

# Устройство управления и защиты электродвигателя погружного насоса

Евгений Колесников (Тульская обл.)

**Представленное в статье устройство удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к аппаратуре управления и защиты погружных насосов. Плавный пуск электродвигателя снижает нагрузку на питающую сеть и повышает надёжность и производительность погружной насосной установки. Устройство выполнено на основе микроконтроллера и современных силовых компонентов.**

В настоящее время для значительной части населённых пунктов основными источниками водоснабжения являются артезианские скважины с установленными в них погружными насосами, от бесперебойной работы которых зависит качество водоснабжения. Поэтому погружные насосные установки требуют применения надёжных устройств управления и защиты [1].

Разработанное устройство управления и защиты электродвигателя погружного насоса оснащено полным набором защитных функций и обеспечивает плавный запуск, который ограничивает пусковой ток двигателя, снижает динамические перегрузки в трансмиссии, исключает гидравлические удары в трубопроводе и не перегружает питающую сеть.

Принципиальная электрическая схема устройства приведена на рисунке 1. Электродвигатель насоса М1 подключён к питающей сети через автоматический выключатель QF1 и тиристорный ключ (ТК) А1. Устройство состоит из модуля питания (МП) А3, реле контроля фаз (РКФ) А4, модуля управления (МУ) А5, модуля контроля нагрузки (МКН) А6 и модуля контроля изоляции (МКИ) А7. Модули устройства питаются от фазы В сети через автоматический выключатель QF2. Для измерения тока в провод фазы С двигателя включён датчик тока А2.

Модуль питания А3 вырабатывает напряжения постоянного тока, необходимые для питания всех узлов устройства. РКФ контролирует трёхфазное напряжение сети и выдаёт сигнал аварии сети при возникновении одной из аварийных ситуаций: недопустимые повышение, понижение или несимметрия фазных напряжений сети, обрыв одной из фаз, нарушение чередования фаз. Исполнительным орга-

ном РКФ является его нормально замкнутый контакт N.C..

Модуль контроля нагрузки А6 работает совместно с датчиком тока А2 и выдаёт на своих выходах 1–3 соответствующие логические сигналы при выходе тока двигателя за пределы заданных значений по отношению к номинальному току  $I_{н}$ . Пусковому току соответствует величина  $3I_{н}$ , току перегрузки –  $1,3I_{н}$ , току «сухого хода» –  $0,5I_{н}$ .

Модуль контроля изоляции А7 измеряет сопротивление изоляции двигателя М1 перед пуском и выдаёт логический сигнал, если сопротивление изоляции меньше 30 кОм. Электромагнитное реле К4 своим контактом К4.1 подключает МКИ к фазе С сети на время изменения сопротивления изоляции.

Тиристорный ключ А1 предназначен для плавного пуска двигателя М1 путём снижения напряжения и ограничения пускового тока изменением угла регулирования. Модуль управления А5 на основании информации, собранной с других модулей и органов управления, управляет работой всего устройства.

Электромагнитные реле К1 – К3 своими контактами К1.1 – К3.1 шунтируют тиристорный ключ А1 и используются в качестве байпаса, предназначенного для снижения потерь энергии при работе устройства. Переключателем SA1 производится выбор ручного или автоматического режима работы. Кнопки SB1 «Пуск» и SB2 «Стоп» предназначены для ручного управления устройством. При автоматическом управлении к устройству может быть подключён контакт реле давления в трубопроводе или контакт реле датчика уровня воды в резервуаре. Для индикации состояния устройства служат светодиодные индикаторы: HL1 – «Напряжение сети», HL2 – «Работа», HL3 – «Авария». Амперметр PA1 измеряет ток

фазы С двигателя. Кнопки управления SB1 и SB2, индикаторы HL1 – HL3 и амперметр PA1 расположены на лицевой панели шкафа.

Принципиальная электрическая схема тиристорного ключа А1 приведена на рисунке 2. Ключ собран на базе трёх отечественных силовых модулей U1 – U3 типа МТОТО4/3-63-9, содержащих по два оптотиристора в каждом, которые соединены встречно параллельно. Параллельно тиристорам модулей подключены, соответственно, демпфирующие RC-цепи R1C1, R3C2 и R5C3, а также варисторы R2, R4 и R6, защищающие их от перенапряжений. Тиристоры работают в режиме фазового регулирования и управляются импульсами, поступающими от модуля управления.

На рисунке 3 приведена принципиальная электрическая схема модуля питания А3. Он построен по трансформаторной схеме и формирует на выходах стабилизированные напряжения  $\pm 15$  В,  $+5$  В, нестабилизированные напряжения  $+30$  В и изолированное  $\pm 30$  В (из.) постоянного тока. Модуль содержит трансформатор Т1, выпрямители на диодных мостах VD1 – VD3, сглаживающие конденсаторы C1 – C3, C4, C5 и C8, помехоподавляющие конденсаторы C6, C7 и C9, интегральные стабилизаторы напряжения DA1 – DA3 на напряжения  $+15$  В,  $-15$  В и  $+5$  В, соответственно, и защитные диоды VD4 – VD6. Плавкие вставки FU1 – FU4 защищают элементы модуля от перегрузок и коротких замыканий.

В качестве РКФ применено серийное реле ЕЛ-12Е. При подаче на него напряжения и отсутствии аварии сети его выходной контакт разомкнут. При возникновении любой из аварий сети контакт замыкается и подаёт сигнал в модуль управления.

На рисунке 4 приведена принципиальная электрическая схема модуля контроля нагрузки А6. Входным напряжением модуля является напряжение, снимаемое с нагрузочного резистора R1 датчика тока А2, в качестве которого использован датчик на основе эффекта Холла LA55-P/SP-1 фирмы LEM, имеющий высокую точность и небольшие габариты. Этот сигнал выпрямляется с помощью активного двухполупериодного

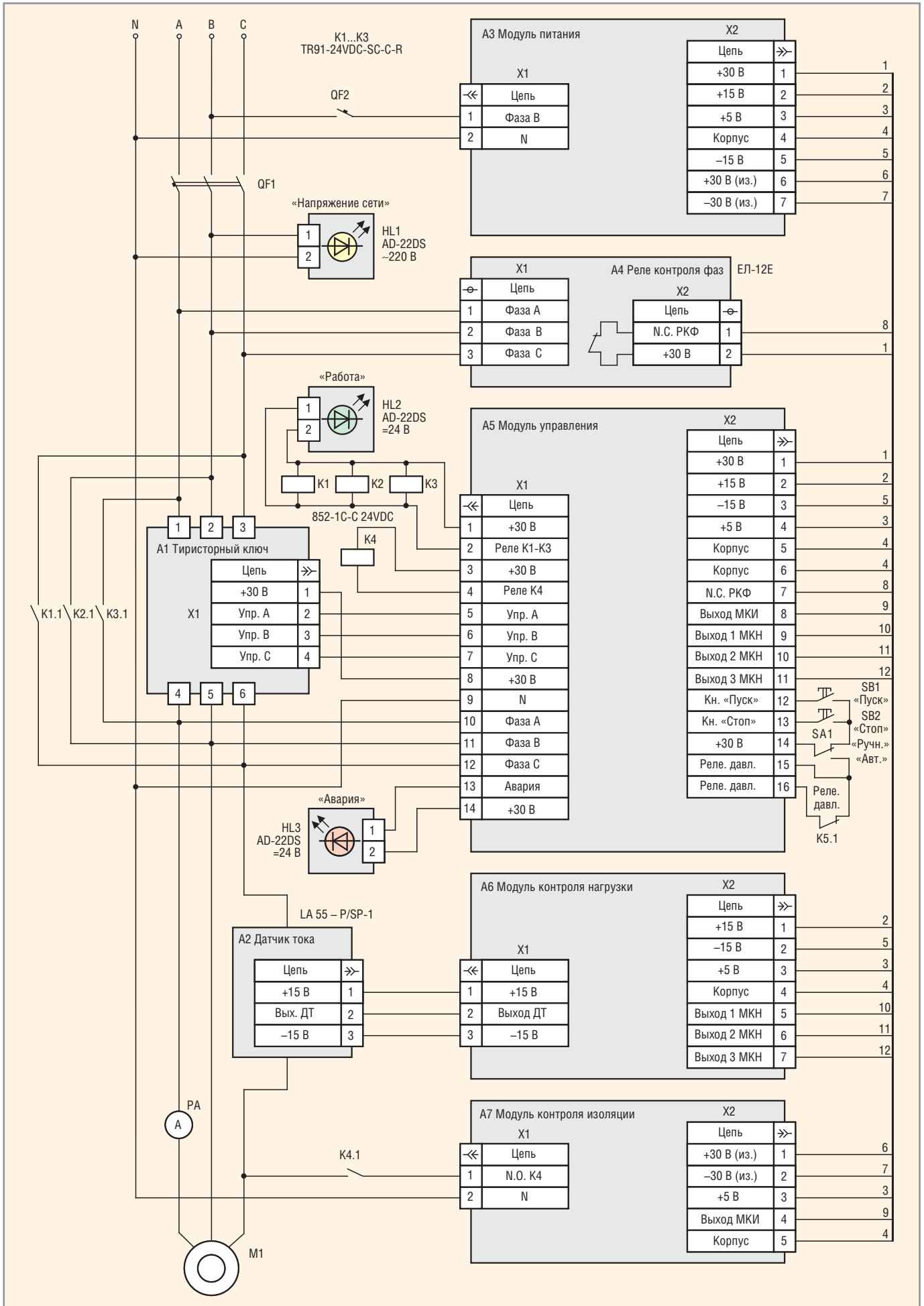


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства

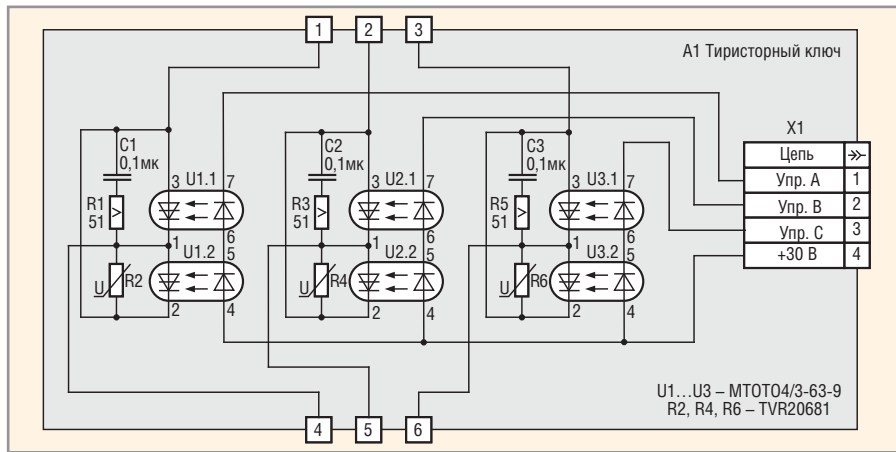


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема тиристорного ключа

выпрямителя на операционных усилителях (ОУ) DA1.1, DA1.2, диодах VD1, VD2 и резисторах R3 – R9. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения использован активный фильтр второго порядка на ОУ DA1.3, конденсаторах C2 – C4 и резисторах R10, R11, R13, R15 [2]. Выходное напряжение фильтра подаётся на вход компаратора на ОУ DA2.1 и через масштабный усилитель с коэффициентом передачи 2 В/В на ОУ DA1.4 и резисторах R12, R14, R16 – на входы компараторов на ОУ DA2.2, DA2.3. Резисторы R17 – R35 устанавливают режим работы компараторов. Подстроечным резистором R2 устанавливается коэффициент передачи 2 В/В канала выпрямитель–фильтр, что соответствует напряжению 3 В на выходе ОУ DA1.3 и напряжению 6 В на выходе ОУ DA1.4 при номинальном режиме работы двигателя. Конденсатор C1 служит для подавления помех. Подстроечным резистором R20 регули-

ется в некоторых пределах величина пускового тока двигателя.

В номинальном режиме работы электродвигателя насоса, напряжение, пропорциональное его току, снимается с резистора R2, выпрямляется, сглаживается фильтром и подаётся на неинвертирующий вход компаратора DA2.1, а также через масштабный усилитель – на неинвертирующие входы компараторов DA2.2, DA2.3. При этом входное напряжение компаратора DA2.1 не превышает напряжение уставки на его инвертирующем входе, пропорциональное току  $3I_{н}$ , и на выходе 1 МКН присутствует сигнал лог. 0. Входное напряжение компаратора DA2.2 также не превышает напряжение уставки на его инвертирующем входе, пропорциональное току  $1,3I_{н}$ , и на выходе 2 МКН также присутствует сигнал лог. 0. Входное напряжение компаратора DA2.3 превышает напряжение уставки на его инвертирующем входе, пропорциональное току

(«сухого хода»)  $0,5I_{н}$ , и на выходе 3 МКН устанавливается сигнал лог. 1.

При пуске двигателя его пусковой ток  $I_{п}$  периодически превышает величину  $3I_{н}$ , в результате чего срабатывает компаратор DA2.1 и на его выходе и выходе 1 модуля устанавливается сигнал лог. 1, который используется в модуле управления для ограничения пускового тока.

При перегрузке двигателя его ток превышает величину  $1,3I_{н}$ , в результате чего срабатывает компаратор DA2.2, и на его выходе и на выходе 2 МКН устанавливается сигнал лог. 1. Этот сигнал свидетельствует об аварии «Перегрузка».

При «сухом ходе» двигателя его ток уменьшается и становится меньше величины  $0,5I_{н}$ , в результате чего срабатывает компаратор DA2.3, и на его выходе и на выходе 3 МКН устанавливается сигнал лог. 0. Этот сигнал свидетельствует об аварии «сухой ход». Сигналы аварий с выходов 1–3 МКН поступают в модуль управления, где обрабатываются по специальному алгоритму.

На рисунке 5 приведена принципиальная электрическая схема модуля контроля изоляции А7. В качестве источника оперативного тока в МКИ выбран постоянный ток, поскольку даже при закрытом ключе (в отключённом состоянии устройства) небольшое переменное напряжение проникает на выход через демпфирующие RC-цепи ключа. МКИ содержит: измерительный мост на резисторах R1 и R5 с шунтирующими конденсаторами C1 и C2 и развязывающим диодом VD1; делитель напряжения на резисторах R2 – R4; компаратор DA2; развязывающий транзисторный оптро

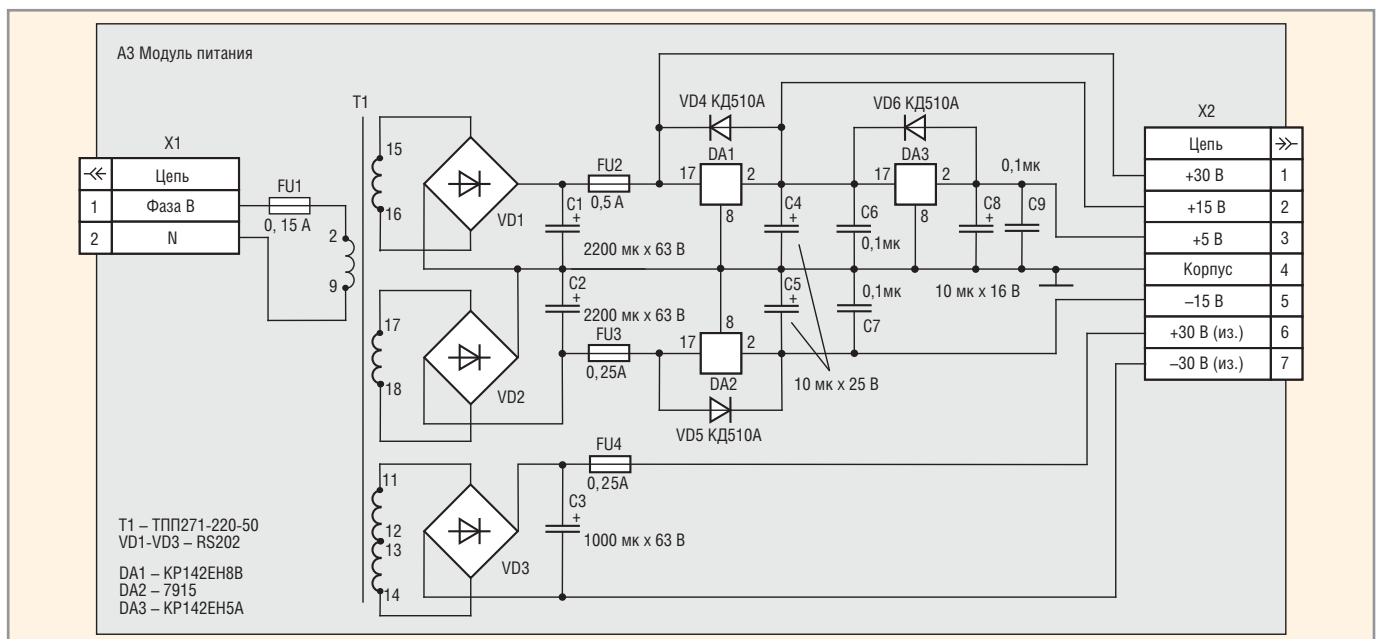


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема модуля питания

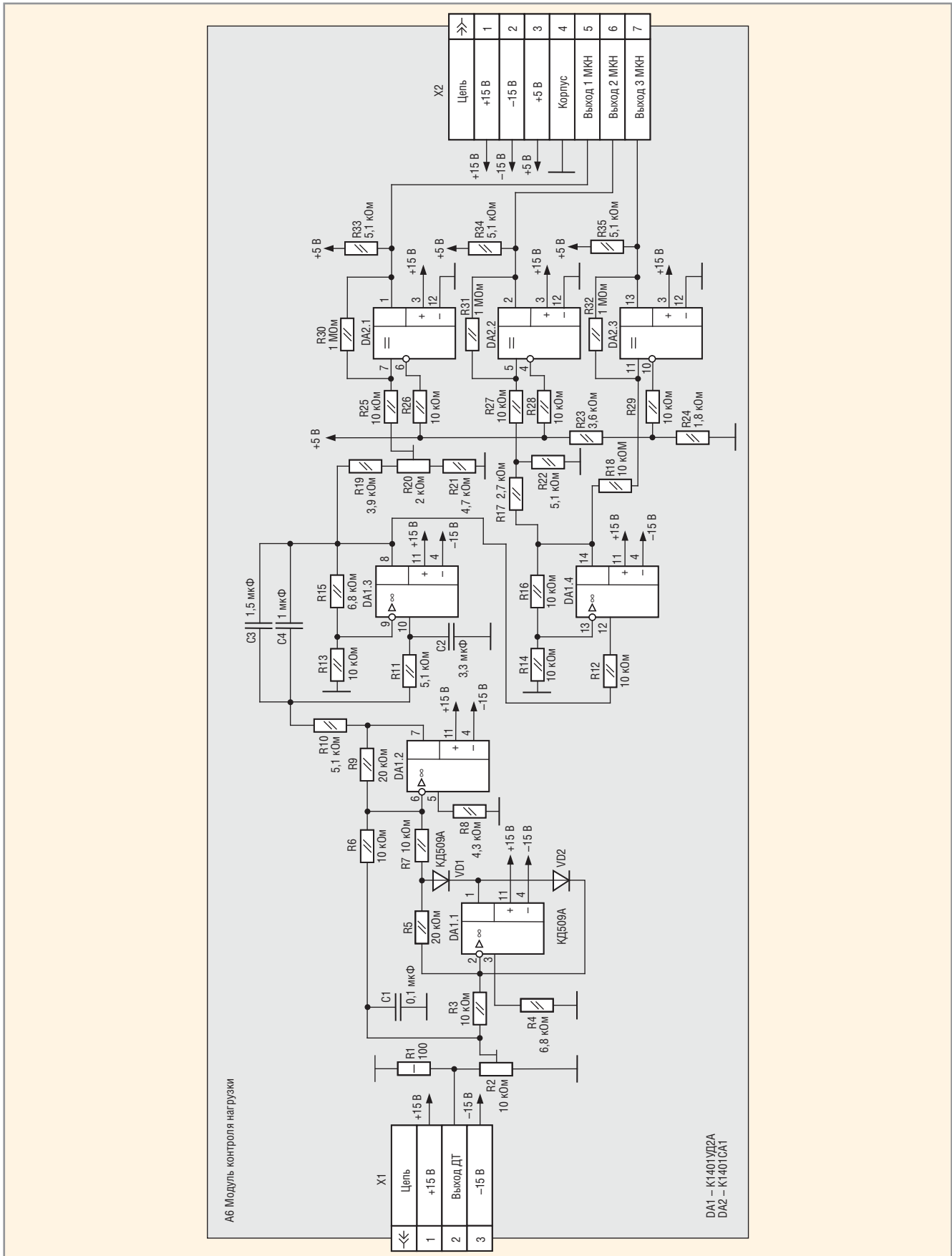


Рис.4. Принципиальная электрическая схема модуля контроля нагрузки

стабилизатор напряжения +15 В на DA1 со сглаживающими конденсаторами C5, C6 и защитным диодом VD2. Конденсаторы C1 и C2 служат для подавления переменной составляющей напряжения про-

мышленной частоты. Конденсаторы C3 и C4 предназначены для подавления помех. Для гальванической развязки по питанию, стабилизатор напряжения DA1 питается напряжением  $\pm 30$  В (из) от от-

дельной обмотки трансформатора модуля питания. Компаратор DA2 включён в диагональ измерительного моста, к другой диагонали которого подключено напряжение +15 В. Подстроечным резис-

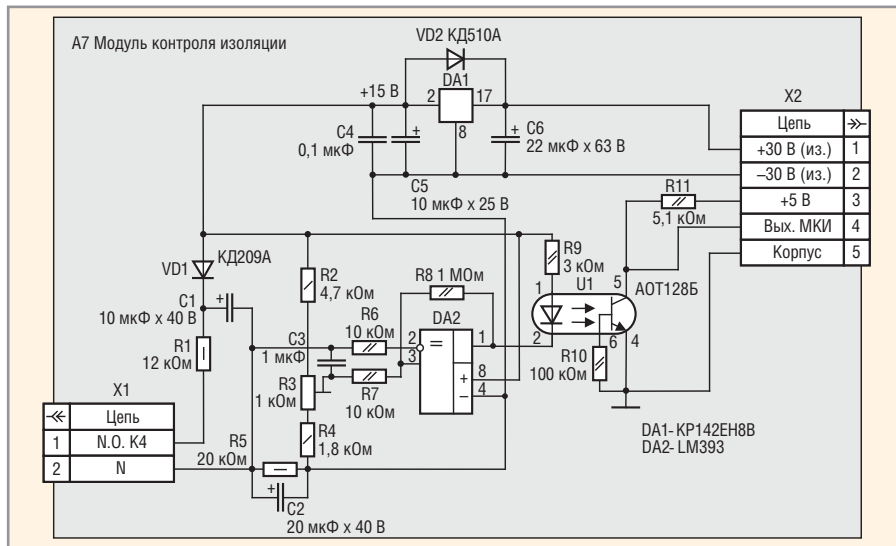


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема модуля контроля изоляции

тором R3 устанавливается порог срабатывания защиты. На время измерения резистор R1 подключается к фазе С двигателя через нормально разомкнутый контакт N.O. K4.1 реле K4.

Если сопротивление изоляции кабеля превышает 30 кОм, то напряжение на неинвертирующем входе компаратора DA2 больше, чем на инвертирующем. При этом на его выходе присутствует высокий уровень. Светодиод оптрона U1 не горит, и на выходе МКИ устанавливается уровень лог. 1, что свидетельствует о нормальном сопротивлении изоляции.

При снижении сопротивления изоляции кабеля менее 30 кОм увеличивается напряжение в измерительной диагонали моста, и напряжение на инвертирующем входе компаратора DA2 становится больше, чем на неинвертирующем. В результате на его выходе напряжение снижается практически до нуля, зажигается светодиод оптрона U1 и на выходе МКИ устанавливается лог. 0. Это свидетельствует об аварийной ситуации, сигнал о которой поступает с выхода МКИ в МУ, где обрабатывается в соответствии с заданным алгоритмом.

На рисунке 6 приведена принципиальная электрическая схема модуля управления. Основу схемы составляет микроконтроллер (МК) DD1 фирмы Micro-Chip Technology PIC16F877A, имеющий необходимое количество портов ввода-вывода и тактовую частоту 4 МГц, достаточную для обеспечения требуемого быстродействия устройства. Кварцевый резонатор ZQ1, конденсаторы C1, C2 и резистор R21 обеспечивают нормальное функционирование МК согласно рекомендациям по его применению [3]. Конденсатор C3 – помехоподавляющий. Тран-

зисторные оптроны U1, U2 и U5, светодиоды которых через резисторы R7, R22, R31 подключены к фазам питающей сети, обеспечивают синхронизацию с сетью. На коллекторах фототранзисторов оптронов U1, U2 и U5 в моменты перехода сетевого фазного напряжения через ноль формируются синхронизирующие импульсы длительностью около 0,5 мс, которые подаются на входы RA3, RA2 и RA1 микроконтроллера.

Транзистор VT1 управляет реле K1 – K3 байпаса по сигналу с вывода RD0 микроконтроллера DD1, а транзистор VT2 управляет реле K4 по сигналу с вывода RC0 DD1. Резисторы R1 и R2 ограничивают токи реле K1 – K3 и K4, соответственно. Диоды VD1 и VD2 ограничивают э.д.с. самоиндукции обмоток реле при отключении.

Транзисторы VT3 – VT5 работают в ключевом режиме и усиливают импульсы управления тиристорным ключом, вырабатываемые на выводах RC4, RD2 и RD2 микроконтроллера. Импульсы управления следуют попарно через 60 электрических градусов и подаются одновременно на оба оптодиода соответствующего модуля U1 – U3 одной из фаз. Резисторы R3 – R5 ограничивают ток через светодиоды силовых модулей U1 – U3 тиристорного ключа.

Транзистор VT6 по сигналу с вывода RC2 микроконтроллера включает светодиодный индикатор HL3 «Авария» на лицевой панели шкафа. Резисторы R8 – R19 устанавливают режимы работы транзисторов VT1 – VT6, причём для надежного запирания транзисторов VT1, VT3 – VT6 на их базы через резисторы R8, R12 – R16 подаётся небольшое отрицательное смещение от источника –15 В.

Оптроны U3, U4 и U6 предназначены для гальванической развязки и формирования сигналов управления от кнопок «Пуск», «Стоп» и РКФ, которые поступают на входы RA5, RE0 и RA3 микроконтроллера. Резисторы R23, R24, R26, R30, R34, R35, R38, R39, R44 устанавливают режимы работы оптронов U3, U4 и U6. Резисторы R27, R42 и R46 служат для повышения помехоустойчивости цепей управления.

Реле K1 используется в автоматическом режиме при управлении устройством от контакта K5.1 реле давления. При этом переключающий контакт K1.1 реле K1, в зависимости от его состояния, шунтирует либо кнопку «Пуск» (в отключенном состоянии), либо кнопку «Стоп» (во включенном состоянии). Резистор R47 ограничивает ток через обмотку реле K1.

Светодиоды HL1 – HL8, подключённые к выводам RB7 – RB0 микроконтроллера, предназначены для индикации состояния устройства и аварийных режимов:

- HL1 (красный) «Откл.» – устройство находится в отключённом состоянии и готово к работе;
- HL2 (жёлтый) «Пуск» – работает тиристорный ключ, осуществляется запуск; мигающий светодиод означает нормальный режим работы (идёт опрос сигналов аварий);
- HL3 (зелёный) «Вкл.» – тиристорный ключ выключен, работает байпас;
- HL4 (красный) «Из.» – недопустимое снижение сопротивление изоляции кабеля;
- HL5 (красный) «Ус.» – недопустимые повышение, понижение или несимметрия фазных напряжений сети, обрыв одной из фаз, нарушение чередования фаз;
- HL6 (красный) «С.х.» – «сухой ход» насоса, ток двигателя меньше  $0,5I_n$ ;
- HL7 (красный) «Пер.» – перегрузка насоса, ток двигателя превысил  $1,3I_n$ ;
- HL8 (красный) «К.з.» – короткое замыкание или заклинивание двигателя, ток двигателя превысил  $3I_n$ .

Резисторы R28, R29, R32, R36, R37, R41, R43, R45 ограничивают ток через светодиоды HL1 – HL8.

На рисунке 7 приведён упрощенный алгоритм работы устройства. После включения питания происходит сброс и инициализация микроконтроллера, при которой устанавливаются вид сигналов и направление передачи информации соответствующими разрядами его портов. После этого РКФ проверяет наличие аварии сети. В случае возникновения ава-

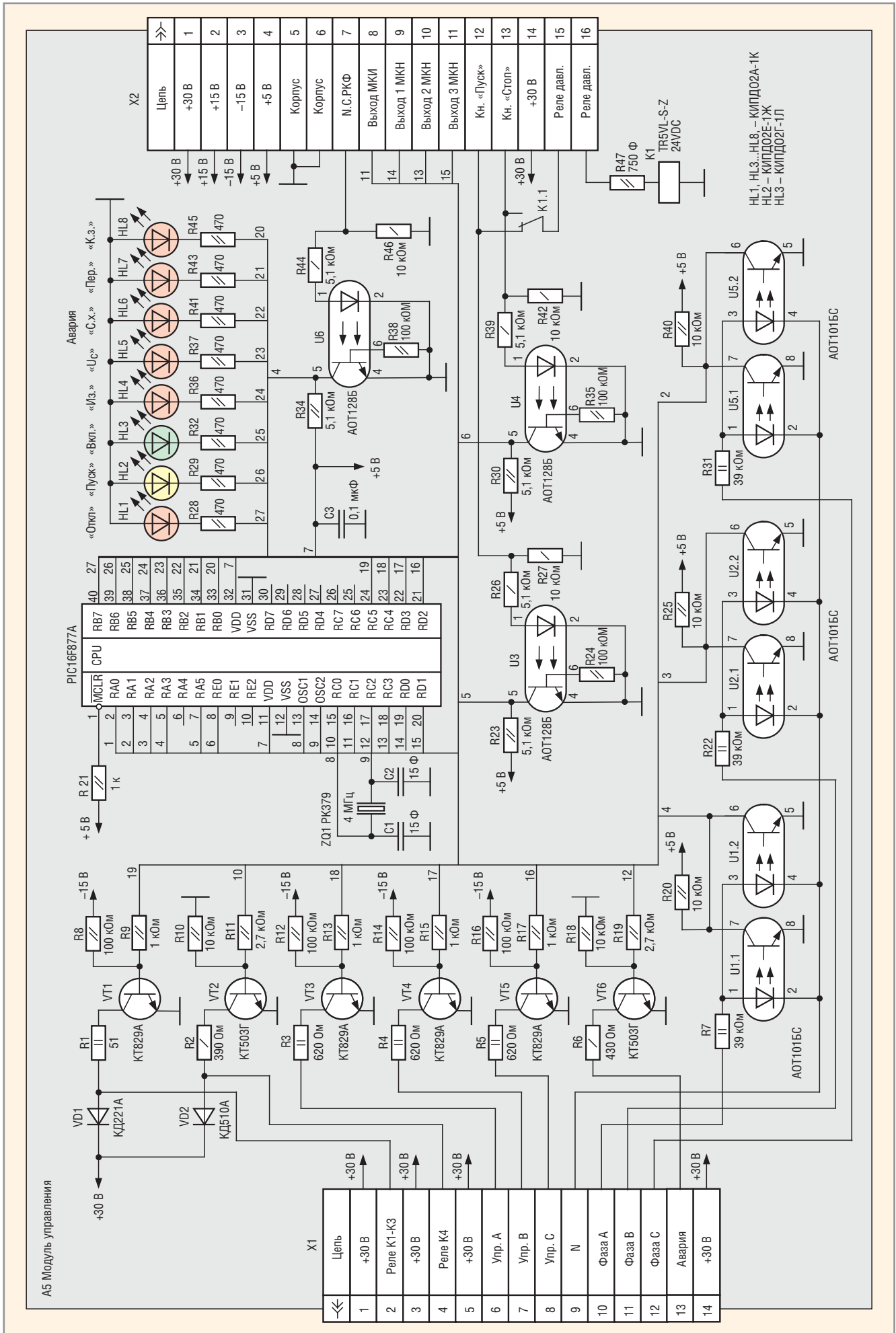


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема модуля управления

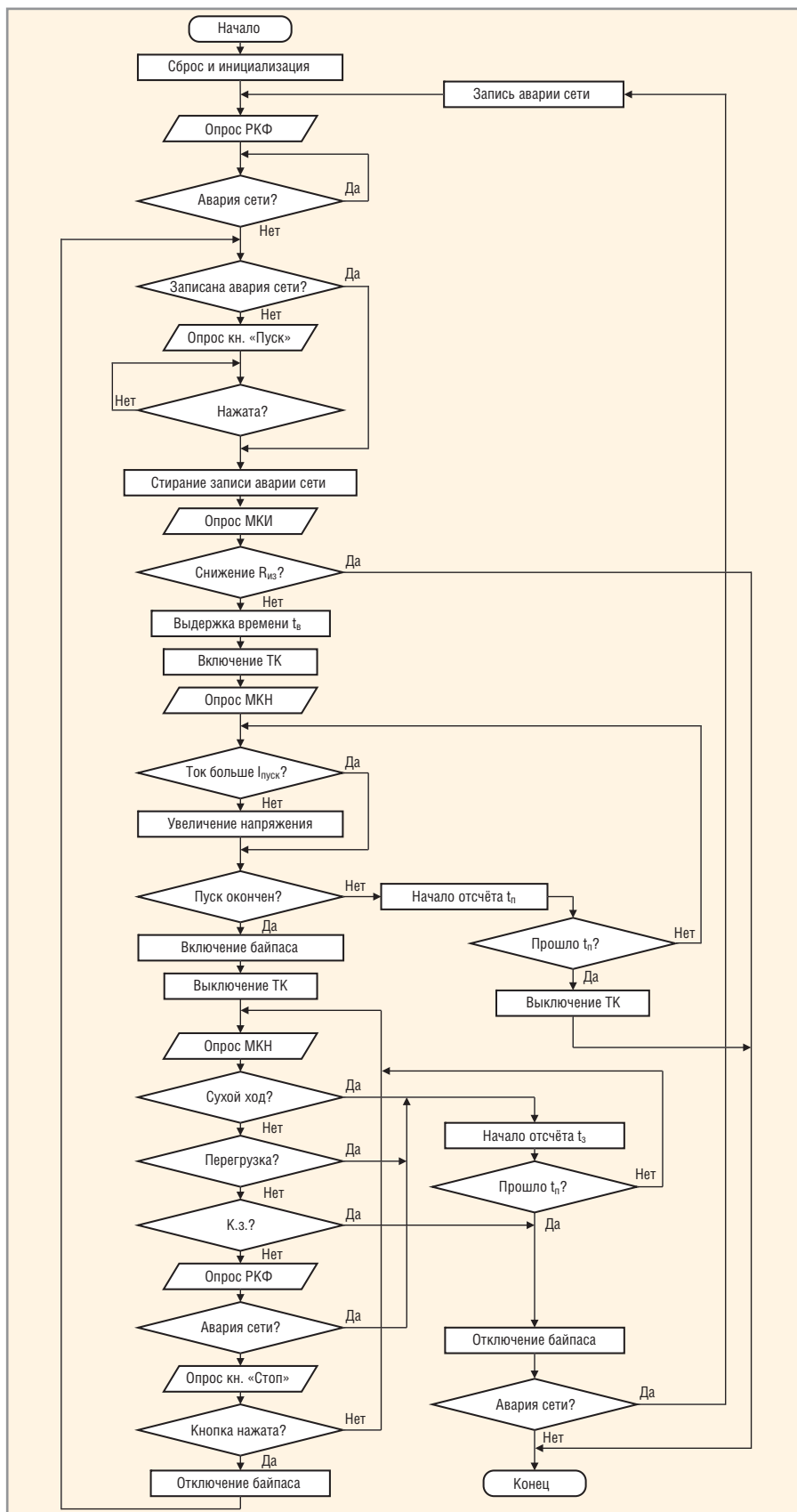


Рис. 7. Упрощённый алгоритм работы устройства

рии сети вырабатывается запрет на включение устройства. Это состояние устройства длится до исчезновения аварии сети, после чего микроконтроллер проверяет наличие записи в его памяти аварии сети, произошедшей накануне. Запись аварии сети производится в энерго-

независимую память МК и используется для организации автоматического повторного включения (АПВ) после восстановления сети. МК успевает сделать такую запись даже при исчезновении напряжения сети, поэтому АПВ происходит при последующем появлении напряже-

ния на входе устройства. Если авария сети была зафиксирована, то происходит включение устройства, минуя кнопку «Пуск», в противном случае МК переходит к опросу кнопки «Пуск».

После нажатия кнопки «Пуск» производится опрос МКИ. Если фиксируется недопустимое снижение сопротивления изоляции, устройство переходит в состояние «Откл.», которое может продолжаться сколь угодно долго, и выйти из которого возможно только выключением и последующим включением автомата QF2, т.е. сбросом МК. Если изоляция двигателя в норме, производится выдержка времени  $t_b$ , величина которой может изменяться от десятков секунд до нескольких минут. Выдержка необходима для гарантированного схода воды в скважине во избежание перегрузки двигателя насоса при пуске.

По окончании выдержки времени  $t_b$  производится включение тиристорного ключа с углом регулирования, соответствующим начальному напряжению пуска, которое устанавливается программно. В процессе пуска производится опрос МКН. При этом, если ток двигателя не превышает заданное значение  $I_{пуск}$  происходит уменьшение угла регулирования и увеличение напряжения на двигателе, в противном случае напряжение остается неизменным. Одновременно с началом пуска начинается отсчёт его длительности  $t_n$ , которая устанавливается программно в пределах 5...7 с. Пуск считается оконченным при достижении углом регулирования конечного значения, задаваемого программно. Если время пуска превысит заданное значение  $t_n$  производится выключение ТК, и устройство переходит в состояние «Откл.». Защита от несостоявшегося пуска предотвращает выход из строя двигателя из-за перегрева в процессе пуска.

По окончании пуска производится включение байпаса, выключение ТК и начинается процедура циклического опроса сигналов защит с МКН, РКФ и кнопки «Стоп». Эта процедура происходит сколь угодно долго, пока либо не возникнет одна из аварийных ситуаций, либо не будет нажата кнопка «Стоп». При возникновении любой из аварийных ситуаций – «сухого хода», перегрузки или аварии сети – начинается отсчёт времени задержки срабатывания защиты  $t_s$ , которое устанавливается программно в пределах 5...25 с для каждой защиты индивидуально. Если в течение этого времени аварийная ситуация исчезла, то происходит сброс индикации аварий и

МК возвращается к процедуре циклического опроса сигналов аварий. В противном случае проводится проверка причины возникновения аварийной ситуации. Если отключение произошло из-за аварии сети, то производится запись об аварии сети в память МК, который затем переходит к постоянному опросу РКФ, пока не исчезнет авария сети, и далее по алгоритму. Если причина отключения не в аварии сети, то устройство переходит в состояние «Откл.», из которого может выйти только при отключении напряжения питания автоматом QF2.

При возникновении короткого замыкания происходит отключение байпаса и после проверки причины отключения устройство переходит в состояние «Откл.». Если в процессе опроса была нажата кнопка «Стоп», то происходит отключение байпаса, и МК переходит к проверке записи аварии и последующему опросу кнопки «Пуск».

Следует отметить, что в течение всего времени работы устройства производится индикация его состояния и аварийных режимов с помощью светодиодных индикаторов HL1 – HL3 на лицевой панели и светодиодов HL1 – HL8 в модуле управления.



Рис. 8. Внешний вид устройства

Для других применений, например, для повысительных насосных станций (станций подкачки), в устройстве предусмотрена функция плавного торможения двигателя.

Таким образом, разработанное устройство учитывает все возможные аварийные ситуации и обеспечивает плавный пуск. Применение устройства позволяет повысить надёжность и производительность погружной насосной установки, устранить гидроудары в напорных трубопроводах, увеличить срок службы и увеличить межремонтный цикл используемого насосного оборудования, уменьшить нагрузку на сеть.

Устройство смонтировано в шкафу, имеющего размеры 500×320×180 мм, в

исполнении IP54. На рисунке 8 показан внешний вид устройства. Разработанное устройство испытано и успешно эксплуатируется на артезианской скважине с погружным насосом типа ЭЦВ8-16-140 мощностью 11 кВт в одном из сельских поселений Тульской области.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Березин С.Е. Насосные станции с погружными насосами. Стройиздат, 2008.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. Додэка-XXI, 2005.
3. Яценков В.С. Микроконтроллеры MicroCHIP. Практическое руководство. Горячая линия-Телеком, 2002.

