

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра промышленной электроники

Электропитание ЭВМ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОДНОТАКТНОГО
ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Руководство к лабораторной работе

ТОМСК — 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра промышленной электроники

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ПрЭ

С.Г. Михальченко

Электропитание ЭВМ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОДНОТАКТНОГО
ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**Руководство к лабораторной работе
для студентов направления 11.04.04
электроника и наноэлектроника**

РАЗРАБОТЧИКИ:
Доцент каф. ПрЭ
Б.И. Коновалов

Ст. препод. каф. ПрЭ
В.С. Мишуров

Доцент каф. ПрЭ
В.Д. Семенов

Ст. препод. каф. ПрЭ
В.В. Русанов

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	3
2 ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
2.1 Однотактный прямоходовый преобразователь (ОПП)	4
2.2 Стабилизированный источник питания на основе преобразователей с трансформаторным выходом.....	10
3 ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	14
4 ОПИСАНИЕ МАКЕТА	15
5 ПРОГРАММА РАБОТЫ	20
6 ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА	21
7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	22
8 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	23

1 ВВЕДЕНИЕ

Основная масса устройств радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) потребляет электроэнергию на постоянном токе. Силовая цепь большинства источников питания постоянного тока реализуется на основе непосредственных преобразователей постоянного напряжения (НПН). Однако такие источники питания наряду с высокими энергетическими показателями обладают существенными недостатками. Это наличие гальванической связи входа и выхода, а также такие источники не могут обеспечить питания нагрузки напряжениями нескольких уровней. Для реализации силовой цепи многоканальных источников питания используют, как правило, инверторы с трансформаторным выходом. В настоящей работе рассматриваются источники питания, выполненные на основе одноконтурных схем.

2 ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Однотактный прямоходовый преобразователь (ОПП)

Схема ОПП с идеальным трансформатором представлена на рис. 2.1. При включении транзистора VT1 напряжение входного источника $U_{вх}$ через открывшийся диод VD2 прикладывается к дросселю L_{ϕ} и конденсатору C_{ϕ} . Ток в дросселе и напряжение на конденсаторе возрастают, увеличивая запасенную в них энергию. При выключении транзистора ток дросселя замыкается через диод VD0, при этом диод VD2 выключается обратным напряжением, а ток намагничивания i_1 замыкается через диод VD1, и энергия, запасенная в индуктивностях рассеивания первичной обмотки W_1 и намагничивания, сбрасывается через диод VD1 в конденсатор C1 и выделяется на резисторе R1, а нагрузка питается энергией, запасенной в элементах выходного фильтра.

Использование трансформатора по прямому назначению, а не в качестве накопительного элемента делает прямоходовые преобразователи более предпочтительными перед обратноходовыми при мощностях нагрузки в несколько сотен ватт.

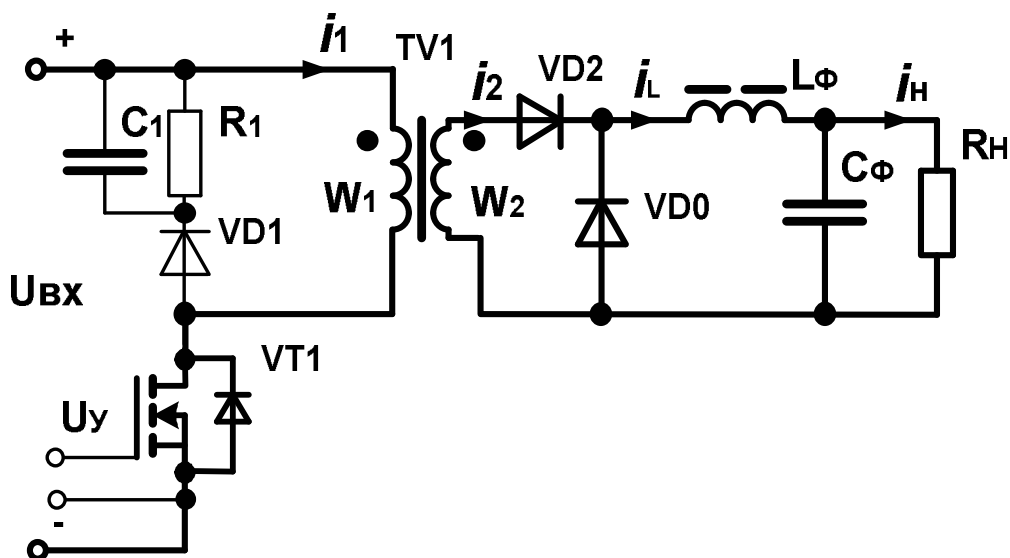


Рисунок 2.1 — Однотактная преобразовательная ячейка с прямым включением выпрямительного диода

По существу, это функциональная схема ОПП, если считать трансформатор идеальным, т.е. ток намагничивания трансформатора принять равным нулю, а напряжение источника питания $U_{вх}$ приводится к вторичной стороне трансформатора в соответствии с равенством «вольт на виток» по выражению:

$$\frac{E}{W_1} = \frac{U_2}{W_2} \Rightarrow U_2 = \frac{U_{вх} \cdot W_2}{W_1} = \frac{U_{вх}}{K_{ТР}}$$

Ток i_L дросселя L_Φ равен току вторичной обмотки W_2 на интервале открытого диода VD2 и в соответствии с равенством ампер-витков идеального трансформатора (ток намагничивания равен нулю) приводится в первичную обмотку W_1 .

$$i_2 \cdot W_2 + i_1 \cdot W_1 = 0$$

$$i_1 = -\frac{i_2 \cdot W_2}{W_1} = -\frac{i_2}{K_{TP}}$$

При таком рассмотрении ОПП, трансформатор TV1 и транзистор VT1 нужны только для согласования уровня напряжений в источнике питания E и напряжения на вторичной обмотке W_2 трансформатора TV1, а также для коммутации диода VD2. Если пересчитать напряжение E по вторичной обмотке, а диод VD2 заменить ключом K , то получится схема непосредственного преобразователя постоянного напряжения понижающего типа с гальванической связью источника питания E и нагрузки R_H , как показано на рис. 2.2.

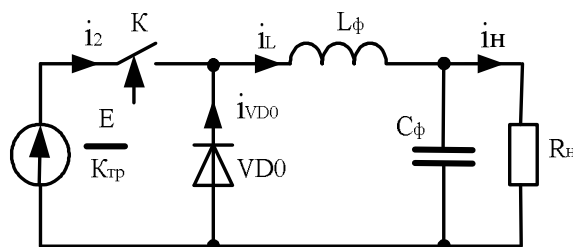


Рисунок 2.2

Особенность в работу реальной схемы ОПП вносит трансформатор TV. Схема замещения трансформатора содержит активные сопротивления и индуктивности рассеяния первичной r_1 , s_1 и вторичной r_2 , s_2 обмоток, а также индуктивность намагничивания L_μ .

Если учитывать индуктивность намагничивания L_μ и индуктивность рассеяния первичной обмотки L_s , которые имеет конечное значение, необходимо при размыкании ключа K обеспечить контур протекания тока i_μ , иначе разрыв этого тока приведет к перенапряжению на ключе K и выходу его из строя.

Возможные варианты организации контура протекания тока i_μ показаны на рис. 2.3. Цепь сброса реактивной энергии намагничивания определяет амплитуду отрицательной полуволны, а вместе с этим и предельное значение относительной длительности γ_{\max} включенного состояния транзистора, что в свою очередь влияет на расчетную мощность выходного фильтра. Зависит от выбора цепи протекания тока размагничивания i_μ и максимальное значение напряжения на закрытом транзисторе. Так для варианта на рис. 2.3, а увеличение γ_{\max} приводит к значительному росту амплитуды отрицательной полуволны, а следовательно и необходимости использования транзистора с боль-

шим допустимым напряжением. Варианту на рис. 2.3, б для достижения той же цели нужен высоковольтный стабилизатор (ограничитель напряжения).

Величина амплитуды отрицательной полуволны в варианте на рис. 2.3, в зависит от частоты резонанса контура $L\mu C$, и при синусоидальной форме отрицательной полуволны ее амплитуду можно определить по выражению:

$$U_{(-)\max} = \frac{\pi U_{\text{вх}} \gamma_{\max}}{2(1 - \gamma_{\max})}.$$

Кроме того, все три выше приведенные варианта, приводят к снижению к.п.д., так как энергия при размагничивании выделяется в виде тепла на сопротивлении R . Такие цепи размагничивания сердечника трансформатора используются в источниках малой мощности.

В источниках большей мощности эту энергию сбрасывают либо в источник питания рис. 2.3, з, либо в нагрузку рис. 2.3, д, используя дополнительную обмотку W_p .

Для преобразователя со сбросом энергии в источник питания вариант (з) ток размагничивания на рис. 2.4 показан пунктиром. Амплитуда отрицательной полуволны напряжения первичной обмотки определяется выражением:

$$U_{1(-)\max} = \frac{U_{\text{вх}} W_1}{W_p},$$

где W_1 — число витков первичной обмотки трансформатора;

W_p — число витков обмотки размагничивания.

Предельное значение γ_{\max} находится из условия:

$$U_{\text{вх}} \gamma_{\max} \leq U_{\text{вх}} \frac{W_1}{W_p} (1 - \gamma_{\max}).$$

Для варианта (д) — максимальное значение отрицательного напряжения первичной обмотки находится по выражению:

$$U_{1(-)\max} = \frac{U_{\text{н}} W_1}{W_p},$$

а предельное значение γ_{\max} — из условия:

$$U_{\text{вх}} \gamma_{\max} \leq U_{\text{н}} \frac{W_1}{W_p} (1 - \gamma_{\max}).$$

На рис. 2.1 показан вариант организации контура для протекания тока i_{μ} , предполагающий сброс энергии намагничивания в конденсатор C_1 через диод VD1, и дальнейшее рассеивание ее в виде тепла на резисторе R_1 .

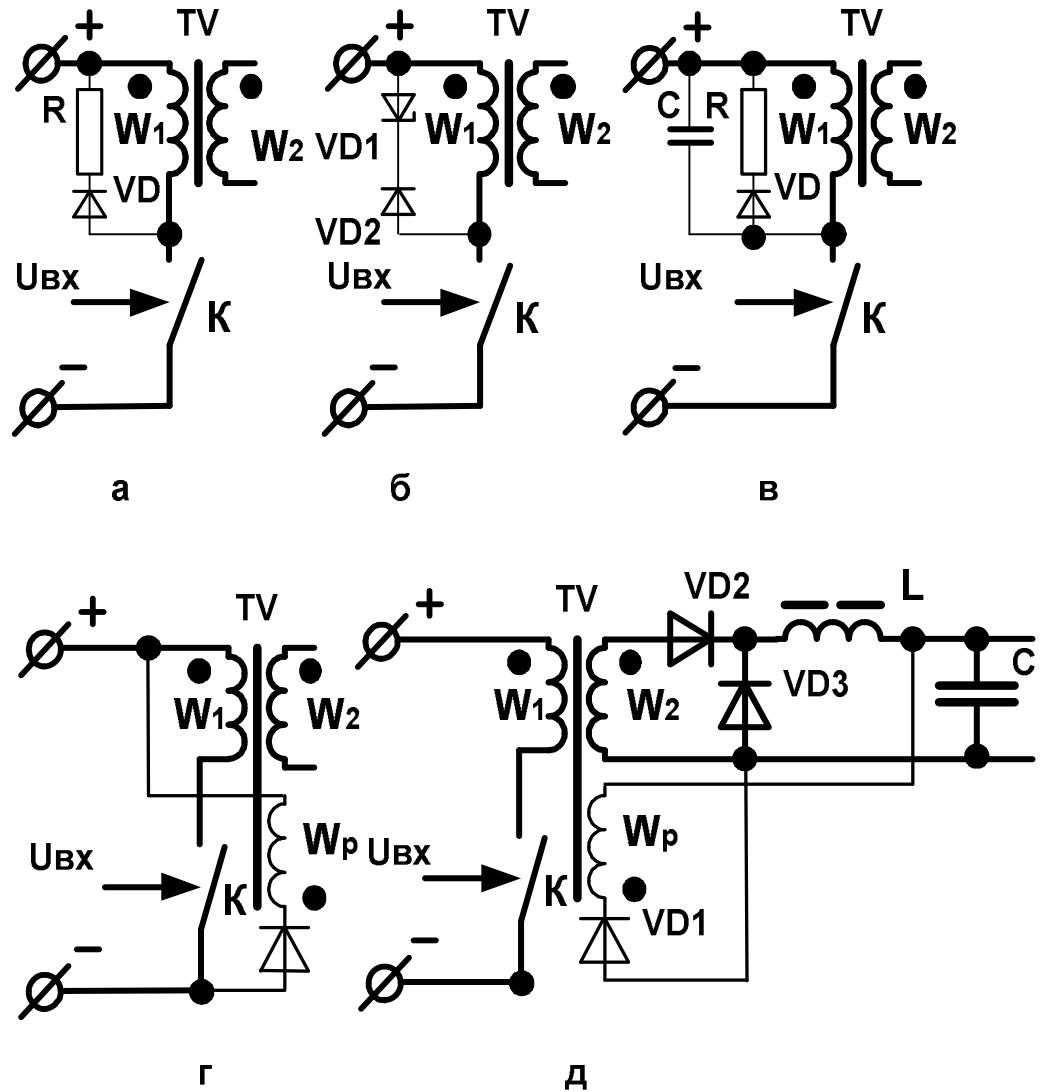


Рисунок 2.3

Временные диаграммы напряжений и токов на элементах схемы представлены на рис. 2.4.

Ток намагничивания в индуктивности L_{μ} может быть непрерывным или прерывистым, на рис. 2.4 представлены диаграммы, соответствующие граничному режиму, в котором ток i_{μ} обращается в нуль только в одной точке.

Ток i_{μ} в индуктивности намагничивания L_{μ} определяется из соотношения $U_{L_{\mu}} = L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt}$, которое при нарастании тока можно записать как:

$$\Delta i_{\mu(+)} = \frac{U_{L_{\mu CP}} \cdot \Delta t}{L_{\mu}} = \frac{U_{L_{\mu CP}} \cdot t_{II}}{L_{\mu}} = \frac{E \cdot \gamma \cdot T}{L_{\mu}} \gamma. \quad (11)$$

Выражение (11) можно словами определить так. Если к дросселю с индуктивностью L_{μ} приложить постоянное (среднее на интервале Δt) напряжение $U_{L_{\mu} \text{ CP}}$ в течение времени Δt , то ток в нем вырастет на величину $\Delta i_{\mu(+)}$.

При граничном режиме и режиме прерывистого тока по току намагничивания приращение тока намагничивания будет равно максимальному току

$$\Delta i_{\mu(+)} = I_{\max} - I_{\min} = I_m - 0 = I_m. \quad (12)$$

Для установившегося режима работы ток намагничивания должен к концу периода вернуться в исходную точку, что достигается приложением к дросселю L_{μ} обратного по знаку напряжения.

При приложении к дросселю обратного напряжения ток в нем будет убывать на величину

$$\Delta i_{\mu(-)} = \frac{U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} \cdot t_{\Pi}}{L_{\mu}} = \frac{U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} \cdot (1 - \gamma) \cdot T}{L_{\mu}} \quad (13)$$

и, в установившемся режиме, когда $\Delta i_{\mu(+)} = \Delta i_{\mu(-)}$, получаем

$$E \cdot \gamma \cdot T = U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} \cdot (1 - \gamma) T, \quad (14)$$

откуда

$$U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} = \frac{E \cdot \gamma}{1 - \gamma}. \quad (15)$$

Выражение (15) показывает, что при увеличении γ до 0,5 среднее обратное напряжение на индуктивности намагничивания, обеспечивающее возврат ее по току в исходное состояние, равно E , а при $\gamma \rightarrow 1$, $U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} \rightarrow \infty$.

Поскольку среднее значение обратного напряжения определяется по соотношению

$$U_{L_{\mu} \text{ CP обр}} = \frac{1}{(1 - \gamma) T} \int_{\gamma T}^T U_L(t) dt, \quad (16)$$

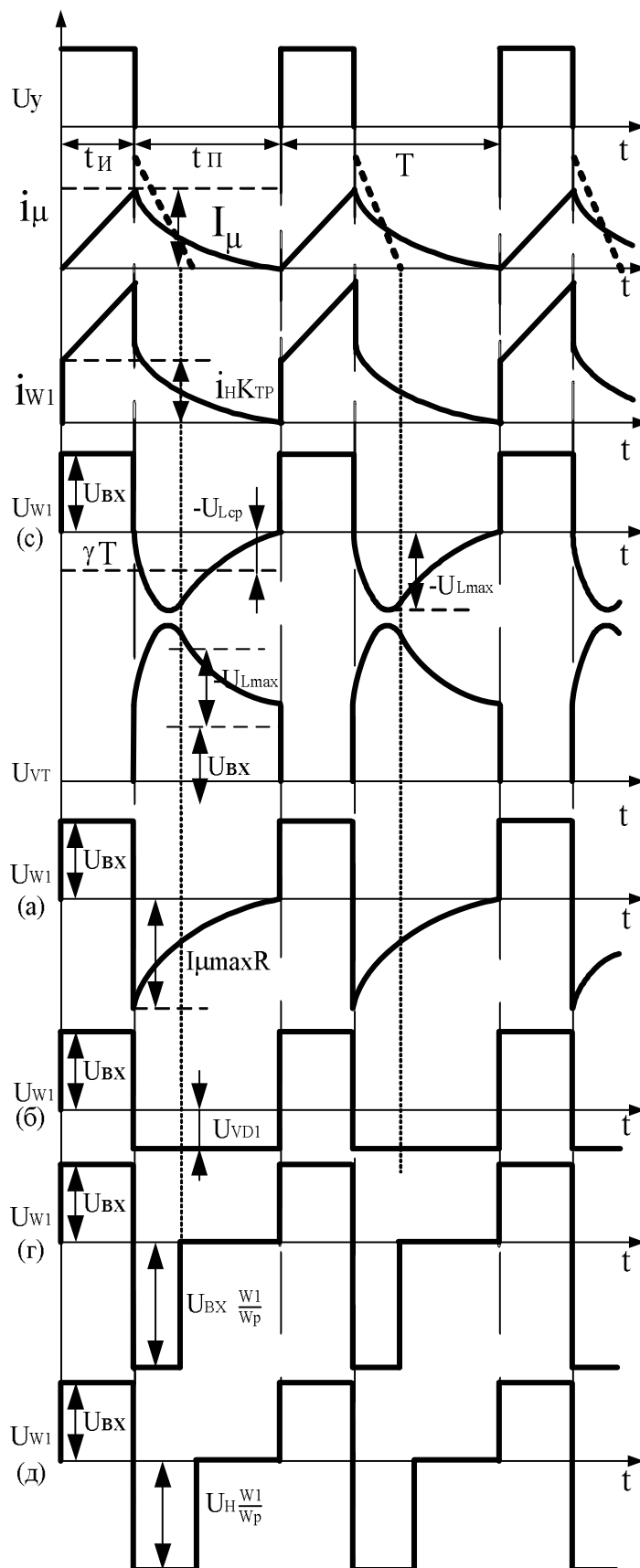


Рисунок 2.4 — Временные диаграммы токов и напряжений в первичной цепи трансформатора с индуктивностью L_{μ}

то при любом законе изменения $U_L(t)$ можно получить среднее значение напряжения на дросселе. Если $U_{L\text{м}} \text{ сробр}$ больше, чем полученное из (15), наступает режим прерывистого тока.

2.2 Стабилизированный источник питания на основе преобразователей с трансформаторным выходом

Структурная схема стабилизированного источника представлена на рис. 2.5 и состоит из силовой или энергетической части источника, которая включает в себя источник напряжения питания $U_{\text{пит}}$, однотактный инвертор И, высокочастотный трансформатор $T_{\text{р}}$, выпрямитель В, фильтр Ф выходного напряжения, нагрузку Н. В некоторых случаях между источником $U_{\text{пит}}$ и инвертором И устанавливается входной фильтр для сглаживания пульсаций входного тока. Оставшаяся часть структурной схемы включает в себя источник опорного напряжения ИОН, сравнивающее устройство в виде сумматора S, УО — усилитель ошибки, КЗ — корректирующее звено, ЗГ — задающий генератор, ГПН — генератор пилообразного напряжения, ИМ — импульсный модулятор, звено обратной связи $K_{\text{ос}}$, и относится к информационной части схемы. По необходимости устанавливают драйвера, или усилители мощности, являющиеся согласующим устройством между маломощной информационной частью и мощной силовой. Назначение драйвера — преобразовывать маломощный сигнал ИМ в сигнал необходимой мощности, способный включать ключи инвертора, а также осуществлять гальваническую развязку сигнала управления от силовой части источника, если такое требование выдвигается.

Блок защиты осуществляет выключение силовой (энергетической) части источника при коротких замыканиях или перегрузках в силовой цепи, в источнике питания или преобразователе.

На современном уровне развития электроники зачастую информационная часть выполняется в виде специализированной микросхемы — ШИМ-контроллера, к выходам которого необходимо лишь подключить источники питания и необходимые элементы, задающие режимы работы микросхемы. Информацию о ШИМ-контроллерах можно найти в [1].

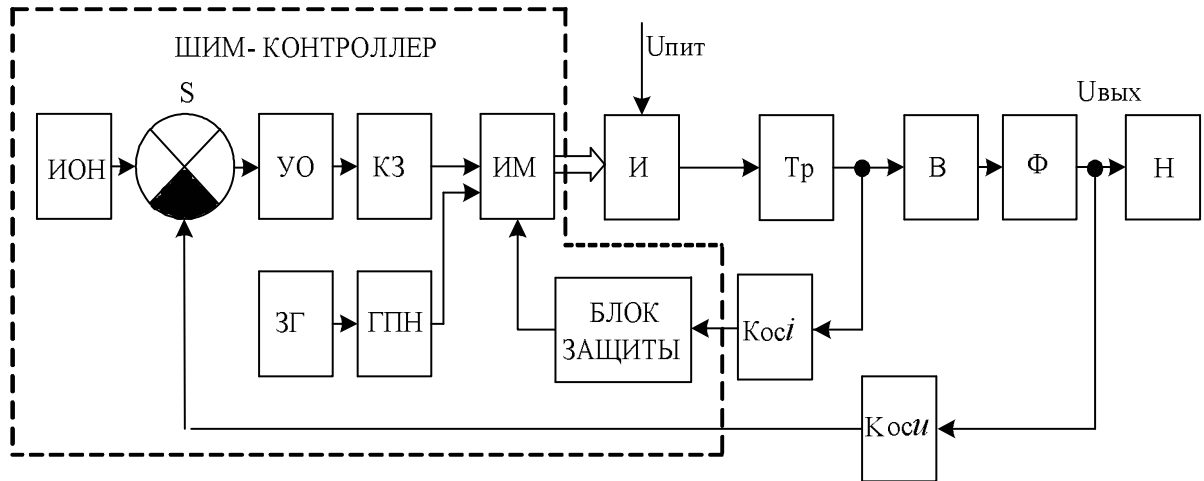


Рисунок 2.5 — Структурная схема преобразователя с управлением на основе ШИМ

На рис. 2.6 представлена развернутая структурная схема, которая представляет фактически математическую модель стабилизированного источника питания на основе прямоходового преобразователя.

Силовая часть модели состоит из источника напряжения $U_{\text{вх}}$, умножителя МУ1, играющего роль преобразователя с ШИМ, так как его выходное напряжение будет равно $U_{\text{вх}} \gamma$, безынерционного звена $\frac{1}{K_{\phi}}$, сумматоров S1,

S2, S3, интеграторов, в качестве которых выступают дроссель фильтра и конденсатор фильтра.

Неидеальность дросселя L фильтра отражена его сопротивлением r_L постоянному току. Интеграторы имеют отрицательную обратную связь по напряжению U_n нагрузки (дроссель $\frac{1}{L} \int U_L dt$) и току i_n нагрузки ($\frac{1}{C} \int i_c dt$).

Множительное звено МУ1 и безынерционное звено $\frac{1}{K_{\phi}}$ используются также при нахождении входного тока $i_{\text{вх}}$ преобразователя $K_{\text{тр}}$.

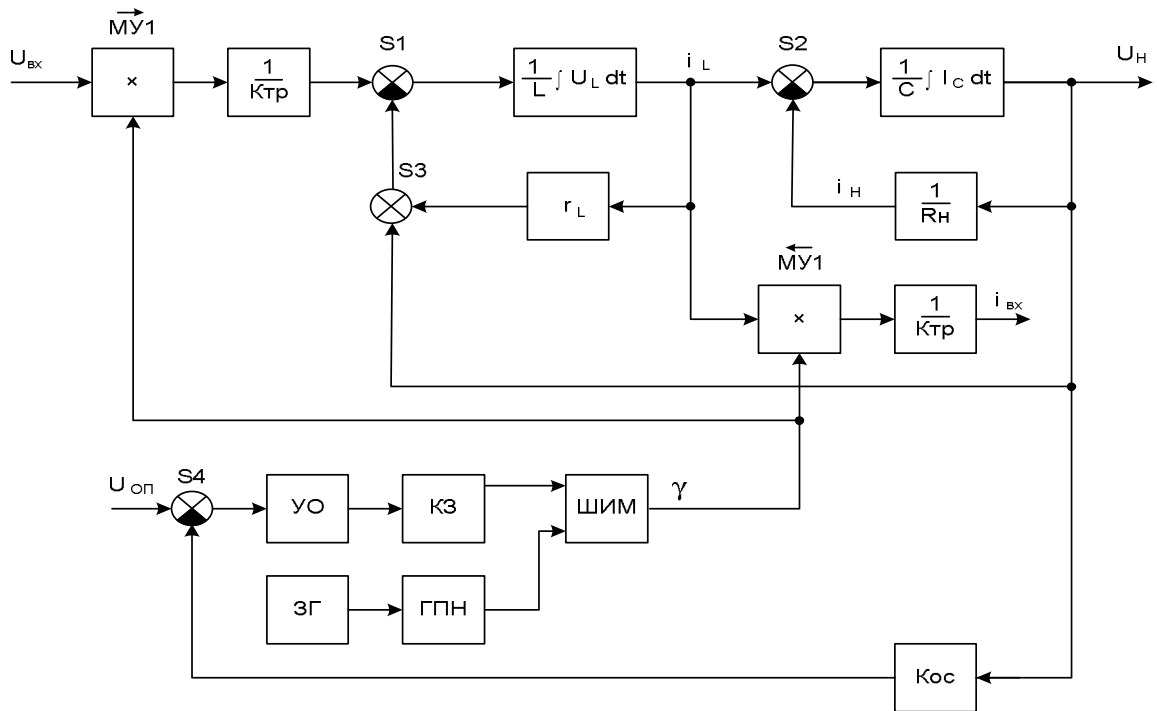


Рисунок 2.6 — Развернутая структурная схема преобразователя

На рис. 2.7 приведена принципиальная электрическая схема силовой цепи источника питания на основе обратного преобразователя, которая при выполнении лабораторной работы отражается на мониторе компьютера.

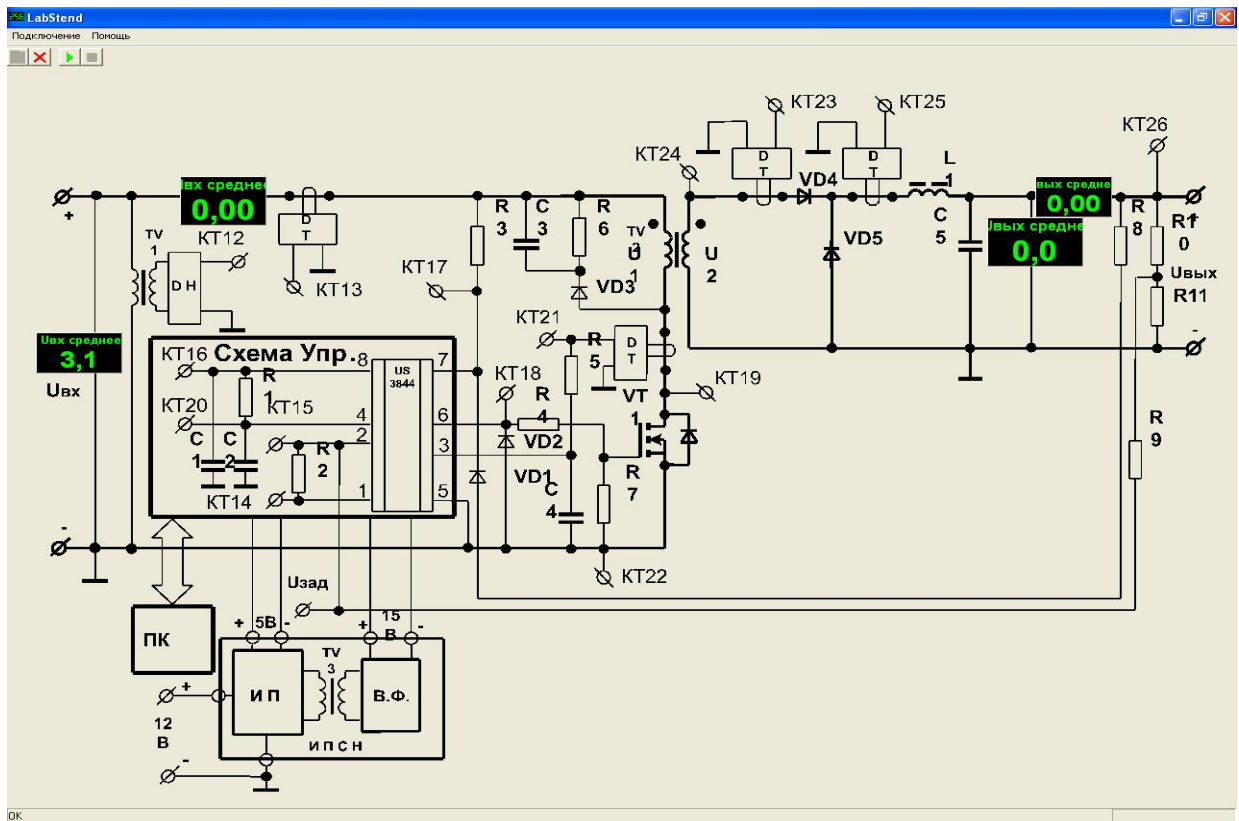


Рисунок. 2.7

На экран выводятся следующие органы управления и индикации:

- индикатор измеренного значения входного напряжения преобразователя;
- индикатор измеренного значения входного тока преобразователя;
- индикатор измеренного значения тока дросселя;
- индикатор измеренного значения выходного тока преобразователя;
- индикатор измеренного значения выходного напряжения преобразователя.

3 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

3.1 Изучить принципы построения источников вторичного питания, выполненных на основе однотактного прямоходового преобразователя с широтно-импульсной модуляцией.

3.2 Исследовать особенности работы источников питания (как замкнутой системы) при воздействии возмущающих факторов ($U_{вх}$; $I_{н}$).

4 ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Структура лабораторной установки представлена на рис. 4.1.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ ОТКЛЮЧАТЬ И ПОДКЛЮЧАТЬ ВЫХОДНЫЕ КЛЕММЫ ПРИ ВКЛЮЧЕННОМ ВЫХОДНОМ НАПРЯЖЕНИИ!

4.1 Лабораторный макет оформлен в виде стенда. Стенд выполнен в настольном исполнении. На лицевой панели расположены контрольные точки для измерения исследуемых параметров. На левой боковой панели расположены разъем подключения источника питания собственных нужд, разъем подключения источника входного напряжения, разъем связи с компьютером. На правой боковой панели расположены клеммы подключения нагрузки.

4.2 Состав стенда.

4.2.1 Стенд включает в себя следующие основные узлы:

- микроконтроллер;
- ШИМ-контроллер;
- стабилизатор напряжения на основе двухтактного инвертора со средней точкой;
- стабилизатор напряжения на основе прямоходового преобразователя;
- стабилизатор напряжения на основе обратногоходового преобразователя;
- вспомогательные элементы;
- реле.

4.2.2 Микроконтроллер управляет работой стенда:

- обрабатывает сигналы управления от компьютера;
- формирует сигналы управления реле;
- формирует сигналы управления активным преобразователем в соответствии с заданными выходными параметрами;
- измеряет текущее значение контролируемых параметров;
- передает измеренные параметры и информацию о состоянии преобразователя в управляющий компьютер.

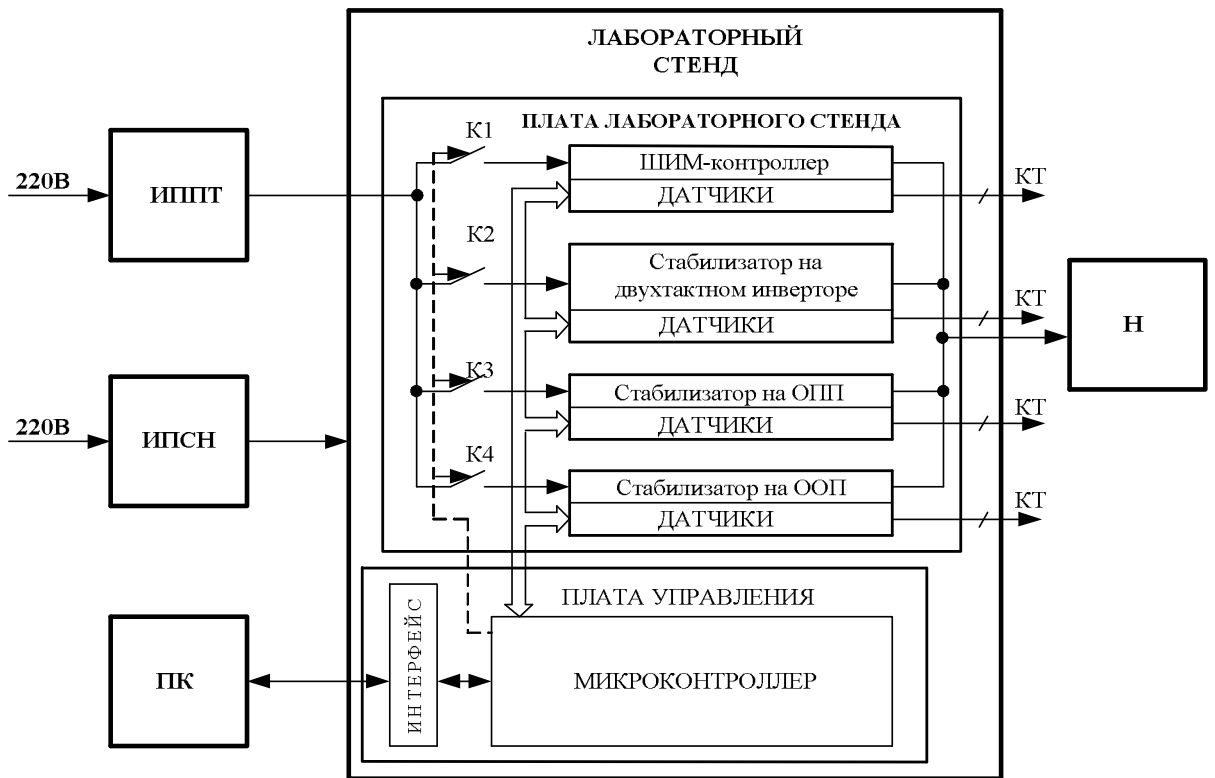


Рисунок 4.1 — Структурная схема лабораторной установки

4.2.3 Реле служат для конфигурирования схемы силовой цепи стенда в соответствии со схемой выбранного преобразователя по рис. 4.2.

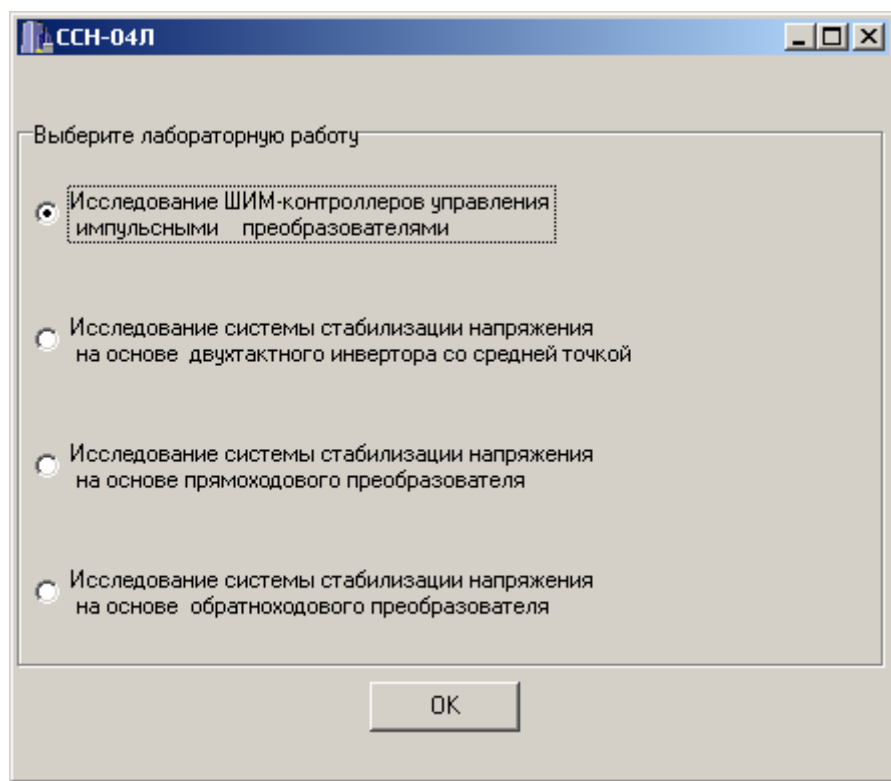


Рисунок 4.2

4.3 Подготовка стенда к работе.

Подключить нагрузочное сопротивление (реостат) к клеммной колодке X1 на правой боковой панели стенда.

Присоединить разъём кабеля связи стенда с компьютером к разъёму XP1 на левой боковой панели стенда.

Присоединить разъём кабеля источника питания собственных нужд к разъёму XS2 на левой боковой панели стенда.

Присоединить разъём кабеля входного переменного напряжения стенда к разъёму XS1 на левой боковой панели стенда.

Проверить правильность монтажа. Провести проверку работоспособности стенда в следующей последовательности:

- подать на стенд напряжение 12 В (присоединить вилку сетевого кабеля источника питания 12 В к розетке однофазной сети переменного тока 220 В). При поступлении питания на стенд должны включиться светодиоды HL12-HL15;

- включить компьютер и загрузить соответствующее программное обеспечение LabStend.exe;

- нажать кнопку «Выбор исследуемой схемы».

При исправном стенде программа должна перейти в меню выбора исследуемой схемы, в заголовке которого должно быть указано наименование стенда «ССН-04Л».

После запуска программы на экран выводится главное окно программы рис. 4.3 с управляющими элементами.

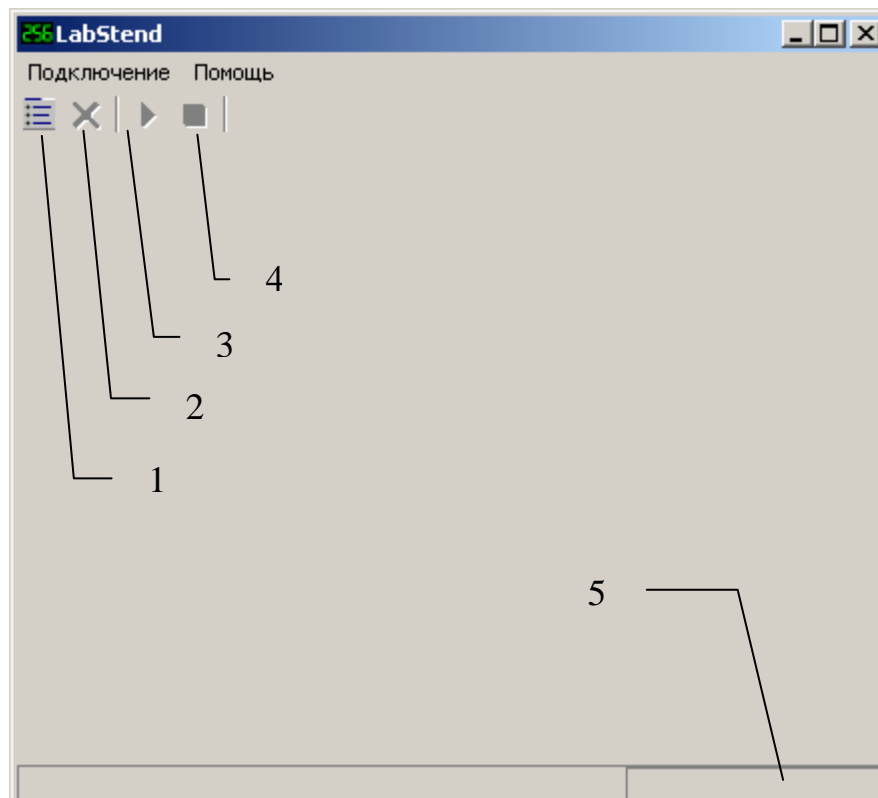


Рисунок 4.3

В заголовке программы указывается имя программы. Главное меню программы состоит из двух пунктов: «Подключение» и «О программе». Под главным меню расположена панель инструментов с четырьмя кнопками: «Выбор исследуемой схемы» поз. 1, «Сброс выбора» поз. 2, «Старт» поз. 3, «Стоп» поз. 4. Неактивные кнопки выделены серым цветом. В правом нижнем углу окна (поз. 5) расположен индикатор качества связи управляющего компьютера со стендом, показывающий количество пропущенных пакетов в процентном соотношении к запрошенным. Ухудшение качества связи приводит к замедлению обновления значений измеренных величин.

При выборе пункта меню «Подключение» на экран выводится окно выбора COM порта для связи со стендом рис. 4.4.

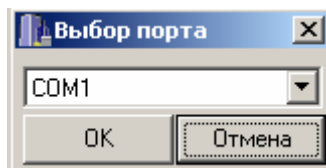


Рисунок 4.4

При нажатии кнопки «Выбор исследуемой схемы» на дисплей выводится окно выбора со списком схем (рис. 4.2), исследуемых на подключенном стенде. В заголовке окна указывается наименование подключенного стенда.

Нажатие кнопки «ОК» в этом окне, а так же при выборе лабораторных работ, на экран последовательно выводятся два окна (рис. 4.5—4.6) выбора дополнительных параметров работы стенда. В заголовке окна указывается наименование лабораторной работы.

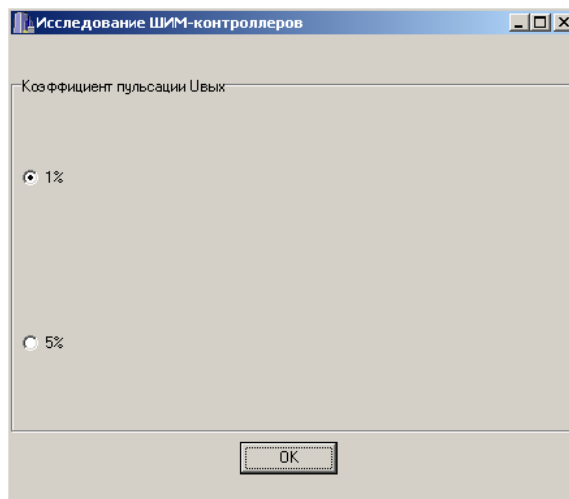


Рисунок 4.5

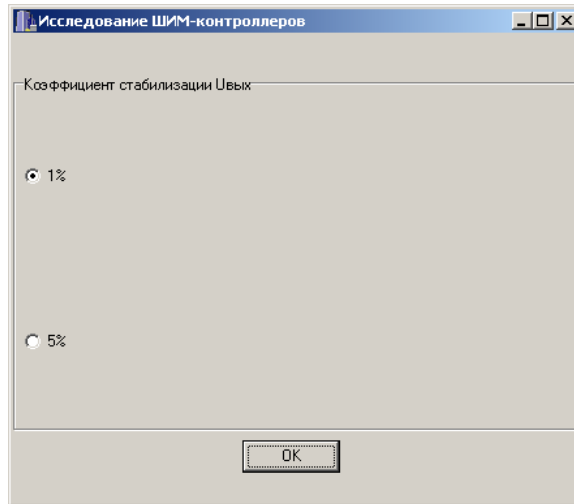


Рисунок 4.6

Нажатием кнопки «ОК» в основное окно программы загружается изображение исследуемой схемы с управляющими элементами и элементами отображения параметров.

С помощью кнопок «Включить К1» и «Выключить К1» подается и снимается входное напряжение.

ВНИМАНИЕ! При входном напряжении свыше 30В блокируется коммутация всех реле, изменяющих конфигурацию силовой схемы стенда, кроме отключения реле К1. При попытке изменить конфигурацию силовой схемы стенда на экран выводится сообщение «Запрещено».

Основные технические характеристики стенда:

величина входного напряжения	24—48В;
максимальный выходной ток (не более)	5 А;
частота преобразователя	35 кГц.

5 ПРОГРАММА РАБОТЫ

5.1 Изучить состав и принцип работы источника вторичного электропитания по принципиальной электрической схеме.

5.2 Исследовать нестабильность выходного напряжения источника от статического изменения напряжения питания при фиксированных токах нагрузки ($I_{н\text{ мин}}$; $I_{н\text{ ном}}$).

5.3 Исследовать нестабильность выходного напряжения источника от статического изменения тока нагрузки при фиксированных значениях напряжения питания ($U_{вх\text{ мин}}$; $U_{вх\text{ макс}}$).

5.4 Исследовать зависимость коэффициента пульсаций выходного напряжения:

- а) от изменения входного напряжения;
- б) изменения тока нагрузки.

5.5 Снять переходные характеристики включения источника при различных значениях:

- а) входного напряжения;
- б) тока нагрузки.

5.6 Снять осциллограммы напряжений и токов, характерные для источника.

6 ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе выполняется в соответствии с требованиями к оформлению и содержанию отчетов, действующими в ТУСУР. Он должен содержать: введение, цель работы, электрические схемы исследуемых устройств, результаты исследований в виде таблиц, графиков осциллограмм, необходимые расчеты, выводы, сделанные на основе анализа расчетных и экспериментальных данных.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1 В чем заключается особенность регулируемого однотактного инвертора, при работе на трансформаторную нагрузку.

7.2 Как выглядит нагрузочная характеристика источника питания на базе регулируемого инвертора.

7.3 Чем обусловлены потери в силовой цепи источника.

7.4 Перечислить виды переходных процессов в замкнутых структурах.

7.5 Назвать показатели качества переходного процесса.

7.6 Как можно изменить точность поддержания выходного напряжения при воздействии дестабилизирующих факторов.

7.7 Записать выражение передаточной функции источника питания как замкнутой системы.

8 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П.А. Воронин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Додэка-XXI, 2005. — 381 с.: ил.

2 Дьяконов В.П. Современная осциллография и осциллографы. Серия «Библиотека инженера» / В.П. Дьяконов. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 320 с.: ил.

3 Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г.С. Зиновьев. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 664 с. — (Серия «Учебники НГТУ»).

4 Кобзев А.В., Коновалов Б.И., Семенов В.Д. Энергетическая электроника: учеб. пособие. В 2-х частях / А.В. Кобзев, Б.И. Коновалов, В.Д. Семенов. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. — Ч.1. — 102 с.

5 Коновалов Б.И. Электропитание ЭВМ: учеб. пособие / Б.И. Коновалов. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. — 177 с.

6 Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления: учеб. пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. — Томск: гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. — 205 с.