

УДК 621.313

Чередник Ю. Н., Пащенко А. С., Ревякин Е. А., Квашнин В. О.

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, УПРАВЛЯЕМЫЙ ОТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Опыт индустриально развитых стран показывает, что при эффективной технической политике вопрос о том, куда направлять капиталовложения – на увеличение производства электроэнергии или на энергосбережение, в подавляющем большинстве случаев решается в пользу инвестиций в энергосбережение. Создание силовых полупроводниковых приборов с новыми свойствами и характеристиками позволило осуществлять преобразование электрической энергии в формах, наиболее удобных для ее электромеханического преобразования, что открыло широкие возможности для создания технически совершенных регулируемых электроприводов. В свою очередь использование достижений микропроцессорной и компьютерной техники принципиально изменило элементную базу, функциональные возможности систем управления электроприводами.

Частотное управление асинхронных электроприводов является наиболее экономичным способом плавного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя, т. к. во всем диапазоне регулирования двигатель работает с малой величиной скольжения ротора, сохраняет высокий коэффициент полезного действия и хорошую жесткость механических характеристик, может работать в двигательном и генераторном режиме [1].

Использование новых полупроводниковых приборов позволило принципиально изменить не только топологию силовой схемы инвертора, прежде всего автономный инвертор напряжения (АИН), но и принципы управления инверторами. Для АИН и автономного инвертора тока (АИТ) на полностью управляемых «высоковольтных ключах» применяются различные технологии широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – со «слежением» (релейного типа), программная – с избирательным подавлением высших гармоник, многоуровневая ШИМ, ШИМ в комбинации с амплитудно-импульсной модуляцией и т. п. [2].

Автономный инвертор напряжения получает питание от источника напряжения, т. е. от источника с малым внутренним сопротивлением (аккумуляторная батарея, выпрямитель с ёмкостным фильтром), на его выходе при переключении силовых полупроводниковых ключей генерируется переменное напряжение в форме последовательности разнополярных прямоугольных импульсов.

Первая гармоника такой последовательности должна соответствовать требуемому значению выходного напряжения. В этом случае для нагрузки – асинхронного электродвигателя – инвертор также является источником с малым внутренним сопротивлением, т. е. источником напряжения [3].

Целью данной работы является разработка и проектирование автономного инвертора напряжения для управления маломощным асинхронным электроприводом. Структурная схема системы управления электропривода представлена на рис. 1.

Функционально разработанный частотный преобразователь состоит из следующих частей: нерегулируемого выпрямителя сетевого напряжения; блока питания платы контроллера; блока платы управления; драйвера инвертора; собственно инвертора; связи с персональным компьютером по uart-интерфейсу и блоков гальванической развязки.

Блок управления реализован на микроконтроллере AT90PWM3, представляющем собой экономичный однокристальный микроконтроллер, достигающий производительности до 16 миллионов инструкций в секунду. Он предназначен для выполнения функций управления в понижающих/повышающих преобразователях постоянного напряжения, синхронными электрическими машинами на основе постоянных магнитов, трехфазными асинхронными электродвигателями и бесколлекторными электродвигателями постоянного тока.

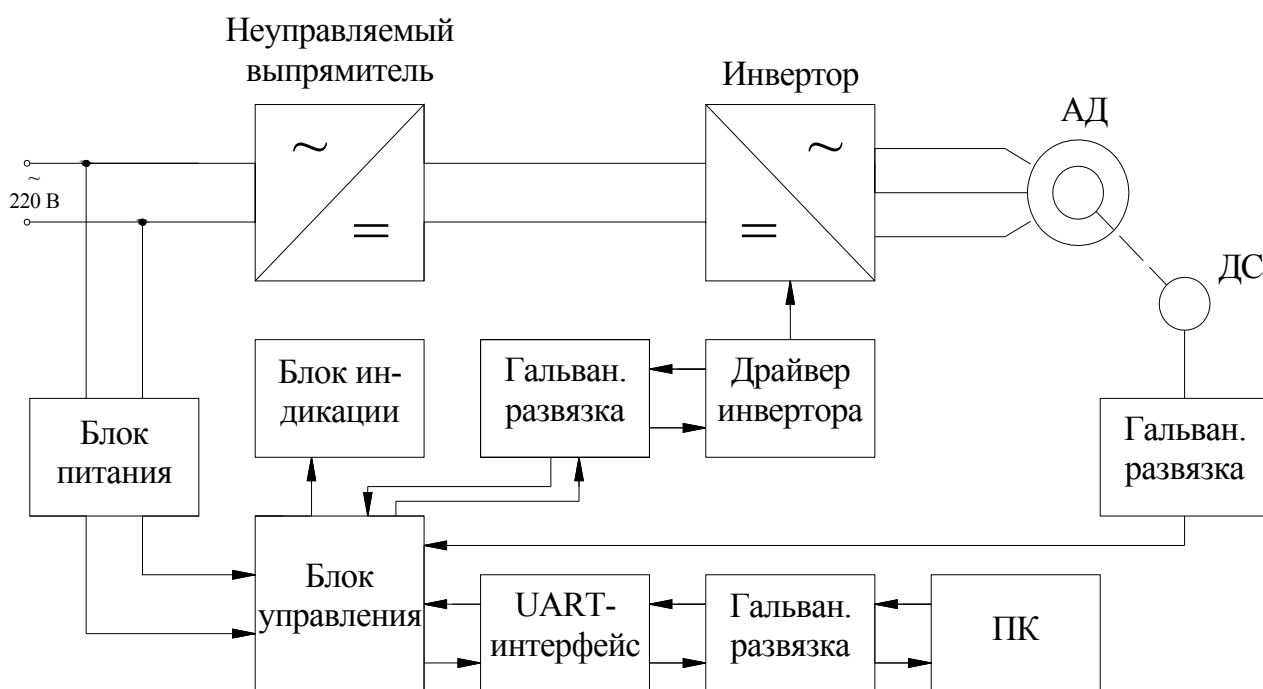


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Принципиальная схема блока управления на основе микроконтроллера AT90PWM3 представлена на рис. 2. Блок управления представляет собой микроконтроллер с набором элементов, необходимым для его функционирования. В схеме блока управления предусмотрены следующие гальванические развязки: блока управления с платой драйвера инвертора, интерфейса энкодера и UART-интерфейса для связи с персональным компьютером. UART-интерфейс обеспечивает соединение с компьютером для управления работой электропривода, а также отладки внутренней программы микроконтроллера.

Элементы C10, C11 и Z1 подключенные к выводам XTAL1 и XTAL2 микроконтроллера представляют собой тактовый генератор, необходимый для тактирования ядра микроконтроллера. Конденсаторы C1–C8 подавляют импульсные помехи по цепям питания микроконтроллера и микросхем гальванической развязки. Кнопка S1 и резисторы R3, R4 образуют схему сброса, необходимую при аппаратном зависании контроллера. Конденсатор C9 подавляет дребезг контактов кнопки S1.

Светодиоды D1, D2 индицируют работу микроконтроллера и возникновение ошибки. Резисторы R5, R6 ограничивают ток через светодиоды в допустимых для портов микроконтроллера пределах (20mA).

Элемент U2 – 74HC04 представляет собой НЕX-инвертор, инвертирующий логические уровни на выходах UN, WN и VN микроконтроллера, так как примененная в данной работе ревизия чипа микроконтроллера AT90PWM3 имеет недоработку фирмы-производителя, состоящую в отсутствии сдвига фаз на 180 градусов между выходными сигналами микроконтроллера управляющими верхними и нижними ключами инвертора.

Микросхемы гальванической развязки U1, U3, U5, U6 обеспечивают полную гальваническую развязку платы блока управления с внешними устройствами, тем самым обеспечивают безопасность микроконтроллера в случае возникновения аварийной ситуации во внешних цепях, а также в цепях связи платы управления с персональным компьютером.

Микросхема U1 – ADUM1201 представляет собой двухканальный двунаправленный цифровой изолятор. U3, U5, U6 – трехканальные однонаправленные цифровые изоляторы.

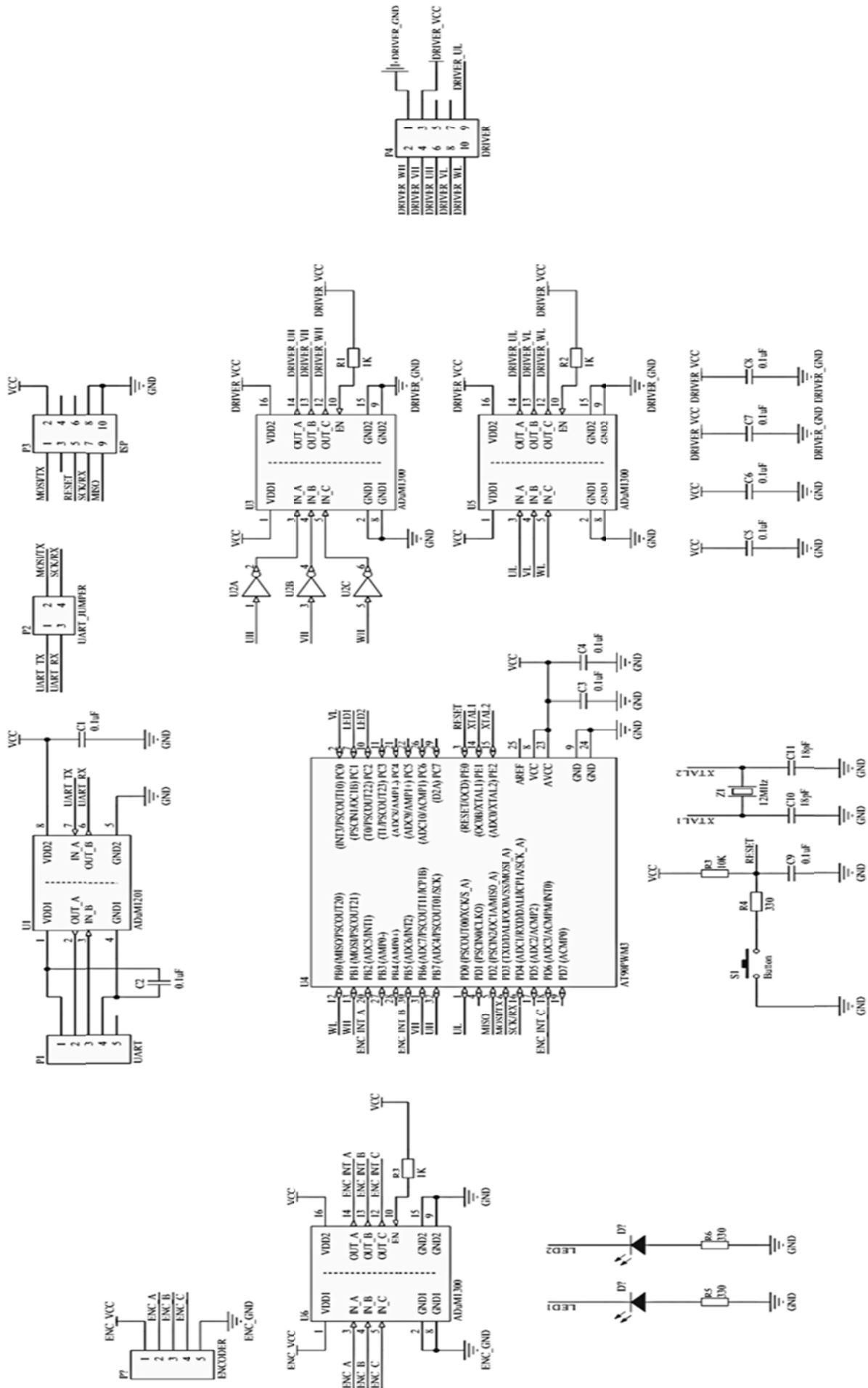


Рис. 2. Принципиальная схема блока управления

Питається блок микроконтроллера от сетевого трансформаторного блока питания обеспечивающего выходное напряжение 9 В постоянного тока и ток нагрузки до 1А, на плате микроконтроллера установлен стабилизатор напряжения LM7805, обеспечивающий стабилизированное напряжение питания контроллера 5 В.

В данной работе организован наиболее популярный алгоритмом управления трехфазным асинхронным электродвигателем – поддержанием постоянства отношения напряжение/частота (правило Костенко) и использованием синусоидальной широтно-импульсной модуляции [5].

Для согласования силовых ключей инвертора с микроконтроллером AT90PWM3 использована микросхема-драйвер 3-фазного моста IR2130 – высоковольтный, высокоскоростной драйвер МОП-транзисторов и IGBT-транзисторов с отдельными выходными каналами управления ключами верхнего и нижнего уровней.

Разработанная принципиальная схема инвертора на основе IR2130 представлена на рис. 3. В качестве ключевых транзисторов Т1-Т6 выбраны полевые транзисторы типа IRF740. На схеме элементы С21, С22, С11, С12, С14 и VDS1 образуют входной сетевой фильтр и выпрямитель. Резисторы R26 и R27 вместе с реле К1 и устройством задержки включения на транзисторе Т7 представляют собой схему «мягкого» включения инвертора в сеть, необходимую для ограничения тока зарядки конденсаторов С11 и С12 и подачи полного напряжения питания на транзисторы Т1-Т6 только после полного включения IR2130 и прекращения всех переходных процессов в инверторе.

На микросхеме U4 – TNY256 собран импульсный блок питания, обеспечивающий стабилизированное выходное напряжение 15 В для питания драйвера IR2130. Микросхема TNY256 представляет собой специализированный ШИМ-контроллер для создания импульсных блоков питания небольшой мощности с минимальным количеством навесных компонентов.

Цепочки С15-R30-С20 -R35 представляют собой RC-фильтры, улучшающие качество напряжения на двигателе и уменьшающие помехи создаваемые приводом. Плавкие вставки F1-F3 отключают устройство от питающей сети в случае аварийной ситуации.

Контроллер AT90PWM3 содержит следующие элементы: 8 кбайт внутрисистемно-программируемой флэш-памяти с поддержкой возможности чтения во время записи, 512 байт ЭСППЗУ, 512 байт статического ОЗУ, 53 линии ввода-вывода общего назначения, 32 рабочих регистра общего назначения, три контроллера силового каскада (PSC), два гибких таймера-счетчика с режимами сравнения и ШИМ, один УСАПП с режимом DALI (интерфейс управления освещением с цифровой адресацией), 11-канальный АЦП с двумя дифференциальными входными каскадами и программируемым усилением, 10-разр. ЦАП, программируемый сторожевой таймер с внутренним генератором, последовательный порт SPI, встроенная отладочная система и четыре программно настраиваемых экономичных режима.

Благодаря контроллерам силового каскада, встроенным в контроллер AT90PWM3, появилась возможность с помощью фазовой автоматической подстройки частоты (PLL) организовать высокую частоту 64/32 МГц. Форма сигналов PSCn00 и PSCn01 в режиме центрального ориентирования выравниваются по центру сигнала PSC счетчика.

Выходное напряжение АИН может регулироваться в пределах от нуля и до среднего действующего значения напряжения цепи постоянного тока, с помощью широтно-импульсной модуляции в инверсии отданной на верхний и нижний ключи. Среднее значение напряжения будет пропорционально коэффициенту заполнения верхнего ключа, которое соответствует отношению длительности импульса к длительности периода (0–100 %). Напряжение на выходе, в этом случае не будет гладкой кривой, а станет такой же прямоугольной формы как сигнал ШИМ, приложенный к верхнему ключу.

Если этот сигнал подать на фильтр низких частот (ФНЧ), то напряжение на выходе фильтра будет пропорционально коэффициенту заполнения верхнего ключа.

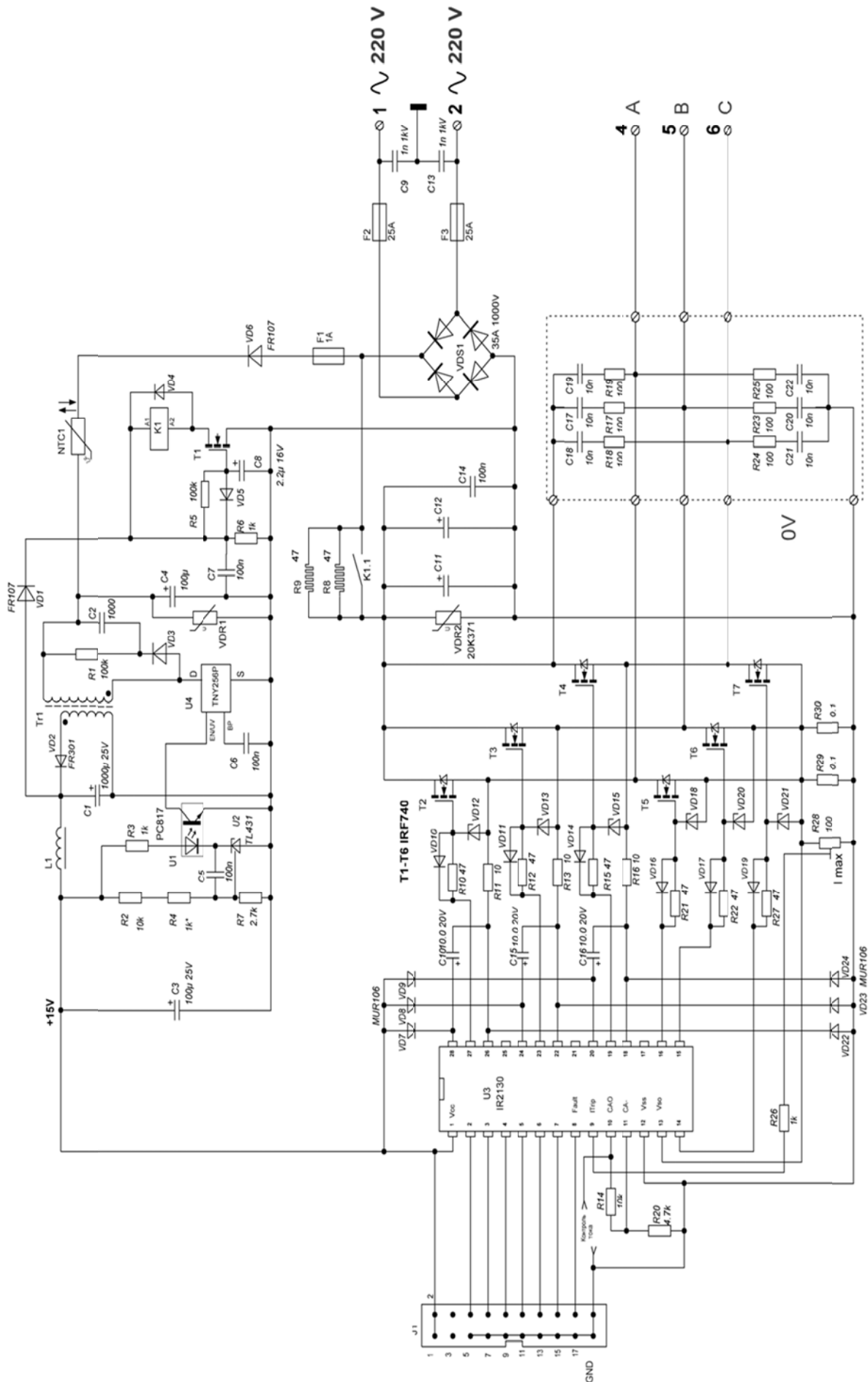


Рис. 3. Принципіальна схема інвертора на основі IR2130

По ряду причин, в устройства управления двигателем обычно не добавляют специальный фильтр низких частот. Во-первых, потому, что двигатель сам действует как ФНЧ. Индуктивность и сопротивление его обмоток создают R-L фильтр низких частот. Дополнительно, инерция ротора и нагрузки создают механический ФНЧ. Выбирая частоту ШИМ достаточно высокой, можно добиться отсутствия сколь-либо значимый пульсаций в скорости ротора. Во-вторых, токи, поданные на обмотки даже маленького двигателя, могут достигать нескольких ампер. Прохождение такого тока через фильтр, например R-C, привело бы к существенной потере мощности в самом фильтре и к нежелательной потере энергии.

Чтобы управлять трехфазным двигателем с помощью синусоидальных токов, для каждой фазы должны быть сгенерированы независимые напряжения. Драйвер для трехфазного двигателя обычно состоит из трех полумостов, по одному на каждый вывод двигателя. Каждый полумост состоит из двух ключей.

Переключение транзисторов не может быть мгновенным. На верхние и нижние ключи сигналы подаются в инверсии, то есть когда один ключ включается, другой ключ выключается. В течение этого перехода, будет краткий момент, когда один ключ закрылся ещё не полностью, а другой уже начал открываться. Возникает замыкание между источником напряжения питания и землей через транзисторы с очень малым сопротивлением, соответственно, ток может быть очень большим. Эта ситуация известна как сквозной ток, и её нужно избегать, так как велика вероятность выхода драйвера из строя, если не предусмотрена аппаратная защита.

Решением этой проблемы является добавление малого периода времени (паузы), которая образует мертвую зону, когда оба ключа выключены для каждого переключения ШИМ.

Принцип постоянства отношения напряжение/частота наиболее широко распространён в современных регулируемых асинхронных приводах [5]. Он может использоваться в приводах, которые не требуют высоких динамических характеристик, а необходимо только эффективно варьировать частотой вращения в полном диапазоне. Это позволяет использовать синусоидальную модель асинхронного электродвигателя в установившемся режиме, в которой величина магнитного потока статора пропорциональна отношению амплитуды и частоты напряжения статорной обмотки. Если данное отношение поддерживать на постоянном уровне, то постоянство будет сохранять и магнитный поток статора и, таким образом, вращающий момент будет зависеть только от частоты скольжения.

Когда частота статора снижается меньше определенной пороговой частоты, амплитуду напряжения необходимо поддерживать на определенном уровне для поддержания постоянства магнитного потока ротора. В противоположном случае, когда частота становится выше номинального значения, амплитуда напряжения останется на номинальном уровне из-за насыщения ключей инвертора. В этом случае поток ротора будет непостоянным и вращающий момент снижается.

Таким образом, скалярный принцип управления " V/f " заключается в подаче на обмотки электродвигателя 3-фазного синусоидального напряжения, амплитуда которого пропорциональна частоте, за исключением частот ниже порогового значения и выше номинального. Наклон графика зависимости " V/f " определяется по номинальным значениям напряжения питания и частоты питающей сети, а пороговая частота выбирается по проценту (5–10 %) от номинальной частоты.

Алгоритм управления трехфазным асинхронным электродвигателем использованный в данной работе реализованный в микроконтроллере AT90PWM3 представлен на рис. 4.

При организации синусоидальной ШИМ, табличные значения синуса сравнивают с выходом реверсивного счетчика (используется в качестве генератора треугольных импульсов). Когда выходное значение реверсивного счетчика перешагивает через данные значения, переключается соответствующий выход компаратора.

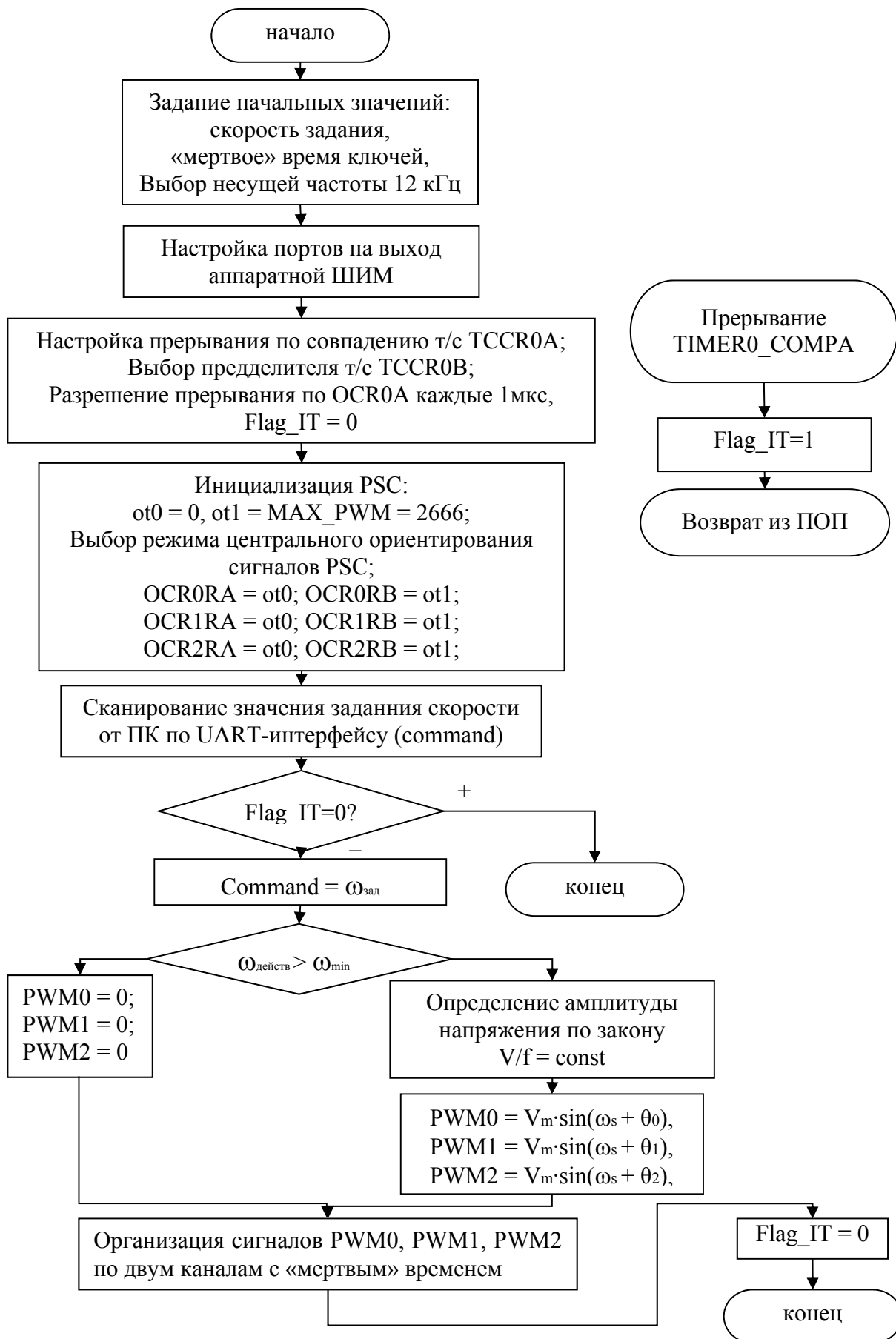


Рис. 4. Алгоритм управления трехфазным асинхронным электродвигателем

Как результат, в каждом ШИМ-канале генерируются импульсы, коэффициент заполнения которых пропорционален соответствующему значению напряжения статора. Поскольку данный реверсивный счетчик с тремя компараторами достаточно сложен для программной реализации, то такое устройство должно присутствовать в микроконтроллере в качестве встроенного аппаратного блока. Это и послужило причиной выбора микроконтроллера AT90PWM3, в состав которого входят три контроллера силового каскада (PSC).

Одним из способов решения задачи формирования с помощью инвертора трехфазной синусоидальной системы напряжений со сдвигом по фазе 120 градусов на обмотках статора является использование таблицы синусов. В этом случае частота поля статора ω_s определяет три дискретных времени интеграторов, которые вычисляют мгновенные значения фаз для каждого статорного напряжения:

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \theta_0[k-1] + \omega_s [k]T_s, \\ \theta_1 &= \theta_1[k-1] + \omega_s [k]T_s, \\ \theta_2 &= \theta_2[k-1] + \omega_s [k]T_s,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\theta_0[0] = 0$, $\theta_1[0] = -2\pi/3$, $\theta_2[0] = -4\pi/3$, а T_s – период дискретизации для алгоритма управления.

Если одно из этих значений становится больше 2π , то для поддержания области значений в диапазоне от 0 до 2π из результирующего значения вычитается 2π . Таблица синусов используется для вычисления трех напряжений, которые необходимо приложить к статору:

$$\begin{aligned}V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s [k]) \cdot \text{sita}(\theta_0[k]), \\ V_b[k] &= V_{sm}(\omega_s [k]) \cdot \text{sita}(\theta_1[k]), \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s [k]) \cdot \text{sita}(\theta_2[k]),\end{aligned}\quad (2)$$

где $V_{sm}(\omega_s)$ – амплитуда напряжения статора, определенная по принципу постоянства отношения напряжение-частота и $\text{sita}(\theta_i[k]) = \sin(\theta)$. Таблица синусоиды имеет значения синусоиды в диапазоне от 0 до $\pi/2$.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложен вариант реализации автономного инвертора напряжения для управления асинхронным электроприводом с реализацией скалярного закона управления, поддерживающий постоянство соотношения напряжения и частоты. Для формирования питающего напряжения организована синусоидальная широтно-импульсная модуляция с высокой несущей частотой ШИМ 12 кГц на микроконтроллере AT90PWM3. Особое внимание в работе уделено организации защит: защиты от пиковых токов, гальванических развязок, защит от сквозных токов в инверторе. Приведенная методика является основой для разработки и построения более сложных систем управления асинхронными электроприводами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шавьолкін О. О. *Перетворювальна техніка: навчальний посібник* / О. О. Шавьолкін, О. М. Наливайко ; під заг. ред. О. О. Шавьолкіна. – Донецьк–Краматорськ : ДДМА, 2003. – 326 с.
2. Лазарев Г. Б. *Инверторы преобразователей для частотно-регулируемых электроприводов* / Г. Б. Лазарев // *Новости электротехники*. – 2005. – № 2 (23).
3. Квашин В. О. *Разработка и исследование регулируемого асинхронного электропривода на основе преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией* / В. О. Квашин, Ю. Н. Черодник // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – Випуск 11(186). – С. 174–177.
4. *Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями* / В. Г. Бичай, Д. М. Пиза, Е. Е. Потапенко, Е. М. Потапенко // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2001. – № 1. – С. 138–144.
5. *Управление асинхронным электродвигателем переменного тока по принципу постоянства V/f и обычного ШИМ-управления [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/app/micros/avr/AVR494.htm>.