. Согласно принципам функционирования следящих систем автоматического регулирования по [4–6] между заданной траекторией и действительной траекторией электропривода возникает установившееся динамическое рассогласование. Его величина возрастает с ростом скорости движения, в рассматриваемом случае, частоты циклических движений стеклоочистителей, моментов инерции механизмов и момента механической нагрузки. Кроме того, при реверсах направлений вращения электрических двигателей в крайних нижних и крайних верхних положениях стеклоочистителей возникают переходные процессы, продолжительность которых зависит от моментов инерции механизмов. При значительной их величине продолжительность переходных процессов вполне может быть сопоставима с продолжительностью цикла движения стеклоочистителей между крайними положениями, что приводит к серьезным динамическим рассогласованиям на большей части траектории движения. Вследствие наличия этих рассогласований, стеклоочистители при движении не могут достигнуть крайних положений. Области их движения ограничены в окрестностях крайних положений недостигаемыми секторами, величина которых зависит от частоты циклических движений,

моментов инерции и момента нагрузки. Это же явление может быть объяснено ограниченной полосой пропускания системы управления при обработке задающих воздействий [4–6]. Величина указанных динамических рассогласований может оказаться такой существенной, что при их возникновении уже не приходится говорить о согласованном движении стеклоочистителей.

Снизить величины этих рассогласований можно, снизив частоту циклических движений вплоть до величины, ниже установленной стандартами. Попытка устранения рассогласования между заданной траекторией и действительным положением стеклоочистителя с помощью интегрирующей составляющей регулятора положения приводит к значительному перерегулированию и колебательности переходных процессов при реверсах, а значит, и к возникновению динамических моментов, которые, имея значительные величины, передаются на опоры двигателей. Эти процессы, наблюдаемые визуально, нарушают гармонию движения.

Важным для функционирования системы управления является и то обстоятельство, что из-за размеров, а именно, длины и массы таких стеклоочистителей каждый из них нельзя рассматривать как жесткое одномассовое звено. Можно предположить, что между валом стеклоочистителя и его щеткой имеется упругая механическая связь. Такие нежесткие двухмассовые звенья делают электропривод склонным к колебаниям, демпфирование которых происходит за счет протекания электромеханических процессов. Кроме того, демпфированию таких колебаний способствует формирование плавных процессов пуска и торможения [7, 8].

Перечисленные обстоятельства негативно влияют на согласование движения стеклоочистителей в зависимости от их скоростей движения, размеров и массы. Поэтому техническое решение из [1] применимо для легковых автомобилей, стеклоочистители которых имеют сравнительно небольшие размеры и массу. Чего нельзя сказать про стеклоочистители более габаритных транспортных средств – грузовых автомобилей и автобусов. Поэтому в разрабатываемой системе управления требуется устранить возникновение указанных выше секторов, ограничивающих область движения стеклоочистителей, снизить нагрузку на электрические двигатели и элементы конструкции, а также обеспечить плавность движения стеклоочистителей без колебательных процессов при реверсе направления их движения с подъема на спуск и обратно, которые нарушают визуальную гармонию этого движения.

Для того чтобы по сравнению с [1] избежать реверсов направления вращения электрических двигателей постоянного тока М1 и М2 с возбуждением от постоянных магнитов, их валы соединены с валами стеклоочистителей С1 и С2 через кулисные механизмы, как показано на рис. 1, что было применено в [2]. Для таких электрических двигателей, имеющих линейные электромеханические характеристики, характерны сравнительно простые

способы управления, в частности, регулирование скорости вращения. При использовании алгоритма согласования движения стеклоочистителей, предложенного далее, могут быть использованы электрические двигатели различных типов, управление которыми обеспечивает линейность электромеханических характеристик, в том числе, бесколлекторные электрические двигатели.

Если вращение валов электрических двигателей происходит в одном направлении с постоянной скоростью, то при таких кулисных передачах валы стеклоочистителей совершают реверсивное вращение с переменной скоростью по всей ширине зон $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$. Червячные редукторы ЧР1 и ЧР2 предназначены для понижения скоростей вращения двигателей и повышения их моментов. На рис. 1 также показана зона возможного пересечения стеклоочистителей, образованная пересечением зон $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ и ограниченная их позициями Е и F.

При выборе датчиков положения и валов, на которые они установлены, чтобы обеспечить систему управления информацией, необходимой или, как минимум, достаточной для управления движением, требуется учитывать конструкцию механизма и удобство его сборки, а также надежность датчиков и их соответствие условиям эксплуатации. Важно отметить, что, как правило, датчики положения для автомобильной техники, имеют аналоговый выходной сигнал и предназначены для измерения положения в ограниченном секторе – обычно 90° или 120° . Причем вблизи границ диапазона измерения возрастает ошибка – отклонение от действительной величины измеряемого угла. Кроме того, размещение датчиков на валах двигателей оказалось затруднительным. Поэтому аналоговые автомобильные датчики положения ДУП-01, обозначенные на рис. 1 как ДП1 и ДП2, принцип работы которых основан на эффекте Холла, были установлены на валы стеклоочистителей. Однако такое расположение датчиков не позволяет по их сигналам однозначно сопоставить положения валов стеклоочистителей

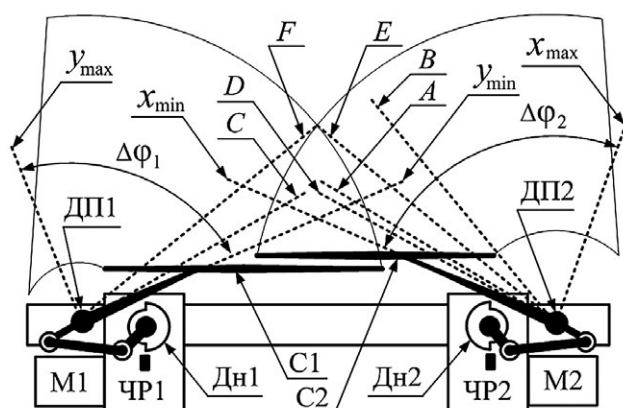


Рис. 1. Кинематическая схема механизма панорамных стеклоочистителей.

Fig. 1. The kinematic scheme of the mechanism of panoramic windscreen wipers.

с положениями валов двигателей. Очевидна необходимость концевых датчиков для детектирования крайних нижних положений стеклоочистителей x_{\min} и y_{\min} .

Исходя из описанной конструкции механизма, предполагается следующая последовательность согласованного циклического движения стеклоочистителей:

1. В начальном состоянии цикла оба стеклоочистителя находятся в крайних нижних положениях. При этом пассажирский стеклоочиститель С1 обязательно неподвижен, а водительский – С2 может быть неподвижен, если электропривод находится в состоянии парковки, либо пересекать крайнее нижнее положение, заканчивая предыдущий цикл движения.
2. Водительский стеклоочиститель С2 начинает или продолжает движение на подъем при постоянной скорости вращения своего двигателя до позиции А, уступая, таким образом, пространство для движения пассажирского стеклоочистителя, который на этом этапе остается неподвижным в крайнем нижнем своем положении y_{\min} .
3. Достигнув позиции А, водительский стеклоочиститель продолжает подъем при постоянной скорости вращения своего двигателя, а пассажирский стеклоочиститель С1 начинает подниматься также с постоянной скоростью вращения своего двигателя.
4. Стеклоочиститель со стороны водителя достигает позиции В и пресекает ее. Когда водительский стеклоочиститель находится выше позиции В, как при подъеме, так и при спуске, его двигатель в соответствии с сигналом задания изменяет скорость своего вращения в зависимости от текущего положения. Чем выше стеклоочиститель, тем ниже скорость вращения его двигателя. Пассажирский стеклоочиститель на этом этапе продолжает движение с постоянной скоростью вращения своего двигателя.
5. Достигнув крайних верхних положений x_{\max} и y_{\max} , стеклоочистители продолжают движение на спуск. Из-за замедления вращения двигателя водительского стеклоочистителя при его подъеме к этому времени пассажирский стеклоочиститель опережает его. При спуске водительского стеклоочистителя скорость вращения его двигателя увеличивается в зависимости от положения при движении к позиции В.
6. При спуске пассажирского стеклоочистителя до позиции С его двигатель вращается с постоянной скоростью. Достигнув позиции С, он начинает замедлять скорость своего вращения в зависимости от положения стеклоочистителя. Чем ниже положение этого стеклоочистителя, тем ниже скорость вращения его двигателя.
7. Аналогично, при достижении позиции D при спуске водительского стеклоочистителя его двигатель также начинает замедлять скорость своего вращения в зависимости от положения. Чем ниже положение стеклоочистителя, тем ниже скорость вращения его двигателя.
8. Достигнув крайнего нижнего положения y_{\min} , которое система управления детектирует по концевому датчику, пассажирский стеклоочиститель останавливается, уже предварительно снизив скорость, и ожидает начала следующего цикла движения.
9. Достигнув крайнего нижнего положения x_{\min} , которое также детектируется по концевому датчику, водительский стеклоочиститель либо останавливается, если система управления имеет команду на парковку, либо продолжает движение, пересекая положение x_{\min} снизу вверх, что является началом очередного цикла движения.

Приведенный алгоритм согласования движений требует нескольких пояснений. Плавное замедление движения стеклоочистителей при приближении к крайним нижним положениям необходимо для их более точной остановки, снижения динамических нагрузок двигателей, и устранения электромеханических колебаний, которые также связаны с протеканием токов значительных величин. Эти колебания возникают при резкой остановке и вызваны механической упругостью стеклоочистителей [7, 8]. Остановка пассажирского стеклоочистителя в крайнем нижнем положении в конце цикла необходима по следующим причинам:

1. В крайних нижних положениях необходимо обеспечить смену порядка следования стеклоочистителей с опережения на отставание.
2. Необходимо устранить разность хода стеклоочистителей, которая неизбежно накапливается в пределах цикла их движения из-за воздействия различных факторов – неравномерности механической нагрузки, различия механических характеристик двигателей, грубой настройки параметров ускорения и замедления вращения электрических двигателей.
3. Необходимо осуществить взаимное позиционирование стеклоочистителей в начале каждого цикла, чтобы начать очередной цикл движения при строго определенных условиях.

Важно отметить, что остановки и пуски двигателей являются причиной значительных динамических нагрузок. Однако без взаимного позиционирования в контрольных точках x_{\min} и y_{\min} по окончании первого же цикла произойдет пересечение стеклоочистителей.

В [2] при осуществлении подобного алгоритма согласованного управления имелись сложности в связи с неоднозначностью сопоставления положений стеклоочистителей и валов их двигателей, которая была учтена путем использования логических переменных, вычисляемых в процессе движения. Однако начальные значения этих логических переменных по названной выше причине невозможно заведомо корректно установить. В качестве попытки устранения этой коллизии был применен алгоритм первоначальных поочередных движений стеклоочистителей, который при включении электропривода позволяет войти в циклическую работу. Для его осуществления

в качестве параметров, используемых в вычислениях, были отдельно выделены граничные положения стеклоочистителей, которые обозначены как E и F на рис. 1. Находясь выше такого граничного положения, стеклоочиститель не препятствует движению другого стеклоочистителя. Лишь по аналоговым датчикам система управления может детектировать всего 4 различных комбинации взаимных положений стеклоочистителей (выше или ниже) с учетом положения по отношению к граничным положениям E и F (выше или ниже), не учитывая при этом направление движения на подъем или спуск. Однако алгоритм входа в согласованное циклическое движение был разработан, исходя из условия, что движению стеклоочистителей не препятствует их пересечение. Поэтому при его осуществлении нельзя исключить их пересечения при некоторых начальных положениях стеклоочистителей. Кроме того, при согласованном управлении требовалось определять направления их движения – на спуск или на подъем. Для этого требовалось детектировать прохождение стеклоочистителями крайних верхних положений x_{\max} и y_{\max} путем дифференцирования их текущих положений. Эта операция может дать некорректный результат из-за наличия шумов в выборке аналогового сигнала датчиков положения, неяркой выраженности крайних положений по этим сигналам, из-за протекания переходных процессов, а также в связи с тем, что не исключено движение стеклоочистителей под действием любого внешнего активного момента.

Чтобы по сравнению с [2] устранить указанную проблему, дополнительно с аналоговыми датчиками положения на выходных валах червячных редукторов были установлены дискретные индуктивные датчики. В зависимости от уровня логического сигнала они позволяют определить направление движения стеклоочистителей – на подъем или на спуск. Поэтому на рис. 1 они обозначены как Дн1 и Дн2 – датчики направления. Изменению уровня логического сигнала соответствуют крайнее верхнее положение стеклоочистителя или его крайнее нижнее положение – положение парковки. Использование датчиков Дн1 и Дн2 позволило упростить алгоритм согласования движения стеклоочистителей, приведенный выше, по сравнению с [2]. Например, при движении не требуется детектировать положения x_{\max} и y_{\max} , однозначно определяются начальные условия при включении электропривода, а также однозначно сопоставляются положения валов стеклоочистителей и их двигателей. Благодаря применению этих датчиков взаимные положения стеклоочистителей (выше или ниже), их положения по отношению к граничным позициям E и F (выше или ниже), сочетаясь с направлениями движения – на спуск или на подъем, образуют 16 комбинаций. Лишь при трех из них дальнейшее движение невозможно без пересечения с учетом нереверсивности вращения двигателей. Для остальных комбинаций оказалось достаточным всего трех сценариев поочередного движения

стеклоочистителей, чтобы вернуть их в положение парковки, исключив пересечение, с вхождением в циклическое согласованное движение. Дополнительная комбинация требуется для учета коллизии при движении обоих стеклоочистителей в окрестности положения парковки, когда по сигналам от датчиков ДП1, ДП2, Дн1 и Дн2 выполняются условия для запрета движения, но их пересечение не возникает из-за размеров и формы.

Очевидно, что предложенный неследящий алгоритм согласованного движения стеклоочистителей выполняет возложенную на него задачу, если скорости вращения электрических двигателей стабилизированы в некоторых пределах, чтобы снизить изменение этих скоростей при изменении механической нагрузки. Это требование связано с тем, что электромеханическая характеристика $\omega(I)$ двигателя, имеющего малую мощность, является достаточно мягкой, а механическая нагрузка на стеклоочистители изменяется в широких пределах. Изменение реактивной составляющей нагрузки связано с состоянием стекла – влажным или сухим. Активная составляющая механической нагрузки связана с действием силы тяжести на стеклоочистители и изменяется в процессе их движения в зависимости от углового положения. Кроме того, нагрузки каждого из них могут несколько отличаться, что без стабилизации скоростей вращения двигателей может привести к нарушению согласованного управления.

Так как валы стеклоочистителей соединены с валами двигателей через кулисные механизмы, то взаимосвязь между положениями этих валов нелинейная, а без использования датчиков направления Дн1 и Дн2 еще и неоднозначная. Поэтому использование датчиков положения, расположенных на валах стеклоочистителей, для вычисления скоростей вращения двигателей затруднено. По этой причине организация обратных связей по скоростям вращения двигателей для замыкания контуров их стабилизации по [4–7] также затруднена. Для решения указанной проблемы целесообразно стабилизировать скорости вращения двигателей с помощью положительных обратных связей по токам их якорных цепей – регулирование по возмущению [7, 8].

Математическое описание предложенной к применению замкнутой системы стабилизации скорости может быть представлено в виде структурной схемы, показанной на рис. 2.

В этой схеме имеются следующие обозначения параметров электропривода и его координат: U_{ω} – сигнал задания скорости вращения двигателя, U_{π} и k_{π} – сигнал положительной обратной связи по току и ее коэффициент, $U_{от}$ и $k_{от}$ – сигнал отрицательной обратной связи по току с токоограничением ТО по отсечке [7, 8] и ее коэффициент, U_{δ} – сигнал рассогласования, k_y – коэффициент передачи суммирующего усилителя Y , k_{π} и T_{π} – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя СП, E_{π} – ЭДС силового преобразователя, E_d – ЭДС вращения

двигателя, E_δ – их разность, R_α и T_α – активное сопротивление якорной цепи ЯЦ двигателя и его электромагнитная постоянная времени с учетом параметров силового преобразователя, $k\Phi$ – коэффициент двигателя при постоянном магнитном потоке Φ , J – момент инерции механической части МЧ, приведенный к валу двигателя с учетом момента инерции его ротора, I – ток якорной цепи, M – электромагнитный момент, M_c – момент нагрузки, ω – скорость вращения электрического двигателя, p – оператор Лапласа. Сигнал задания U_ω и промежуточные координаты $\{U\}$, выше названные сигналами, при цифровой реализации системы управления являются эквивалентными им цифровыми кодами.

При циклическом движении стеклоочистителей согласно предложенному алгоритму согласования движения таким контурам, индивидуальным для каждого двигателя, задается $U_{\omega 1}(\varphi_1, t)$ и $U_{\omega 2}(\varphi_2, t)$, где φ_1 и φ_2 – угловые положения стеклоочистителей, а t – время.

Из структурной схемы, показанной на рис. 2, при $p=0$ и $k_{от}=0$ следует выражение статической электромеханической характеристики электропривода при стабилизации ω :

$$\omega(I) = \omega_0 - \Delta\omega(I); M = k\Phi I, \quad (1)$$

где ω_0 – скорость холостого хода и $\Delta\omega$ – статический перепад скорости (изменение скорости вращения при изменении тока нагрузки) определяются по следующим выражениям:

$$\omega_0 = \frac{k_y k_{сп}}{k\Phi} U_\omega; \Delta\omega(I) = \frac{R_\alpha - k_y k_{сп} k_{пт}}{k\Phi} I. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) показывают стабилизирующее действие положительной обратной связи по току на скорость вращению двигателя. В соответствии с этим, на рис. 3, а показано, что при номинальном токе I_n скорость вращения двигателя ω_n без положительной обратной связи по току ниже скорости ω_3 при ее использовании. Жесткость β статической электромеханической характеристики электропривода является мерой статического перепада $\Delta\omega$ скорости при изменении тока нагрузки в пределах ΔI , как показано на рис. 3, а:

$$\beta = \frac{\Delta I}{\Delta\omega} = \frac{I_n}{\omega_0 - \omega_n}. \quad (3)$$

На рис. 3, а и 3, б обозначены следующие статические и динамические характеристики: 1 – при $k_{пт}=0$; 2 – при промежуточном $k_{пт}$; 3 – при критическом $k_{пт}$; 4 – участок токоограничения. Из (2) также следует вывод,

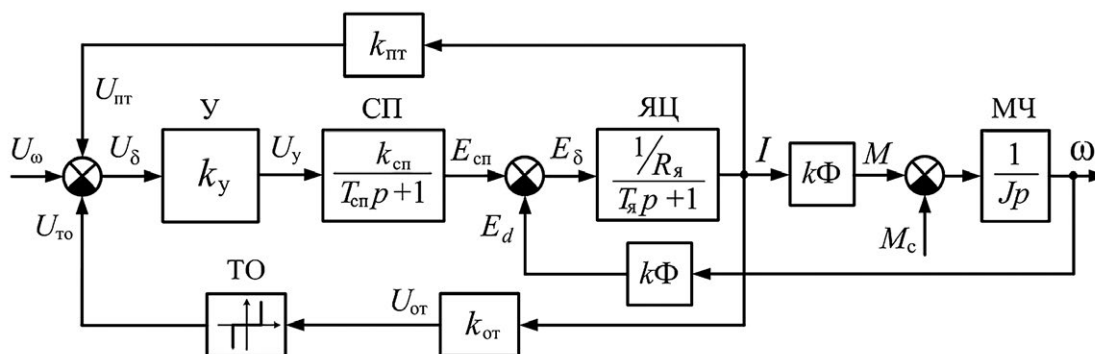


Рис. 2. Структурная схема контура автоматического регулирования скорости двигателя.

Fig. 2. The structural scheme of the circuit of automatic control of motor rotation velocity.

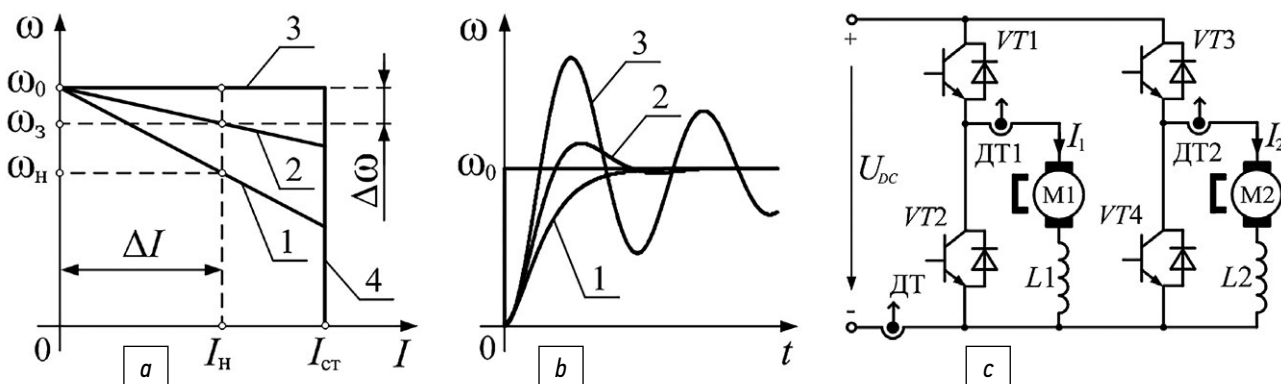


Рис. 3. Система управления электропривода: а – статические электромеханические характеристики; б – реакция на скачкообразный сигнал задания; с – схема силового преобразователя.

Fig. 3. Electric drive control system: а – static electromechanical properties; б – response to a jump input signal; с – the scheme of the power converter.

что такой способ стабилизации скорости интуитивно прост с точки зрения практики настройки. Так как $k_{\text{пт}}$ согласно (2) оказывает влияние на величину статического перепада скорости $\Delta\omega$, не влияя на скорость холостого хода ω_0 , при настройке стабилизации скорости целесообразно изменять величину этого коэффициента, оставив неизменной величину коэффициента суммирующего усилителя $k_y=1$.

Следует также отметить, что с ростом жесткости β статической электромеханической характеристики электропривода растет и колебательность переходных процессов вплоть до критического значения коэффициента обратной связи по току $k_{\text{пт}}$, далее которого электропривод становится неустойчивым [7, 8]. Эта закономерность на качественном уровне иллюстрируется графиками, показанными на рис. 3, б.

У электромеханических характеристик $\omega(I)$, показанных на рис. 3, а, имеется мягкий участок ограничения тока на стопорном уровне $I_{\text{ст}}$ для защиты двигателя от перегрузок в динамических процессах, а также при стопорении под действием механической нагрузки. В системах стабилизации скорости с положительной обратной связью по току, которые, в целом, являются системами с суммирующим усилителем, для формирования участка ограничения тока может быть использована отрицательная обратная связь по току с отсечкой [7, 8], которая показана на рис. 2. Элемент ТО в этой обратной связи является нелинейностью вида «зона нечувствительности». От ее ширины зависит диапазон тока $\pm I_{\text{ст}}$, в котором стабилизируется скорость вращения двигателя по (1) и (2). Эта обратная связь вступает в действие дополнительно к положительной обратной связи по току, стабилизирующей скорость, при превышении током заданной уставки $I_{\text{ст}}$ и формирует мягкий участок «4» электромеханической характеристики. Жесткость этого участка зависит от соотношения коэффициентов обратных связей $k_{\text{пт}}$ и $k_{\text{от}}$. Если силовой преобразователь имеет высокое быстродействие и $T_{\text{сн}} \approx 0$, то отрицательная обратная связь по току может быть осуществлена релейным способом:

$$E_{\text{сн}} = k_y U_y \text{ при } |I| < I_{\text{ст}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{сн}} = 0 \text{ при } |I| \geq I_{\text{ст}}. \quad (5)$$

В этом случае коэффициент $k_{\text{от}}$ можно считать равным бесконечности. Такая обратная связь не требует настройки кроме задания $I_{\text{ст}}$, а участок ограничения тока электромеханической характеристики вертикален, как показано на рис. 3, а, то есть имеет нулевую жесткость.

Так как реверс направлений вращения двигателей не требуется, то для их питания, как и в [3], следует применить неревверсивные силовые преобразователи, показанные на рис. 3, с, которые устроены по полумостовой схеме [9]. В процессе регулирования напряжений, приложенных к якорным цепям двигателей, верхний

и нижний транзисторы $VT1$, $VT2$ и $VT3$, $VT4$ полумостов открываются и закрываются противофазно в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Диапазон изменения этих напряжений в процессе регулирования – от нуля до $U_{\text{дс}}$ напряжения постоянного тока, величина которого 24–27 В соответствует уровню бортовой сети. Несущая частота ШИМ имеет величину 30 кГц. Поэтому справедливо допущение, что $T_{\text{сн}} \approx 0$, и соотношения (4) и (5) при формировании участка электромеханической характеристики для ограничения тока. Торможение электрических двигателей осуществляется их переводом в динамическое торможение при замыкании якорных цепей накоротко через открытые нижние транзисторы $VT2$ и $VT4$ полумостов. Датчики тока ДТ1 и ДТ2 установлены так, чтобы измерять токи электрических двигателей при их нарастании и спаде в пределах периода ШИМ управления транзисторами $VT1$ – $VT4$. Дроссели $L1$ и $L2$, включенные в якорные цепи электрических двигателей, предназначены для сглаживания пульсаций их токов, вызванных широтно-импульсной модуляцией напряжения, а также с целью уменьшения зоны прерывистых токов [9]. Датчик тока ДТ, измеряющий общий для двигателей ток, является элементом для защиты силового преобразователя от короткого замыкания.

Что касается группы задач логического управления, которые упоминались ранее, то они связаны с переключением режимов движения в зависимости от кода на дискретных переключателях. Среди таких режимов работы электропривода имеются:

1. Непрерывное движение (повторение циклов) на одной из двух частот, а именно, низкой – свыше 30 циклов в минуту, и высокой – свыше 40 циклов в минуту.
2. Одиночные циклы через интервалы времени заданной продолжительности.
3. Работа со стеклоомывателем – три цикла на низкой частоте, далее – в зависимости от кода, установленного на переключателях.
4. Возврат стеклоочистителей в положение парковки и технологические режимы.

Если соотнести логическое управление с автоматическим регулированием координат, то оно заключается в формировании сигналов или кодов заданий $U_{\omega 1}(\varphi_1, t)$ и $U_{\omega 2}(\varphi_2, t)$, используя различные счетчики времени, программные счетчики и идентификаторы движений.

Решение задач, относящихся к третьей группе, требует осуществить сопряжение электропривода с управляющим оборудованием по сетевой шине CAN (Controller Area Network), широко распространенной в автомобильной технике. Сообщения, которыми обмениваются устройства, должны соответствовать протоколу J1939. Сопряжение с оборудованием для настройки электропривода может быть осуществлено по интерфейсу асинхронного последовательного приемапередатчика UART (Universal Asynchronous Receive-Transmitter). Параметры

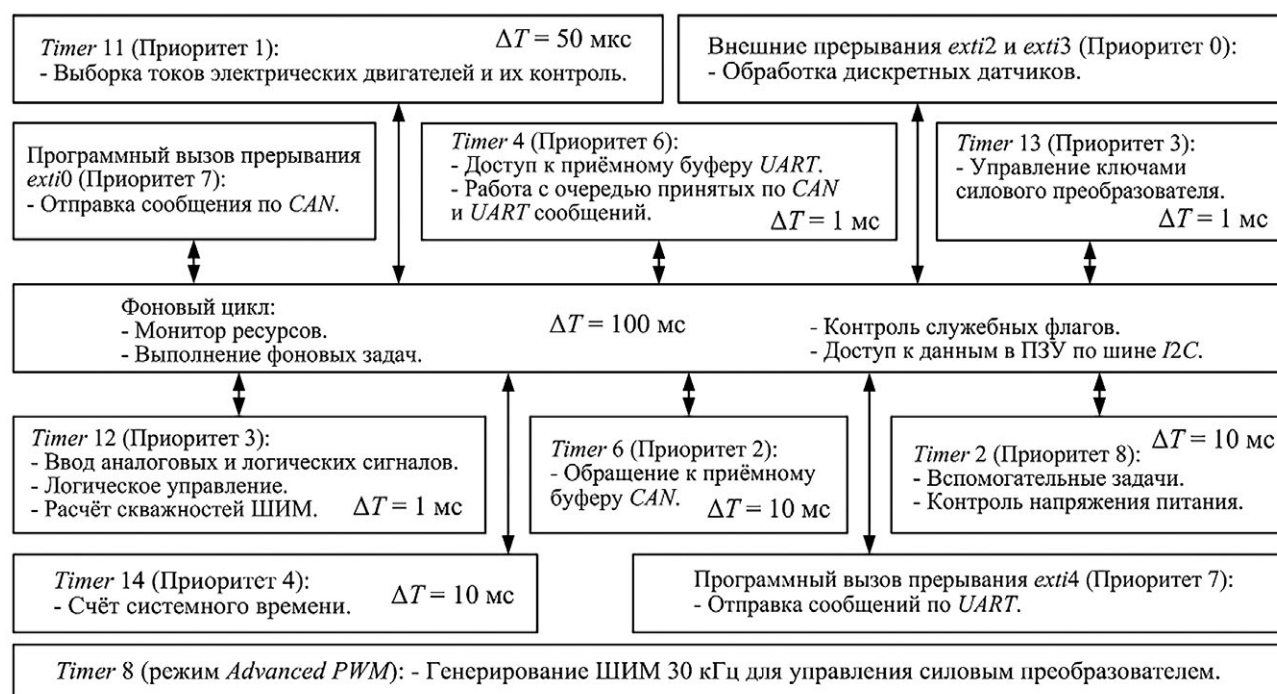


Рис. 4. Блок-схема программного обеспечения системы управления электропривода.

Fig. 4. The block diagram of the electric drive control system software.

настройки целесообразно сохранить в памяти постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) с доступом по шине I2C (*Inter Integrated Circuit*) или во флэш-памяти микроконтроллера.

Следует отметить, что в (2) от величины напряжения питания U_{DC} силового преобразователя зависит величина его коэффициента k_{cp} , а значит, и скорость холостого хода ω_0 . Чтобы устранить это влияние в некотором диапазоне U_{DC} , осуществлена коррекция $U_{\omega 1}(\varphi_1, t)$ и $U_{\omega 2}(\varphi_2, t)$ пропорционально величине U_{DC} по отношению к его базовому уровню 24В.

Разработка программного обеспечения для микропроцессорного управления потребовала учета ограниченности вычислительных ресурсов микроконтроллера. Согласно блок-схеме на рис. 4 задачам управления назначены приоритеты и интервалы повторения ΔT , исходя из их значимости и своевременного захвата, обработки и генерирования сигналов. При этом более высоким приоритетам соответствуют меньшие их номера, указанные на рис. 4.

При разработке программного обеспечения использовались средства модельно-ориентированного программирования, а именно, библиотека *Waijung Blockset* [10] для микроконтроллеров *STM32* из состава системы компьютерной математики *Matlab*. При этом стандартные модельные блоки из этой библиотеки были использованы в качестве программных обработчиков встроенных модулей микроконтроллера – дискретных портов ввода и вывода, аналого-цифрового преобразователя, генераторов сигналов с ШИМ, цифровых интерфейсов. Модельные блоки обработчиков системных прерываний

использованы как элементы графической компоновки программного обеспечения согласно рисунку 4. Математическое программное обеспечение на основе алгоритмов управления электроприводом было разработано на языке C. Сочетание средств модельно-ориентированного программирования и подпрограмм, разработанных на языке C, показало эффективность, например, в [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Система управления была разработана в виде электронного блока, помещенного в защищенный корпус исполнения *IP66*, который показан на рис. 5, а. При ее разработке и исследовании использовалась натурная установка, по конструкции, размерам и механическим нагрузкам повторяющая ветровое стекло автобуса. Для отслеживания движения стеклоочистителей в процессе настройки с помощью персонального компьютера по линии связи *USB – UART* использовано специальное приложение, панель которого показана на рис. 6, а.

На рис. 6, б показаны графики положений φ_1 и φ_2 стеклоочистителей, скважностей γ_1 и γ_2 ШИМ напряжений, питающих их электрические двигатели, и токов I_1 и I_2 при их циклическом согласованном движении. Графики построены с помощью приложения для персонального компьютера с использованием данных от системы управления. Положения φ_1 и φ_2 выражены в кодах, или дискретах, аналого-цифрового преобразования сигналов

от датчиков ДП1 и ДП2 на осях стеклоочистителей. Согласно графикам, показанным на рис. 5, *b*, стеклоочистители при движении не пересекаются, так как между ними имеется дистанция. Смена последовательности их движения с отставания на опережение и обратно происходит вне зоны возможного пересечения $\Delta\varphi_0$. Ширина зоны $\Delta\varphi_0$ равна углу между x_{\min} и позицией *E* пассажирского стеклоочистителя или между y_{\min} и позицией *F* водительского стеклоочистителя.

Назначение кнопок на панели приложения для настройки электропривода, показанной на рис. 6, *a*, согласно их названиям, не требует пояснений. Для настройки согласованного движения стеклоочистителей предусмотрены два программируемых коэффициента. Первый из них – K_6 , эмпирический коэффициент замедления

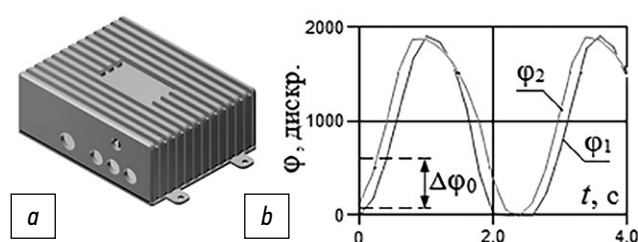


Рис. 5. Система управления электропривода: *a* – защитный корпус; *b* – графики положений стеклоочистителей при циклическом движении.

Fig. 5. The electric drive control system: *a* – the protection housing; *b* – the graphs of windscreen wipers displacement at cyclic movement.

вращения двигателя водительского стеклоочистителя в зависимости от его положения выше позиции *B*, показанного на рис. 1. Второй коэффициент – K_d , который выражен в процентах ширины зоны $\Delta\varphi_2$ на рис. 1. Он равен углу между x_{\min} и позицией *A* водительского стеклоочистителя. Величины этих коэффициентов подбираются экспериментально при настройке электропривода таким образом, чтобы исключить пересечение стеклоочистителей, обеспечив минимальное время цикла их движения и визуальную гармоничность. Чтобы задать интервал времени между одиночными циклами при прерывистом движении, предназначен параметр T_z в секундах. Коэффициенты положительных обратных связей по токам для каждого двигателя обозначены как K_{n1} и K_{n2} . Для настройки контуров стабилизации скоростей вращения двигателей целесообразно постепенно повышать k_{np} от нулевого значения до некоторого оптимума колебательности при обработке переходных процессов и жесткости электромеханической характеристики. Релейное ограничение тока при настройке требует задания стопорного уровня тока $I_{\max} = I_{ст}$.

Высокая и низкая частоты циклического движения стеклоочистителей задаются с помощью параметров $Z1$ и $Z2$ (рис. 6, *a*) в виде скважности ШИМ напряжения питания двигателей в процентах. Например, на графиках скважностей γ_1 и γ_2 на рис. 6, *b* пунктирной линией показан уровень скважности $Z1=55\%$. Относительно этого уровня происходит автоматическое регулирование напряжений питания двигателей при циклическом движении стеклоочистителей путем задания $U_{\omega 1}(\varphi_1, t)$ и $U_{\omega 2}(\varphi_2, t)$ согласно алгоритму согласованного движения. Кроме этого,

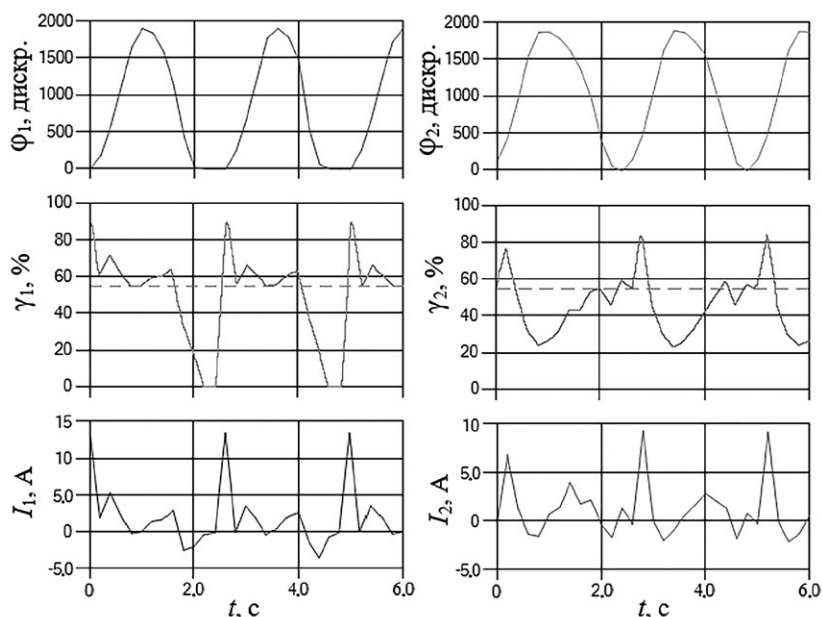
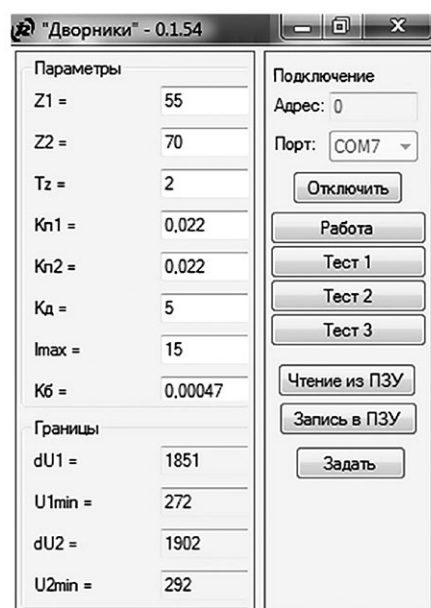


Рис. 6. Система управления электропривода: *a* – панель приложения для настройки с помощью персонального компьютера; *b* – экспериментальные графики координат.

Fig. 6. The electric drive control system: *a* – the toolbar of the application for tuning with use of a personal computer; *b* – the experimental graphs of coordinates.

форма графиков скважностей γ_1 и γ_2 зависит от процесса стабилизации скоростей вращения двигателей при действии нагрузки – трения и моментов силы тяжести. Благодаря форсирующему действию положительных обратных связей по току возникают динамические составляющие напряжений питания. Важно отметить, что мгновенные значения скважностей не достигают предельного уровня 95%. Если же скважности достигают указанного уровня, то контуры автоматического регулирования уже не обеспечивают стабилизацию скоростей вращения их двигателей, а стеклоочистители выходят из согласованного движения. Если это явление происходит кратковременно, например, в переходных процессах, то оно в значительной мере компенсируется при позиционировании стеклоочистителей.

Токи I_1 и I_2 на рис. 6, b имеют значительные динамические составляющие в начале каждого цикла из-за форсированного увеличения скорости вращения двигателей и смены направления движения стеклоочистителей по отношению к моментам силы тяжести. Их можно несколько снизить путем формирования процессов пуска – плавного, но быстрого нарастания скважностей γ_1 и γ_2 напряжений в зависимости от времени или от углового положения стеклоочистителей, что, однако, приводит к росту продолжительности цикла их движения.

Интенсивность динамических процессов и их сложная зависимость от параметров электропривода и механической нагрузки затрудняет применение расчетных способов для выбора мощности двигателей, которые требуют более детального экспериментального уточнения с учетом тяжелых условий эксплуатации при температуре окружающего воздуха до $+70^\circ\text{C}$, способствующих нагреву и затрудняющих охлаждение. Исходя из продолжительного режима работы $S1$ и большей динамической нагрузки у двигателя пассажирского стеклоочистителя, подходящей номинальной мощностью каждого из них следует считать 100 Вт.

Показано, что в зависимости от состояния ветрового стекла частота циклического движения стеклоочистителей изменяется в пределах 3–4 цикла в минуту. Низкое изменение скоростей вращения двигателей при действии нагрузки препятствуют их выходу из согласования независимо от состояния стекла, в том числе при некотором неравенстве их нагрузок.

Так как точность установки аналоговых датчиков положения находится в пределах некоторого допуска, то для ориентирования системы управления по отношению к этим датчикам предусмотрены специальные тестовые поочередные движения стеклоочистителей. Эти движения вызываются специальной комбинацией на логических переключателях и совершаются с целью обнаружения крайних положений и расчета в зависимости от них промежуточных положений $A - F$, показанных на рис. 1. Величины крайних нижних положений x_{\min} и y_{\min} , измеренные по датчикам ДП1 и ДП2, которые обозначены

как $U_{1\min}$ и $U_{2\min}$, а также величины зон $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$, обозначенные как dU_1 и dU_2 , отображены на панели приложения в специальных формах. Эти же движения используются для принудительного возврата стеклоочистителей в положение парковки, если движение запрещено из-за взаимного положения. При этом, как и при ориентировании, стеклоочистители должны быть подняты от стекла.

Другие результаты разработки системы управления электропривода:

1. Отработано начало движения стеклоочистителей и их парковка из произвольных начальных положений, которые не запрещены из-за возможного пересечения с учетом нереверсивности вращения двигателей по сигналам датчиков положения.
2. Отлажен обмен сообщениями между электроприводом и управляющим устройством, имитирующим работу бортового компьютера, по сетевой шине CAN.
3. Произведена имитация различных аварийных ситуаций, в том числе, пересечения стеклоочистителей, превышения токами величины аварийной уставки, кратно большей, чем $I_{\text{ст}}$, выхода напряжения питания из допустимого диапазона, отключения датчиков положения, в которых выполняются предусмотренные действия – оповещение либо остановка движения.
4. Отработано переключение между режимами движения стеклоочистителей.
5. Опробована работа системы управления при поддержании скорости вращения электрических двигателей при изменении напряжения питания $U_{\text{дс}}$ в диапазоне 18–35 В.
6. При переносе параметров настройки системы управления между устройствами их повторная настройка не требуется за исключением некоторого контроля и коррекции.

ВЫВОДЫ

При разработке системы управления сделаны следующие выводы:

1. Разработана полнофункциональная система управления электропривода панорамных стеклоочистителей, между которыми отсутствует механическая связь. При этом решены задачи автоматического регулирования координат, логического управления, а также задача сопряжения с внешним управляющим и контрольным оборудованием.
2. Разработка системы управления потребовала учета различных факторов, связанных с автоматическим управлением движением. Среди них область применения, конструкция механизма, типы и расположение датчиков, характер механической нагрузки, жесткость механических связей, электромагнитные процессы в схеме силового преобразователя, точность и динамика движения, ограничение ресурсов управляющего микроконтроллера.

3. Система управления обеспечивает согласованное и визуально гармоничное движение стеклоочистителей, в том числе, при изменении механической нагрузки. Настройка электропривода обладает интуитивной простотой и наглядностью.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полющенко И.С. Модельно-ориентированная разработка синхронно-следящего электропривода // Электротехника. 2021. № 12. С. 29–36. doi: 10.53891/00135860_2021_12_29
2. Polyuschenkov I.S. Development of Double-motor Electric Drive for Screen Wipers // 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), Moscow, Russian Federation. Moscow: IEEE, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722590
3. Aros Electronics [internet] Режим доступа: <https://www.aros.se/> дата обращения: 25.06.2022.
4. Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории управления: Учебник в 3-х т. Т.2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.

REFERENCES

1. Polyuschenkov I.S. Model-Based Development of a Synchronous Servo Drive. *Elektrotehnika*. 2021;12:29–36. (in Russ). doi: 10.53891/00135860_2021_12_29
2. Polyuschenkov I.S. Development of Double-motor Electric Drive for Screen Wipers. In: *29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), Moscow, Russian Federation*. Moscow: IEEE; 2022:1–6. doi: 10.1109/IWED54598.2022.9722590
3. Aros Electronics [internet] Available from: <https://www.aros.se/> accessed: 25.06.2022.
4. Egupov N.D. *Methods of classical and modern management theory: A textbook in 3 vols*. Vol. 2. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E Bauman; 2000. (in Russ).

ОБ АВТОРЕ

Полющенко Игорь Сергеевич,
к.т.н., инженер;
адрес: Российская Федерация, 214031, Смоленск,
ул. Индустриальная, д. 2;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6023-9927>;
eLibrary SPIN: 9795-8775;
e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Competing interests. The author declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. Учебник для вузов. М.: МЭИ, 2008.
6. Блейз Е.С., Зимин А.В., Иванов Е.Е. и др. Теория и проектирование следящих приводов. Следящие приводы: В 3 т. под ред. Б.К. Чемоданова. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999.
7. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015.
8. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. Под ред. Терехова В.М. М.: Академия, 2005.
9. Розанов Ю.К., Соколова Е.М. Электронные устройства электромеханических систем. М.: Академия, 2004.
10. Waijung Blockset [internet] Режим доступа: <http://waijung.aimagin.com> дата обращения: 25.06.2022.

5. Rotach V.Ya. *Theory of automatic control. Textbook for universities*. Moscow: MEI; 2008. (in Russ).
6. Blaze E.S., Zimin A.V., Ivanov E.E., et al. *Tracking drives: In 3 vols. Vol. I. Theory and design of servo drives*. Editor Chemodanov B.K. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E Bauman; 1999. (in Russ).
7. Anuchin A.S. *Electric drive control systems*. Moscow: MEI; 2015. (in Russ).
8. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Control Systems of Electric Drives: A Textbook for High Schools*. Editor Terekhov V.M. Moscow: Akademiya; 2005. (in Russ).
9. Rozanov Yu.K., Sokolova E.M. *Electronic devices of electromechanical systems*. Moscow: Akademiya; 2004. (in Russ).
10. Waijung Blockset [internet] Available from: <http://waijung.aimagin.com> accessed: 25.06.2022.

AUTHOR'S INFO

Igor S. Polyuschenkov,
Cand. Sci. (Tech.), Engineer;
address: 2 Industrialnaya street, 214031 Smolensk,
Russian Federation;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6023-9927>;
eLibrary SPIN: 9795-8775;
e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru