

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.04

УДК 621.341.572

А.В. Саушев¹, И.В. Белоусов¹, О.В. Крюков²

¹Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «ТСН-электро», Нижний Новгород, Российская Федерация

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Системы микропроцессорного управления находят самое широкое применение в различных областях техники. Важнейшей сферой их применения является импульсная преобразовательная техника, которая используется при синтезе современных автоматизированных электроприводов. Управление ключевыми элементами таких преобразователей, обеспечивающее оптимальные по выбранным критериям алгоритмы широтно-импульсной модуляции, возможно только на базе микропроцессорной техники. Актуальным исследованием является обобщение опыта разработки и применения современных микропроцессорных систем управления импульсными преобразователями напряжения. **Цель работы:** изложение опыта разработки микропроцессорных систем управления импульсными преобразователями напряжения и перспективы их применения в автоматизированных электроприводах различного назначения. **Методы:** при решении поставленной задачи применялись методы теории электрических цепей и математического анализа. **Результаты:** показано, что оптимизацию широтно-импульсной модуляции при управлении ключевыми элементами импульсного преобразователя напряжения следует осуществлять по критерию дисперсии тока приводного двигателя электропривода. Для этой цели разработаны аналитические алгоритмы. Выполнен анализ особенностей построения современных систем микропроцессорного управления импульсными преобразователями напряжения и перспектив их развития. Даны рекомендации по их применению. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке и технической реализации алгоритмов управления импульсными преобразователями напряжения на основе микропроцессорной техники.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, микропроцессорное управление, широтно-импульсная модуляция, интерфейс связи.

A.V. Saushev¹, I.V. Belousov¹, O.V. Kryukov²

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

²TSN-electro, Nizhny Novgorod, Russian Federation

THEORY AND PRACTICE OF MICROPROCESSOR CONTROL OF PULSE VOLTAGE CONVERTERS

Microprocessor control systems are widely used in various fields of technology. The most important area of their application is pulse converter technology, which is used in the synthesis of modern automated electric drives. The control of the key elements of such converters, providing optimal pulse width modulation algorithms according to the selected criteria, is possible only on the basis of microprocessor technology. An actual study is a generalization of the experience of developing and applying modern microprocessor control systems for pulse voltage converters. **The purpose of the work:** the presentation of the experience in the development of microprocessor control systems for pulse voltage converters and the prospects for their application in automated electric drives for various purposes. **Methods:** methods of the theory of electrical circuits and mathematical analysis were used to solve the problem. **Results:** it is shown that the optimization of pulse width modulation when controlling the key elements of a pulse voltage converter should be carried out according to the criterion of current dispersion of an electric drive motor. Analytical algorithms have been developed for this purpose. The analysis of the peculiarities of the construction of modern microprocessor control systems for pulse voltage converters and the prospects for their development is carried out. Recommendations for their use are given. **Practical significance:** the results obtained can be used in the development and technical implementation of control algorithms for pulse voltage converters based on microprocessor technology.

Keywords: pulse voltage converter, microprocessor control, pulse width modulation, communication interface.

Введение

В последние годы импульсная преобразовательная техника находит все более широкое применение в различных системах электроэнергетики. При этом наиболее активно она используется в автоматизированных электроприводах различного назначения при синтезе их систем управления. В зависимости от структуры выделяют два класса преобразователей частоты: со звеном постоянного тока, предполагающего двойное преобразование электрической энергии, и с непосредственной связью (матричные преобразователи). Несмотря на перспективность матричных преобразователей частоты [1], в настоящее время, в большинстве случаев, в электроприводах находят применение системы частотного управления, силовая структурная схема которых построена на основе управляемого или неуправляемого выпрямителя, фильтра и инвертора напряжения. Для управления ключевыми элементами преобро-

зователя используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). В настоящее время широкое применение находят так называемые классический и векторный способы модуляции [1–7]. Выполнено достаточно много исследований, посвященных сравнительной оценке возможных способов ШИМ, включая алгоритмы полнофазной и неполнофазной модуляции [8–15].

В работах [16–18] рассмотрены явление перемодуляции и алгоритмы управления, исключающие ее появление. Для анализа процессов, протекающих в преобразователях с ШИМ, используются методы компьютерного и аналитического моделирования. Для технической реализации алгоритмов управления ШИМ применяется микропроцессорная техника.

В настоящее время активно продолжается процесс импортозамещения. В связи с этим важно осмыслить теоретический и практический опыт применения средств микропроцессорной техники для построения систем управления импульсными преобразователями напряжения в составе автоматизированных электроприводов.

Целью статьи являются постановка задачи оптимальной ШИМ по критерию дисперсии тока и изложение особенностей построения микропроцессорных систем управления импульсными преобразователями и перспектив их развития в автоматизированных электроприводах различного назначения на основе работ, проводимых авторами в этом направлении.

Основное содержание статьи

Импульсный преобразователь напряжения

Будем полагать, что электронно-ключевой преобразователь состоит из полумостов, которые будем обозначать $X = 1, 2, \dots, m$. Рассмотрим общий случай. Схема m -фазного электронно-ключевого преобразователя приведена на рисунке.

В схеме присутствует m верхних ключей и m нижних ключей. Узлы полумостов, в которых соединяются верхний и нижний ключи, будем нумеровать $X = 1, 2, \dots, m$. Потенциал φ_N узла N принят за ноль. Потенциал φ_M узла M равен напряжению звена постоянного тока преобразователя U_d . Нагрузка подключается к узлам $X = 1, 2, \dots, m$.

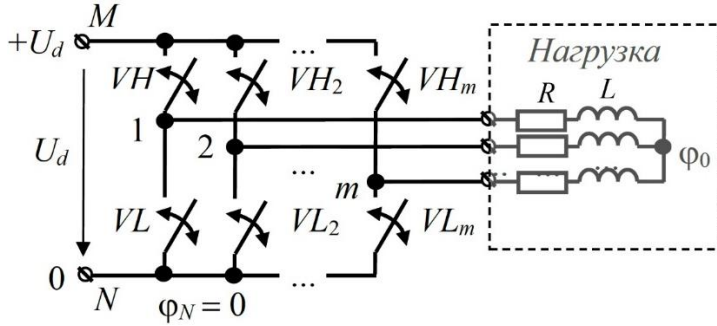


Рис. Схема m -фазного электронно-ключевого моста

В процессе функционирования полумоста в каждый момент времени замкнут нижний ключ или верхний ключ. Управление ключами полумоста описывается коммутационной функцией [19]:

$$\chi_x = 1 \left(\frac{\gamma_x}{2} + \frac{1}{2} + \Delta\alpha_x - \phi \right) \cdot 1 \left(\frac{\gamma_x}{2} - \frac{1}{2} - \Delta\alpha_x + \phi \right), \quad (1)$$

где γ_x – скважность импульса; $\Delta\alpha_x$ – коэффициент смещения импульса относительно центра временного интервала модуляции; ϕ – левосторонняя периодическая пилообразная функция:

$$\phi(\tau) = \phi = \tau - k = \tau - \text{floor}(\tau) \in (0, 1). \quad (2)$$

Интервалы модуляции будем нумеровать:

$$k = \text{floor}(\tau) = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где $\text{floor}(x)$ – целая часть числа x . Начала интервалов времени $t_k = k \cdot T_0$, где T_0 – период модуляции, задают дискретное время. Начала интервалов относительного времени $\tau_k = k = \text{floor}(\tau)$. Таким образом, дискретное относительное время – номера интервалов модуляции.

Период функции $\phi(\tau)$ равен 1. Область определения функции $\phi(\tau) = \phi$ может рассматриваться также как относительное время, которое отсчитывается от 0 до 1 на последовательности интервалов модуляции $k = 1, 2, \dots$. Угловая частота функции $\phi(\tau)$ равна $2 \cdot \pi$. Если периодическую пилообразную функцию $\phi(t)$ рассматривать как функцию реального времени t , то ее угловая частота $\omega_0 = 2 \cdot \pi / T_0$. Частота модуляции $f = 1 / T_0$.

Заметим, что коммутационная функция χ_x полумоста X , определенная выражением (1), зависит от модулирующей функции $u_x = \gamma_x$

и коэффициента смещения $\Delta\alpha_X$, характеризующего положение импульса от центра интервала модуляции. Коммутационные функции являются управляющими параметрами ШИМ электронно-ключевого преобразователя. Управляющие параметры γ_X и $\Delta\alpha_X$ ($X = 1, 2, \dots, m$) делятся на две группы: параметры, характеризующие скважности импульсов γ_X и их положение на интервале ШИМ $\Delta\alpha_X$. Общее число управляющих параметров ШИМ электронно-ключевого m -фазного преобразователя $2 \cdot m$.

Параметры положения $\Delta\alpha_X$ не связаны с принципом формирования напряжения ШИМ, рассмотренным в работах [19, 20], могут быть определены произвольным образом и попадают в группу свободных переменных управления полумостами электронно-ключевого преобразователя.

Задачей электронно-ключевого преобразователя является формирование модулированных напряжений на нагрузке по заданным значениям фазных напряжений. Модулирующие функции фазных напряжений обозначают g_X . Так как нагрузкой обычно является электрическая машина, то модулирующие функции фазных напряжений должны удовлетворять свойствам симметрии, одно из которых определяет следующая связь между ними:

$$\sum_{X=1}^m g_X = 0. \quad (4)$$

Связи между модулирующими функциями потенциалов полумостов γ_X и напряжений нагрузки g_X следуют из заданной топологии системы, образованной электронно-ключевым преобразователем и нагрузкой, и определяются соотношениями:

$$\gamma_X = y_X = g_X + \gamma_0 = 1/2 + g_X - g_0. \quad (5)$$

Силовые электронно-ключевые цепи с ШИМ чаще всего используются для управления электрическими машинами. В системе электронно-ключевой преобразователь-электродвигатель электронно-ключевой преобразователь играет подчиненную роль. Он должен обеспечивать требуемый характер протекания токов в электродвигателе путем формирования функций напряжения g_X . Модулированные напряжения, формируемые электронно-ключевым преобразователем, являются функциями коммутационных функций полумостов с большими амплитудами, значения которых, как правило, равны или пре-

восходят номинальное амплитудное напряжение электродвигателя. Поэтому на интервалах ШИМ в токе обмоток мощных электродвигателей наблюдаются существенные пульсации. Эти пульсации играют отрицательную роль. Они ведут к пульсациям электромагнитного момента и, как следствие, к ухудшению виброшумовых характеристик электропривода, а также к дополнительным потерям мощности. Следовательно, одной из важнейших задач ШИМ напряжения, является снижение пульсаций тока на периоде модуляции [7, 12]. В работах [19, 20] показано, что основным критерием оптимальности при разработке систем управления ШИМ является дисперсия тока в приводном электродвигателе, которую необходимо минимизировать.

Важным элементом электрического преобразователя является устройство управления. В современных системах управления для этого используются микроконтроллеры [21–26]. В настоящее время существует достаточное количество микроконтроллеров, предназначенных для управления различными типами электрических преобразователей. Для управления электрическим преобразователем, как правило, используются специализированные микроконтроллеры, которые отличаются наличием, как минимум, шести блоков формирования сигналов ШИМ, блоком обработки сигналов инкрементального энкодера, блоком аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с числом входов не менее шести.

Основным критерием выбора микроконтроллера является возможность реализации алгоритмов управления электронно-ключевым преобразователем и потребителем его энергии. Чаще всего потребителем энергии является электрическая машина. В системе управления электронно-ключевым преобразователем производится много вычислений с вещественными числами. Поэтому желательно наличие в микроконтроллере блока для выполнения арифметических операций с плавающей запятой.

Наиболее популярными для управления электрическими преобразователями являются микроконтроллеры Delfino компании Texas Instruments, а также микроконтроллеры с ядром ARM Cortex-M4F различных производителей, в том числе российских. Одним из основных блоков микроконтроллера, предназначенного для управления электронно-ключевым преобразователем, является блок формирования ШИМ. Необходимое число блоков определяется числом силовых

ключей преобразователя. В случае, если число ключей преобразователя велико, то используется структура с несколькими ячейками, в каждой из которых устанавливается своя плата управления с микроконтроллером [23].

Управление преобразователем

В системах управления электрическим преобразователем, содержащим электронно-ключевые полумосты, желательно, чтобы блок ШИМ автоматически формировал сигнал управления другим ключом полумоста с учетом «мертвого» времени. Целесообразно, чтобы блок формирования ШИМ аппаратно обрабатывал статусные сигналы драйверов ключей и отключал сигналы управления ключами, если драйвер передает сигнал аварии. Указанные возможности необязательны и могут быть реализованы программным путем, однако при этом снизится надежность системы управления и всего электрического преобразователя.

Во многих современных системах управления часто используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), которые позволяют одновременно выполнять большое количество логических операций. Следует отметить, что в большинстве случаев функции ПЛИС можно возложить на микроконтроллер. При этом упрощается реализация импортозамещения и повышается гибкость системы.

Для обработки сигналов с датчиков тока и напряжения, как правило, используется схема на операционных усилителях. Это необходимо для согласования сигнала датчика с допустимым уровнем напряжения входа АЦП микроконтроллера. В дальнейшем сигнал поступает в цифровой фильтр на ПЛИС или на аналоговый фильтр низкой частоты и только после этого в микроконтроллер. На сегодняшний день быстроедействие микроконтроллеров позволяет передавать сигнал с операционного усилителя прямо в АЦП микроконтроллера и осуществлять требуемую фильтрацию непосредственно в нем, что упрощает реализацию системы и увеличивает ее возможности. А внешний фильтр следует использовать только для устранения высокочастотных помех.

Также в схеме рекомендуется использовать защиту от перенапряжений и фильтр низкой частоты. Частота среза фильтра для наиболее широко используемых на практике электродвигателей должна быть, как правило, на порядок больше частоты ШИМ сигналов управления силовыми ключами электрического преобразователя.

В микроконтроллере сигнал с датчика должен обрабатываться программно с помощью цифрового фильтра. Возможность осуществления качественной цифровой фильтрации сигналов должна учитываться при выборе типа микроконтроллера. Ввод аналоговых сигналов, не требующих быстрой обработки, а также аналоговых сигналов системы верхнего уровня должен быть осуществлен с помощью микросхемы АЦП, подключенной к микроконтроллеру через микросхему гальванической развязки.

Для связи с системой верхнего уровня на плате системы управления должна быть предусмотрена возможность установки микросхем приемо-передатчиков интерфейсов RS-485 и CAN. Количество интерфейсов зависит от возможностей конкретного микроконтроллера и поставленной перед разработчиком задачи. Также необходимо обеспечить независимую гальваническую развязку между указанными микросхемами и микроконтроллером.

В электронно-ключевых преобразователях большой мощности для обеспечения помехозащищенности рекомендуется реализовывать интерфейсы связи с помощью оптоволокну. Для этого оптоприемник подключается к входу приемника интерфейса связи микроконтроллера. Кроме того, сигнал оптоприемника объединяется с сигналом передатчика интерфейса связи микроконтроллера при помощи микросхемы логического «И», а затем передается в оптопередатчик. Это позволяет объединить несколько плат системы управления в цепочку для подключения к системе верхнего уровня. Для связи с системой верхнего уровня также рекомендуется использовать оптические кабели. При этом можно использовать не только пластиковое, но и кварцевое оптоволокно, позволяющее передавать информацию на большие расстояния и с более высокой скоростью.

Быстродействие современных микроконтроллеров и интерфейсов связи позволяет системе верхнего уровня не только наблюдать значения различных переменных системы управления, но и строить графики для этих переменных в реальном времени. Также можно строить осциллограммы значений токов, напряжений и других величин без необходимости в использовании другого измерительного оборудования.

Для сохранения параметров системы управления рекомендуется использовать EEPROM-память. В большинстве современных микроконтроллеров, используемых в системах управления электрическим

преобразователем, данная память отсутствует. Однако ее можно установить в виде отдельной микросхемы. Для связи микроконтроллера с микросхемой памяти EEPROM обычно используется интерфейс SPI. Иногда можно использовать флэш-память микроконтроллера для сохранения параметров системы управления. Но такой подход имеет ряд недостатков. Во-первых, ресурс флэш-памяти обычно меньше, чем EEPROM-памяти. Это обусловлено тем, что для изменения одного параметра во флэш-памяти требуется произвести запись целого блока данных. Во-вторых, при осуществлении записи во флэш-память нельзя выполнять программу из этой же флэш-памяти. Последнее устраняется исполнением программы из оперативной памяти, но при этом существенно уменьшается объем доступной оперативной памяти, а это критично для большинства микроконтроллеров. Также EEPROM-память можно использовать для ведения журнала событий и аварий системы управления. В эту же память можно сохранять значения входных сигналов и переменных управления в случае аварии.

Для записи значения входных сигналов и переменных управления, ведения журнала событий и аварий системы управления, а также для сохранения больших объемов информации рекомендуется использовать SD-карту. Это позволяет легко извлечь и в дальнейшем проанализировать полученные данные. Для подключения SD-карты в режиме SPI к микроконтроллеру не требуется дополнительных микросхем. Для сохранения времени возникновения событий и аварий система должна иметь часы реального времени и поддерживать их питание от батареи. Рекомендуется использовать отдельную микросхему часов реального времени. Использовать для этого только микроконтроллер не рекомендуется, поскольку даже в режиме пониженного энергопотребления он потребляет значительно больший ток, чем указанная микросхема. На плате управления желательно предусмотреть ввод логических сигналов от системы верхнего уровня и контактов в преобразователе, например, сигналов о состоянии автоматических выключателей.

Ввод сигналов должен осуществляться с использованием гальванической развязки, например, с использованием оптоэлектронных пар. Также на плате системы управления нужно предусмотреть вывод логических сигналов. Он должен быть реализован с помощью оптоэлектронных пар, либо с помощью реле. Многокаскадные, многофазные и многоуровневые электронно-ключевые преобразователи часто создают с помощью однотипных ячеек.

Для управления ключами ячейки используются платы управления с микроконтроллером. Эти платы подключаются к плате центральной системы управления. Это может быть как отдельная плата, так и одна из плат управления ячейкой. Между платой центральной системы управления и платами ячеек осуществляется связь по интерфейсу RS-485 или CAN с шинной топологией. Одна линия связи используется для передачи параметров системы управления, чтения переменных состояния и управления ячеек. Другая линия связи используется для передачи ячейкам значений формируемых напряжений. Мультиплексирование этих линий в одну не рекомендуется в связи со сложностью реализации и относительно низким быстродействием указанных интерфейсов.

Отдельная линия используется для передачи сигнала готовности между ячейками и в центральную систему управления. Данные линии соединяются в кольцо следующим образом. Принятый ячейкой сигнал готовности объединяется с сигналом готовности ячейки при помощи микросхемы логического «И», а затем передается в следующую ячейку. Объединять эти сигналы с помощью микроконтроллера не рекомендуется, так как при сбоях в работе микроконтроллера он не сможет передать аварийное состояние, которое принято с предыдущей ячейки, в следующую ячейку. Состояние готовности также должно передаваться по интерфейсам связи в центральную систему управления.

После исчезновения аварийного состояния во всех ячейках центральный микроконтроллер принудительно устанавливает на некоторое время выходной сигнал готовности вне зависимости от значения входного сигнала на линии готовности. Это необходимо для сброса аварийного состояния линии готовности. В большинстве случаев необходимо осуществлять синхронизацию ШИМ между ячейками. Сигнал синхронизации формируется микроконтроллером центральной системы управления с помощью блока формирования ШИМ. Микроконтроллеры ячеек принимают этот сигнал с помощью блока сравнения и захвата. Для передачи сигнала используется интерфейс RS-422.

Некоторые современные микроконтроллеры имеют вход и выход для синхронизации ШИМ. Использовать их не рекомендуется в связи с низкой помехозащищенностью и невозможностью программной предобработки принятого сигнала синхронизации. В электрических преобразователях большой мощности все рассмотренные линии связи должны быть реализованы с помощью оптоволоконна.

В системе управления электрическим преобразователем должна быть предусмотрена возможность подключения датчиков температуры. Схема для подключения датчиков температуры может быть реализована как на общей плате системы управления, так и в виде отдельной платы. Для подключения термометров сопротивления используют двухпроводную, трехпроводную и четырехпроводную схемы. Не рекомендуется использовать двухпроводную схему подключения, поскольку она не учитывает сопротивление проводов, которыми датчик подключен к системе управления. Четырехпроводная схема подключения позволяет исключить влияние сопротивления проводов на измерение температуры. Обычно провода имеют примерно равные сопротивления, и их разницу можно не учитывать. В этом случае достаточно использовать трехпроводную схему подключения.

Поскольку термометры сопротивления имеют небольшой температурный коэффициент сопротивления, необходимо обеспечить высокую точность измерений. Стандартные АЦП, входящие в микроконтроллер, обычно не позволяют достичь требуемой точности. Поэтому для измерения температуры необходимо использовать сигма-дельта АЦП в виде отдельной микросхемы, подключенной к микроконтроллеру через микросхему гальванической развязки. Также для измерения необходимы два источника опорного тока. В некоторые типы АЦП они уже встроены. В противном случае их нужно установить в виде отдельных микросхем. Обычно данная схема позволяет подключить только один термометр сопротивления.

Для подключения большего числа термометров сопротивления рекомендуется использовать аналоговые мультиплексоры. Нужно выбирать аналоговый мультиплексор с малой максимально допустимой разницей сопротивлений между его каналами. Для измерения сопротивления терморезисторов можно использовать стандартные АЦП. Использовать АЦП, встроенные в микроконтроллер, не рекомендуется, так как при этом будет отсутствовать гальваническая развязка между микроконтроллером и терморезистором. Кроме того, количество доступных аналоговых входов микроконтроллера обычно невелико. Поэтому измерение сопротивления терморезисторов осуществляется с помощью отдельной микросхемы АЦП, соединенной с микроконтроллером через микросхему гальванической развязки. Также для измерения температуры с помощью рассмотренных выше датчиков

можно использовать готовые промышленные модули. Подключение системы управления к таким модулям обычно осуществляется с помощью интерфейсов RS-485 или CAN.2.1.4.

Быстродействие современных микроконтроллеров позволяет использовать адаптивные, идентификационные, нейросетевые и другие алгоритмы, требующие выполнения большого количества операций за заданный малый промежуток времени. При этом необходимо наличие в микроконтроллере блока для выполнения арифметических операций с плавающей запятой. Тенденция к повышению быстродействия микропроцессоров позволит в более полном объеме решать задачи идентификации и прогнозирования состояния элементов системы управления и преобразователя электрической энергии.

В последние годы все больший интерес приобретают многоуровневые импульсные преобразователи напряжения, позволяющие реализовывать мощные электроприводы, которые находят применение, например, в системах электродвижения судов, в частности, ледоколов. При создании систем управления для многоуровневых преобразователей обычно используется несколько микроконтроллеров. Связь таких микроконтроллеров следует выполнять по оптическому интерфейсу с целью устранения влияния помех и повышения быстродействия. С целью сокращения числа соединений приоритетные и другие данные, сигналы синхронизации и аварии нужно передавать не по нескольким, а по одной линии в каждом направлении. Для такой схемы достаточно использовать элементарные и достаточно просто импортозамещаемые логические микросхемы, и нет необходимости в использовании для этой цели ПЛИС.

Заключение

В рамках импортозамещения последние годы характеризуются широким использованием микропроцессорного управления широтно-импульсной модуляцией в электроприводах с импульсными преобразователями напряжения. Это позволяет добиться высоких показателей качества электроприводов, включая минимизацию дисперсии тока в нагрузке и, как следствие, снижение пульсаций электромагнитного момента приводного двигателя.

В статье дан анализ современного состояния микропроцессорного управления преобразователями электрической энергии. Раскрыты

аппаратные и программные особенности построения таких систем управления. Даны рекомендации по импортозамещению и практической реализации таких систем управления. Рассмотрены перспективы микропроцессорного управления импульсными преобразователями напряжения в составе автоматизированных электроприводов.

Библиографический список

1. Çetin, N.O. Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters / N.O. Çetin, A.M. Hava // *Electrical and Electronics Engineering – ELECO 2009. International Conference on Publication Year. – 2009. – P. I447–I451.*
2. Андриянов, А.И. Сравнительная характеристика различных видов ШИМ по топологии областей существования периодических режимов / А.И. Андриянов, Г.Я. Михальченко // *Электричество. – 2004. – № 12. – С. 46–54.*
3. Коротков, А.А. Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов. – Иваново: Изд-во Иванов. гос. энергетич. ун-та им. В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
4. Использование пространственно-векторной ШИМ с переменной частотой модуляции в многоуровневых инверторах систем прецизионного электропривода / В.С. Томасов, А.А. Усольцев, Д.А. Вертгел, К.М. Денисов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 355–363.*
5. Generalised sinusoidal PWM with harmonic injection for multi-phase VSIs / A. Iqbal, E. Levi, M. Jones, S. Vukosavic // *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Conf. PESC, Jeju, Korea. – 2006. – P. 2871–2877.*
6. Holmes, D.G. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / D.G. Holmes, T.A. Lipo. – New-York: Wiley-IEEE Press, 2003. – 734 p.
7. Hava, A.M. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm / A.M. Hava, R.J. Kerkman, T.A. Lipo // *IEEE Applied Power Electronics Conference Atlanta, Georgia. – February 1997. – Vol. 2. – P. 886–891.*
8. Обухов, С.Г. Широтноимпульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин, Д.Е. Кондратьев // *Электричество. – 2008. – № 8. – С. 23–31.*

9. Чаплыгин, Е.Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения / Е.Е. Чаплыгин, С.В. Хухтиков // *Электричество*. – 2011. – № 5. – С. 53–61.

10. Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, А.А. Коротков, Д.А. Монов // Тр. VII Междунар. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизир. электроприводу (АЭП-2012). – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2012. – С. 109–113.

11. Андриянов, А.И. Сравнительная характеристика различных видов ШИМ по топологии областей существования периодических режимов / А.И. Андриянов, Г.Я. Михальченко // *Электричество*. – 2004. – № 12. – С. 46–54.

12. Баховцев, И.А. Сравнительный анализ выходного напряжения АИН с синусоидальной и векторной ШИМ / И.А. Баховцев // *Техническая электродинамика. Темат. вып. СЭЭ*. – Киев, 2008. – Ч. 3. – С. 63–66.

13. Баховцев, И.А. Обобщенный анализ выходной энергии многофазных многоуровневых инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // *Электричество*. – 2016. – № 4. – С. 26–33.

14. Гуськов, В.О. Сравнительный анализ математических описаний и методов широтно-импульсной модуляции / В.О. Гуськов, А.В. Лавин // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология*. – 2023. – № 3. – С. 74–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81

15. McGrath, B.P. An analytical technique for the determination of spectral components of multilevel carrier-based PWM methods / B.P. McGrath, D.G. Holmes // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2002. – Vol. 49, № 4. – P. 847–857.

16. Саушев, А.В. Перемодуляция в трехфазных электронно-ключевых мостах системы преобразователь–электродвигатель / А.В. Саушев, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко // *Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та*. – 2024. – № 4. – С. 87–94.

17. Саушев, А.В. Двухфазная синусоидальная широтно-импульсная модуляция с перемодуляцией в системе преобразователь–электродвигатель / А.В. Саушев, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко // *Вестник Северо-Кавказ. федерал. ун-та*. – 2024. – № 4. – С. 39–48.

18. Васильев, Б.Ю. Обеспечение режима перемодуляции и повышение эффективности преобразования энергии в силовых автономных инверторах электроприводов / Б.Ю. Васильев // *Электричество*. – 2015. – № 6. – С. 47–55.

19. Белоусов, И.В. Оптимальная широтно-импульсная модуляция в системе управления электроприводом / И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, А.В. Саушев // *Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 463–471.

20. Belousov, I.V. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation / I.V. Belousov, V.F. Samoseiko, A.V. Saushev // *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness. – INTERAGROMASH. – 2022. – Vol. 363. – 1025 p.*

21. Якимов, Р.И. Стенд для экспериментальных исследований систем управления преобразователем Кука / Р.И. Якимов, Е.А. Аксенов // *Сборник науч. тр. Новосибир. гос. техн. ун-та*. – 2016. – № 4 (86). – С. 131–143.

22. Бычков, Е.В. Аппаратная поддержка микроконтроллерных систем управления в выпрямительно-зарядных устройствах и инверторах / Е.В. Бычков, Е.В. Васенин, М.Е. Степанов // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. – 2019. – № 12 (125). – С. 36–40.

23. Бережнов, Д.А. Перспективные алгоритмы управления в электроприводе с многоуровневым преобразователем частоты для электропоездов серии ЭС1В/И / Д.А. Бережнов, Ю.М. Иньков // *Практическая силовая электроника*. – 2022. – № 2 (86). – С. 49–51.

24. Бочкарев, И.В. Микропроцессорное устройство управления по системе «непосредственный преобразователь частоты – АД» электропривода экскаватора / И.В. Бочкарев, И.Ш. Кадыров // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2007. – № 5. – С. 25–30.

25. Кадыров, И.Ш. Микропроцессорная система импульсно-фазового управления тиристорного преобразователя / И.Ш. Кадыров, Т.С. Борукеева, Г.Д. Матекова // *Известия Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова*. – 2017. – № 1 (41). – С. 36–43.

26. Грудинин, В.С. Моделирование микропроцессорного управления частотным преобразователем асинхронного двигателя / В.С. Грудинин, В.М. Сбоев, В.И. Лалетин // *Advanced Science*. – 2017. – № 1 (5). – С. 23.

References

1. Çetin N.O., Hava A.M. Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters. *Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009. International Conference on Publication Year*, 2009, pp. I447-I451.
2. Andriianov A.I., Mikhal'chenko G.Ia. Sravnitel'naia kharakteristika razlichnykh vidov ShIM po topologii oblastei sushchestvovaniia periodicheskikh rezhimov [Comparative characteristics of various types of PWM according to the topology of the regions of existence of periodic modes]. *Elektrichestvo*, 2004, no. 12, pp. 46-54.
3. Korotkov A.A., Vinogradov A.B. Novyi algoritm vektornogo formirovaniia ShIM vysokovol'tnogo preobrazovatel'ia s minimizatsiei kommutatsionnykh poter' [A new algorithm for vector generation of PWM of a high-voltage converter with minimization of switching losses]. *Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet*, 2008, 298 p.
4. Tomasov V.S., Usol'tsev A.A., Vertgel D.A., Denisov K.M. Ispol'zovanie prostranstvenno-vektornoj ShIM s peremennoi chastotoi moduliatsii v mnogourovnevnykh invertorakh sistem pretsizionnogo elektroprivoda [The use of space-vector PWM with variable modulation frequency in multi-level inverters of precision electric drive systems]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 355-363.
5. Iqbal A., Levi E., Jones M., Vukosavic S. Generalised sinusoidal PWM with harmonic injection for multi-phase VSIs. *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Conf. PESC, Jeju, Korea*, 2006, pp. 2871-2877.
6. Holmes D.G., Lipo T.A. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice. New-York: Wiley-IEEE Press, 2003, 734 p.
7. Hava A.M., Kerkman R.J., Lipo T.A. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm. *IEEE Applied Power Electronics Conference Atlanta, Georgia*. February 1997, vol. 2, pp. 886-891.
8. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondrat'ev D.E. Shirotnoimpul'snaia moduliatsiia v trekhfaznykh invertorakh napriazheniia [Pulse width modulation in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 8, pp. 23-31.
9. Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Shirotno-impul'snaia moduliatsiia s passivnoi fazoi v trekhfaznykh invertorakh napriazheniia [Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 5, pp. 53-61.

10. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Korotkov A.A., Monov D.A. Sravnitel'nyi analiz energeticheskikh pokazatelei algoritmov upravleniia vysokovol'tnym mnogourovnevym preobrazovatelem [Comparative analysis of energy parameters of control algorithms for high-voltage multilevel converter]. *Trudy VII Mezhdunarodnoi (XVIII Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2012)*. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2012, pp. 109-113.

11. Andriianov A.I., Mikhal'chenko G.Ia. Sravnitel'naia kharakteristika razlichnykh vidov ShIM po topologii oblastei sushchestvovaniia periodicheskikh rezhimov [Comparative characteristics of different types of PWM in the topology of the regions of existence of periodic regimes]. *Elektrichestvo*, 2004, no. 12, pp. 46-54.

12. Bakhovtsev I.A. Sravnitel'nyi analiz vykhodnogo napriazheniia AIN s sinusodal'noi i vektornoii ShIM [Comparative analysis of the output voltage of the AIN with sinusodal and vector PWM]. *Tekhnicheskaiia elektrodinamika. Temat. vyp. SEE*. Kiev, 2008, part 3, pp. 63-66.

13. Bakhovtsev I.A., Zinov'ev G.S. Obobshchennyi analiz vykhodnoi energii mnogofaznykh mnogourovnevnykh invertorov napriazheniia s shirotno-impul'snoi moduliatsiei [Generalized analysis of the output energy of multiphase multilevel voltage inverters with pulse-width modulation]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 4, pp. 26-33.

14. Gus'kov V.O., Lavin A.V. Sravnitel'nyi analiz matematicheskikh opisaniia i metodov shirotno-impul'snoi moduliatsii [Comparative analysis of mathematical descriptions and pulse width modulation methods]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 3, pp. 74-81. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81

15. McGrath B.P., Holmes D.G. An analytical technique for the determination of spectral components of multilevel carrier-based PWM methods. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 847-857.

16. Saushev A.V., Belousov I.V., Samoseiko V.F. Peremoduliatsiia v trekhfaznykh elektronno-kliuchevykh mostakh sistemy preobrazovatel'-elektroprivigatel' [Re-modulation in three-phase electronic key bridges of the converter–electric motor system]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2024, no. 4, pp. 87-94.

17. Saushev A.V., Belousov I.V., Samoseiko V.F. Dvukhfaznaia sinusoidal'naia shirotno-impul'snaia moduliatsiia s peremoduliatsiei v sisteme preobrazovatel'-elektrodivigatel' [Two-phase sinusoidal pulse width modulation with re-modulation in the converter-electric motor system]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2024, no. 4, pp. 39-48.

18. Vasil'ev B.Iu. Obespechenie rezhima peremoduliatsii i povyshenie effektivnosti preobrazovaniia energii v silovykh avtonomnykh invertorakh elektroprivodov [Providing a modulation mode and increasing the efficiency of energy conversion in power autonomous inverters of electric drives]. *Elektrichestvo*, 2015, no. 6, pp. 47-55.

19. Belousov I.V., Samoseiko V.F., Saushev A.V. Optimal'naia shirotno-impul'snaia moduliatsiia v sisteme upravleniia elektroprivodom [Optimal pulse width modulation in an electric drive control system]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 463-471.

20. Belousov I.V., Samoseiko V.F., Saushev A.V. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation. *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness. INTERAGROMASH*, 2022, vol. 363, 1025 p.

21. Iakimov R.I., Aksenov E.A. Stend dlia eksperimental'nykh issledovaniu sistem upravleniia preobrazovatelem Kuka [Stand for experimental studies of control systems of the Cook converter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 4 (86), pp. 131-143.

22. Bychkov E.V., Vasenin E.V., Stepanov M.E. Apparatnaia podderzhka mikrokontrollernykh sistem upravleniia v vypriamitel'no-zaryadnykh ustroistvakh i invertorakh [Hardware support for microcontroller control systems in rectifier chargers and inverters]. *Avtomatizatsiia i IT v energetike*, 2019, no. 12 (125), pp. 36-40.

23. Berezhnov D.A., In'kov Iu.M. Perspektivnye algoritmy upravleniia v elektroprivode s mnogourovnevnykh preobrazovatelem chastoty dlia elektropoezdov serii ES1V/I [Promising control algorithms in an electric drive with a multilevel frequency converter for electric trains of the ES1V series]. *Prakticheskaiia silovaia elektronika*, 2022, no. 2 (86), pp. 49-51.

24. Bochkarev I.V., Kadyrov I.Sh. Mikroprotssessornoe ustroistvo upravleniia po sisteme “neposredstvennyi preobrazovatel' chastoty - AD”

elektroprivoda ekskavatora [Microprocessor control device according to the "direct frequency converter - AD" system of the excavator electric drive]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2007, no. 5, pp. 25-30.

25. Kadyrov I.Sh., Borukeeva T.S., Matekova G.D. Mikroprotsessor-naia sistema impul'sno-fazovogo upravleniia tiristornogo preobrazovatel'ia [Microprocessor-based pulse-phase control system of a thyristor converter]. *Izvestiia Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I. Razzakova*, 2017, no. 1 (41), pp. 36-43.

26. Grudin V.S., Sboev V.M., Laletin V.I. Modelirovanie mikroprotsessornogo upravleniia chastotnym preobrazovatelem asinkhronnogo dvigatel'ia [Simulation of microprocessor control of an asynchronous motor frequency converter]. *Advanced Science*, 2017, no. 1 (5), 23 p.

Сведения об авторах

Саушев Александр Васильевич (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: saushev@bk.ru).

Белоусов Игорь Владимирович (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доцент кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: igor5.spb@yandex.ru).

Крюков Олег Викторович (Нижний Новгород, Российская Федерация) – доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, ООО «ТСН-электро».

About the authors

Alexander V. Saushev (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations" of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: saushev@bk.ru).

Igor V. Belousov (St. Petersburg, Russian Federation) – Associate Professor of the Department of "Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations" of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: igor5.spb@yandex.ru).

Oleg V. Kryukov (Nizhny Novgorod, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of Science, TSN-Electro LLC.

Поступила: 02.10.2024. Одобрена: 17.10.2024. Принята к публикации: 29.11.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Саушев, А.В. Теория и практика микропроцессорного управления импульсными преобразователями напряжения / А.В. Саушев, И.В. Белоусов, О.В. Крюков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 52. – С. 76–95. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.04

Please cite this article in English as:

Saushev A.V., Belousov I.V., Kryukov O.V. Theory and practice of microprocessor control of pulse voltage converters. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 52, pp. 76-95. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.04