

Разработка универсального блока управления и контроля

для полупроводниковых преобразователей частоты

В статье описаны принцип действия, устройство, а также особенности функционирования универсального блока управления и контроля (БУК) для преобразователей частоты, разработанных НПО «Параллель» (г. Уфа). Приведено описание варианта конструкции и основные функции специализированных ячеек БУК полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ). Показано, что разработанный БУК позволяет эффективно применить статические преобразователи частоты в технологических процессах индукционного нагрева металлов токами повышенной частоты (ТВЧ). В статье приведены основные технические решения БУК типа «Параллель», предназначенного для современной серии ППЧ промышленных установок индукционного нагрева металлов ТВЧ.

Михаил Мультенко

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

Дарья Мамаева

darya.mamaeva.95@mail.ru

Введение

Система управления (СУ) — это неотъемлемая часть статических преобразователей частоты, используемых в высокочастотных установках индукционного нагрева металлов ТВЧ. Основа статического преобразователя частоты — автономный инвертор, являющийся силовым полупроводниковым устройством, преобразующим постоянное напряжение выпрямителя ППЧ в однофазный переменный ток повышенной частоты.

Система управления не только обеспечивает включение силовых тиристорных инверторов в нужной очередности и регулирование их частоты по заданному закону, но и выполняет много дополнительных функций, обеспечивающих нормальную работу ППЧ, например проводит индикацию аварийных режимов работы. Многообразие функций СУ, а также необходимость повышения надежности их осуществления приводят в условиях воздействия импульсных помех ППЧ к усложнению системы управления. Однако в настоящее время для изготовления СУ ППЧ используется современная база совершенных электронных компонентов. Поскольку рабочая частота ППЧ далека от предельных значений у компонентов СУ, в такой системе допустимо устанавливать широко распространенные отечественные маломощные тиристоры, диоды, транзисторы, микросхемы, оптроны и т. д.

Так как габариты СУ не имеют принципиального значения, а плотность монтажа ее дискретных компонентов не ограничена, величина потребляемой ими мощности не лимитирована. Следовательно, помехоустойчивость и надежность БУК обеспе-

чиваются традиционными, достаточно простыми средствами.

В статье рассмотрена СУ ППЧ, при разработке которой использованы оригинальные технические решения, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения и доведенные до реализации на практике в виде отдельных узлов блока управления и контроля универсального назначения. Но чтобы познакомиться с принципом действия БУК, необходимо получить представление о назначении и работе преобразователя частоты и индукционной установки в целом [1, 2].

Устройство и работа составных частей БУК

БУК, предназначенный для полупроводниковых преобразователей частоты, которые разработаны и произведены НПО «Параллель», выполняет следующие функции:

- предпусковой автоматический контроль исправности элементов силовой схемы преобразователя в установках индукционного нагрева металлов ТВЧ;
- пуск (включение в работу) полупроводникового преобразователя частоты при запуске индукционной установки;
- непрерывный контроль электрического режима и состояния элементов и узлов полупроводникового преобразователя частоты в процессе нормальной работы;
- аварийное отключение установки ТВЧ при возникновении аварийных режимов и неисправностей;
- диагностирование и индикацию типа неисправности или аварийного режима;

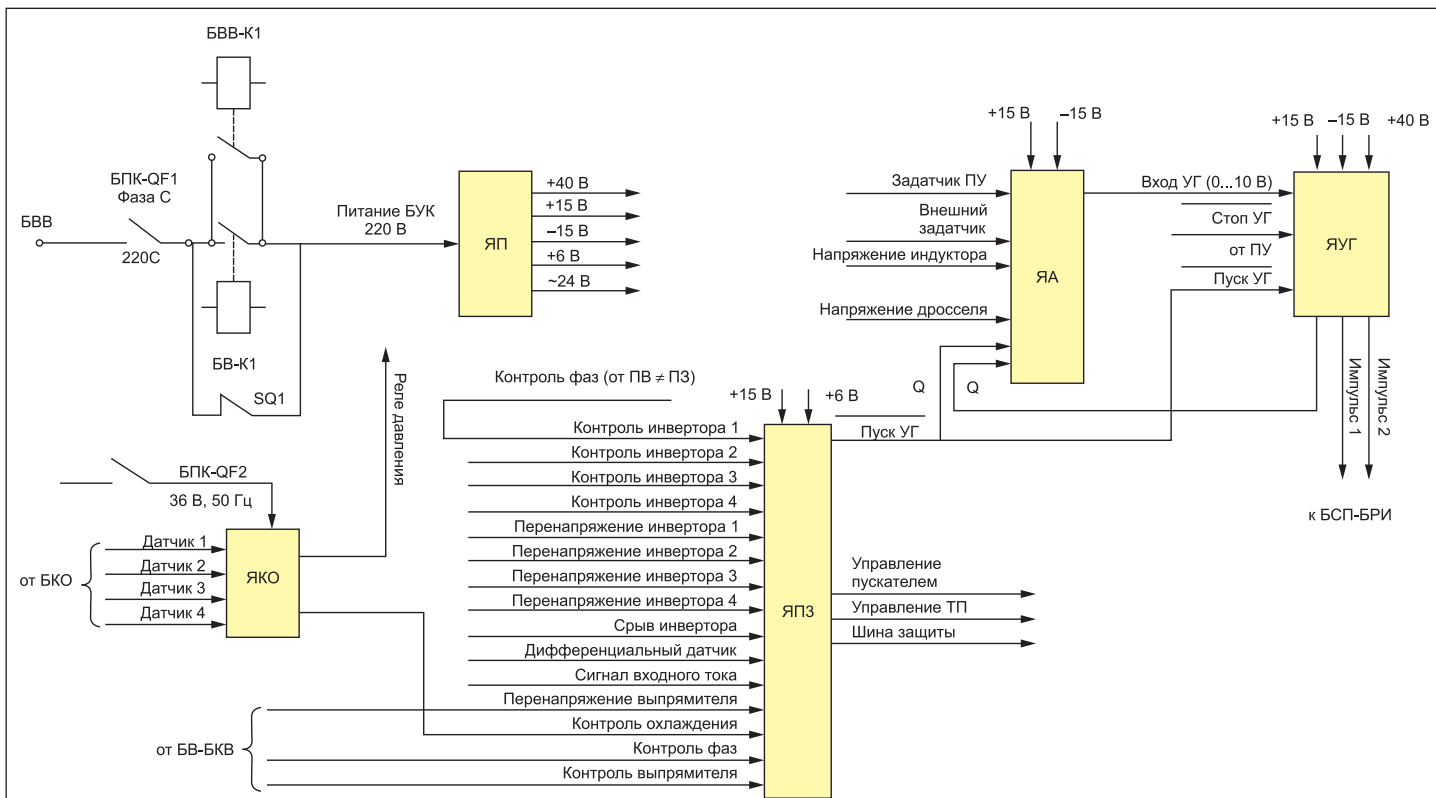


Рис. 1. Функциональная схема БУК: БВВ — блок ввода; БПК — блок питания и контроля; ПУ — пульт управления; БВ — блок выпрямителя; БКВ — блок контроля выпрямителя; БСП — блок силовой полупроводниковый; БРИ — блок распределителя импульсов

- генерацию необходимой импульсной последовательности с требуемой инвертором частотой импульсов, чтобы сформировался выходной ток преобразователя;
- формирование одно- или двухтактной последовательности управляющих импульсов требуемой формы и амплитуды для силовых полупроводников инвертора;
- формирование сигнала управления технологическим процессом индукционного нагрева ТВЧ;
- ручное либо автоматическое регулирование режима работы установки ТВЧ по сигналам задатчиков от пульта управления преобразователем (ПУ) или выносного пульта управления нагревом (ПУН), технологического контроллера, внешнего регулятора или программатора.

На рис. 1 показана электрическая функциональная схема универсального БУК для полупроводниковых преобразователей частоты типа «Параллель». БУК включает в себя ячейку питания (ЯП), ячейку автоматики (ЯА), ячейку управляемого генератора (ЯУГ), ячейку контроля охлаждения (ЯКО), ячейку пуска и защиты (ЯПЗ).

Далее рассмотрены основные элементы функциональной схемы БУК — отдельные функциональные ячейки СУ ППЧ, конструктивно объединенные в единый блок. Основные технические решения, реализованные в БУК, защищены авторскими свидетельствами СССР [3–10].

Ячейка питания БУК

Функциональная схема ячейки питания (ЯП), приведенная на рис. 2, подключена к сетевому напряжению 220 В/50 Гц. На выходы

ЯП выдает постоянные напряжения +6 В, +40 В, стабилизированные напряжения +15 и -15 В и переменное напряжение высокой частоты с амплитудой 24 В. Напряжение 220 В/50 Гц через сетевой предохранитель, помехоподавляющий фильтр и балластный резистор подается на выпрямитель. Инвертор на транзисторах, питающийся выпрямленным напряжением 310 В, выполнен по полумостовой схеме, два плеча которой образованы резистивно-емкостным делителем. Транзисторы инвертора ЯП управляются драйвером с необходимыми элементами обвязки.

Устройство максимальной токовой защиты представляет собой вспомогательный тиристор, управляющая цепь которого через фильтр подключена к резистору, включенному в цепь выходного постоянного тока сетевого выпрямителя. При токе 0,2–0,4 А тиристор включается и замыкает цепь питания драй-

ра, в результате чего транзисторы инвертора закрываются, а светодиод «I>» сигнализирует о срабатывании максимальной токовой защиты.

От вторичных обмоток трансформатора ячейки питания БУК напряжения высокой частоты прямоугольной формы поступают на диодные выпрямители с фильтрующими конденсаторами, а также на полупроводниковые стабилизаторы с конденсаторами фильтра на выходах. Стабилизированные напряжения +15 и -15 В необходимы для питания микросхем других ячеек БУК.

В цепи выходных обмоток трансформатора включены самовосстанавливающиеся предохранители, резко увеличивающие сопротивление при превышении номинальной нагрузки по току или при перегреве. После устранения перегрузки или перегрева они автоматически восстанавливают свое первоначальное сопротивление. Каждый выход ЯП снабжен цепью

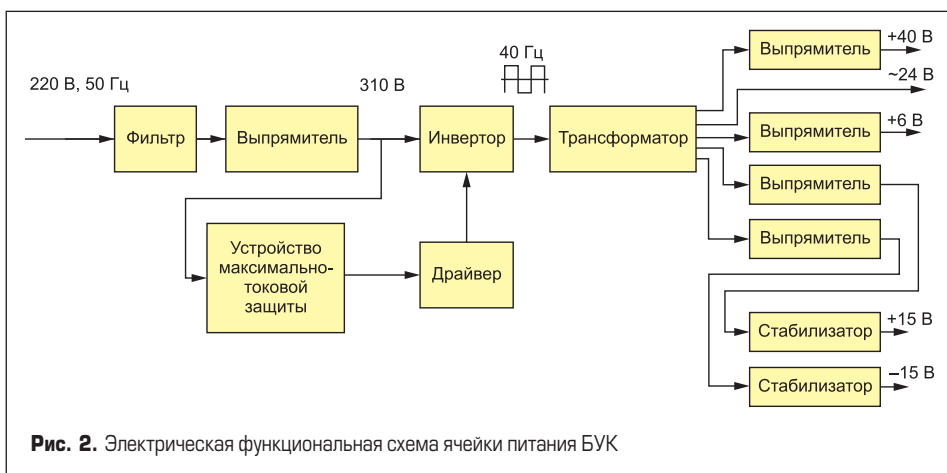


Рис. 2. Электрическая функциональная схема ячейки питания БУК

индикации напряжения (светодиоды «40В», «~24В», «+15В» и «-15В»).

Ячейка пуска и защиты БУК

Ячейка пуска и защиты (ЯПЗ) постоянно контролирует сигналы датчиков параметров преобразователя. Если диагностическая информация датчиков свидетельствует об отсутствии неисправностей, ЯПЗ формирует сигналы в цепи «Управление пускателем», «Управление ТП» и «Пуск УГ». В аварийных режимах в цепи «Шина защиты» появляется сигнал низкого уровня, формирующий импульс для срабатывания конденсаторного выключателя ППЧ. При этом прекращается подача сигналов в цепи «Управление пускателем» и «Управление ТП».

На рис. 3 приведена электрическая функциональная схема ЯПЗ. Она включает в себя 16 каналов контроля параметров преобразователя, в том числе 2 канала, связанных с выходами оптранных датчиков, а также 4 канала защиты, связанных с выходами трансформаторных датчиков. Все 16 сигналов поступают на входы пороговых элементов, в качестве которых использованы 16 триггеров Шмитта (микросхемы D2–D5). При напряжении питания + 15 В напряжение срабатывания пороговых элементов составляет около 10 В. Выходы пороговых элементов соединены с информационными входами D-триггеров регистра памяти (микросхемы D6–D9).

Прямые выходы D-триггеров ЯПЗ подключены к входам логических элементов И–НЕ (D14, D15), а инверсные — к входам индикаторов состояния каналов контроля. Каждый канал индикации состоит из ключа, управляющий вход которого является входом индикатора, а сигнальная цепь связывает цепочку из светодиода и резистора с источником питания +6 В. ЯПЗ является логическим устройством, осуществляющим предпусковой контроль, пуск, функциональный контроль,

отключение, защиту и диагностирование преобразователя частоты.

Перечисленные выше функции реализуются следующим образом. Предпусковой контроль начинается после нажатия кнопки КОНТАКТОР ВКЛ на пульте управления преобразователем и срабатывания пускателя блока выпрямителя (БВ). При этом запитывается БУК, и на выходе БВ появляется постоянное испытательное напряжение величиной около 400 В. При диагностировании исправности силовых вентилей ППЧ на каждом из них появляется напряжение, благодаря чему включаются транзисторы контролируемых оптопар и на входах 16 пороговых элементов ЯПЗ (D1–D4) устанавливаются сигналы низкого уровня. Сигнал «Контроль фаз» в этот момент имеет высокий уровень, но не влияет на работу схемы, так как блокируется сигналом низкого уровня, приходящим с выхода D19.2 на второй вход порогового элемента. Сигналы высокого уровня с выходов пороговых элементов поступают на информационные входы регистра памяти (D-триггеры D6...D9) и передаются на выходы регистра, поскольку на стробирующих входах сигнал низкого уровня, D-триггеры «прозрачны» для информации.

Ключи D10–D13 заперты, так как их управляющие входы поступают сигналы низкого уровня с инверсных выходов D-триггеров регистра памяти и светодиоды индикаторов не светятся. На выходах D14, D15 логических элементов И–НЕ устанавливаются низкие уровни напряжений, на выходах D16.1, D16.2 элементов ИЛИ–НЕ и D17.2 элемента И–НЕ — высокие уровни. На входе фиксатора включения контактора (рис. 3) появляется напряжение низкого уровня. А через время задержки, составляющее примерно 0,1 с, которое определяется RC-цепочкой, на выходе фиксатора низкий уровень напряжения сме-

няется высоким. Также высокий уровень отмечается на выходе фиксатора выключения контактора.

Высокий уровень напряжения с выхода D19.2 включает ключ, подающий ток в цепь «Управление пускателем». Включение пускателя приводит к появлению напряжений фаз питающей сети на соответствующих входах блока конденсаторного выключателя (БКВ), после чего уровень сигнала «Контроль фаз» меняется на низкий. Через время задержки около 1 с включается ключ, подающий ток в цепь «Управление ТП», а также поступает сигнал низкого уровня в цепь «Пуск УГ». Одновременно снимается блокирующий сигнал со второго входа порогового элемента, и сигнал «Контроль фаз» начинает влиять на работу схемы ЯПЗ. С рассмотренного момента включается тиристор проходной (ТП), и с определенной задержкой начинается генерация управляющих импульсов для тириستоров инвертора, т. е. происходит пуск преобразователя.

Фиксатор включения пускателя удерживается в состоянии высокого уровня выходного сигнала независимо от сигнала с элемента D17.1. Он изменяет состояние лишь по сигналу цепи «Шина защиты», а в исходное состояние возвращается только после снятия питания. В случае появления сигнала неисправности по любому из 15 входов во время предпускового контроля включение пускателя исключается, что обеспечивают логические элементы D16.1 и D17.2. При этом соответствующий светодиод индицирует причину неисправности преобразователя, список которых указан на лицевой панели БУК. Если отсутствует напряжение хотя бы одной из фаз (неисправность предохранителя, пускателя и т. д.), то после включения пускателя происходит его немедленное отключение и загорается соответствующий индикатор на лицевой панели ЯПЗ.

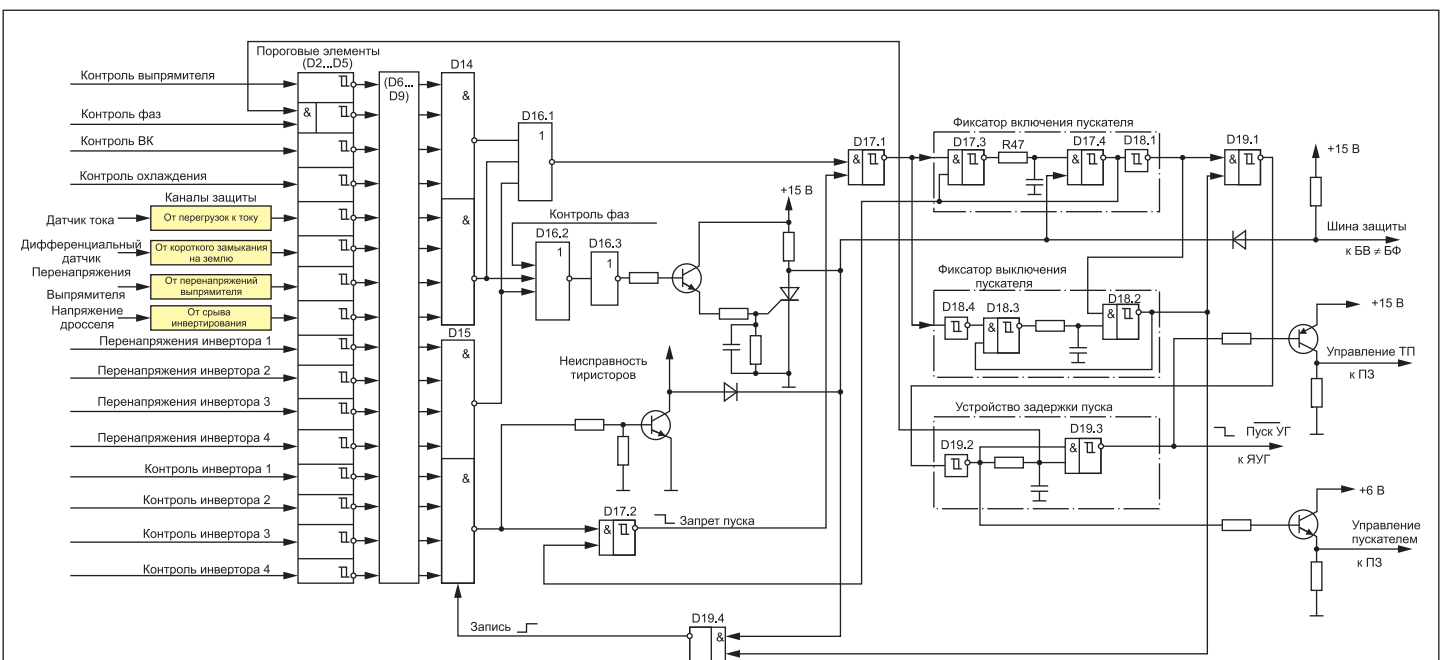


Рис. 3. Электрическая функциональная схема ячейки пуска и защиты

Контроль тиристора проходного (ТП) возможен только до момента пуска, когда ТП находится под испытательным напряжением. После пуска выходная цепь контролирующего оптрона шунтируется транзистором БКВ, который, в свою очередь, включается сигналом «Управление ТП». Функциональный контроль производится во время работы ППЧ путем непрерывной подачи на 16 входов ЯПЗ сигналов контролирующего оптопар, датчика входного тока, трансформаторного датчика замыканий на землю в нагрузку и напряжения на силовом дросселе инвертора.

В случае когда сигналы о неисправности подает система контроля охлаждения ППЧ, система контроля выпрямителя или система конденсаторного выключателя силового инвертора, на входе фиксатора выключения пускателя возникает напряжение низкого уровня. А через время задержки около 20 мкс на выходе D18.2 появляется напряжение низкого уровня, что приводит к выключению пускателя. Фиксатор выключения пускателя после этого удерживается в состоянии низкого выходного сигнала вплоть до снятия питания с БУК. Причина отключения высвечивается соответствующим светодиодом.

В случае появления аварийного сигнала с канала «Перенапряжения инвертора», «Перегрузка по току», «Замыкание на землю», «Перенапряжения выпрямителя», «Срыв инвертирования» или контроля фаз на выходе D16.2 элемента ИЛИ-НЕ появляется сигнал низкого уровня. Это приводит к включению тиристора и формированию сигнала низкого уровня в цепи «Шина защиты». При этом снимается управление с ТП, срабатывает ВК и отключается пускатель. Одновременно на стробирующий вход D-триггеров регистра памяти поступает высокий уровень напряжения, что обеспечивает фиксацию сработавших каналов защиты с их индикацией вплоть до снятия питания с БУК, т. е. до нажатия на кнопку КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ.

Если нажатие на кнопку КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ производится во время нормальной работы преобразователя, то отключаются пускатель БВ, силовой пускатель БВВ и обесточивается БУК. Канал защиты от перегрузок по току выполнен на основе датчика тока LEM. Его выходной сигнал сравнивается с уставкой компаратора D1.1, выходной сигнал которого поступает на вход триггера Шмитта D3.1. Чувствительность канала изменяется регулируемым резистором.

Канал защиты от замыкания на землю содержит выпрямитель, выполненный на диодной матрице с помехоподавляющими конденсаторами, вход которой через цепь «Дифференциальный датчик» подключен к трансформатору тока БВВ, а выход — к пороговому элементу D3.4. Канал защиты ЯПЗ от замыкания на землю настроен на срабатывание при разности токов примерно 20 А в плюсовой и минусовой цепях выпрямителя.

Временные диаграммы сигналов, поясняющие принцип действия канала защиты от срыва инвертирования, представлены на рис. 4. Для защиты преобразователя от срыва инвер-

тирования использован оригинальный способ защиты инвертора [5]. В установившемся режиме работы инвертора длительность отрицательных полуволн напряжения входного дросселя прямо пропорциональна длительности проводящего состояния тиристорov и диодов инвертора. Срыв инвертирования выражается в том, что тиристоры не выключены. Это приводит к превышению нормальной длительности отрицательных полуволн сигнала в цепи «Напряжение дросселя». Канал защиты от срыва преобразует отрицательные полуволны данного сигнала в пилообразные импульсы, амплитуда которых пропорциональна их длительности. В случае срыва инвертирования амплитуда импульсов достигает уровня переключения порогового элемента, что приводит к срабатыванию защиты.

Срыв инвертирования может наступить при разрыве выходной цепи инвертора, предельно большом эквивалентном сопротивлении нагрузке при неправильной настройке ППЧ, из-за помех по цепям управления тиристорами, перегрузки и перегрева тиристорov, воздействия высокой скорости нарастания напряжения, например при неисправности дросселя насыщения, коммутующего дросселя или демпфирующих цепей. Защита от срыва инвертирования срабатывает и при других неисправностях схемы инвертора (например, обрывах, коротких замыканиях), которые при-

водят к тому, что тиристоры не выключаются или происходит короткое замыкание силовой цепи за входным дросселем инвертора ППЧ.

На рис. 4 показаны временные диаграммы работы канала защиты ЯПЗ при пуске и установившемся режиме, а также при срыве инвертирования. Принципиальная электрическая схема канала защиты от срыва инвертирования выполнена согласно рекомендациям работы [6]. Напряжение дросселя с сигнальной обмотки поступает на вход усилителя-ограничителя, преобразующего входной сигнал в прямоугольные импульсы амплитудой около 14 В. К коллектору транзистора подключена интегрирующая RC-цепочка. Во время отрицательной полуволны напряжения дросселя, по длительности соответствующей включенному состоянию тиристорov и диодов инвертора ППЧ, транзистор запирается и подключенный конденсатор заряжается через резисторы.

Во время паузы в работе тиристорov и диодов инвертора транзистор насыщен суммарным током от входного сигнала и через резистор от источника +15 В. При этом конденсатор разряжается через диод и транзистор. В течение нескольких периодов после пуска (рис. 4) напряжение дросселя имеет отрицательную полярность. Чтобы исключить ложное срабатывание защиты в этот период, параллельно конденсатору, через

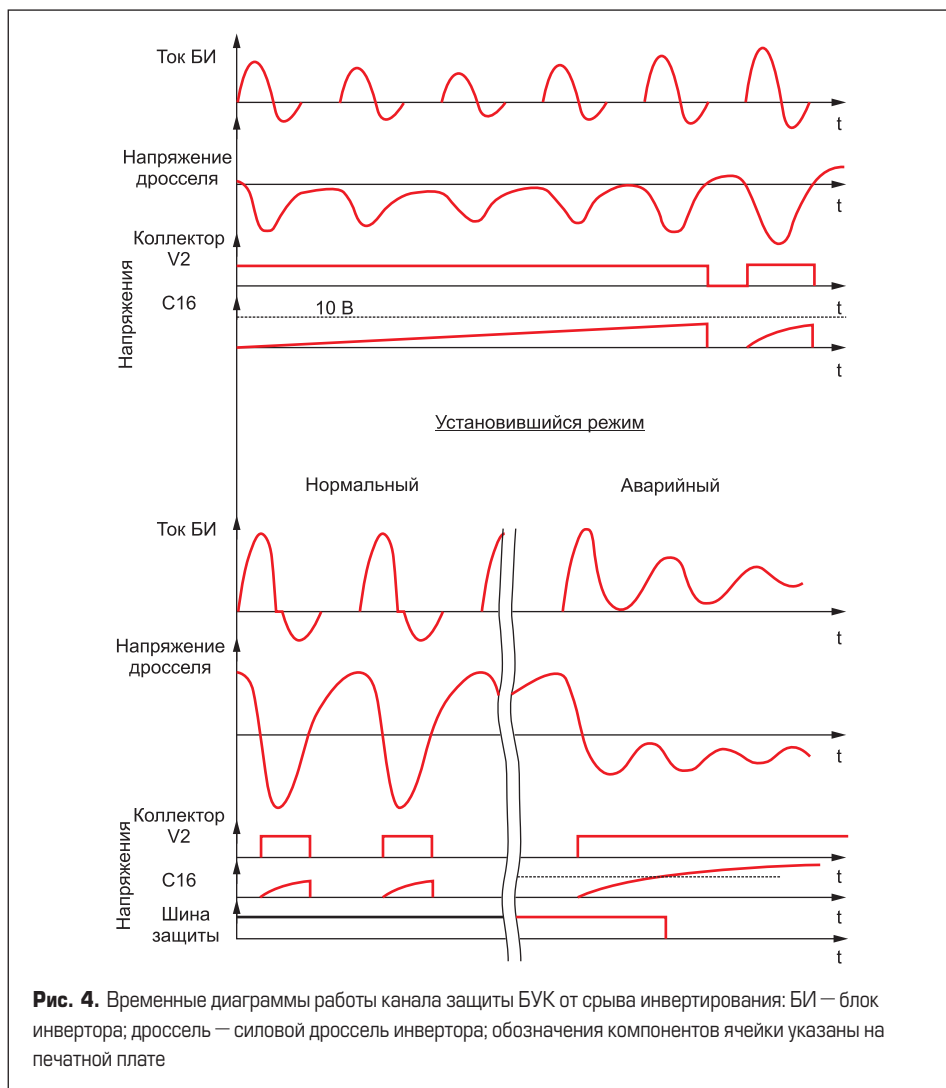


Рис. 4. Временные диаграммы работы канала защиты БУК от срыва инвертирования: БИ — блок инвертора; дроссель — силовой дроссель инвертора; обозначения компонентов ячейки указаны на печатной плате

диод, включен конденсатор, замедляющий рост напряжения на входе порогового элемента в первые периоды после пуска. Затем конденсатор заряжается до напряжения 13 В. В дальнейшем он не влияет на форму выходного напряжения канала защиты от срыва, так как диод смещен в обратном направлении. Резистор разряжает конденсатор при выключении инвертора перед следующим пуском.

Уставка по длительности канала защиты БУК от срыва инвертирования регулируется резистором. Следует иметь в виду, что если ее величина приближается к длительности отрицательной полуволны напряжения дросселя, может произойти срабатывание защиты вследствие наличия сигнала низкого уровня в цепи «Шина защиты», которое не сопровождается свечением светодиода. В этом случае сигнал высокого уровня на стробирующий вход D-триггера поступает с задержкой относительно момента включения тиристора. За время этой задержки сигнал на информационном входе возвращается к нормальному (высокому) уровню, поскольку отрицательная полуволна напряжения дросселя окончилась. Это необходимо учитывать при настройке защиты БУК от срыва инвертирования силовых тиристоров ППЧ.

Ячейка контроля охлаждения БУК

Ячейка контроля охлаждения (ЯКО) контролирует выходные сигналы блока контроля охлаждения преобразователя. В случае превышения ими пороговых значений она сначала выдает предупреждающий сигнал в цепь «Реле охлаждения», а затем с задержкой 2–4 с отключает ППЧ во избежание перегрева элементов силовой схемы. Ячейка предназначена

для контроля наличия и фиксации перегрева воды в каналах системы охлаждения преобразователя, световой индикации отсутствия или перегрева воды по каждому из каналов охлаждения и формирования сигналов «Контроль охлаждения» и «Реле охлаждения». Ячейка контроля охлаждения преобразователей типа «Параллель» описана в работе [13].

На рис. 5 показана электрическая функциональная схема ЯКО. Ячейка подключена к напряжению 36 В/50 Гц через самовосстанавливающийся предохранитель. К входам четырех идентичных каналов сигнализации (КС1–КС4) через цепи «Датчик 1–Датчик 4» подключены последовательно соединенные контакты термостатов и реле протока (индикаторов потока), установленных на сливном коллекторе блока контроля охлаждения преобразователя частоты. Каждый КС состоит из резисторов, контактов соответствующего термостата, индикатора потока, ограничителя напряжения, помехоподавляющего конденсатора и D-триггера. К выходам D-триггеров через ключи подсоединены светодиодные индикаторы, а через элемент ИЛИ — вход транзисторного интегратора.

При умеренных расходе и температуре воды в ветвях сливного коллектора контакты термостатов и индикаторов потока замкнуты. При этом на входах D-триггеров имеет место высокий уровень напряжения в 10 В. А сами триггеры находятся в единичном состоянии, при котором светодиоды индикации защиты не светятся. Если расход воды в каком-либо канале меньше (2,7 ± 0,3) л/мин или температура воды выше (45 ± 5) °С, последовательная цепочка, состоящая из контактов реле протока и тер-

мостата, разрывается и падает напряжение на входе соответствующего D-триггера, который переключается в нулевое состояние. При этом светится красный светодиод, индицирующий аварийное состояние соответствующей ветви канала охлаждения.

Устройство гальванической развязки предотвращает попадание высокого напряжения в систему управления. Цепь сброса ЯКО возвращает ячейку в исходное состояние.

При переключении в нулевое состояние хотя бы одного из D-триггеров, по сигналу, поступающему через развязывающие диоды, включается транзистор интегратора, соединяющий входы оптрона с источником питания. Тиристор оптрона, включаясь, замыкает цепь «Реле давления», передающую сигнал неисправности охлаждения на пульты управления преобразователем и индукционной установкой. После заряда конденсатора до порогового напряжения однопереходного транзистора интегратора последний формирует импульс, включающий тиристор. а затем на стробирующий вход D-триггеров поступает низкий уровень напряжения, фиксирующий их состояние. Одновременно выключается опто-транзистор, выдающий аварийный сигнал в цепь «Контроль охлаждения» ячейки пуска и защиты.

Если неисправность системы охлаждения восстанавливается до момента аварийного отключения, например, оператор при появлении звукового сигнала на пульте управления увеличил давление на входе в систему охлаждения, последовательная цепочка из термостата и реле протока вновь замыкается, и D-триггер возвращается в единичное состояние. При этом горевшие красные светодиоды гаснут, конденсатор интегратора разряжается, а электрическая схема ячейки возвращается в исходное состояние.

Время задержки аварийного отключения преобразователя устанавливается при настройке преобразователя. Сброс D-триггеров при настройке осуществляется размыканием выключателя БПК «36 В». При аварийном отключении преобразователя сброс ЯКО происходит вместе со сбросом ЯПЗ нажатием красной кнопки КОНТАКТОР ВЫКЛ на ПУ преобразователя или соответствующей кнопки ПУН. При этом выключение тиристора выполняет оптопара, вход которой подключен к напряжению +6 В ЯП.

Ячейка управляемого генератора БУК

На рис. 6 показана функциональная схема ячейки управляемого генератора (ЯУГ). Она управляет частотой управляющих импульсов инвертора в функции сигналов цепей «Задатчик ПУ» (в режиме ЗАДАНИЕ ПУЛЬТ) или «Внешний Задатчик» (в режиме ЗАДАНИЕ ВНЕШНЕЕ). Сигналы цепей «Q» и «Напряжение нагрузки» являются сигналами обратной связи для системы автоподстройки на резонансную частоту нагрузки и системы стабилизации выходного напряжения. ЯУГ по сигналам цепей «Пуск УГ» и «Стоп УГ» начинает или прекращает генерацию и формирование управляющих импульсов для тири-

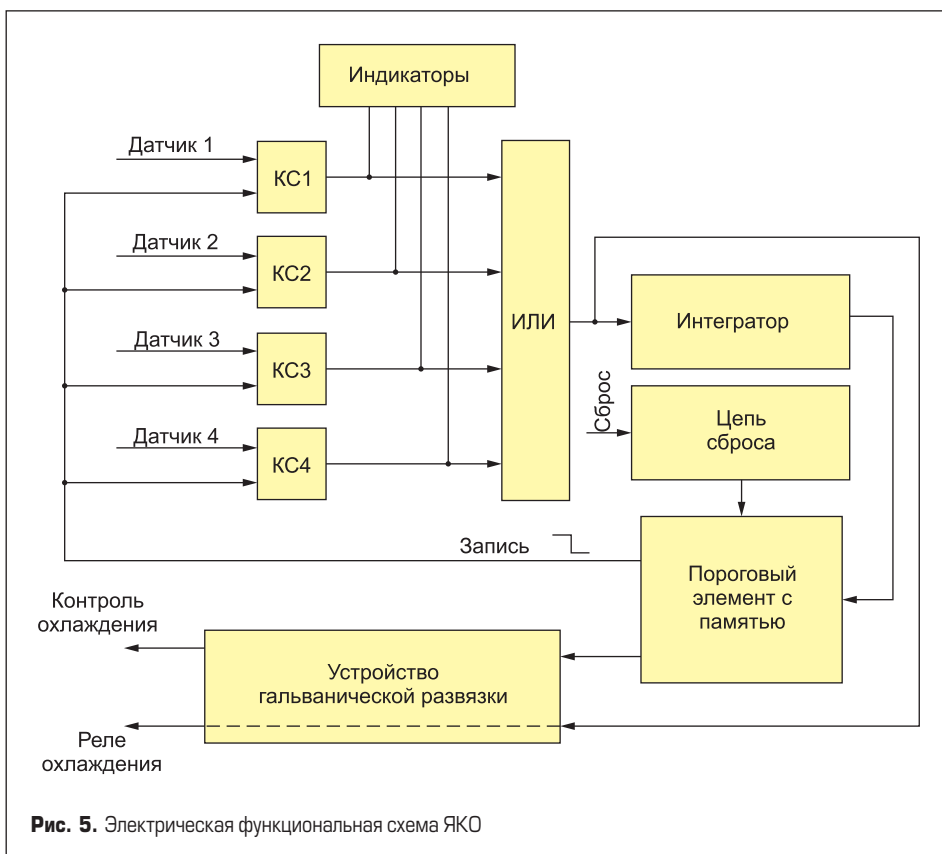


Рис. 5. Электрическая функциональная схема ЯКО

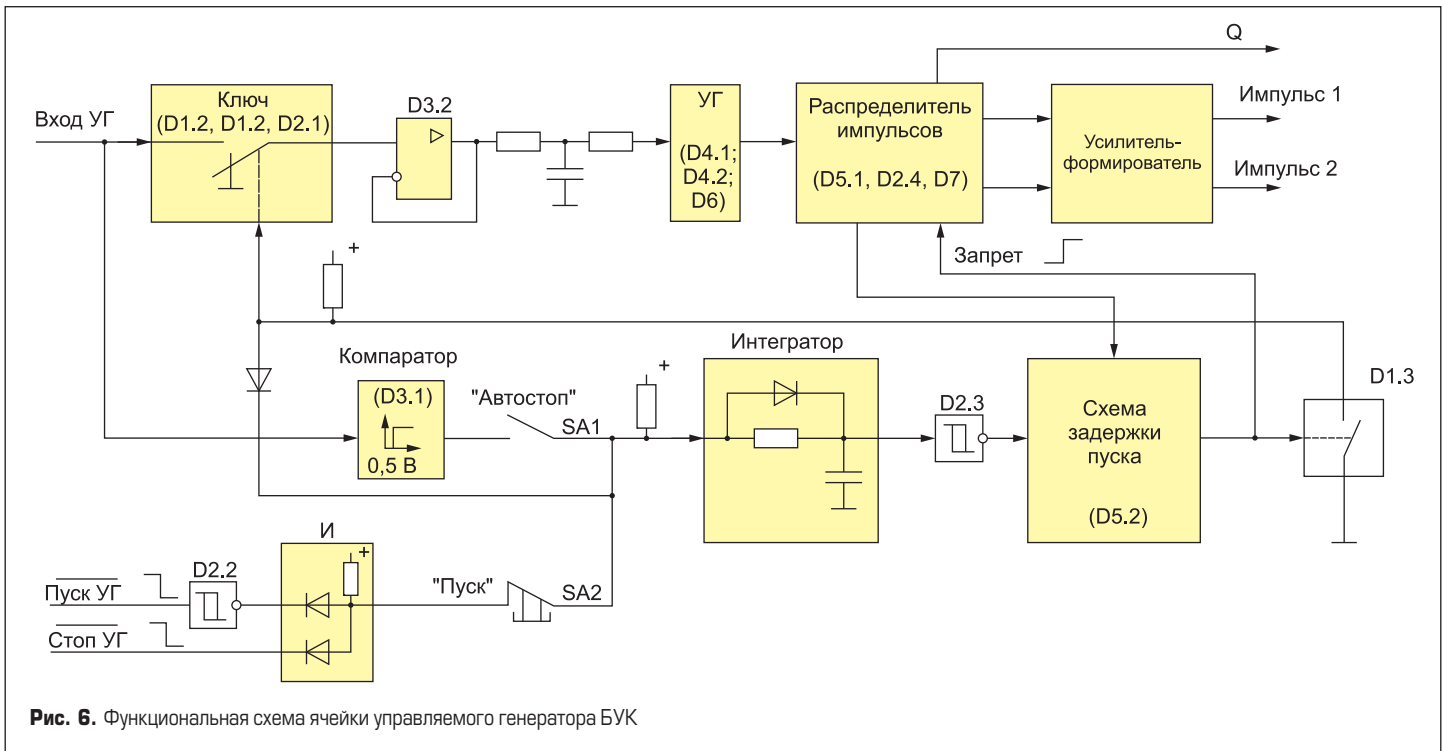


Рис. 6. Функциональная схема ячейки управляемого генератора БУК

сторов ППЧ. Частота импульсов изменяется от минимума до максимума пропорционально сигналу цепи «Вход УГ (0–10 В)».

Частота УГ изменяется пропорционально сигналу цепи «Вход УГ (0–10 В)» в пределах от минимальной до максимальной. Сигнал 0–10 В поступает на вход УГ через ключ D1.1, повторитель напряжения D3.2 и фильтр, ограничивающий скорость изменения частоты и связанной с ней мощности преобразователя. Это необходимо для ограничения перенапряжений на элементах силовой схемы ППЧ.

Пуск ЯУГ производится подачей сигнала низкого уровня в цепь «Пуск УГ», останов — подачей напряжения низкого уровня в цепь «Стоп УГ». При пуске заряжается конденсатор интегратора и переключается триггер Шмитта D2.3. Через схему задержки пуска снимается запрет с распределителя импульсов и размыкается ключ D1.3. В результате на управляющий вход ключа D1.1 поступает высокий уровень напряжения и ключ связывает цепь «Вход УГ (0–10 В)» со входом УГ. В цепях «Импульс 1» и «Импульс 2» появляются импульсы, частота следования которых в первый момент минимальна, а по мере заряда конденсатора она увеличивается до значения, заданного сигналом в цепи «Вход УГ (0–10 В)».

Схема задержки пуска предназначена для облегчения пуска мостовых схем инверторов. При наличии на плате специальной перемычки схема задерживает формирование второго и последующих импульсов управления тиристорами на время заряда коммутирующего конденсатора. В случае прекращения подачи сигнала низкого уровня в цепь «Пуск УГ» или при подаче низкого уровня напряжения в цепь «Стоп УГ» сигнал низкого уровня поступает через элементы И на управляющий вход ключа D1.1. При этом вход УГ соединяется с общим проводом источника питания, и вследствие разряда конденсатора проис-

ходят плавное снижение частоты импульсов и сброс мощности ППЧ. Одновременно конденсатор интегратора разряжается через резистор, а когда триггер Шмитта D2.3 отпускается через время задержки, равное примерно 0,1 с, подается сигнал, запрещающий прохождение импульсов через логические элементы D7.1, D7.2 распределителя импульсов. К этому времени инвертор работает на минимальной мощности, и снятие управляющих импульсов не вызывает перенапряжения в силовой схеме.

На рис. 7 приведены временные диаграммы напряжений в ячейке управляемого генератора БУК. Управляемый генератор (УГ) генерирует последовательность импульсов длительностью 10 мкс с частотой, кратной выходной частоте преобразователя. Распределитель импульсов преобразует эту последовательность в две половинные частоты, сдвинутые на 180 электрических градусов. Усилитель-формирователь создает мощные импульсы тока для управления тиристорами инвертора.

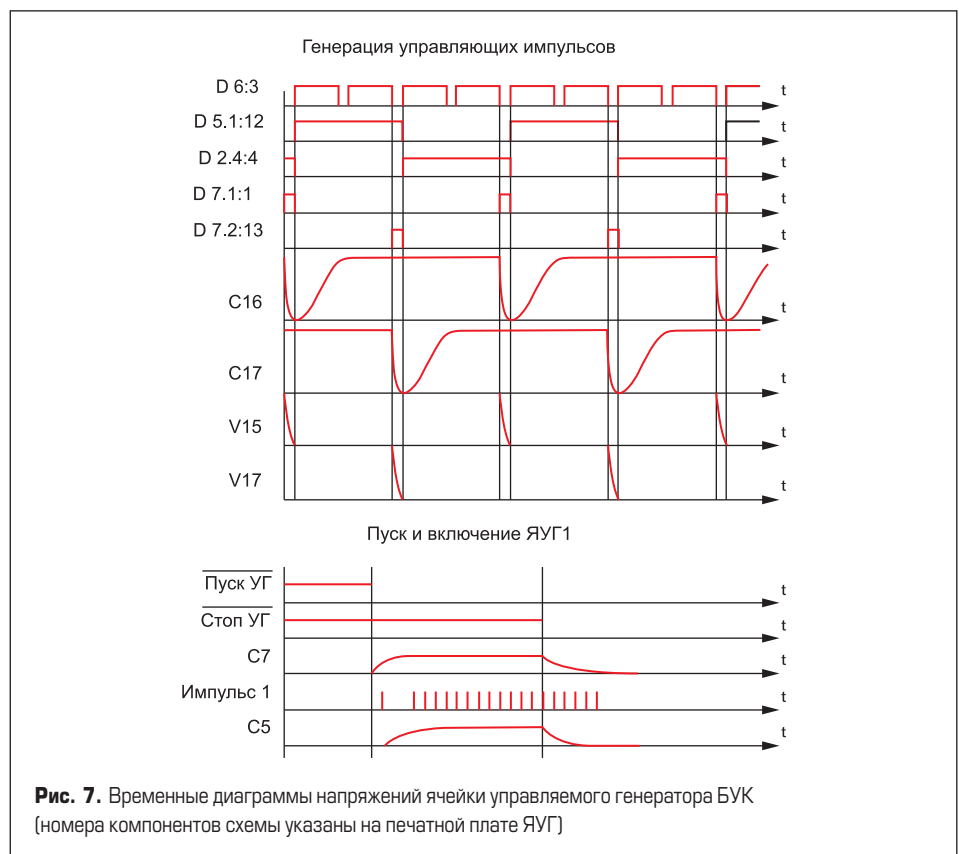


Рис. 7. Временные диаграммы напряжений ячейки управляемого генератора БУК (номера компонентов схемы указаны на печатной плате ЯУГ)

В режиме «Автостоп» (переключатель ПУГ-SA1 замкнут) снижение сигнала в цепи «Вход УГ (0–10 В)» ниже 0,5 В приводит к переключению компаратора D3.1, автоматическому снижению частоты и снятию выходных импульсов ЯУГ подобно тому, как это происходит при подаче сигнала низкого уровня в цепь «Стоп УГ». Таким образом, если задать величину напряжения меньше 0,5 В, инвертор ППЧ прекращает генерацию выходного тока и потребление мощности из питающей ППЧ силовой сети. Кнопка SA2 ПУСК служит для ручного включения ЯУГ в режиме проверки ЯУГ.

Ячейка автоматики БУК

Ячейка автоматики (ЯА) включает в себя три канала: регулирования фазы, регулирования напряжения, ограничения частоты. Регулирование мощности преобразователя изменением рабочей частоты в сторону индуктивного рассогласования контура нагрузки «вниз от резонанса» реализовано так же, как и электрических параметров преобразователя частоты с резонансной нагрузкой [3]. Оно обеспечивается совместным воздействи-

ем на управляемый генератор БУК сигналов от каналов регулирования фазы и напряжения индуктора.

Канал регулирования фазы (фазового угла нагрузки) служит для ограничения верхнего предела регулирования резонансной частотой нагрузки. Он содержит измеритель фазы, включающий компаратор, триггер, повторитель и элемент «исключающее ИЛИ», фильтр нижних частот, задатчик фазы и усилитель.

На рис. 8 показана электрическая функциональная схема ячейки автоматики БУК. Входы измерителя фазы связаны с измерительным трансформатором напряжения, подключенным к индуктору, и цепью «Q», которая несет информацию о фазе управляющих импульсов и выходного тока инвертора. Информацию о фазе напряжения нагрузки содержит сигнал цепи «Напряжение индуктора 2». Выходной сигнал триггера D2.1 сдвинут по фазе на 90 электрических градусов относительно фазы тока (сигнала «Q»), что позволяет получить требуемую статическую характеристику измерителя фазы.

Выходным сигналом измерителя фазы являются прямоугольные импульсы по-

стоянной амплитуды, скважность которых зависит от сдвига фаз между входными сигналами измерителя. После того как R усреднится С-фильтром, сигнал фазового угла в усилителе D5.1 сравнивается с заданным, который при настройке устанавливается соответствующим максимальному значению мощности преобразователя. Следовательно, при отсутствии сигналов от каналов регулирования напряжения и ограничения частоты, поступающих через диоды, канал регулирования фазы поддерживает резонанс в нагрузке, т. е. максимально возможную мощность при данной настройке схемы.

Канал регулирования напряжения, как и канал регулирования фазы, одним своим входом связан с трансформатором напряжения, подключенным к нагрузке (индуктору). Он состоит из выпрямителя, R, С-фильтра нижних частот и усилителя (D8.2, D7.2). Выходной сигнал усилителя D7.2 через диод, резисторы «Q») и повторитель D5.2 воздействует на вход УГ, управляя его частотой. Конденсатор вместе с резисторами образует фильтр нижних частот, обеспечивающий устойчивость системы регулирования.

Сигнал задания в канале регулирования напряжения поступает через переключатель SA2 на лицевой панели ячейки автоматики (ЯА) ЗАДАНИЕ ВНУТРЕННЕЕ/ ВНЕШНЕЕ от цепи «Задатчик ПУ» (режим ВНУТРЕННИЙ ЗАДАТЧИК) или «Внешний задатчик» (режим ВНЕШНИЙ ЗАДАТЧИК). Благодаря односторонней проводимости диода канал регулирования напряжения воздействует на частоту и мощность в сторону снижения лишь тогда, когда напряжение контура нагрузки превышает заданное значение. Таким образом, в результате совместного действия каналов регулирования фазы и напряжения ЯА поддерживает частоту УГ, соответствующую заданному значению напряжения нагрузки, т. е. стабилизирует это напряжение. Если потребуется, сигнал напряжения, подаваемый на вход канала регулирования напряжения, может быть заменен сигналом величиной 0–10 В, отображающим другой электрический параметр, например ток емкостной ветви контура нагрузки, мощность, ток индуктора или входной ток преобразователя.

Переключатель SA2 МОЩНОСТЬ/ ЧАСТОТА переключает вход УГ от выхода ЯА (режим МОЩНОСТЬ) к цепям задатчиков — задатчику ПУ (в режиме ВНУТРЕННИЙ ЗАДАТЧИК) и внешнему задатчику (в режиме ВНЕШНИЙ ЗАДАТЧИК). В режиме МОЩНОСТЬ ячейка автоматики автоматически подстраивает регулируемый параметр (напряжение нагрузки) под значение, заданное с ПУ или из цепи «Внешний задатчик». В режиме ЧАСТОТА сигнал задания непосредственно воздействует на вход УГ.

Цепь управления частотой через ключ D4.2 связана с цепью «Стоп УГ», в которую могут быть включены контакты релейного регулятора температуры. При достижении уставки релейного регулятора контакты замыкаются, сигнал на входе УГ обнуляется, что приводит к сбросу мощности, а в режиме АВТОСТОП —

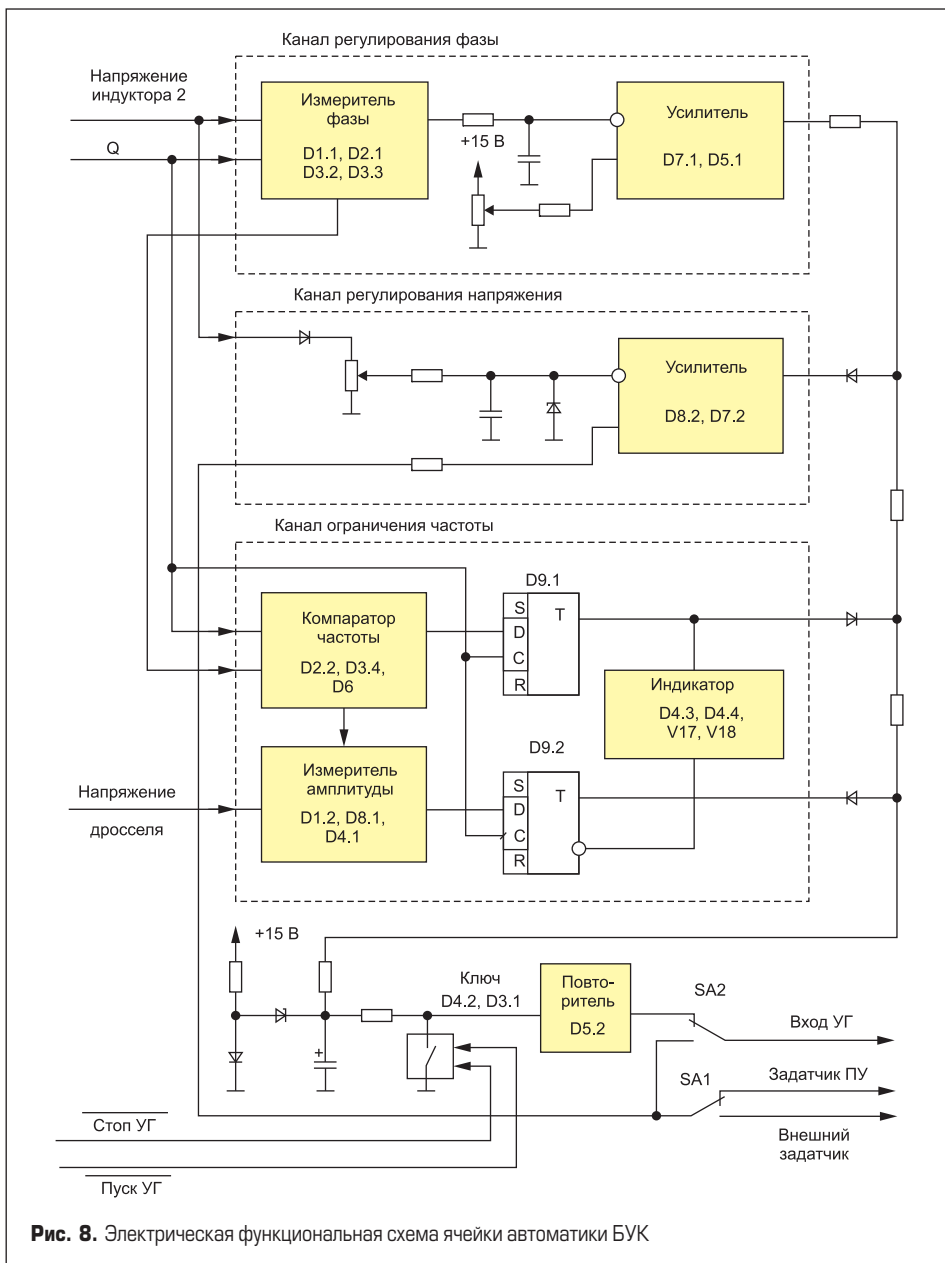


Рис. 8. Электрическая функциональная схема ячейки автоматики БУК

к прекращению инвертирования. Релейное регулирование мощности ППЧ осуществляется согласно работе [9]. Канал ограничения частоты предназначен для ограничения частоты УГ верхним и нижним пределами. Нижний предел частоты соответствует началу линейного участка регулировочной характеристики преобразователя.

В случае если в период сигнала «Q» укладывается лишнее число колебаний напряжения нагрузки, компаратор частоты D2.2, D3.4, D6 переводит D-триггер D9.1 в единичное состояние. При этом светится светодиод «<» на лицевой панели ЯА и в режиме МОЩНОСТЬ частота УГ увеличится вплоть до вхождения в рабочий диапазон регулировочной характеристики колебательного контура нагрузки ППЧ.

Если амплитуда напряжения дросселя превысит значение, заданное резистором, измеритель амплитуды (D1.2, D8.1, D4.1) переводит D-триггер D9.2 в нулевое состояние. При этом загорается светодиод «>». В режиме МОЩНОСТЬ частота УГ автоматически возвращается в допустимые пределы. В режиме ЧАСТОТА свечение индикаторов «<» и «>» позволяет установить диапазон частоты ячейки управляемого генератора (ЯУГ) ручной подстройкой резисторов МИН и МАКС.

Ячейка автоматики предоставляет возможность четырех вариантов исполнения, предназначенных для управления различными индукционными установками и ППЧ. Варианты исполнения реализуются установкой переключек в электрической принципиальной схеме

ЯА. В четвертом исполнении ЯА канал регулирования фазы не используется, а на вход напряжения обратной связи подается сигнал датчика тока обратных диодов инвертора ППЧ в соответствии с примененным способом управления инвертора [10].

Особенности универсального БУК

Внешний вид, конструкция и устройство БУК в НПО «Параллель» разработаны в различных вариантах, главными из которых являются компактный блочный [14] и в виде плоской панели, с набором функциональных ячеек. Основные технические решения отдельных ячеек СУ — типовые. Те узлы СУ, которые не входят в состав БУК, выполняются в виде конструктивно завершенных.

На рис. 9 показаны внешние подключения БУК тиристорного преобразователя частоты ППЧ-160-8,0/10,0 УХЛ4 для установки индукционного нагрева ТВЧ, поэтому на рис. 9 показаны дополнительные узлы: пульт управления (ПУ) преобразователем частоты, расположенный на его лицевой панели, и внешний пульт управления нагревом (ПУН). Особенности этих узлов описаны в работах [11–13]. Направление стрелок внешних подключений и их название показывают входы и выходы аналоговых и импульсных сигналов БУК.

Входы аналоговых сигналов БУК: «Сигнал входного тока» 0–5 В; «Напряжение дросселя» (эффективное значение) 0–20 В; «Напряжение

индуктора» (эффективное значение) 0–20 В; «Задатчик ПУ» 0–10 В; «Внешний задатчик» 0–10 В; «Напряжение обратной связи» 0–10 В; «Дифференциальный датчик» (эффективное значение) 0–20 В. Логические сигналы (низкий уровень — менее 7 В, высокий уровень — от 10 до 15 В): по четыре входа «Контроль инвертора» и «Перенапряжение инвертора»; по одному входу «Контроль фаз»; «Контроль выпрямителя»; «Контроль ВК»; «Перенапряжение выпрямителя»; «Стоп УГ». Выходные сигналы БУК «Импульс 1», «Импульс 2», амплитуда 60 В ±10%; длительность (по уровню 0,1) 10 мкс; диапазон частот 0,5–17 кГц; «Управление пускателем» 5 В ±10%; «Управление ТП» 15 В; «Шина защиты» — норма 15 В, авария — менее 2 В; «Индикатор» 0–10 В.

На рис. 10 представлен внешний вид (с лицевой стороны) универсального БУК. Рассматриваемый в данной статье БУК выполнен в виде съемной панели с защитным экраном, устанавливаемой на двери шкафа преобразователя частоты. В состав БУК входят пять конструктивно обособленных ячеек, расположенных в определенном порядке сверху вниз: ячейка питания (ЯП); ячейка автоматики (ЯА); ячейка управляемого генератора (ЯУГ); ячейка контроля охлаждения (ЯКО); ячейка пуска и защиты (ЯПЗ). Для связи с ППЧ и индукционной установкой БУК снабжен розеткой и вилок. Напряжения питания БУК: 220 В/50 (60) Гц ±10% и 36 В/50 (60) Гц ±10%. Потребляемая мощность — не более 30 Вт. Размеры — 246×58×726 мм, масса — 5,4 кг.

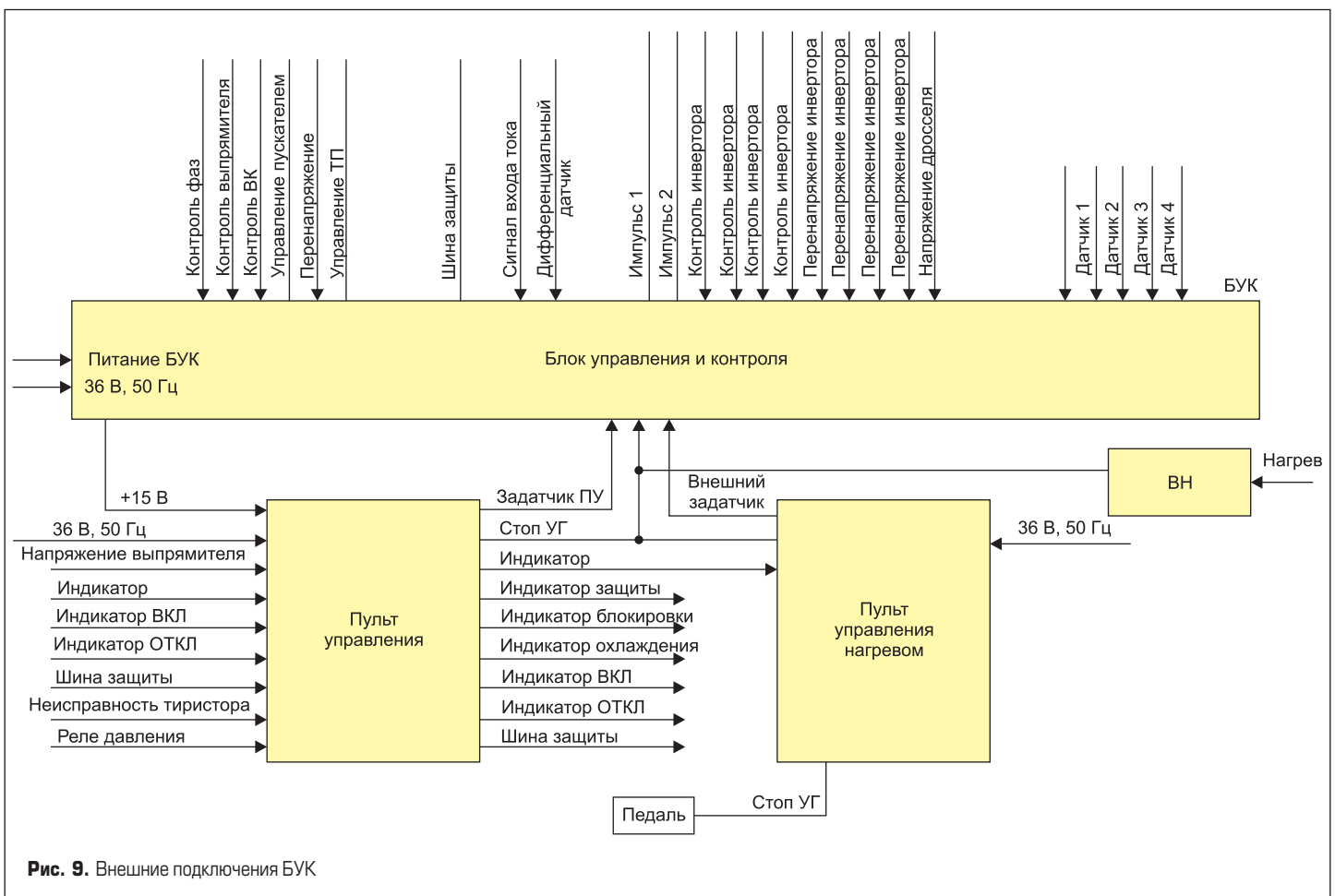


Рис. 9. Внешние подключения БУК



Рис. 10. Универсальный БУК в виде плоской панели

Для подавления помех от работы инвертора входящий в ЯП трансформатор снабжен заземленным экраном, разделяющим первичную и вторичные обмотки, а выходные цепи постоянного тока заземлены через конденсаторы.

После установки БУК внутри шкафа преобразователя на специально предназначенное для него место он подсоединяется к двум разъемам ответных частей жгута преобразователя (установки). БУК рассчитан на эксплуатацию внутри шкафов полупроводниковых преобразователей, установленных в закрытом помещении. Он функционирует в климатических условиях, соответствующих климатическому исполнению и категории размещения УХЛ4.2

по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 155431-89. Место, где установлен преобразователь, следует защитить от пыли, воды, масла и эмульсии. Температура окружающей среды должна быть в диапазоне +15...+35 °С. Верхнее значение относительной влажности должно составлять 80%, при температуре +25 °С и при более низких на элементах не должна конденсироваться влага. Высота над уровнем моря — не более 1000 м.

Следует отметить, что значительный вклад в разработку схемотехнических и конструктивных решений БУК внес ведущий инженер-конструктор НПО «Параллель» Р. Р. Мухаметов [14].

Заключение

Усложнение в условиях воздействия импульсных помех функций универсальной системы управления ППЧ повышает требования к надежности БУК, что решается, в первую очередь, увеличением потребляемой ею мощности и габаритов. Эффективное регулирование выходной мощности ППЧ с резонансной нагрузкой производится воздействием на управляемый генератор БУК сигналов от каналов регулирования фазы и напряжения индуктора, а также изменением рабочей частоты при индуктивном характере рассогласования контура нагрузки.

Разработаны различные варианты внешнего вида, конструкции и устройства универсального БУК. Основными из них являются компактный блочный и БУК в виде плоской панели, с набором функциональных типовых ячеек. Отдельные узлы СУ ППЧ не входят в состав БУК и потому выполняются в виде самостоятельных, конструктивно завершенных узлов ППЧ.

Литература

1. Зинин Ю. Дело жизни // Силовая электроника. 2013. № 5.
2. www.prl.ru.
3. А. с. № 851700. БИ № 28. 1981. Преобразователь постоянного напряжения в переменное. Иванов А. В., Мульменко М. М., Ройзман П. С.

4. А. с. № 748727. БИ № 26. 1980. Способ регулирования электрических параметров преобразователя частоты с резонансной нагрузкой. Иванов А. В., Мульменко М. М., Ройзман П. С.
5. А. с. № 1095304. БИ № 20. 1984. Способ защиты инвертора. Иванов А. В., Мульменко М. М., Уржумсков А. М.
6. А. с. № 1184042. БИ № 37. 1985. Устройство для защиты инвертора. Иванов А. В., Мульменко М. М.
7. А. с. № 1636921. БИ № 11. 1991. Устройство для контроля и защиты вентиляющего преобразователя. Иванов А. В., Мульменко М. М., Узьянбаев А. Х.
8. А. с. № 1543512. БИ № 6. 1990. Преобразователь частоты с блоком конденсаторной защиты. Иванов А. В., Мульменко М. М., Юнусов Р. Г., Узьянбаев А. Х.
9. А. с. № 748789. БИ № 26. 1980. Способ регулирования выходной мощности тиристорного инвертора. Юнусов Р. Г., Уржумсков А. М., Ройзман П. С., Иванов А. В.
10. А. с. № 736357. БИ № 19. 1980. Способ управления инвертором. Иванов А. В., Мульменко М. М., Ройзман П. С.
11. Зинин Ю., Мульменко М. Новые разработки силовых преобразователей типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов. // Силовая электроника. 2014. № 2.
12. Зинин Ю., Иванов А., Мульменко М., Уржумсков А. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева труб большого диаметра. // Силовая электроника. 2014. № 6.
13. Зинин Ю., Мульменко М. Проектирование станций охлаждения для установок индукционного нагрева металлов. // Силовая электроника. 2015. № 2.
14. Зинин Ю., Мульменко М. Современные тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов. // Силовая электроника. 2015. № 3.
15. Мульменко М. М. // Силовая электроника. 2015. № 4.