



2.1.9. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА (СЕМИНАР) № 9. РАСЧЕТ ИСТОЧНИКОВ СТАБИЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: изучение принципов расчета источников стабильного тока, изучение конструкции и принципов его работы, получение заданных входных и выходных параметров источников стабильного тока, получение навыков расчета источников стабильного тока.

Задание по работе №1

1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры источников стабильного тока.
3. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе

Методические указания по выполнению работы №1

Исходные данные: Рассчитать схему источника стабильного тока значением до 6 А (рис. 2.9.1). Источник содержит следующие основные узлы: регулирующий компонент, источник опорного напряжения, задающий узел, узел электропитания, контрольно-измерительные приборы.

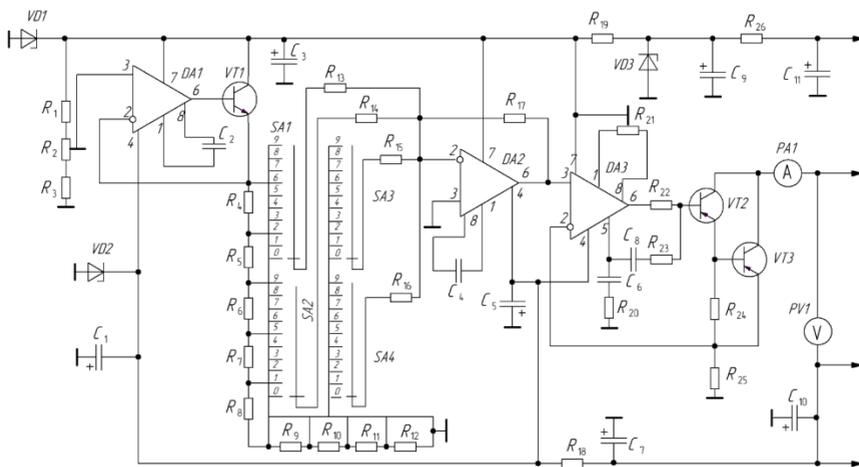


Рис. 2.9.1. Схема источника тока до 6 А со стабилизатором тока



Источник опорного напряжения представляет собой повторитель напряжения и содержит высокоточный операционный усилитель DA1 (микросхема типа К140УД14А) и транзистор VT1 типа КТ603Б. Нагрузкой опорного источника являются последовательно соединенные прецизионные резисторы $R_4 - R_{12}$ (типа С2-1 или С2—13) сопротивлением по 49,9 Ом каждый. На вход повторителя подается постоянное напряжение U_o с выхода двухступенчатого параметрического стабилизатора напряжения, который содержит диоды VD1 (Д818Е), VD3 (КС515А) и делитель напряжения R_1 (2,2 кОм), R_2 (3,3 кОм), R_3 (3,3 кОм). Падение напряжения на каждом из резисторов $R_4 - R_{12}$ можно принять равным $U_o / 9$, что позволяет снять с выходов делителя десять опорных напряжений в диапазоне от 0 до U_o . Резисторы делителя выбираются с допуском на сопротивление не более 1 %.

Выходными сигналами опорного источника формируются в задающем узле напряжения для управления генератором выходного тока. В состав задающего узла входит высокоточный операционный усилитель DA2 (микросхема типа К140УД14А), который суммирует опорные напряжения с делителя $R_{43} - R_{12}$. С помощью переключателей SA1-SA4 на выходе операционного усилителя DA2 устанавливается значение напряжения от 0 до 1,111 U_o согласно зависимости:

$$U_{DA2} = k_1 U_o / 9 + k_2 U_o / 90 + k_3 U_o / 900 + k_4 U_o / 9000,$$

где $k_1 - k_4$ — коэффициенты, принимающие значения от 0 до 9 в зависимости от положения переключателей.

Задающий узел позволяет дискретно установить задающее напряжение с шагом $U_o / 9000$, при этом резисторы $R_{13} - R_{16}$ (С2-29 В или С2-31) сумматора должны иметь отклонение сопротивления порядка 0,05...0,1 % и значение сопротивления большее по сравнению с резисторами источника опорного напряжения.

Генератор выходного тока содержит усилитель мощности на транзисторах VT2 (ГТЗ21В) и VT3 (КТ825Г). Резистор R_{25} (С5-8 или С5-16 с сопротивлением 0,51 Ом) является датчиком тока ОУ DA3 (микросхема типа К153УД5), который сравнивает задающее напряжение на неинвертирующем входе с напряжением обратной связи на инвертирующем входе. Выравнивание этих напряжений осуществляется воздействием на базу составного транзистора, ко-



торый работает в линейном режиме. Изменения базового тока вызывают соответствующие изменения токов эмиттера и коллектора до тех пор, пока напряжение обратной связи, снимаемое с резистора R_{25} и пропорциональное току в силовой цепи, не сравняется с задающим напряжением.

Узел электропитания обеспечивает напряжения 17...20 В при токе 0,3...0,5 А и 27...30 В при токе до 6 или до 10 А. Контроль тока и напряжения на нагрузке осуществляется стрелочными приборами PA1 (0...10 А) и PV1 (0...30 В). Полное отклонение вольтметра соответствует току не более 100 мкА для точного установления тока нагрузки.

Остальные компоненты схемы: конденсаторы C_1, C_3 (200 мкФ, 16 В); C_2, C_4 (30 пФ); C_5, C_6 (500 мкФ, 16 В); C_7 (0,022 мкФ); C_8 (0,047 мкФ); C_9 (4000 мкФ, 25 В); C_{10}, C_{11} (2000 мкФ, 50 В); резисторы R_{13} (10 МОм); R_{14} (1 МОм); R_{15}, R_{19} (100 кОм); R_{16}, R_{17} (10 кОм); R_{18} (220 Ом); R_{20} (56 Ом); R_{21} (39 Ом); R_{22} (10 Ом); R_{23} (110 Ом); R_{24} (680 Ом); R_{26} (620 Ом); стабилитрон VD2 (КС515А).

Задание по работе №2

1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры схему источника электропитания соленоид СВЧ-прибора стабилизированным током.
3. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе

Методические указания по выполнению работы №2

Исходные данные: рассчитать схему источника электропитания соленоид СВЧ-прибора стабилизированным током. Основные требования, предъявляемые к источнику: а) установка выходного тока должна осуществляться в пределах 10...12,5 А плавно или ступенями через 0,5 А с помощью регулирующего устройства; б) нестабильность установленного выходного тока при всех условиях эксплуатации должна быть в пределах ± 4 % от установленного значения при изменении сопротивления нагрузки от минимального значения до максимального; в) входное напряжение (220 ± 11) В трехфазного тока частоты 400 Гц; г) нагрузка выполнена в виде обмотки из провода, активное сопротивление которой при температуре $+20$ °С составляет (7 ± 1) Ом; д) охлаждение обмотки жидкостное; температура жидкости на входе обмотки при включении



из холодного состояния равна температуре окружающей среды (от -50 до $+50$ °С), максимальная температура провода обмотки $+130$ °С; е) сопротивление проводов, соединяющих источник и нагрузку, при температуре $+20$ °С составляет $0,1$ Ом; ж) относительное эффективное значение пульсации выходного тока не должно превышать 10^{-3} ; з) должна быть предусмотрена защита по максимальному (от 14 до $16,5$ А) и минимальному (от 7 до $8,5$ А) току нагрузки, отключающая высокое напряжение от СВЧ-прибора за время не более $0,3$ с.

Структурная схема такого источника тока на базе высокочастотного преобразователя приведена на рис. 2.9.2.

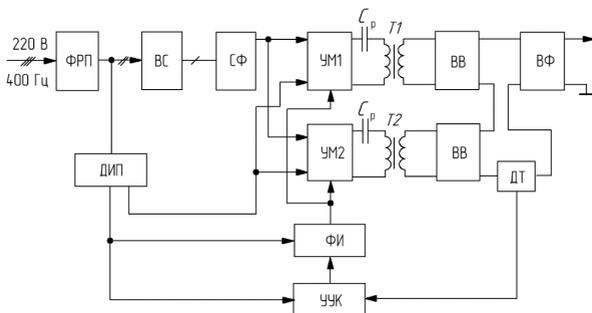


Рис. 2.9.2. Структурная схема источника тока для соленоида СВЧ-прибора: ФРП – фильтр радиопомех; ВС – выпрямитель сетевой; СФ – сетевой фильтр; УМ – усилитель мощности; ФИ – формирователь импульсов; УУК – устройство управления и контроля; ВВ – выпрямитель выходной; ВФ – выходной фильтр; ДТ – датчик тока; Т – трансформатор; С_р – разделительный конденсатор

Выходная мощность источника определяется выражением:

$$P_{\text{вых max}} = I_{\text{вых max}}^2 R_{\text{нагр max}}$$

При выходной мощности источника тока, превышающей выходную мощность одного транзисторного моста, необходимо сложение мощностей по постоянному току в соответствии с приведенной структурной схемой.

Максимальное значение тока $I_{\text{ком}}$, коммутируемого транзисторами мостовой схемы, ориентировочно определяется по формуле:



$$I_{\text{ком}} = P_{\text{вых max}} / \eta K_{\text{зап max}} U_{d \text{ min}},$$

где η – КПД преобразователя, примерно равный 0,8-0,85; $K_{\text{зап max}}$ – максимальный коэффициент заполнения импульсов; $U_{d \text{ min}}$ – минимальное значение выпрямленного напряжения сети. В случае параллельной работы мостовых схем полученное значение тока необходимо разделить на два.

Максимальное значение напряжения, коммутируемое транзисторами инвертора, для мостовой схемы равно максимальному выпрямленному напряжению с учетом коэффициента запаса $K_3 = 1,2$.

Для обеспечения высокой точности стабилизации тока в отличие от схем ограничения тока при перегрузках необходимо применение высокоточных датчиков тока, например на основе датчика Холла типа ДТХ-50. При этом сигнал обратной связи по току, снимаемый с датчика тока, поступает на усилитель рассогласования в схему устройства управления и контроля. Изменение коэффициента заполнения импульсов управления, образующееся в результате сравнения напряжения рассогласования с напряжением генератора пилы в микросхеме, приводит к регулированию выходного напряжения источника с целью стабилизации тока в нагрузке.

Максимальное выходное напряжение на вторичной обмотке трансформатора для источника тока определяется зависимостью:

$$U_{\text{тр.вых max}} = \frac{I_{\text{нагр max}} R_{\text{нагр max}} + \Delta U_{\text{пр.выпр}}}{K_{\text{зап max}}}.$$

При суммировании выходного напряжения полученное значение $U_{\text{тр.вых max}}$ делится пополам.

Задание по работе №3

1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры радиопередающего устройства, предназначенное для генерирования мощных высокочастотных импульсов с широким набором частот повторения и длительностей.
3. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе



Методические указания по выполнению работы №3

Исходные данные: Расчитать радиопередающее устройство, предназначенное для генерирования мощных высокочастотных импульсов с широким набором частот повторения и длительностей, формирования непрерывных сигналов 1-го и 2-го гетеродинов приемника и сигнала опорной частоты. В устройстве используется выходной клистрон в качестве оконечного усилителя и ЛБВ в качестве предварительного усилителя. В состав радиопередающего устройства входят (рис. 2.9.3) возбудитель-гетеродин; формирователь зондирующего сигнала; усилитель выходного сигнала передатчика; высоковольтный стабилизирующий источник электропитания катодного напряжения.

Возбудитель - гетеродин формирует сигнал на выходных частотах радиопередающего устройства в заданном диапазоне частот, а также сигналы 1-го и 2-го гетеродинов приемника. Сигнал с выхода возбудителя поступает на предварительный усилитель. В качестве активного компонента предварительного усилителя используется лампа бегущей волны.

Сигнал с выхода предварительного усилителя усиливается выходным усилителем передающего устройства. В качестве выходного усилителя используется клистрон с сеточным управлением. Между катодом и резонаторным блоком клистрона приложено постоянное высокое напряжение. Управление током клистрона осуществляется с помощью модулятора. В паузе между импульсами клистрон закрыт напряжением, приложенным между катодом и сеткой клистрона.

Модулятор формирует импульсы напряжения, поступающие на сетку клистрона. При поступлении импульса напряжение между сеткой и катодом становится близким к нулю, и клистрон усиливает сигнал, поступающий на его вход.

Импульсы, управляющие работой модулятора, поступают с подмодулятора. На вход подмодулятора приходят два импульса: импульс начала работы (ИНР) и импульс конца работы (ИКР). Длительность генерируемого клистроном высокочастотного импульса равна временному интервалу между фронтами импульсов ИНР и ИКР, поступающих на модулятор.

Мощный высокочастотный сигнал с выхода клистрона через выходной высокочастотный тракт поступает на облучатель антен-



ного устройства. Выходной волноводный тракт содержит: ферритовый циркулятор; переключатель «антенна-эквивалент»; высокочастотную нагрузку — эквивалент антенны; элементы защиты тракта от высокочастотных пробоев; волновод, канализирующий сигнал к высокочастотному выходу.

На выходе высоковольтного источника электропитания может быть установлено заданное в паспорте на клистрон напряжение, которое поддерживается с необходимой точностью. Высоковольтный источник электропитания обеспечивает плавный подъем выходного напряжения при включении, а также установку напряжения в пределах (0,7...1,0) номинального, что необходимо для проведения тренировки клистрона при его первоначальной установке после длительного хранения или длительного перерыва в работе.

В шкафу высоковольтного электропитания размещены:

- блок управления и преобразования;
- высоковольтные трансформаторно-выпрямительные модули (ВТМ), высоковольтный делитель, фильтр;
- панель предохранителей;
- источник электропитания соленоида;

Основные технические данные высоковольтного источника электропитания, входящего в состав радиопередающего устройства, следующие:

- выходное напряжение, кВ - 20
- выходной ток, А – 1
- нестабильность выходного напряжения, %, не более – 3
- уровень гармонических составляющих выходного напряжения в доплеровском диапазоне частот, мВ, не более – 50
- время установления напряжения, с, не более – 5

Структурная схема высоковольтного источника электропитания приведена на рис. 2.9.4.

Основой источника является преобразователь напряжения, работающий на частоте в диапазоне (90... 130) кГц. Основными узлами устройства являются мостовой инвертор (И), резонансный контур (РК), трансформаторно-выпрямительный модуль (ТМ) и выходной фильтр (ВФ). Инвертор с подключенным к нему резонансным контуром образует резонансный инвертор.

Для получения заданной выходной мощности 24 кВт в источнике объединены восемь резонансных инверторов (И1 ... И8, РК1



Напряжение на входы инверторов И1 ... И8 подается с выходов сетевых выпрямителей СВ1 ... СВ4, причем выпрямленное напряжение 310 В с одного выпрямителя поступает на два инвертора. На входы выпрямителей СВ1... СВ4 подается напряжение сети 220 В трехфазного тока частоты 400 Гц от блока защиты и фильтрации сети (БЗФС). В состав БЗФС входят сетевые помехоподавляющие фильтры и устройство защиты. Фильтры служат для защиты сети от помех, создаваемых инверторами, а также для защиты источника электропитания от помех, поступающих со стороны входной сети. Устройство защиты выполняет функцию защиты сети от аварийного тока в результате короткого замыкания на выходах выпрямителей СВ1 ... СВ4 (например, при пробое транзисторов инвертора).

Блок управления, индикации и контроля (БУИК) осуществляет функции индикации и контроля основных параметров источника электропитания, в том числе регулируемого выходного высокого напряжения, а также синхронизирует совместную работу с другими внешними устройствами комплекта аппаратуры.

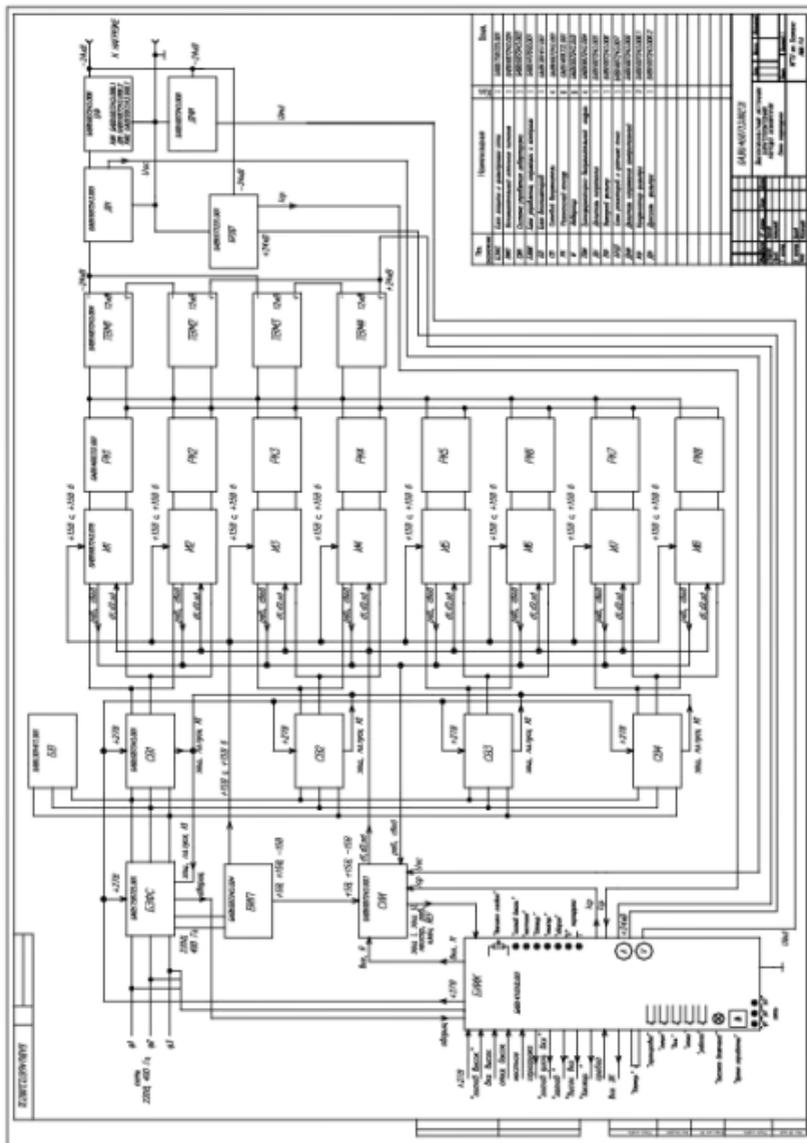


Рис. 2.9.4. Пример оформления чертежа структурной схемы источника стабилизированного напряжения



Мощность, потребляемая источником электропитания от входной сети, определяется выражением:

$$P \sim \frac{U_n I_n}{\eta Q},$$

где $U_n = 20$ кВ – катодное напряжение выходного усилителя передающего устройства; $I_n = 18$ А – импульсный ток выходного усилителя;

$\eta = (0,55...0,9)$ — КПД высоковольтного выпрямителя;

$Q = 20$ – скважность в импульсном режиме работы.

При указанных значениях величин входная мощность источника электропитания составляет 21 кВт.

Ток I_ϕ фазы входной сети:

$$I_\phi = \frac{P \sim}{U \cdot 1,73} = \frac{21000}{220 \cdot 1,73} = 55 \text{ А}.$$

Таким образом, в каждой фазе должен быть установлен предохранитель, рассчитанный на номинальный ток 60 А.

Переменная составляющая выходного напряжения высоковольтного выпрямителя в доплеровском диапазоне частот вызывает амплитудную и фазовую модуляции в высокочастотном сигнале выходного усилителя передающего устройства. Уровень спектральных составляющих паразитной модуляции высокочастотного сигнала, вызванных пульсациями напряжения электропитания, должен быть ниже уровня собственных шумов выходного усилителя радиопередающего устройства. Относительный уровень шумов, вносимых собственно выходным усилителем в высокочастотный сигнал, пересчитанный на полосу приемного устройства Δf в герцах, имеет порядок минус сотен децибел. В связи с этим относительный уровень паразитной модуляции, вызванный спектральными составляющими пульсаций напряжения электропитания, должен быть ниже (хотя бы на 5 дБ) уровня собственных шумов радиопередатчика.

Уровень амплитудной модуляции высокочастотного сигнала находится из следующих соображений. Мощность на выходе усилительного клистрона определяется выражением:

$$P = \eta K U^{5/2}.$$



где η – коэффициент полезного действия выходного усилителя; K – первеанс выходного усилителя; U – выходное напряжение высоковольтного источника.

Приращение ΔP мощности связано с приращением АЦ напряжения соотношением:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{5\Delta U}{2U}.$$

Максимальная мощность $P_{\text{макс}}$ амплитудно-модулированного сигнала связана с коэффициентом m_a амплитудной модуляции зависимостью:

$$P_{\text{макс}} = P(1 + m_a)^2,$$

где P — мощность немодулированного сигнала; $\Delta P = P_{\text{макс}} - P = 2m_a P$ (при малых коэффициентах амплитудной модуляции).

Следовательно:

$$m_a = \frac{5\sqrt{2}U_{\text{эфф}}}{4U},$$

где $U_{\text{эфф}}$ — эффективное значение пульсации в напряжении электропитания.

В рассматриваемом примере, относительный уровень паразитной модуляции, вызванной спектральными составляющими, не должен превышать минус 110 дБ, т. е. должно соблюдаться соотношение $m_a < 6,3 \cdot 10^{-6}$. Отсюда:

$$U_{\text{эфф}} \approx 78,5 \text{ мВ}.$$

Таким образом, для обеспечения допустимой амплитудной модуляции сигнала радиопередатчика уровень пульсаций выходного напряжения источника электропитания не должен превышать 80 мВ.

Следует отметить, что пульсации напряжения электропитания кроме амплитудной модуляции вызывают и фазовую модуляцию усиливаемого сигнала, связанную с модуляцией пучка электронов



по скорости и, соответственно, изменением времени пролета электронов в пространстве дрейфа выходного усилителя.

Запаздывание $\theta = \omega t$ сигнала по фазе определяется временем пролета электрона в пространстве дрейфа между первым и последним резонаторами выходного усилителя. Типовым значением запаздывания сигнала для рассматриваемых приборов считают $\theta \approx 2000$. Связь запаздывания θ в выходном усилителе с напряжением U электропитания описывается выражением:

$$\theta = \omega S \sqrt{\frac{m}{2e}} \frac{I}{\sqrt{U}}$$

где S – расстояние между первым и последним резонаторами выходного усилителя; m – масса электрона; e – заряд электрона.

Из последнего выражения следует, что коэффициент m_φ фазовой модуляции сигнала, вызванной наличием пульсации в напряжении электропитания выходного усилителя, связан с этим напряжением соотношением:

$$d\theta = m_\varphi = \theta \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_{\text{эфф}}}{U}.$$

Полагая $m_\varphi = 6,3 \cdot 10^{-6}$, получим $\frac{U_{\text{эфф}}}{U} \leq 2,5 \cdot 10^{-7}$ или $U_{\text{эфф}} \leq 3,5$ мВ, что на порядок меньше допустимых пульсаций для случая амплитудной модуляции сигнала.

Таким образом, уровень спектральных составляющих в выпрямленном напряжении на частотах от 5 кГц не должен превышать 5 мВ.

Задание по работе №4

1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры источника электропитания соленоида.
3. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе



Методические указания по выполнению работы №4

Исходные данные: рассчитать источник электропитания соленоида обеспечивает установленное значение тока в пределах (10...25) А со стабильностью не хуже $\pm 1\%$ при воздействии влияющих величин с плавным нарастанием тока за время не менее 1 с при нагрузке с активным сопротивлением от 1,5 до 3,0 Ом и индуктивностью около 0,2 Гн.

Источник рассчитан на выходную мощность 2,0 кВт при входном напряжении (220 \pm 44) В трехфазного тока частоты 400 Гц.

Источник электропитания соленоида выполнен по схеме регулируемого стабилизатора тока на базе двухтактного обратного высокочастотного преобразователя. По сравнению с однотактными такая схема отличается повышенной мощностью, а по сравнению с традиционными двухтактными – меньшей сложностью и более высокой надежностью. Структурная схема источника приведена на рис.2.9.5, где К – контактор, ВА – входной автомат, ВФ – входной фильтр, ЭК – электронный ключ, Пр. – предохранитель, – — плата управления, ПП – плата вспомогательного электропитания, В – вентиляторы, И – индикаторы напряжения и тока, Р – регулятор уровня тока, П –высокочастотный преобразователь, М – мостовая схема выпрямителя, X1 и X2 – входные разъемы, X3 – выходной разъем.

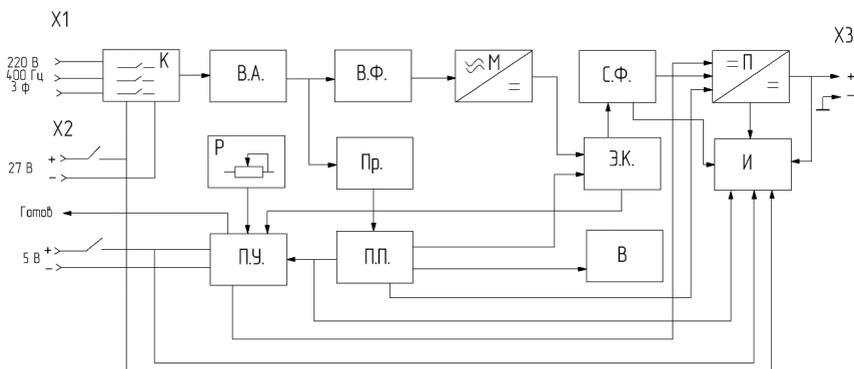


Рис. 2.9.5. Структурная схема источника электропитания соленоида



Принципиальная электрическая схема регулируемого стабилизатора тока приведена на рис. 2.9.6.

Мощный высокочастотный преобразователь выполнен на двухтактном драйвере D1 типа UC3825N, двух транзисторах VT1 и VT2 типа SPW17N80, двух трансформаторах T1 и T2 на сердечниках марки ETD59 и двух выпрямительных диодах VD3, VD4 типа CSD020060. Использование диодов CSD020060 на карбиде кремния, обладающих весьма малым временем восстановления, позволяет реализовывать мощные однотактные схемы в режиме непрерывных токов. Схема представляет собой два однотактных обратных преобразователя, работающих со сдвигом на полпериода за счет управления двухтактным драйвером. Регулирование выходной мощности происходит за счет обратной связи по току транзисторов через токовые трансформаторы T3 и T4. Контроль тока нагрузки ведется с помощью шунта R27 типа 75ШСМ3-30-0,5. На микросхеме D6 типа 1446УД1А собран усилитель сигнала датчика тока и усилитель сигнала ошибки, на который поступают сигналы усилителя датчика тока и напряжение задатчика с контакта 2 разъема X4. Выход усилителя сигнала ошибки через диод VD8 подключен к выходу усилителя сигнала ошибки драйвера D1.

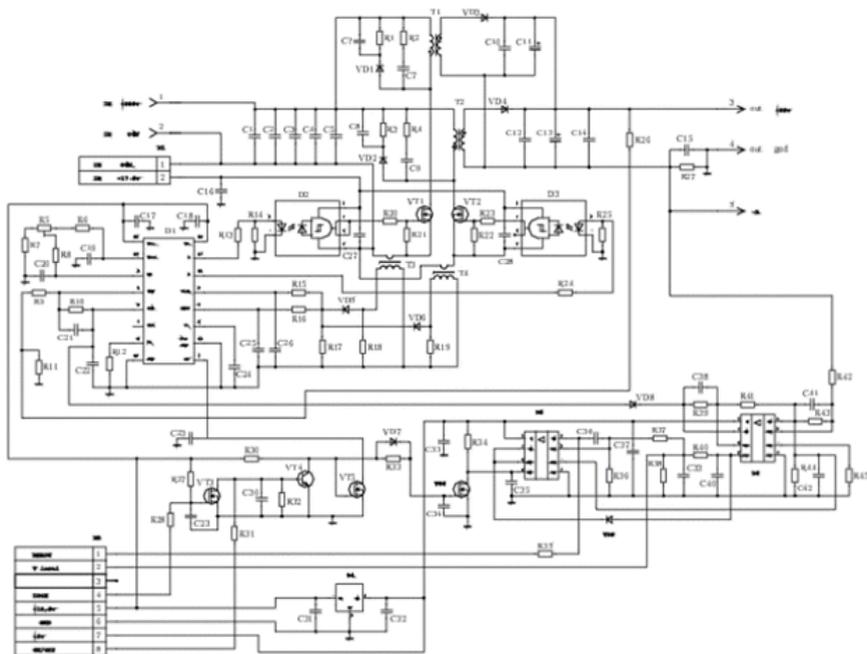


Рис. 2.9.6. Принципиальная электрическая схема стабилизатора тока

На половине микросхемы D5 выполнен компаратор, вырабатывающий сигнал «Готов» при достижении выходным током значения, равного 80% от заданного уровня. Этот сигнал поступает на контакт 1 разъема X4.

Включение источника электропитания соленоида с плавным нарастанием тока в нагрузку обеспечивает схема управления на транзисторах VT3 – VT6 и половине микросхемы D5. Включение источника электропитания производится подачей сигнала с уровнем логической «1» на вход транзистора VT3 через контакт 8 разъема X4. Работа источника электропитания разрешена при подаче на контакт 4 разъема X4 сигнала с уровнем логического «0» или при соединении этого контакта с корпусной (земляной) шиной. Если контакт 4 разъема X4 отсоединяется от корпусной (земляной) шины или на него подается сигнал с уровнем логической «1», то работа источника блокируется.

При отсутствии нагрузки напряжение на выходе источника электропитания соленоида будет нарастать до предельного уста-



новленного значения 80 В. Ограничение выходного напряжения происходит за счет обратной связи по напряжению, реализованной на усилителе обратной связи драйвера D1 и делителя R26, R11. Уровень ограничения напряжения можно регулировать с помощью переменного делителя R5, R6, R7.

Развязку цепей управления с транзисторами VT1 и VT2 обеспечивают оптические драйверы транзисторов D2, D3 типа HCPL3120A. Для электропитания цепей управления и оптических драйверов используется дополнительный источник электропитания в виде маломощного сетевого преобразователя. Входное напряжение к стабилизатору тока подается от мощного сетевого выпрямителя через контакты X1, X2.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие стабилизаторов тока от стабилизаторов напряжения?
2. Какой фазовый сдвиг необходим для использования двух однотактных преобразователей в качестве двухтактного?
3. В каком состоянии находится ключ однотактного обратного преобразователя в момент отбора мощности вторичной цепи?
4. В чем разница между прямо ходовым и обратно ходовым преобразователями?
5. Какие датчики используются в стабилизаторах тока для формирования сигнала обратной связи?