



## УПРАВЛЕНИЕ БЕЗДАТЧИКОВЫМИ ПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, В. Ф. СЕМИКИН, канд. техн. наук, Л. Ф. СУШИЙ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны схемы управления реверсивных двигателей постоянного тока со стабилизацией скорости по электродвижущей силе. Разработан микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод, отличающийся жесткими нагрузочными характеристиками, отсутствием коммутирующих контактов для реверса, высокой надежностью, возможностью точного задания скорости до пуска двигателя.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, двигатель постоянного тока, стабилизация скорости, бездатчиковый привод, тиристорный регулятор, транзисторный регулятор, микропроцессор, цифровое управление

Электроприводы являются неотъемлемой частью практически всех сварочных установок для дуговой сварки. Это прежде всего привод подачи электродной проволоки, приводы перемещения сварочной тележки, поперечных колебаний сварочной головки, позиционирования сварочной головки и др. В управляемых электроприводах наибольшее распространение получили двигатели постоянного тока. По сравнению с асинхронными двигателями переменного тока в них гораздо проще управлять скоростью и они имеют существенно меньшие габариты. Кроме того, асинхронные двигатели переменного тока выпускают, как правило, на напряжение питания 220 В и выше, что согласно правилам техники безопасности [1] позволяет использовать их в стационарных и передвижных автоматах. Исключительными массогабаритными и регулировочными характеристиками отличаются современные бесконтактные синхронные машины. Однако и они, и системы их управления имеют очень высокую стоимость.

К приводам подачи электродной проволоки сварочных полуавтоматов предъявляют следующие требования: диапазон регулирования частоты вращения не менее 1:10; стабильность установленной частоты вращения независимо от колебаний напряжения сети +5...+10% и момента нагрузки на валу 0...100% не хуже ±10% [2]. Приводы для сварки с импульсной подачей проволоки, поперечного периодического перемещения сварочной головки, системы автоматического регулирования напряжения сварки неплавящимся электродом и систем автоматического слежения за стыком должны отличаться существенно большим диапазоном регулирования скорости и предельным воздействием.

Такие характеристики можно получить только при использовании систем управления с отрицательной обратной связью по частоте вращения двигателя. Наилучшие результаты получены у систем с датчиком скорости вращения электродвигателя — тахогенератором постоянного или переменного тока, импульсным оптическим датчиком или датчиком, основанным на эффекте Холла. К сожалению, датчики скорости сложны, дороги и не всегда есть физическая возможность их установить. Например, популярные двигатели Д90 и Д25 Киевского ОАО «Артем-контакт» не позволяют подсоединить датчик скорости к валу с противоположной к редуктору стороны двигателя.

В простейших приводах в качестве сигнала обратной связи используют напряжение тахометрического моста [3, 4], основным недостатком которого является его низкая точность. Реально напряжение тахометрического моста пропорционально не скорости двигателя, а напряжению питания и току двигателя. Такая система эквивалентна системе с отрицательной обратной связью по напряжению питания двигателя и положительной обратной связью по нагрузке (току). Наиболее негативным свойством системы является то, что обратная связь по току является положительной и ее увеличение для повышения жесткости нагрузочной характеристики двигателя приводит к неустойчивости системы. В результате в приводах с обратной связью по сигналу тахометрического моста никогда не удастся получить жесткие характеристики привода, как в системах с датчиками скорости. Соответственно сужается и диапазон регулирования скорости двигателя.

Существенно лучшие результаты показывают бездатчиковые системы с обратной связью по электродвижущей силе (ЭДС) обмотки якоря двигателя [5]. Как известно, ЭДС составляет [6]

$$E_a = C_e n \Phi,$$

где  $C_e$  — конструктивный параметр двигателя;  $\Phi$  — поток возбуждения;  $n$  — скорость вращения

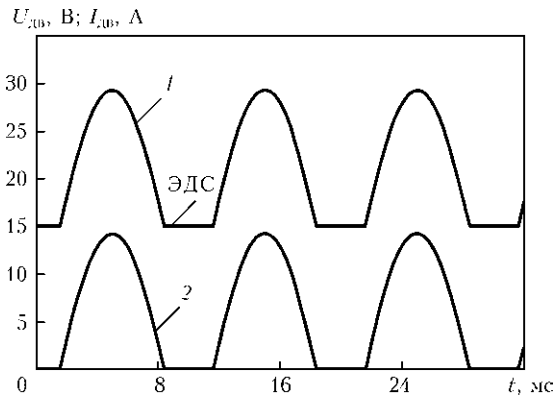


Рис. 1. Осциллограммы напряжения  $U_{дв}$  (1) и тока  $I_{дв}$  (2) двигателя, питаемого от двухполупериодного выпрямителя переменного напряжения с частотой 50 Гц

вала двигателя. Таким образом, ЭДС двигателя не хуже машинного тахометра характеризует скорость двигателя. Проблема состоит в том, как измерить ЭДС.

Значение ЭДС можно измерить, если перевести двигатель в режим генератора, отключив его от источника питания. При кратковременном отключении питания двигатель по инерции продолжает вращаться, а следовательно, напряжением на якоре является ЭДС. Если двигатель питается от регулируемого источника постоянного тока, то система управления должна периодически отключать питание и в образовавшейся паузе измерять напряжение на двигателе. При питании двигателя от выпрямленного однофазного напряжения сети двигатель значительную часть полупериода напряжения сети работает в режиме генератора. Это происходит, когда ЭДС двигателя больше мгновенного напряжения источника питания (рис. 1).

**Тиристорный бездатчиковый привод.** Для проверки принципа регулирования скорости по ЭДС двигателя тиристорного привода создан макет аналоговой системы управления, принципиальная схема которого приведена рис. 2.

Регулятор испытывали с коллекторным двигателем  $M$  постоянного тока типа Д90 мощностью 130 Вт. Питание двигателя производится от управляемого двухтактного выпрямителя на оптронных тиристорах  $VD1, VD2$ . Выпрямитель питается от понижающего трансформатора  $T1$ .

Напряжение якоря двигателя после резистивного делителя  $R1, R2$  поступает на повторитель  $DA2$ , а с его выхода — на аналоговый ключ  $DA4$ , который управляется выходным напряжением компаратора  $DA3$ . На инвертирующий вход компаратора с шунта  $R3$ , включенного в цепь якоря двигателя, подается напряжение, пропорциональное току якоря двигателя  $M$ . В результате, когда через якорь двигателя протекает ток и двигатель работает в режиме генератора, ключ  $DA4$  замкнут и конденсатор  $C2$  заряжается до напряжения, пропорционального ЭДС двигателя. Когда напряжение на якоре двигателя больше ЭДС, через якорь двигателя протекает ток и ключ  $DA4$  размыкается по команде от  $DA3$ . В результате напряжение на конденсаторе  $C2$  на протяжении всего времени остается пропорциональным ЭДС двигателя. После повторителя  $DA5$  это напряжение подается на регулятор  $DA1$ , выход которого соединен с регулятором фазового управления тиристорами на однопереходном транзисторе  $VT2$ . На основе транзистора  $VT1$  и выпрямителя  $VD3$  собрана схема синхронизации работы  $VT2$  с сетью. Задание скорости осуществляется потенциометром  $R4$ .

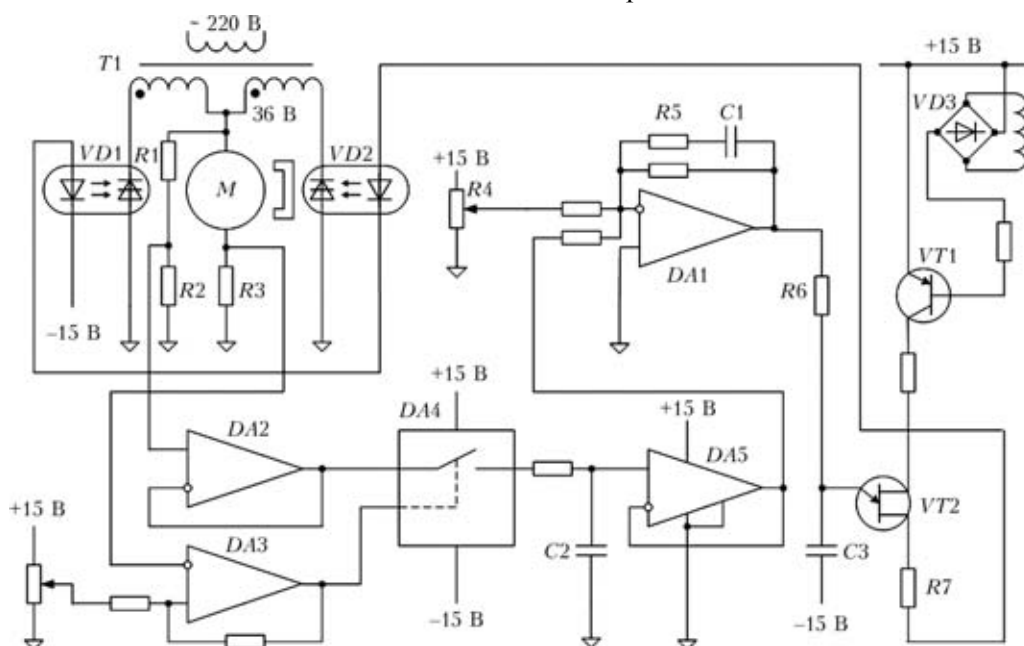


Рис. 2. Принципиальная схема регулирования скорости неререversible тиристорного привода с отрицательной обратной связью по ЭДС двигателя постоянного тока



Испытание макета регулятора показало высокую точность стабилизации скорости вращения двигателя в широком диапазоне изменения напряжения питающей сети и нагрузки на валу двигателя. Несомненным достоинством тиристорного регулятора является его предельная простота и надежность, он практически не накладывает ограничений на мощность и питающее напряжение двигателя. Его недостатком является низкий коэффициент мощности, особенно на большой скорости двигателя, обусловленный импульсным характером тока якоря двигателя. В результате действующее значение тока двигателя, определяющее его нагрев, существенно выше среднего значения тока, определяющего момент на валу двигателя.

**Микропроцессорный тиристорный бездатчиковый привод.** Использование микропроцессорной техники в тиристорном приводе позволяет упростить схему устройства и в то же время использовать более совершенные алгоритмы управления. Принципиальная схема микроконтроллерного тиристорного бездатчикового привода постоянного тока приведена на рис. 3.

Использование микроконтроллера позволило применить алгоритм реверсивного управления двигателем и совместить в одной системе, помимо функции управления, также функцию отображения в цифровом виде заданной и реальной скорости двигателя.

В качестве контроллера DD1 в данной разработке использован однокристальный микроконтроллер PIC16F873 фирмы «Microchip» (США).

Потенциометром  $R1$  задается скорость двигателя  $v_{зад}$ . Выходное напряжение потенциометра подается на один из входов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. На другой вход АЦП поступает напряжение с делителей  $R4$  и  $R5$ , которые подключены к якору двигателя  $M$ . В результате обработки микроконтроллером этого напряжения из него извлекается значение ЭДС двигателя.

Синхронизация с напряжением сети осуществляется схемой, собранной на основе  $R2, R3, VD1, DA1$ . В результате на входе  $RB7$  контроллера DD1 формируются импульсы синхронизации с сетью, запускающие по прерыванию подпрограмму управления приводом в начале каждого полупериода напряжения сети.

Выключателями  $Bn$  (вперед) и  $Hз$  (назад) формируются команды на вращения вала двигателя в соответствующем направлении. Кнопка  $Rs$  служит для ручного сброса микроконтроллера.

На выходах  $RD3$  и  $RD4$  контроллера формируются импульсы включения оптосимисторов  $VS1$  и  $VS2$ . Эти импульсы поступают на базы транзисторов  $VT1, VT2$ , к коллекторам которых присоединены излучающие диоды оптосимисторов. При включении транзисторов  $VT1, VT2$  включается соответствующий оптосимистор в направлении, определяемом выключателями  $Bn$  и  $Hз$ .

Оптосимисторы включены по однофазной схеме двухполупериодного реверсивного выпрямителя с питанием от трансформатора  $T1$ , вторичная обмотка которого имеет отвод от средней точки.

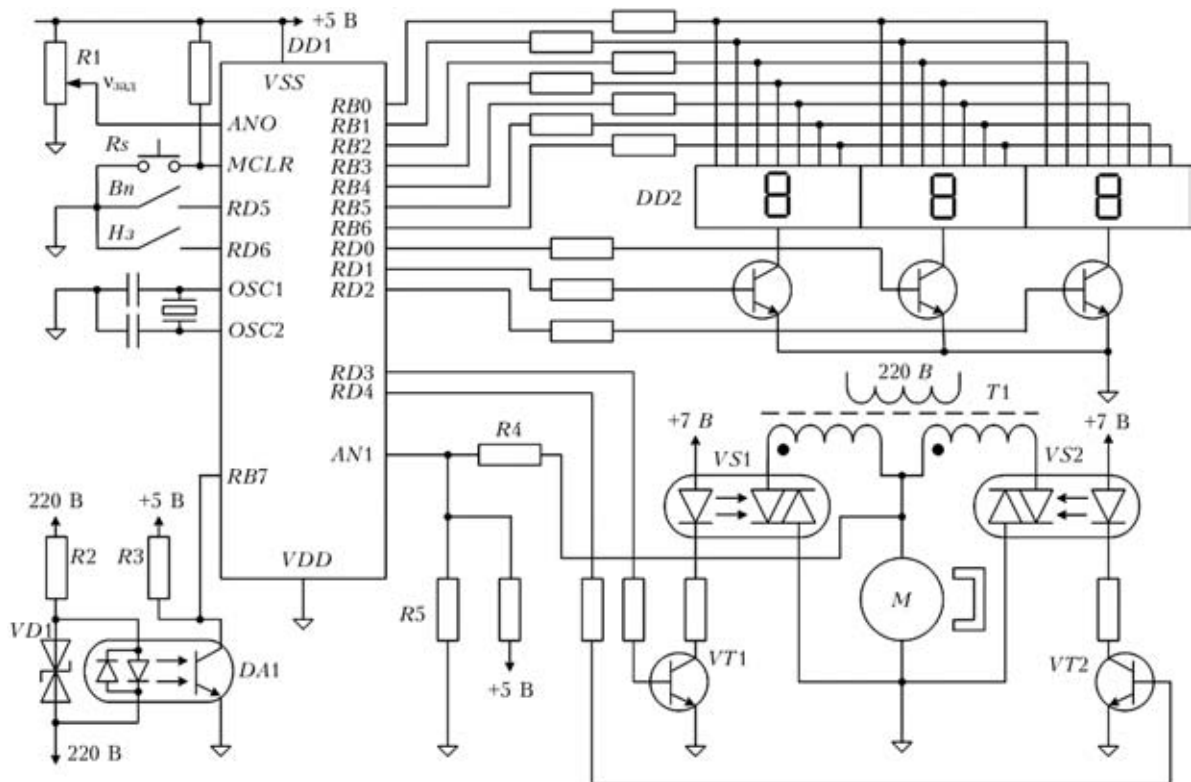


Рис. 3. Принципиальная схема микропроцессорного реверсивного тиристорного бездатчикового привода



Выпрямитель нагружен на якорь коллекторного двигателя постоянного тока  $M$  с возбуждением от постоянных магнитов.

Большое количество выходных регистров микроконтроллера PIC16F873 дополнительно к устройствам управления и регулирования позволяет подключать к нему трехразрядный семисегментный светодиодный индикатор  $DD2$  в режиме динамического управления. При разомкнутых выключателях  $Bn$  и  $Hз$  на индикатор выводится значение заданной скорости двигателя, а при включении вращения двигателя на индикатор — значение измеренной скорости двигателя. Статическая ошибка регулирования скорости отсутствует вследствие применения пропорционально-интегрального дискретного алгоритма управления, и скорость двигателя равна заданной, что позволяет с большой точностью задавать ее значение до пуска двигателя.

**Микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод.** Для питания низковольтных двигателей постоянного тока малой мощности наиболее целесообразно применение транзисторных широтно-импульсных преобразователей. Типовым решением является мостовая схема на силовых полевых транзисторах с изолированным затвором (MOSFET). Высокая частота широтно-импульсного преобразования обуславливает малые пульсации тока якоря двигателя, а работа транзисторов в режиме переключения обеспечивает их минимальный нагрев по сравнению с работой в линейном режиме. Для управления транзисторами моста выбран микроконтроллер PIC16F684, который идеально подходит для этих целей. Он имеет встроенные функции широтно-импульсной модуляции (ШИМ)-управления транзисторным мостом, токовую защиту в каждом периоде ШИМ, функции защиты от сквозных токов моста при реверсе двигателя, содержит флэш-па-

мять и встроенные средства внутрисхемного программирования, что облегчает отладку систем. Указанный микроконтроллер выпускается в 14-ножечном DIP корпусе. Упрощенная схема микропроцессорного бездатчикового транзисторного реверсивного привода постоянного тока приведена на рис. 4.

Силовая часть привода выполнена на мощных комплиментарных полевых транзисторах  $VT2$ – $VT5$ . Транзисторы  $VT3$ ,  $VT5$  имеют входы управления логического уровня и управляются непосредственно микроконтроллером. Находящиеся под высоким потенциалом транзисторы  $VT2$ ,  $VT4$  подключены к управляющим выходам микроконтроллера через маломощные согласующие транзисторы  $VT1$ ,  $VT6$ . Направление вращения двигателя задается переключателями  $Bn$  и  $Hз$ .

Для регулирования оборотов двигателя применяется ШИМ-управление, в котором среднее значение напряжения, подаваемого на двигатель, определяет его обороты, при этом изменяется в соответствии со скважностью импульсов питания. По сигналу переключателя  $Bn$  включаются транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , а на затвор транзистора  $VT5$  подается сигнал ШИМ. В результате двигатель вращается в рабочем направлении с заданной скоростью. При реверсе включаются транзисторы  $VT3$ ,  $VT4$ ,  $VT6$ .

Как отмечено выше, ЭДС обмотки якоря двигателя можно измерить в момент, когда на якорь не подается питание и двигатель, вращаясь по инерции, работает в генераторном режиме. Отключение питания производится в каждом периоде ШИМ, а следовательно, измерять ЭДС теоретически можно с частотой ШИМ. Реально это возможно только при сравнительно низкой частоте ШИМ, поскольку электрическая цепь якоря двигателя имеет довольно значительную индуктивность. При отключении питающего напряжения

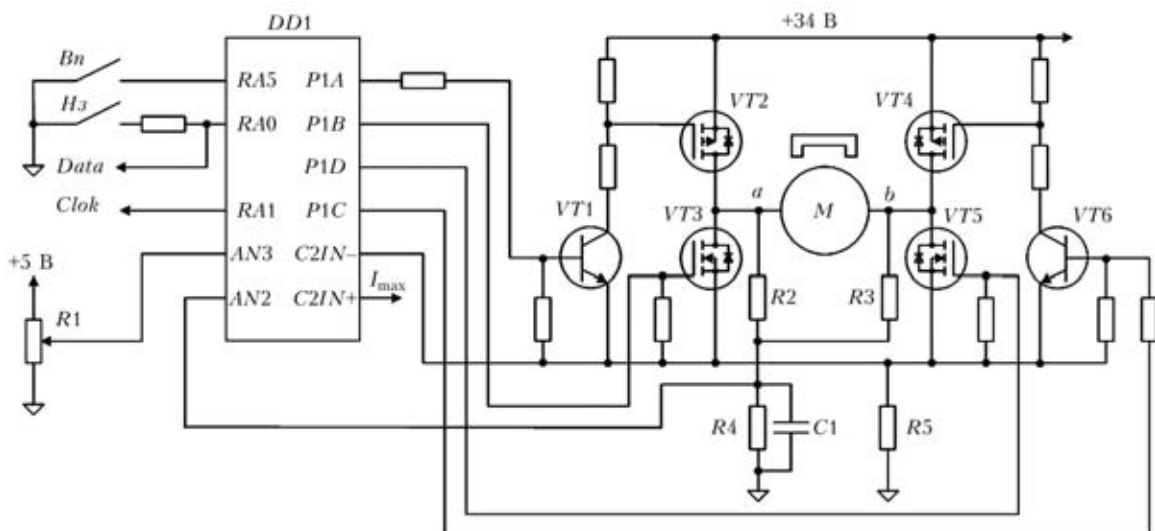


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема микропроцессорного бездатчикового реверсивного транзисторного привода



ток якоря начинает уменьшаться, что вызывает ЭДС самоиндукции, которая вычитается из ЭДС обмотки якоря. Если во время паузы питающего напряжения ток якоря уменьшается до нуля, то после этого на обмотке можно наблюдать ЭДС якоря. Таким образом, для измерения значений ЭДС двигателя с максимальной частотой, т. е. в каждом периоде ШИМ необходима относительно низкая ее частота, обеспечивающая прерывистый ток якоря двигателя. Кроме того, следует ограничить максимальный диапазон относительной длительности импульса ШИМ таким образом, чтобы длительность обязательной паузы ШИМ была достаточной для измерения ЭДС. В связи с этим применен метод периодического кратковременного прерывания питания двигателя при высокой частоте ШИМ.

Прерывания питания двигателя осуществляли в течение промежутка времени, составляющего приблизительно единицы миллисекунд, что достаточно для измерения и обработки значений ЭДС контроллером. Измеряемое значение ЭДС снимается с точек *a* или *b* моста (см. рис. 4) и подается на вход *AN2* (АЦП) микроконтроллера через делители *R2–R4*. На рис. 5 представлены осциллограммы ЭДС электродвигателя типа Д90 в периоды прерываний его питания. Это напряжение приведено к диапазону значений входного напряжения АЦП микроконтроллера (0...5 В).

Задание скорости двигателя осуществляется потенциометром *R1*, выходное напряжение которого подается на вход *AN3* (АЦП) микроконтроллера.

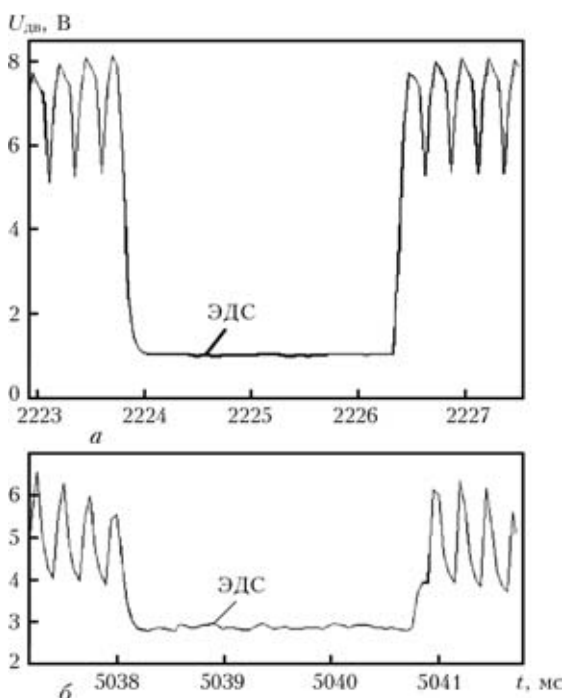


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на якоре электродвигателя при низкой (*a*) и высокой (*b*) скорости вращения

Цикл работы контроллера составляет 10 мс. При этом в течение 7,5 мс на транзисторы моста подается управление, в течение 2,5 мс транзисторы моста отключаются, и двигатель, вращаясь по инерции, работает в режиме генератора. За это время контроллер производит несколько измерений значений ЭДС, их усреднение и вычисление управляющих воздействий — длительности импульса ШИМ. Частоты ШИМ составляют 4 кГц.

С целью стабилизации скорости двигателя использован рекуррентный дискретный закон пропорционально-интегрального (ПИ) управления [6]. Для сокращения времени отработки программного уменьшения скорости отрицательное значение управляющего воздействия реализуется реверсом питающего напряжения двигателя путем соответствующего управления транзисторами моста.

На рис. 6 представлены переходные процессы привода с замкнутой обратной связью по ЭДС якоря двигателя при ступенчатом изменении задания оборотов. Как видно из рисунка, привод обрабатывает 30%-ные изменения задания скорости за 50...60 мс. Без обратной связи по скорости время разгона составляет 300 мс, а торможения — 750 мс.

Благодаря использованию ПИ-регулятора статическая ошибка регулирования скорости равна нулю при изменении как нагрузки двигателя, так и колебаний напряжения питающей сети. В результате диапазон регулирования составляет не менее 1:50, что более чем достаточно для сварочного оборудования.

Напряжение, пропорциональное току якоря, снимается с шунта *R5* и подается на инвертирующий вход *C2IN<sup>-</sup>* встроенного компаратора микроконтроллера. На неинвертирующий вход подается напряжение, пропорциональное заданному максимальному току якоря  $I_{max}$ . Если ток двигателя превышает  $I_{max}$ , питание двигателя отключается до следующего периода ШИМ. Таким образом осуществляется мгновенная защита транзисторов моста по току практически без дополнительных затрат на оборудование и программирование. В результате имеет место эффективное ограничение тока якоря во время переходных процессов при пуске, реверсе, резком изменении нагрузки двигателя и т. п.

Связь с цифровым индикатором скорость/задатчик осуществляется по последовательному интерфейсу  $I^2C$  путем передачи сигналов *Data* и *Clock* через выходы микроконтроллера *RA0* и *RA1*. Обновление информации на индикаторе происходит с интервалом 0,32 с. В режиме остановки на индикатор выводится заданное, а в режиме вращения — измеренное значение скорости, усредненное на интервале обновления информации.

Таким образом, для приводов нестационарных сварочных установок наибольшее распространение

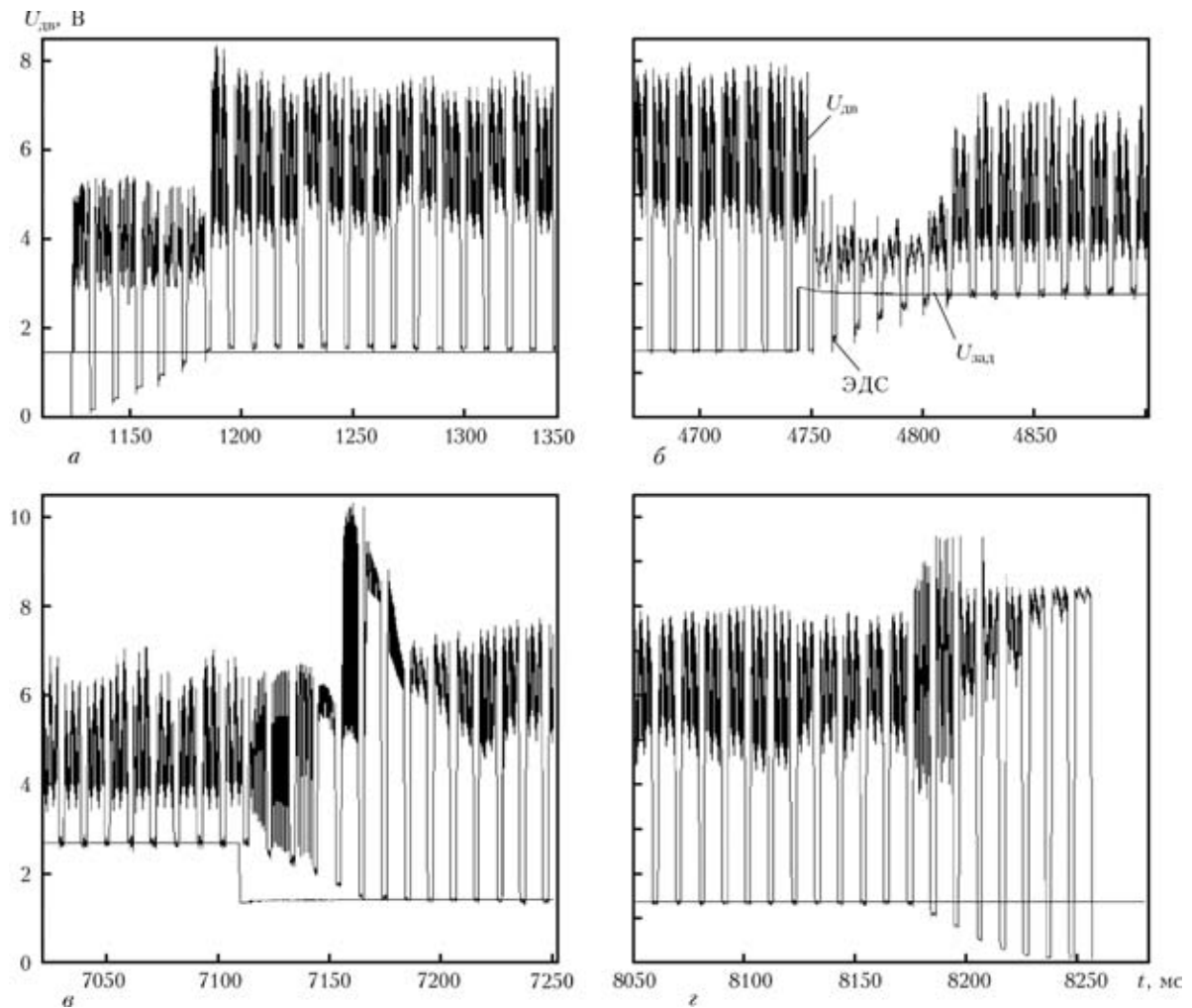


Рис. 6. Переходные процессы в замкнутой системе регулирования при пуске (а), ступенчатых увеличении (б) и уменьшении (в) задания скорости двигателя, а также при его остановке (з)

ние получили двигатели постоянного тока. Применение отрицательной обратной связи по скорости двигателя значительно улучшают стабильность привода, его статические и динамические характеристики. Использование ЭДС якоря двигателя в качестве сигнала отрицательной обратной связи по скорости существенно удешевляет и повышает надежность системы автоматического управления двигателем. Разработанный микропроцессорный транзисторный бездатчиковый привод отличается жесткими нагрузочными характеристиками, отсутствием коммутирующих контактов для реверса, высокой надежностью, малыми габаритами и стоимостью, возможностью точного задания скорости двигателя до его пуска.

Control schemes for reversing DC motors with a speed stabilised by the electromotive force are described. Microprocessor-based sensorless transistor drive was developed, characterised by constant loading characteristics, absence of switching contacts for a reverse gear, high reliability and possibility of precise setting of speed prior to starting the motor.

1. ГОСТ 12.2.007.8–75. Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности. — Введ. 01.01.78.
2. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
3. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Выща шк., 1986. — 296 с.
4. Ланкин Ю. Н., Масалов Ю. А., Байитрук Е. Н. Схема управления приводами сварочных установок // Автомат. сварка. — 2006. — № 7. — С. 57–59.
5. Low-cost bidirectional brushed DC motor control using the PIC16F684. AN 893 // www.microchip.com.
6. Пиотровский Л. М. Электрические машины: В 2 т. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — Т.1. — 512 с.
7. Изерман Р. Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 541 с.

Поступила в редакцию 20.10.2009