

О.Г. ГЕВОРГЯН, П.А. ШИРИНЯН, Г.С. КАРОЯН

**АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ  
ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СИНХРОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Представлены алгоритм и программное обеспечение системы импульсного управления скоростью синхронных двигателей, реализуемой посредством питания статорной обмотки импульсами тока непосредственно от сети через тиристорный коммутатор. Импульсы тока синхронизированы с положением ротора и регулируются по фазе и величине. Показано, что способ импульсного управления обеспечивает более высокие экономические и качественные характеристики по сравнению с известным частотным управлением.

**Ключевые слова:** скорость синхронного двигателя, импульсное управление, импульсы тока статора, датчик положения ротора, регулирование скорости, микроконтроллер.

**Введение.** Мощные синхронные двигатели (СД) находят широкое применение в различных областях промышленности. При этом достаточно остро стоит проблема их плавного пуска и управления скоростью вращения. В настоящее время изменение и регулирование скорости вращения СД выполняется путем их частотного управления с использованием специальных регулируемых тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) и напряжения, рассчитанных на мощность двигателя [1]. Данные устройства по своим массогабаритным, материалозатратным и стоимостным характеристикам соизмеримы с двигателем, а иногда и превосходят таковые. Это практически исключает саму возможность регулирования скорости СД посредством ТПЧ, особенно для мощных СД (мощностью порядка 1...20 МВт), в то время как именно для последних задача регулирования скорости, в том числе их надёжного пуска, наиболее актуальна.

**Постановка задачи и методы исследования.** Разработан принципиально новый способ импульсного управления скоростью СД, который обеспечивает их плавный управляемый пуск и изменение скорости при питании непосредственно от сети переменного тока практически без перегрузки машины и сети [2,3].

Массогабариты и стоимость оборудования импульсного пуска в несколько раз меньше, чем для известных устройств частотного пуска.

Импульсное управление скоростью синхронной машины выполняется по схеме рис.1. С помощью сигналов датчика положения ротора включаются тиристоры соответствующей группы тиристорного коммутатора (анодной или катодной) так, чтобы протекающий импульс тока данного направления создавал положительный вращающий момент. Отпирающие импульсы подаются на тиристоры в определенные моменты времени с определенной фазой – углом управления  $\alpha$ . По завершении импульса тока, когда ток достигает нулевого значения, тиристор естественным образом запирается.

Алгоритмически исключается прохождение тех импульсов тока, которые, попадая на стык разрешенного интервала, создают отрицательные средние импульсные моменты.

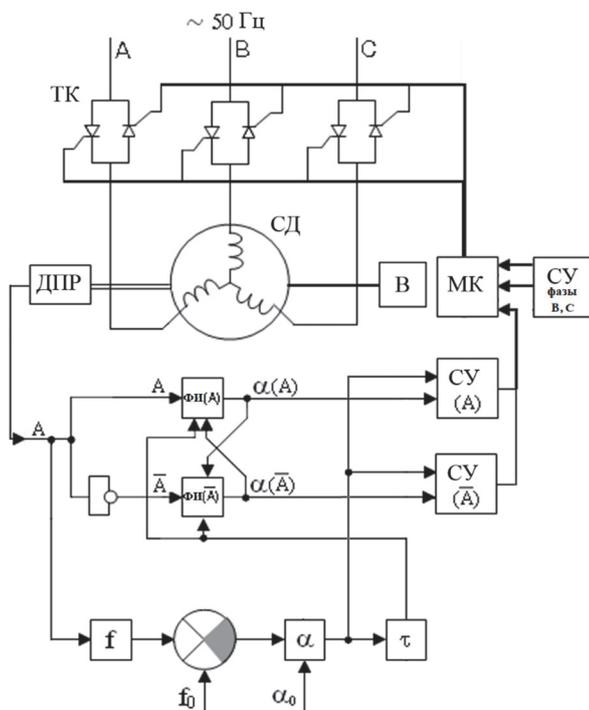


Рис.1. Схема импульсного пуска и управления скоростью синхронного двигателя:  
 СД – синхронный двигатель, ТК – тиристорный коммутатор, ФИ – формирователь импульсов, СУ – система управления фазами, МК – микроконтроллерное управление, ДПР – датчик положения ротора, В – возбудитель,  $f_0$  – установленная скорость,  $\alpha$  – угол управления,  $\tau$  – длительность импульса тока

При использовании в качестве коммутатора транзисторов IGBT часть импульса, создающего отрицательный момент вращения, исключается снятием сигнала управления с транзисторов коммутатора.

Рассмотрим процессы образования импульсных токов, самовозбуждения, вращающих моментов и регулирования скорости двигателя (рис.2). В цепи, образованной фазой сети, открытым тиристором и фазой обмотки якоря машины, действуют разность напряжения сети  $U_S$  с угловой частотой сети  $\omega$  (рис.2а) и напряжение противо-ЭДС машины  $U_M$  с угловой частотой вращения  $\omega_P$  (рис.2б).

Сигналами датчика положения ротора (рис.2в) включаются тиристоры соответствующей группы тиристорного коммутатора (анодной или катодной) так, чтобы импульс данного направления создавал положительный вращающий момент. Отпирающие импульсы тиристоров подаются в определенные моменты времени с определенной фазой – углом управления  $\alpha$  относительно нулевой фазы напряжения сети  $U_S$ . В момент подачи отпирающего импульса при положительном анодном напряжении тиристор открывается, и в цепи протекает ток. Поскольку в указанном контуре действует переменное напряжение – разность напряжения сети и противо-ЭДС машины, а тиристор получает единичный отпирающий импульс, то ток имеет импульсный характер (рис.2г).

Ток в контуре, протекая в момент времени  $t_H$ , достигает максимального значения в момент времени  $t_0$ , когда напряжение в контуре проходит нулевое значение, и становится равным нулю в момент времени  $t_K$ , когда среднее интегральное напряжение в контуре на интервале существования импульса становится равным нулю, т.е. когда выполняется условие

$$\int_{t_H}^{t_K} (U_S - U_M) dt = 0; \quad \text{или} \quad \int_{t_H}^{t_0} (U_S - U_M) dt = \int_{t_0}^{t_K} (U_S - U_M) dt. \quad (1)$$

В момент времени  $t_K$ , когда ток импульса достигает нулевого значения, происходит естественная коммутация тиристора (тиристор запирается).

Выражение импульса тока в обмотке статора определяется решением дифференциального уравнения процессов в контуре и имеет вид [4]

$$i_S(t) = \frac{1}{L_S} \int_{\alpha}^{t_K} [U_S \sin \omega i + U_M \sin(\omega_P t + \gamma_0)] dt, \quad (2)$$

где  $U_S$ ,  $U_M$  – амплитуда напряжения сети и противо-ЭДС двигателя;  $L_S$  – индуктивность обмотки статора;  $\alpha$  – угол управления;  $\gamma_0$  – начальное положение ротора.

При открытом состоянии тиристора тиристорного коммутатора, когда по обмотке статора протекают импульсные токи, напряжение сети, приложенное к обмотке статора, трансформируется в обмотку возбуждения ротора (рис.2д). Напряжение на обмотке возбуждения определяется выражением

$$U_b(t) = K (U_s - U_M) \cos \gamma(t) \Big|_{\alpha}^{t_k}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент трансформации напряжения  $U_s$  обмотки статора в обмотку ротора;  $\gamma(t)$  - текущее угловое положение ротора.

Это импульсное напряжение создаёт в обмотке возбуждения импульсы тока (рис.2е):

$$i_b(t) = \frac{1}{L_b} \int_{\alpha}^{t_k} U_b(t) dt, \quad (4)$$

где  $L_b$  - индуктивность обмотки возбуждения.

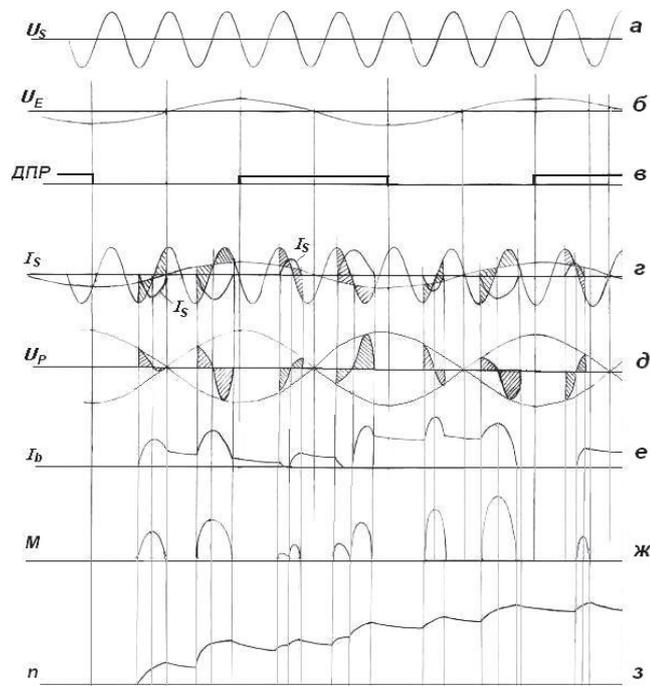


Рис.2. Диаграммы процессов при импульсном управлении:

а - напряжение сети, б – противо-ЭДС двигателя, в - сигнал датчика положения ротора, г - напряжение контура и ток в обмотке якоря, д - напряжение, наведённое в обмотку возбуждения, е - ток в обмотке возбуждения, ж - момент вращения, з - скорость вращения

На межимпульсном интервале, когда закрыты тиристоры тиристорного коммутатора и отсутствуют напряжения на обмотках статора и ротора, ток в обмотке возбуждения затухает в соответствии с постоянной времени обмотки возбуждения – она достаточно велика, поэтому затухание незначительно. Каждый

последующий импульс тока начинается и нарастает с текущего значения тока возбуждения. Таким образом, при импульсном управлении в двигателе возникает и поддерживается постоянный по направлению ток самовозбуждения, причём без использования внешних устройств возбуждения, обеспечивая создание вращающего момента.

Импульс тока, протекающего в обмотке статора, взаимодействуя с импульсом тока возбуждения в обмотке возбуждения, создаёт импульс вращающего момента (рис.2ж):

$$M(t) = C i_s(t) i_b(t) \sin \gamma(t), \quad (5)$$

где  $C$  - конструктивная постоянная машины;  $i_s(t)$ - функция импульса тока в обмотке статора (2);  $i_b(t)$ - функция импульса тока в обмотке ротора;  $\gamma(t)$  – угловое положение ротора, выраженное углом  $\gamma$  между осью полюса индуктора и плоскостью эквивалентного витка обмотки якоря.

Каждый импульс вращающего момента создаёт импульсное ускорение ротора, вследствие чего на интервале существования импульса скорость вращения ротора увеличивается и определяется выражением

$$\omega_p(t) = \frac{1}{J} \int_a^{t_k} [M(t) - M_c(t)] dt, \quad (6)$$

где  $J$  – момент инерции ротора;  $M_c(t)$  – момент сопротивления нагрузки.

Параметры импульсов токов (фаза, ширина, площадь) устанавливаются такими, чтобы момент количества движения, сообщённого импульсом вращающего момента, был больше момента торможения, созданного нагрузкой на меж-импульсном интервале. В этом случае скорость вращения ротора импульсно-ступенчато увеличивается (рис. 2з). Если указанные моменты уравновесить, то скорость вращения будет неизменна.

Изменением угла управления можно регулировать длительность, амплитуду, площадь импульсов тока в обмотке якоря и тока возбуждения в роторной обмотке, соответственно величину вращающего момента и скорость вращения. Автоматическая стабилизация и изменение скорости вращения выполняются под воздействием угла управления.

Важное значение при импульсном управлении имеют величина колебания скорости вращения двигателя, вызванной пульсацией вращающего момента, и, соответственно, возможность расчёта указанных колебаний. Со стороны потребителей зачастую выдвигаются жёсткие требования по ограничению колебаний скорости вращения двигателя и приводимого механизма, вплоть до требования полного исключения колебаний. Это обстоятельство

может выдвигаться против самой идеи импульсного управления. Однако эти требования представляются не вполне обоснованными и не столь принципиально важными. Сказанное выше может быть обосновано следующим. В качестве приводных двигателей большого числа механизмов и агрегатов в технике широко используются поршневые двигатели внутреннего сгорания. Последние по своему принципу действия создают пульсирующий вращающий момент, однако это не является препятствием для их широкого использования.

На рис. 3 а,б приведены рассчитанные на модели (MatLab Simulink) характеристики разгона и стабилизации скорости синхронного двигателя типа СТД–800 мощностью 800 кВт при импульсном управлении.

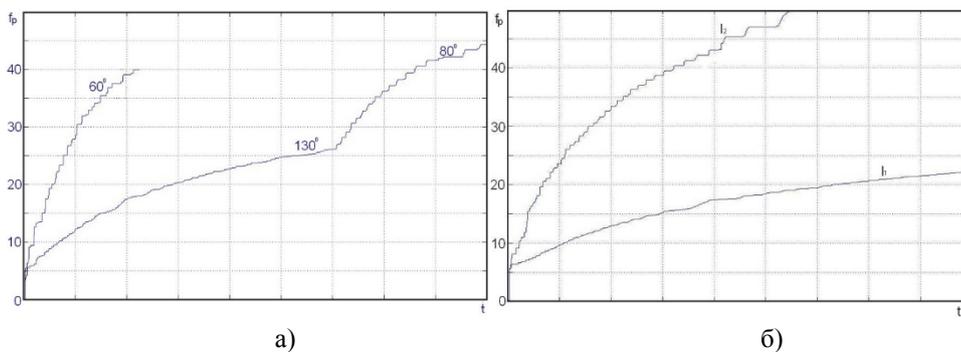


Рис. 3. Характеристики разгона и стабилизации скорости синхронного двигателя типа СТД–800 мощностью 800 кВт: а - при различных углах управления; б - при различных моментах инерции ротора

Объясняется это тем, что, с одной стороны, вращающиеся маховые массы агрегата в определённой степени сглаживают пульсации момента и скорости вращения; с другой стороны - это косвенно подтверждает не критичность этого требования. Важной является частота пульсации – высокая частота вырождается в вибрацию (которая независимо от пульсации момента всегда имеет место в механических приводах), низкая частота пульсации приводит к автоколебаниям скорости, что более заметно. Кроме того, нелинейная, пульсирующая нагрузка сама приводит к колебаниям момента вращения и скорости, и это обстоятельство принимается как неизбежное. Это имеет место, например, в электромеханических приводах мельниц размельчения руды и т.д. [5].

**Результаты исследования.** Система управления СД реализована на AVR микроконтроллере Atmega8535 [6,7]. В соответствии с вышеописанным принципом и приведенными на рис. 4 временными диаграммами разработаны алгоритм и программное обеспечение системы импульсного управления скоростью СД, реализуемой посредством питания статорной обмотки импульсами тока непосредственно от сети через тиристорный коммутатор.

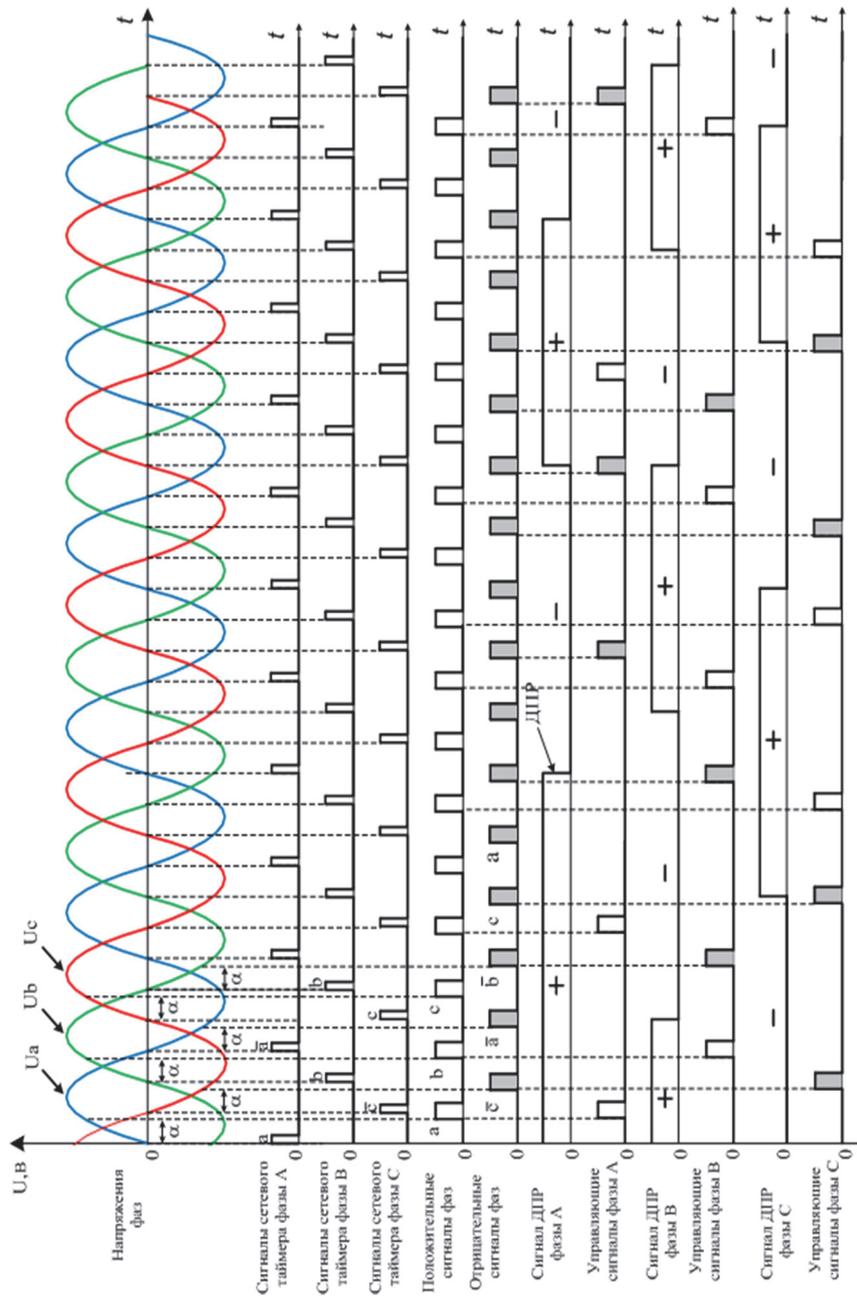


Рис. 4. Диаграммы напряжения сети, сигналов датчика положения ротора и сигналов импульсного управления

Алгоритм программы управления приведен на рис. 5.

Программа управления ввиду ее большого объема в статье не приводится. Желющие с ней ознакомиться могут обратиться по адресу: [micro.user2020@yandex.com](mailto:micro.user2020@yandex.com) или [oleg.gevorgyan@polytechnic.am](mailto:oleg.gevorgyan@polytechnic.am).

Представленные алгоритм и программное обеспечение делают импульсное управление СД более быстродействующим и стабильным, что повышает его надежность.

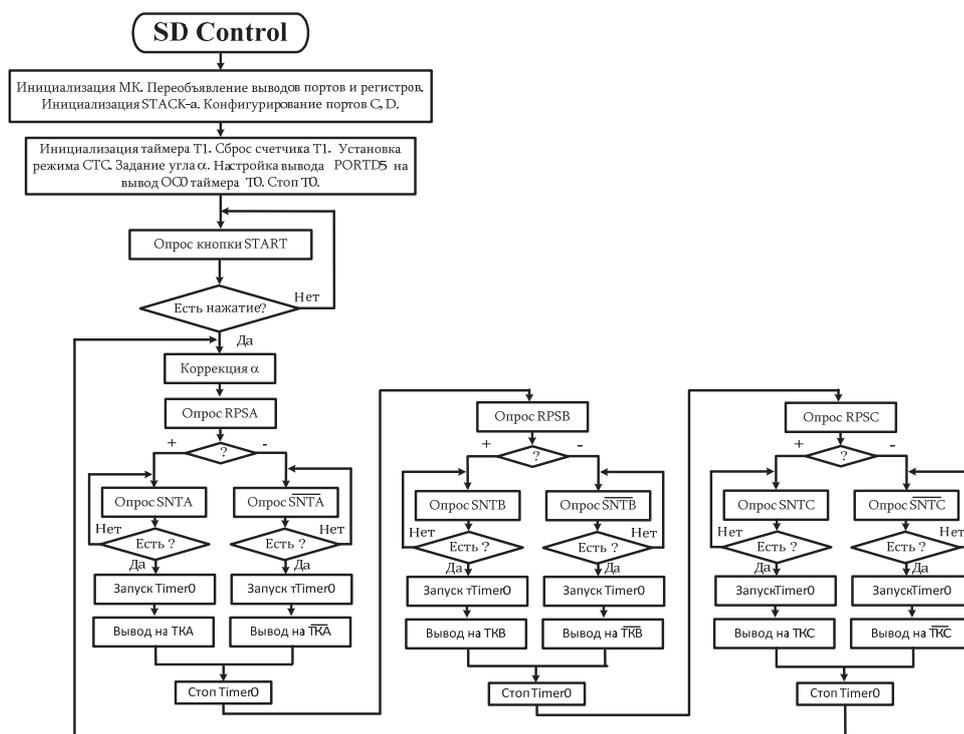


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы управления.

Условные обозначения: SNTA, SNTB, SNTC – сигналы сетевых таймеров фаз A, B, C;

RPSA, RPSB, RPSB – сигналы датчиков положения ротора фаз A, B, C;

TCA, TCB, TCC – коммутаторы тиристоров фаз A, B, C

В следующих статьях будет рассмотрено применение IGBT-транзисторов в системах управления скоростью синхронных двигателей, что упростит систему управления в целом и позволит решить такие задачи, как, например, уменьшение сигнала датчика положения ротора, и тем самым исключить прохождение отрицательных импульсных моментов вращения.

### **Выводы**

1. Разработанный алгоритм и программное обеспечение являются удобным аппаратом для исследования системы импульсного управления скоростью синхронного двигателя с высокой степенью адекватности.

2. Посредством импульсного управления СД при питании его непосредственно от промышленной сети возможно изменение и регулирование скорости вращения.

3. Интенсивность пуска и ускорение двигателя регулируются посредством угла управления и параметров импульсов. При этом регулируется кратность пусковых и переходных токов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Панкратов В.В.** Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники // Силовая интеллектуальная электроника: Специализированный информационно-аналитический журнал. - 2005. - N 2. - С. 27-31.
2. **Давидян Ж.Д.** Системы импульсного пуска мощных синхронных машин. – Ер.: Авторское издание, 2007. – 292 с.
3. **Давидян Ж.Д., Геворгян О.Г.** Математическая модель импульсного управления скоростью синхронных электродвигателей // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. Техн. науки. – 2009.- Т. 62, N. 4.- С. 409-415.
4. **Դավիթյան Ճ.Դ., Գևորգյան Օ.Գ.** Принцип импульсного самовозбуждения и момента синхронного двигателя // ՀՊՃՀ Լրագիր – 76. - Եր.: Ճարտարագետ, 2009. - Հ. 1, N 1. – էջ 199-204:
5. **Геворгян О.Г.** Колебание скорости вращения двигателя синхронного типа при импульсном управлении // Вестник ИАА. - 2010. - Т. 7, N 1. - С. 46-49.
6. **Mazidi, Muhammad Ali.** The AVR microcontroller and embedded systems: using Assembly and C. - Pearson Education, 2011. - 781 p.
7. **Շիրինյան Պ.Հ.** Միկրոկոնտրոլերներ: Ճարտարագետությունը, ծրագրավորումը և կիրառությունները: Դասագիրք / ՀՊՃՀ.-Եր.: Ճարտարագետ, 2013. – 376 էջ:

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 20.09.2022.

Օ.Գ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Պ.Հ. ՇԻՐԻՆՅԱՆ, Գ.Ս. ԿԱՐՈՅԱՆ

ՄԻՆԹՐՈՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ  
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ ԵՎ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԱՊԱՀՈՎՈՒՄԸ

Ներկայացված են սինքրոն շարժիչների արագության իմպուլսային կառավարման համակարգի ալգորիթմը և ծրագրային ապահովումը: Իմպուլսային կառավարումն իրականացվում է անմիջապես ցանցից՝ տիրիստորային կոմուտատորի միջոցով հոսանքի իմպուլսներով ստատորային փաթույթի սնմամբ: Հոսանքի իմպուլսները սինքրոնացված են ռոտորի դիրքի հետ և կառավարվում են ըստ ֆազի և լայնության: Իմպուլսային կառավարման եղանակն ապահովում է զգալիորեն ավելի լավ տնտեսական և որակական բնութագրեր, քան հայտնի հաճախականային կառավարման դեպքում:

**Առանցքային բառեր.** սինքրոն շարժիչի արագություն, իմպուլսային կառավարում, ստատորի հոսանքի իմպուլսներ, ռոտորի դիրքի տվիչ, արագության կարգավորում, միկրոկոնտրոլեր:

O.G. GEVORGYAN, P.H. SHIRINYAN, G.S. KAROYAN

AN ALGORITHM AND SOFTWARE OF THE SYNCHRONOUS MOTOR  
SPEED IMPULSE CONTROL

An algorithm and software of synchronous motor speed impulse control are presented. A new way of pulse speed control of the synchronous electric motors realized by means of feed stator winding pulses of a current directly from a network through thyristor switchboard is presented. Current pulses are synchronized with the position of a rotor and adjustable on a phase and on width. It is shown that the method of pulse control provides better economic and qualitative characteristics compared to the known frequency control.

**Keywords:** synchronous electric motors, pulse control, stator current pulse, rotor position sensor, speed regulation, microcontroller.