

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62–581.6

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-1-65-71

## УПРАВЛЯЕМЫЙ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МАЛОМОЩНЫХ ЦИРКУЛЯРНЫХ ПИЛ

**АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ**✉, канд. техн. наук, доцент  
energo-andreev@rgau-msha.ru✉

**КАБДИН НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ**, канд. техн. наук, доцент  
energo-nek@rgau-msha

**СТОРЧЕВОЙ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор  
V\_Storchevoy@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6929-3919>; Scopus Author ID: 57224938142

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

**Аннотация.** Особенностью использования маломощных циркулярных пил в условиях фермерских мастерских является многообразие режимов эксплуатации, определяемых характером распилов. Для повышения эффективности работы циркулярных пил при поперечных распилах древесины можно рекомендовать применение инерционных накопителей энергии в виде маховиков. Однако при продольных распилах кинетическая энергия маховиков быстро иссякает, а для ее последующего пополнения требуется значительное время. С целью сокращения продолжительности восстановления требуемой частоты вращения диска пилы предлагается в качестве маховика использовать ротор дополнительного электродвигателя. Автоматическое управление дополнительным электродвигателем осуществляется регулятором по величине тока в цепи питания основного электродвигателя. Во избежание возникновения автоколебаний с недопустимо высокой частотой статическая характеристика регулятора должна содержать участок с зоной неоднозначности. Это достигается использованием релейно-контактной схемы, а также схемы на логических элементах или микропроцессора. Релейно-контактная схема содержит пять электромагнитных реле, одно реле времени и два магнитных пускателя. Назначение реле времени сводится к исключению ложных срабатываний за счет обеспечения невосприимчивости регулятора к пусковому току. Для реализации алгоритма управления дополнительным электродвигателем возможно использование логических элементов «И» и «ИЛИ», включенных по предложенной схеме. Эффективной мерой повышения надежности и уменьшения габаритов регулятора является использование микропроцессора ARDUINO совместно с симисторами, установленными в цепях питания электродвигателей циркулярной пилы. Управляемый двухдвигательный электропривод маломощной циркулярной пилы позволяет снизить потребление электроэнергии при поперечных распилах древесины, улучшить условия труда и повысить его производительность при продольных распилах.

**Ключевые слова:** циркулярная пила, режимы распила древесины, маховик, двухдвигательный электропривод, схема управления, реле, логический элемент, микропроцессор, программа.

**Формат цитирования:** Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф. Управляемый двухдвигательный электропривод маломощных циркулярных пил // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 1. С. 65-71. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-65-71>.

© Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф., 2022



ORIGINAL PAPER

## CONTROLLED ELECTRIC DOUBLE-MOTOR DRIVE OF LOW-POWER CIRCULAR SAWS

**SERGEI A. ANDREEV**✉, PhD (Eng), Associate Professor  
energo-andreev@rgau-msha.ru✉

**NIKOLAY E. KABDIN**, PhD (Eng), Associate Professor  
energo-nek@rgau-msha.ru

**VLADIMIR F. STORCHEVOY**, DSc (Eng), Professor  
V\_Storchevoy@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6929-3919>; Scopus Author ID: 57224938142

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

**Abstract.** Using low-power circular saws in farm workshops is characterized by the variety of operating modes determined by the nature of cuts. To increase the efficiency of circular saws when cross-cutting wood, use can be made of inertial energy storage

devices in the form of flywheels. However, with longitudinal cuts, the kinetic energy of the flywheels quickly dries up, and it takes a long time to replenish it. To reduce the restoration time of the required saw disk speed, the authors propose using the rotor of an auxiliary electric motor as a flywheel. The regulator automatically controls the auxiliary electric motor according to the current value in the power supply circuit of the main electric motor. To avoid self-oscillations of an unacceptably high frequency, the static characteristic of the regulator must contain a section with an ambiguity zone. This is achieved by using a Ladder Diagram and a logic gate or a microprocessor. The relay-contact circuit includes five electromagnetic relays, a time relay, and two magnetic starters. The time relay aims to eliminate false alarms by ensuring that the regulator is not susceptible to inrush current. To implement the algorithm for controlling an auxiliary electric motor, it is possible to use the logical elements “AND” and “OR,” included according to the proposed scheme. An effective measure of increasing the reliability and reducing the regulator size is the use of the ARDUINO microprocessor together with semistors installed in the power circuits of circular saw motors. The controlled double-motor electric drive of the low-power circular saw reduces energy consumption when cross-cutting wood and improves working conditions and productivity when ripping.

**Key words:** circular saw, modes of cutting wood, load, flywheel, double-motor electric drive, control circuit, relay, logic element, microprocessor, program.

**For citation:** Andreev S.A., Kabdin N.E., Storchevov V.F. Controlled electric double-motor drive of low-power circular saws. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(1): 65-71. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-65-71>.

**Введение.** Циркулярные пилы успешно используются при заготовке дров и выполнении фасонных работ в небольших фермерских мастерских благодаря простой конструкции, надежности и относительно высоким эксплуатационным показателям [1, 2]. Такие пилы, как правило, обладают малой мощностью (от 0,7 до 5 кВт), что объясняется экономией средств при их приобретении и ограниченными возможностями электросети.

Около 70% сельских электропотребителей получают электроэнергию по однофазным сетям, что осложняет эксплуатацию асинхронных электродвигателей и требует применения фазосдвигающих конденсаторов. При этом эксплуатационные характеристики электродвигателей ухудшаются, а производительность деревообрабатывающего оборудования существенно снижается. Однако даже при наличии трехфазной сети работники мастерской зачастую эксплуатируют циркулярные пилы на пределе их возможностей, допуская перегрузку электродвигателей. Такая перегрузка сопровождается снижением частоты вращения ротора на более чем критическую величину и требует немедленного устранения момента сопротивления. Это достигается прекращением подачи распиливаемого материала и ожиданием восстановления номинальной частоты вращения ротора в течение нескольких секунд.

При поперечном распиле древесины периодический режим работы может оказаться приемлемым, так как в течение пауз оператор имеет возможность выполнять вспомогательные операции: раскладывать распиленные образцы, извлекать заготовки и т.д. Однако продолжительность активной фазы не является постоянной, поскольку требуемая мощность электродвигателя зависит от совокупности ряда следующих факторов [3]:

$$P = \frac{nD}{800} + Sb \cdot 0,736k_n, \text{ кВт},$$

где  $n$  – частота вращения диска пилы,  $\text{м}^{-1}$ ;  $D$  – диаметр пилы,  $\text{м}$ ;  $b$  – ширина пропила,  $\text{мм}$ ;  $S$  – площадь пропила в единицу времени,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;  $k_n$  – коэффициент, зависящий от породы дерева (для твердой породы  $k_n = 14$ , для мягкой  $k_n = 28$ ). Величины  $S$ ,  $b$  и  $k_n$  являются случайными и могут варьироваться в процессе работы: например, с изменением сечения и сортности заготовок, затуплением зубьев, скорости подачи и т.д.

Периодический режим работы не является эффективным, поскольку часть времени цикла затрачивается на восстановление номинальной частоты вращения ротора электродвигателя. Кроме того, периодический режим вызывает повышенную утомляемость оператора и снижает безопасность труда. С другой стороны, использование циркулярной пилы с заведомо завышенной мощностью электродвигателя не является оправданным ввиду перерасхода электроэнергии и высоких затрат на приобретение такой пилы.

Выбор мощности циркулярной пилы, одинаково пригодной для всех режимов работы в условиях фермерской мастерской едва ли возможен. Универсальность циркулярной пилы может быть достигнута сочетанием инерционных свойств ротора дополнительного электродвигателя с устройством его автоматического включения [4].

**Цель исследований:** обоснование возможности использования двухдвигательного электропривода для маломощных циркулярных пил и рассмотрение автоматических устройств для управления им при переменных нагрузках.

**Материалы и методы.** В качестве материала исследований использованы сведения по теории маховиков, а также характеристики современных технических средств автоматики. При разработке автоматических устройств управления двухдвигательным электроприводом применены теоретические методы исследования – в частности, синтез и индукция.

**Результаты и обсуждение.** Некоторое повышение удобства и эффективности эксплуатации маломощных циркулярных пил при поперечных распилах древесины достигается установкой на вал электродвигателя небольшого маховика. В качестве такого маховика можно использовать цельнометаллический диск или повторяющий его по форме наждачный камень. При включении электродвигателя и в течение технологических пауз маховик накапливает кинетическую энергию и отдает ее в процессе распила. Продолжительность поперечного распила обычно находится в диапазоне от 3 до 7 с.

Произведем оценку энергетических показателей маломощной циркулярной пилы с электродвигателем, имеющим номинальную частоту вращения  $2900 \text{ м}^{-1}$ , при ее эксплуатации с маховиком, в качестве которого использован точильный камень диаметром  $D = 0,4 \text{ м}$  и шириной  $b = 0,04 \text{ м}$ . Плотность материала точильного камня составляет:

$\rho = 1800 \dots 2600 \text{ кг/м}^3$  [5]. При  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$  его масса, определенная по формуле  $m = \frac{\pi D^2}{4} b \rho$ , составит:  $m = 11,1 \text{ кг}$ .

Способность к накоплению кинетической энергии маховика определяется его моментом инерции. Для маховика цилиндрической формы (формы толстого диска) момент инерции может быть определен в соответствии с выражением [6]:

$$I = \frac{1}{2} m R^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус маховика, м. Следовательно, для нашего примера  $I = 0,22 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Кинетическая энергия, запасенная маховиком, рассчитывается по формуле:

$$E = 0,5 I \omega^2, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения маховика, рад/с.

В результате подстановки численных значений получим  $E = 10227 \text{ Дж}$ . При потреблении этой кинетической энергии в течение 3 сек. соответствующая мощность окажется равной 3409 Вт. С другой стороны, частота вращения ротора электродвигателя при перегрузке редко падает до нуля. Поэтому при практических расчетах в формуле (2) возведению в квадрат должна подлежать не номинальная угловая частота вращения  $\omega$ , а разность номинальной и минимально допустимой частот  $\omega_m$ :

$$E_{пр.} = 0,5 I (\omega - \omega_m)^2. \quad (3)$$

Для  $\omega_m = 1850 \text{ м}^{-1}$  получим:  $E_{пр.} = 1329 \text{ Дж}$  и  $P_{пр.} = 443 \text{ Вт}$ .

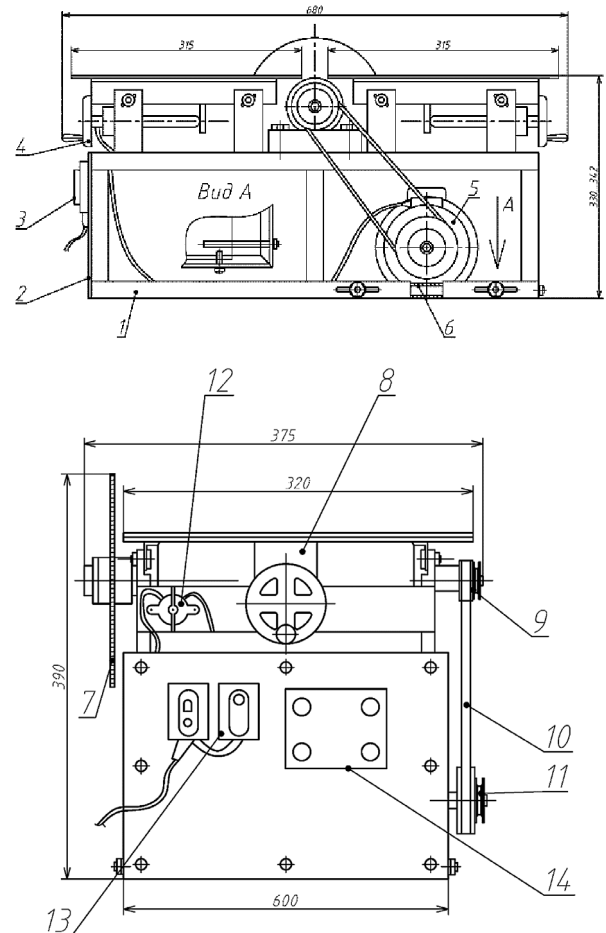
Таким образом, использование маховика для нашего примера в критических случаях обеспечит кратковременный резерв мощности от 0,4 до 3,4 кВт.

Следует отметить, что при продольном распиле древесины маховик может отрицательно повлиять на эффективность процесса. В этом случае перегрузка электродвигателя является продолжительной, и запас кинетической энергии маховика быстро израсходуется. Для поддержания работоспособности циркулярной пилы оператору приходится либо существенно уменьшать скорость подачи заготовок, либо периодически приостанавливать их подачу в зону распила. Первый путь определяет снижение производительности процесса, а второй сильно зависит от опыта оператора и требует от него повышенного внимания. При наличии маховика продолжительность пауз значительно увеличивается, поскольку мощность электродвигателя расходуется не только на увеличение частоты вращения ротора, но и на разгон маховика.

Эффективность применения инерционного накопителя кинетической энергии можно существенно повысить при использовании в качестве маховика ротора дополнительного (второго) электродвигателя. Валы роторов электродвигателей можно соединить между собой гибким валом или с помощью муфты. Желательно, чтобы момент инерции второго электродвигателя оказался несколько больше первого. При поперечных распилах древесины второй электродвигатель пребывает в выключенном состоянии и его ротор выполняет функции маховика. При продольном распиле, сопровождающемся продолжительной перегрузкой, второй электродвигатель автоматически включается, и восстановление номинальной частоты вращения происходит достаточно быстро. Выключение второго двигателя происходит при достижении номинального режима.

Во избежание возникновения автоколебаний статическая характеристика регулятора должна содержать участок с зоной неоднозначности. Такой регулятор может быть реализован релейно-контактной схемой, а также схемой на логических элементах или с использованием микропроцессора.

Циркулярная пила с двухдвигательным электроприводом выполнена в виде рабочего стола с боковым размещением диска на горизонтальном валу (рис. 1).



**Рис. 1. Общий вид циркулярной пилы с двухдвигательным электроприводом:**

- 1 – рама; 2 – панель; 3 – магнитный пускатель;
- 4 – механизм регулирования высоты стола;
- 5, 6 – электродвигатели; 7 – диск пилы; 8 – упор;
- 9 – блок ведомых шкивов; 10 – клиновой ремень;
- 11 – ведущий шкив; 12 – переключатель рода работ;
- 13 – кнопочные станции для управления электродвигателями в ручном режиме;
- 14 – пульт автоматического управления

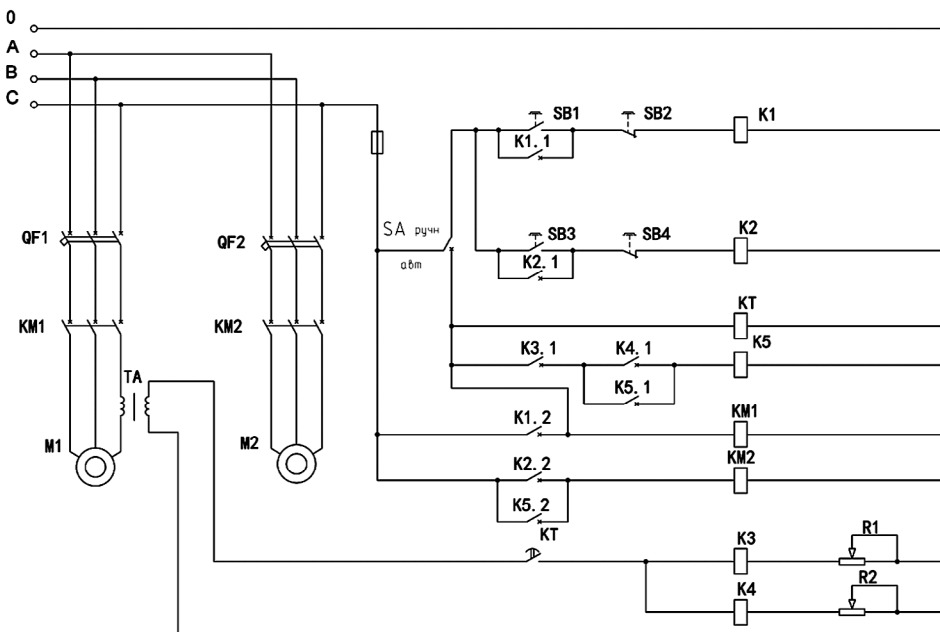
**Fig. 1. General view of a circular saw with a double-motor electric drive:**

- 1 – frame; 2 – panel; 3 – magnetic starter;
- 4 – table height adjustment mechanism; 5, 6 – electric motors;
- 7 – saw blade; 8 – tailstock; 9 – block of driven pulleys;
- 10 – V-belt; 11 – driving pulley; 12 – operation type switch;
- 13 – push-button stations for manual control of electric motors; 14 – automatic control panel

Первоначальные версии схем управления двухдвигательным электроприводом включали в себя тахогенератор, с помощью которого осуществлялось получение информации о частоте вращения роторов электродвигателей,

и косвенным образом – о нагрузке. Такое решение оказалась вполне работоспособным, но одновременно громоздким и требующим проведения трудоемкой операции центрирования трех валов. Гораздо более эффективно использование

трансформатора тока, установленного в одной из фаз первого электродвигателя. Принципиальная электрическая схема электропривода двухдвигательной циркулярной пилы с трансформатором тока представлена на рисунке 2.



**Рис. 2. Принципиальная электрическая схема двухдвигательного электропривода на релейно-контактном регуляторе с трансформатором тока**

**Fig. 2. Schematic diagram of a two-motor electric drive on a relay-contact controller with a current transformer**

Схема содержит первый (основной) электродвигатель *M1*, второй (дополнительный) электродвигатель *M2*, магнитные пускатели *KM1* и *KM2*, автоматические выключатели *QF1* и *QF2*, трансформатор тока *TA*, а также релейно-контактный регулятор. Оба электродвигателя устанавливаются горизонтально на лапах. При этом один из двигателей имеет конструктивное исполнение IM1001 (одним концом), другой – IM1002 (с двумя концами) [7]. Регулятор включает в себя переключатель рода работ *SA*, коммутационные кнопки *SB1* (пуск) и *SB2* (стоп) первого электродвигателя, кнопки *SB3* (пуск) и *SB4* (стоп) второго электродвигателя, промежуточные электромагнитные реле *K1...K5*, подстроечные резисторы *R1*, *R2* и реле времени *KT* [8].

Двухдвигательный электропривод работает следующим образом. Для управления в ручном режиме переключатель рода работ *SA1* переводится в положение «Ручн». В результате кратковременного нажатия на кнопку *SB1* происходит включение первого двигателя, что вызывает срабатывание реле *K1* и замыкание контактов *K1.1* и *K1.2*. Контакт *K1.2* обеспечивает срабатывание магнитного пускателя *KM1* и подачу питания на электродвигатель *M1*. Замыкание контакта *K1.1* переводит реле *K1* на самоподпитку, что определяет продолжение работы реле *K1* после прекращения нажатия на кнопку *SB1*. Выключение первого электродвигателя *M1* производится кратковременным нажатием на кнопку *SB2*. При этом цепь питания реле *K1* обесточивается, что приводит к размыканию контактов *K1.1* и *K1.2*. Аналогично кнопками *SB3* и *SB4* через промежуточное реле *K2*, а также магнитный пускатель *KM2*

осуществляется управление вторым электродвигателем *M2* в ручном режиме.

В автоматическом режиме переключатель рода работ *SA1* устанавливается в положение «Авт». При этом получает питание магнитный пускатель *KM1*, контакты которого включают первый электродвигатель *M1*. Одновременно напряжение подается на обмотку реле времени *KT*, которое срабатывает примерно через 1-2 с. Эта выдержка времени необходима для достижения частоты вращения роторов номинального значения. По истечении выдержки времени контакт *KT* замыкается, обеспечивая подачу напряжения с вторичной обмотки трансформатора тока *TA* на обмотки реле *K3* и *K4*. Применение реле времени *KT* позволило избежать ложного включения второго электродвигателя *M2*, так как в момент начал работы его ротор неподвижен, а по обмоткам статора протекает значительный пусковой ток.

Обмотки реле *K3* и *K4* рассчитаны на напряжение 6 В. На вторичной обмотке трансформатора тока *TA* при номинальной нагрузке первого электродвигателя *M1* развивается напряжение 12 В. При перегрузке, требующей включения второго электродвигателя *M2*, это напряжение составляет 17 В. Сопротивления подстроечных резисторов *R1* и *R2* подбираются таким образом, чтобы реле *K4* срабатывало при перегрузке, а реле *K3* – при номинальном режиме. Таким образом, при напряжении на вторичной обмотке трансформатора тока *TA*, меньшем 12 В, реле *K3* и *K4* оказываются в нерабочем состоянии. При напряжении, большем 12 В, но меньшем 17 В, срабатывает реле *K3*, и при напряжении, большем 17 В, в работу вступают оба реле.

Итак, в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке реле  $K3$  и  $K4$  не срабатывают. При достижении нагрузки номинального значения на вторичной обмотке трансформатора тока  $TA$  достигается напряжение 12 В, которое вызывает срабатывание реле  $K3$  и замыкание контакта  $K3.1$ . При этом подготавливается цепь питания обмотки реле  $K5$ . Если нагрузка продолжит возрастать, сила тока в цепи питания первого электродвигателя  $M1$  увеличится, что вызовет увеличение напряжения на вторичной обмотке трансформатора тока  $TA$ . При превышении этого напряжения значения 17 В реле  $K4$  работает, и получит питание обмотка реле  $K5$ . Замыкание контактов  $K5.1$  переводит реле  $K5$  в режим самоподпитки, а одновременное замыкание контактов  $K5.2$  обеспечивает срабатывание магнитного пускателя  $KM2$ , включающего второй электродвигатель  $M2$ . Включение второго электродвигателя  $M2$  существенно увеличивает суммарный вращающий момент, и частота вращения диска пилы начинает возрастать. Это сопровождается выключением реле  $K4$ . В то же время незначительное снижение потребляемого тока и соответствующее ему уменьшение напряжения на вторичной обмотке трансформатора тока  $TA$  (вплоть до значения 12 В) не приводят к выключению второго электродвигателя  $M2$ , так как реле  $K5$  продолжает получать питание через замкнутые контакты  $K3.1$  и  $K5.1$ . И только при более значительном снижении напряжения на вторичной обмотке трансформатора тока  $TA$  происходит выключение реле  $K5$ , магнитного пускателя  $KM2$  и второго электродвигателя  $M2$ . Электропривод возвращается в первоначальное состояние, и ротор второго электродвигателя  $M2$  вновь выполняет функции пассивного маховика.

Логика управления вторым электродвигателем  $M2$  в автоматическом режиме описывается простейшим алгоритмом:

$$Y = K3(K4 + K5),$$

где  $Y$  – команда на включение второго двигателя  $M2$ ;  $K3$ ,  $K4$  и  $K5$  – факты срабатывания соответствующих реле. Этот алгоритм может быть реализован схемой управления на логических элементах, изображенной на рисунке 3 [9].

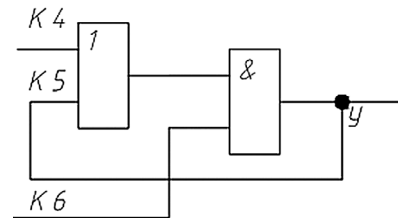


Рис. 3. Схема соединения логических элементов для реализации алгоритма включения второго электродвигателя

Fig. 3. Connection diagram of logic elements to implement the algorithm for switching on the second electric motor

Эффективной мерой повышения надежности и уменьшения габаритов регулятора является перевод релейно-контактной схемы на бесконтактную основу. На рисунке 4 представлена принципиальная электрическая схема двухдвигательного электропривода на микропроцессоре ARDUINO [10].

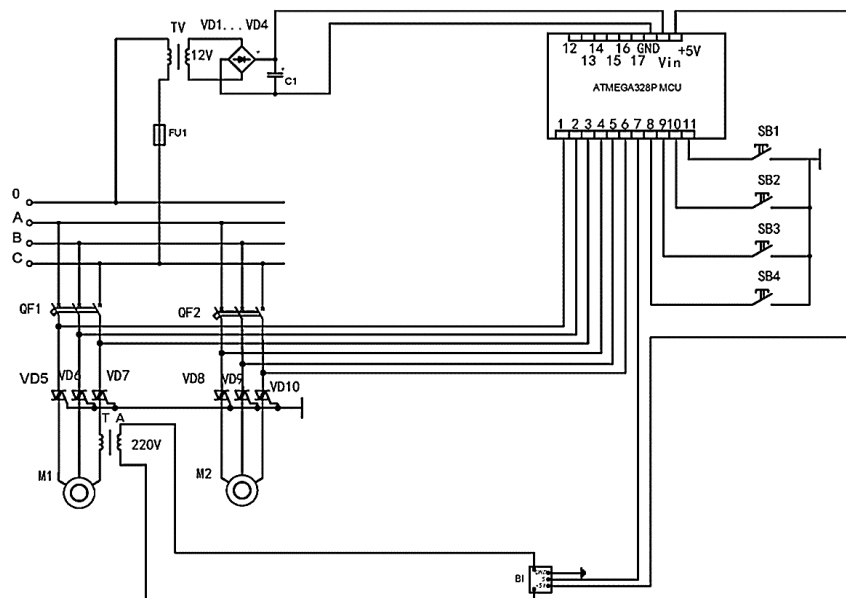


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема двухдвигательного электропривода с микропроцессорным регулятором

Fig. 4. Schematic diagram of a two-motor electric drive with a microprocessor controller

При использовании микропроцессора оказались возможными исключение резисторов  $R1$  и  $R2$ , замена замыкающих кнопок  $SB3$  и  $SB4$  на однотипные замыкающие, а также замена магнитных пускателей  $KM1$  и  $KM2$  на симисторы  $VD5...VD10$ . Одновременно регулятор был дополнен преобразователем электрических сигналов  $B1$ ,

основанным на эффекте Холла и формирующим сигнал для подачи на контрольный вход микропроцессора. Питание микропроцессора осуществляется через понижающий трансформатор  $TV$ , выпрямитель на полупроводниковых диодах  $VD1...VD4$  и сглаживающий конденсатор  $C1$ . Листинг программы микропроцессора представлен в таблице.

Таблица

Листинг управляющей программы

Table

Listing of the control program with comments

Блок программы	Комментарии к блоку программы
<pre>boolean flag1 = 0; boolean flag2 = 0; boolean flag3 = 0; boolean SB1; boolean SB2; boolean SB3; boolean SB4; int min_current = 11,8; int max_current = 15; unsigned long time1;</pre>	<p>Задание разнотипных переменных, определяемых оператором или полученных от датчиков тока (натурального числа, числа с «плавающей» запятой, логического операнда – «true» или «false»). При этом переменные «min_current» и «max_current» отражают значения минимального и максимального токов, которые можно изменить, в зависимости от мощности электродвигателей</p>
<pre>void setup(){ pinMode(11, INPUT_PULLUP); pinMode(10, INPUT_PULLUP); pinMode(9, INPUT_PULLUP); pinMode(8, INPUT_PULLUP); pinMode(7, INPUT); pinMode(6, OUTPUT); pinMode(5, OUTPUT); pinMode(4, OUTPUT); pinMode(3, OUTPUT); pinMode(2, OUTPUT); pinMode(1, OUTPUT); }</pre>	<p>Представление функции <code>setup()</code>. «Тело» функции изображается фигурными скобками «{...}». Номера входов и выходов, через которые осуществляется взаимодействие с внешними элементами, определяются цифрами 1, 2, 3 и т.д. После подачи питания функция <code>setup()</code> выполняется единожды, так как передача информации о внешних подключениях уже завершена</p>
<pre>void loop() { SB1 !=digitalRead(11); SB2 !=digitalRead(10); SB3 !=digitalRead(9); SB4 !=digitalRead(8);</pre>	<p>Представление функции <code>loop()</code>. В фигурных скобках содержатся условия по всем нижепредставленным блокам. В отличие от функции <code>setup()</code> функция <code>loop()</code> определяет бесконечное выполнение одних и тех же команд, что позволяет управлять устройством в реальном времени (например, выполнять команду считывания показаний датчика тока или распознавать состояние кнопок <code>SB</code> с помощью команды <code>digitalRead()</code>). При получении информации о состоянии кнопок микроконтроллер выполняет действия, предписанные в фигурных скобках одного из условий</p>
<pre>if(SB1 == 1 &amp;&amp; millis() – time1 &gt; 1000 &amp;&amp; flag1 == 0) { digitalWrite(1, HIGH); digitalWrite(2, HIGH); digitalWrite(3, HIGH); time1 = millis(); flag1 = 1; } if(SB2 == 1 &amp;&amp; millis() – time1 &gt; 1000 &amp;&amp; flag1 == 1 &amp;&amp; flag3 == 0) { digitalWrite(1, LOW); digitalWrite(2, LOW); digitalWrite(3, LOW); time1 = millis(); flag1 = 0; } if(SB3 == 1 &amp;&amp; millis() – time1 &gt; 1000 &amp;&amp; flag1 == 1) { digitalWrite(4, HIGH); digitalWrite(5, HIGH); digitalWrite(6, HIGH); time1 = millis(); flag1 = 0; flag3 = 1; } if(SB4 == 1 &amp;&amp; millis() – time1 &gt; 1000 &amp;&amp; flag3 == 1) { digitalWrite(4, LOW); digitalWrite(5, LOW); digitalWrite(6, LOW); time1 = millis(); flag1 = 1; flag3 = 0; }</pre>	<p>Ручное управление электроприводом. Блок распознает четыре условия <code>if()</code>. В круглых скобках содержатся параметры условий, в фигурных – действия, подлежащие выполнению. Состояние четырех кнопок определяется выполнением или невыполнением ими одного из четырех условий блока: 1 – нажатие кнопки <code>SB1</code> для включения основного электродвигателя; 2 – нажатие кнопки <code>SB2</code> для выключения основного электродвигателя; 3 – нажатие кнопки <code>SB3</code> для включения дополнительного электродвигателя; 4 – нажатие кнопки <code>SB4</code> для выключения дополнительного электродвигателя</p>

Отметим, что для предотвращения снижения эффективности двухдвигательного электропривода при выборе электродвигателей необходимо обращать внимание на сходство их механических характеристик. Известно, что электродвигатель, обладающий более жесткой характеристикой, при совместной работе будет перегружаться за счет недогрузки электродвигателя с более мягкой характеристикой [11]. При этом разность нагрузок электродвигателей окажется тем значительнее, чем на больший угол сдвинуты их характеристики. Удовлетворительные результаты показало использование в качестве основного двигателя электрической машины мощностью 1,5 кВт с номинальной частотой вращения ротора  $23,55 \text{ c}^{-1}$  при скольжении 4,6%, и в качестве дополнительного двигателя – электрической

машины мощностью 2,2 кВт с номинальной частотой вращения ротора  $23,12 \text{ c}^{-1}$  при скольжении 5,8%.

## Выводы

1. Управляемый двухдвигательный электропривод маломощной циркулярной пилы позволяет снизить потребление электроэнергии при поперечном распиле древесины за счет инерционных свойств конструкции.

2. При значительных перегрузках, сопровождающих продольный распил древесины, использование двухдвигательного электропривода существенно улучшает условия труда оператора посредством автоматического управления дополнительным электродвигателем.

## Библиографический список

1. Фокин С.В. Деревообработка: технология и оборудование / С.В. Фокин, О.Н. Шпортько. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2017. 203 с.
2. Агапов А.И. Оптимизация раскроя пиловочника крупных размеров: Монография. Киров: Вятский государственный университет, 2021. 407 с.
3. Богатырев Н.И. Практикум по электрическому приводу: Учебное пособие для вузов / Н.И. Богатырев, Н.С. Барракин, С.В. Оськин. Краснодар: КубГАУ, 2017. 306 с.
4. Андреев С.А. Управление двухдвигательным электроприводом маломощных циркулярных пил // Доклады ТСХА, 2018. Вып. 290. Ч. II. С. 170-172.
5. Кашун В.А., Мелехин Д.А., Бармин Б.П. Справочник заточника. М.: Машиностроение, 1967. 219 с.
6. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2012. 351 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Адомин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоиздат, 1982. 594 с.
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательство БИНОМ, 2014. 704 с.
9. Игошин В.И. Математическая логика и теория алгоритмов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 448 с.
10. Петин В.А., Биняковский А.А. Практическая энциклопедия Arduino. М.: ДМК Пресс, 2017. 152 с.
11. Алимов И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М.: РадиоСофт, 2004. 128 с.

## Критерии авторства

Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.07.2021

Одобрена после рецензирования 19.11.2021

Принята к публикации 22.11.2021

## References

1. Fokin S.V., Shportko O.N. Derevoobrabotka: tekhnologiya i oborudovanie [Woodworking: technology and equipment]. 2<sup>nd</sup> ed., reviewed and extended. Moscow, INFRA-M, 2017. 203 p. (In Rus.)
2. Agapov A.I. Optimizatsiya raskroya pilovochnika krupnykh razmerov [Optimization of cutting large sawlogs]: Monograph. Kirov, Vyatka State University, 2021. 407 p. (In Rus.)
3. Bogatyrev N.I., Barakin N.S., Oskin S.V. Praktikum po elektricheskomu privodu [Workshop on the electric drive]: Study manual for universities. Krasnodar, KubGAU, 2017. 306 p. (In Rus.)
4. Andreev S.A. Upravlenie dvukhdvigatel'nyim elektroprivodom malomoshchnykh tsirkulyarnykh pil [Control of a double-motor electric drive of low-power circular saws]. *Doklady TSKhA*, 2018; 290 (II): 170-172. (In Rus.)
5. Kashun V.A., Melekhin D.A., Barmin B.P. Spravochnik zatochnika [Handbook of the grinderman]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1967. 219 p. (In Rus.)
6. Timofeev G.A. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. 2<sup>nd</sup> ed., reviewed and extended. Moscow, Yurayt, 2012. 351 p. (In Rus.)
7. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Adomin V.I., Sobolevskaya E.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik [Asynchronous motors of the 4A series: Handbook]. Moscow, Energoizdat, 1982. 594 p. (In Rus.)
8. Horowitz P., Hill W. Iskusstvo skhemotekhniki [The art of circuitry]. Translated from English. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow, Publishing house BINOM, 2014. 704 p. (In Rus.)
9. Igoshin V.I. Matematicheskaya logika i teoriya algoritmov [Mathematical logic and theory of algorithms]: Study manual for university students. 2<sup>nd</sup> ed., stereotyped. Moscow, Izdat. tsentr "Akademiya", 2008. 448 p. (In Rus.)
10. Petin V.A., Binyakovskiy A.A. Prakticheskaya entsiklopediya Arduino [Practical encyclopedia of Arduino]. Moscow, DMK Press, 2017. 152 p. (In Rus.)
11. Alimov I.I. Asinkhronnye dvigateli v trekhfaznom i odnofaznom rezhimakh [Asynchronous motors in three-phase and single-phase modes]. Moscow, Radio Sovt, 2004. 128 p. (In Rus.)

## Contribution

S.A. Andreev, N.E. Kabdin, V.F. Storchevov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. S.A. Andreev, N.E. Kabdin, V.F. Storchevov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 30.07.2021

Approved after reviewing 19.11.2021

Accepted for publication 22.11.2021