

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Ю. М. Казанцев, Н. В. Астахова

**Методические указания к выполнению лабораторных
работ по курсу
«Динамика управляемых преобразовательных устройств»**

Томск 2010

Казанцев Ю. М., Астахова Н. В.. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Динамика управляемых преобразовательных устройств».-Томск: изд. ТПУ, 2010. – 62 с. Рег. номер: 149 от 07.05.2010.

Методические указания включают 4 лабораторные работы. По каждой лабораторной работе приведены необходимые теоретические сведения, предварительное задание, программа исследования, требования к отчёту и контрольные вопросы. Все лабораторные работы выполняются на моделях, создаваемых в среде прикладных программ Orcad.

Методические указания подготовлены на кафедре промышленной и медицинской электроники и предназначены для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Рецензент:

А. Ф. Глотов – к. т. н., доцент кафедры промышленной и медицинской электроники НИ ТПУ.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
2010

1. Особенности импульсных и линейных источников питания

Основой регулирующей аппаратуры силовых электронных систем являются полупроводниковые импульсные преобразователи (ИП) электрической энергии, хорошо сочетающиеся со всеми основными типами источников электропитания, такими, как солнечные батареи, топливные элементы, термоэлектрические генераторы, промышленная сеть. Импульсные преобразователи, работающие с частотами переключения от десятков до сотен килогерц, являются также основой большинства источников вторичного электропитания и регуляторов электропривода различных систем. Основными достоинствами импульсных источников питания являются: высокий коэффициент полезного действия, малые габариты и масса, высокая удельная мощность.

В качестве регуляторов могут использоваться и линейные схемы, в которых регулирование выходного напряжения или тока осуществляется за счёт рассеивания на регулирующем элементе некоторой мощности, что приводит к низкой эффективности и к необходимости в отводе тепла. Хотя линейные источники питания имеют много полезных свойств, таких как: простота, низкие выходные пульсации и шум, хорошие значения нестабильности по напряжению и току и быстрое время восстановления, главным их недостатком является невысокий КПД.

Импульсные источники питания (ИВЭП) получили преимущества перед линейными благодаря применению ключевого режима при работе силовых элементов. В ключевом режиме рабочая точка транзистора большую часть времени находится в области насыщения или области отсечки, а зону активного (линейного) режима проходит с высокой скоростью за очень малое время переключения. При этом в области насыщения напряжение на транзисторе близко к нулю, а в режиме отсечки в транзисторе отсутствует ток, благодаря чему потери в транзисторе оказываются достаточно малыми. Все это приводит к тому, что средняя за период коммутации мощность,

рассеиваемая в ключевом транзисторе, оказывается намного меньше, чем в линейном регуляторе. Малые потери в силовых ключах приводят к уменьшению или полному исключению охлаждающих радиаторов.

Улучшение массогабаритных характеристик сетевых ИВЭП обусловлено прежде всего тем, что из схемы источника питания исключается силовой трансформатор, работающий на частоте 50 Гц. Вместо него в схему вводится высокочастотный трансформатор или дроссель, габариты и масса которых намного меньше низкочастотного силового трансформатора.

Импульсные источники питания имеют более широкий диапазон входных напряжений. Диапазон входных напряжений линейных источников питания обычно не превышает $\pm 10\%$ от номинального значения, что оказывает прямое влияние на КПД. У импульсных источников питания влияние диапазона входного напряжения на КПД очень незначительное или вообще отсутствует, и диапазон входных напряжений $\pm 20\%$ и более даёт возможность работать при сильных изменениях напряжения сети.

К недостаткам импульсных источников электропитания обычно относят: сложность схемы, наличие высокочастотных шумов и помех, увеличенные пульсации выходного напряжения, большое время выхода на рабочий режим. Сравнительные характеристики линейных и импульсных источников питания приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Сравнительные характеристики импульсных и линейных ИВЭП.

Характеристика	Импульс	Линей
	ные	ные
КПД, %	75...95	25...50
Удельная мощность, Вт/дм ³	140...200	30...40
Нестабильность по напряжению, %	0,05...0,1	0,01...0,05
Нестабильность по току, %	0,1...0,5	0,02...0,1
Напряжение пульсаций, мВ	20...50	2...5
Время нарастания переходной характеристики, мкс	100.. 500	20...50

Сравнение этих характеристик показывает, что КПД импульсных источников питания увеличивается по сравнению с линейными в отношении 2:1, а удельная мощность возрастает в отношении 4:1. При повышении частоты преобразования с 20 кГц до 200 кГц удельная мощность увеличивается в отношении 8:1.

В то же время пульсации выходного напряжения в импульсных источниках питания больше, чем у линейных, что обусловлено сложностью подавления коротких импульсов при работе импульсного преобразователя. Другие характеристики у этих источников практически совпадают.

2. Классификация импульсных преобразователей напряжения

К первичным источникам питания ИВЭП относятся сеть переменного тока (50/60 Гц), различные гальванические элементы (аккумуляторы), солнечные батареи и т.п. Соответственно, по типу входного и выходного напряжений, импульсные вторичные источники питания можно разделить на классы:

- ◆ AC/AC - конверторы;
- ◆ AC/DC-конверторы;
- ◆ DC/DC-конверторы;
- ◆ DC/AC-конверторы.

(Здесь AC – переменный ток, DC – постоянный ток).

3. Регулируемые ИП

ИП, являясь устройством, связывающим две или более электрические системы с различными параметрами, обеспечивает обмен энергией между связуемыми системами и должен с высокой точностью и быстродействием осуществлять регулирование и стабилизацию напряжений и токов, обеспечивать требуемую форму выходного напряжения (тока) и потребляемого тока, иметь хорошие энергетические, массогабаритные, надёжностные и другие показатели, в том числе соответствовать требованиям по электромагнитной совместимости.

Импульсный преобразователь представляет собой динамическую систему, т.е. систему, состояние которой изменяется во времени под влиянием воздействующих на нее факторов. Воздействия, влияющие на динамическую систему, могут периодически повторяться или появляться эпизодически, имеют случайный характер и вызывают неожиданные изменения. Адаптацию системы к возмущающим воздействиям и ее способность выполнять свои функции обеспечивает управление. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к расширению функций, возлагаемых на средства управления.

Применение автоматического управления является важным методом улучшения качества ИП. Используя системы регулирования для поддержания характеристик ИП в пределах заданных допусков или повышения постоянства и надёжности выходного сигнала, можно создать эффективный ИП. Регулирование ИП даёт ряд преимуществ. Основным из

этих достоинств являются повышение точности преобразования напряжения и увеличение быстродействия преобразователя, т. е. уменьшение времени переходного процесса.

Поэтому разработка эффективных систем управления является актуальной проблемой.

Под системой управления (СУ) преобразовательного устройства понимают совокупность функциональных узлов и элементов, обеспечивающих:

- управление ключевыми элементами силовой части преобразователя, осуществляющими процесс преобразования электроэнергии;
- регулирование выходных параметров преобразователя по заданному закону;
- обеспечение параллельной работы преобразователей на общую шину;
- включение, отключение преобразователя и распределение электроэнергии между отдельными потребителями;
- управление защитными устройствами преобразователя;
- выдачу информации о работе преобразователя при использовании его в автоматизированной системе, т.е. систему контроля работоспособности преобразователя и его компонентов также относят к системе управления.

Качество управления ИП характеризуют следующие показатели.

1. Статическая точность (нестабильность) регулируемого параметра, характеризуется статической ошибкой, равной отклонению регулируемой величины или её среднего значения от заданного в установившемся режиме $\varepsilon = |y_{уст} - y_{ном}|$, или коэффициентом нестability $\delta y = \varepsilon / y_{ном}$.

Система называется статической, если статическая ошибка отлична от нуля, и астатической, если статическая ошибка равна нулю.

Можно говорить о статической и астатической системах относительно того или иного внешнего воздействия.

Система называется статической относительно задающего воздействия (возмущения), если статическая ошибка от задающего воздействия (возмущения) отлична от нуля, и астатической относительно задающего воздействия (возмущения), если статическая ошибка от задающего воздействия (возмущения) равна нулю.

Для характеристики стабилизирующих ИП используется также коэффициент стабилизации $k_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх.ном}}{\Delta U_{вых} / U_{вых.ном}}$;

2. Коэффициенты гармоник (нелинейных искажений), пульсаций, сглаживания пульсаций регулируемого параметра также характеризуют качество параметров установившегося режима;

3. Время регулирования $t_{рег}$ является основной характеристикой быстродействия системы и определяется временем вхождения регулируемого параметра в «трубку» $2\varepsilon_{доп}$, когда $|y(t) - y_{ном}| < \varepsilon_{доп}$, при $t > t_{рег}$ (рис. 3.1).

4. Максимальное перерегулирование (динамическая ошибка) – максимальное отклонение регулируемой величины от номинального значения $\varepsilon_{дин} = |y_{макс} - y_{ном}|$.

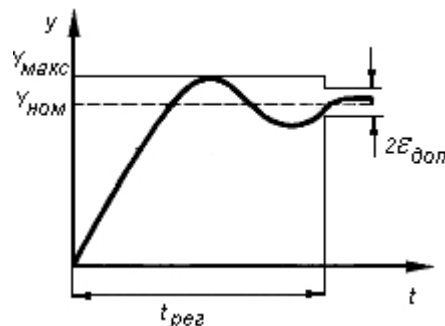


Рис. 3.1. Показатели качества регулирования.

5. Число перерегулирований (на рис. 3.1 их два) и степень затухания $\xi = \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)$, где $\Delta y_{1,2}$ – два соседних перерегулирования (рис. 3.1), характеризуют колебательность системы;

6. Точность регулирования при воздействии случайных возмущений характеризуется среднеквадратическим отклонением σ ;

7. Устойчивость системы характеризуется запасами по амплитуде и фазе АФЧХ ИП, а также АЧХ и ФЧХ импеданса выходной шины.

4. Анализ устойчивости регулируемой системы

Назначением систем управления является поддержание некоторого заданного режима, называемого невозмущенным движением. Если на систему действует возмущение, то фактическое движение (которое называется возмущенным движением) будет отличаться от невозмущенного движения. Невозмущенное движение называется асимптотически устойчивым, если после окончания действия возмущения возмущенное движение $y\{t\}$ с течением времени стремится к невозмущенному движению $y_n\{t\}$: $y(t) \rightarrow y_n\{t\}$ при $t \rightarrow \infty$.

Линейная система управления называется устойчивой или асимптотически устойчивой, если любое ее невозмущенное движение, определяемое задающим воздействием, асимптотически устойчиво.

Объединение преобразователей и потребителей в единый энергетический и конструктивный комплекс нередко сопровождается потерей устойчивости системы в целом, в то время как каждый из каналов устойчиво работает в автономном режиме во всем диапазоне изменения входных и выходных параметров. Выходной импеданс ИП является важным техническим параметром, который влияет на устойчивость связки «источник-потребитель». Завышенное значение импеданса на отдельных участках диапазона частот может привести к появлению косвенных помех в общей шине питания и, следовательно, к сбою работы системы.

На практике для анализа устойчивости необходимо проводить достоверное измерение выходного импеданса ИВЭП. Чтобы система была устойчива, модуль входного импеданса потребителя должен быть больше модуля выходного импеданса источника во всем диапазоне частот.

В энергетических системах это условие выполняется не всегда. На постоянном токе и низких частотах трудностей с согласованием нет (в противном случае КПД передачи энергии был бы ниже 50 %). В остальной полосе частот выполнение такого условия негарантировано, что объясняется резонансными частотами сглаживающих LC-фильтров, входящих в состав источников и потребителей.

При анализе устойчивости разветвлённых систем электропитания процедура сопоставления входных и выходных импедансов повторяется многократно. На завершающем этапе определяют параметры выходного импеданса источника, сопоставляют их с параметрами суммарного входного импеданса потребителей и делают вывод об устойчивости системы и запасах по модулю и фазе. Достоинство такого метода – возможность использования при анализе как расчётных, так и экспериментальных характеристик, что во многих случаях упрощает задачу анализа. При экспериментальном исследовании достаточно снять общую характеристику входного импеданса всех потребителей и, сравнив её с характеристикой выходного импеданса источника, сделать вывод об устойчивости всего соединения.

На частотной характеристике выходного импеданса (рис. 4.1) можно выделить две характерные зоны:

- зона канала управления (диапазон частот от 10 Гц до 5 кГц), где значение модуля импеданса минимально и обусловлено быстрым действием регулятора;

- зона выходного фильтра (диапазон от 5 кГц до 20 кГц). Максимуму модуля выходного импеданса соответствует область частот, в которой быстрогодействия схемы управления уже, а мощности выходного фильтра ещё недостаточно.

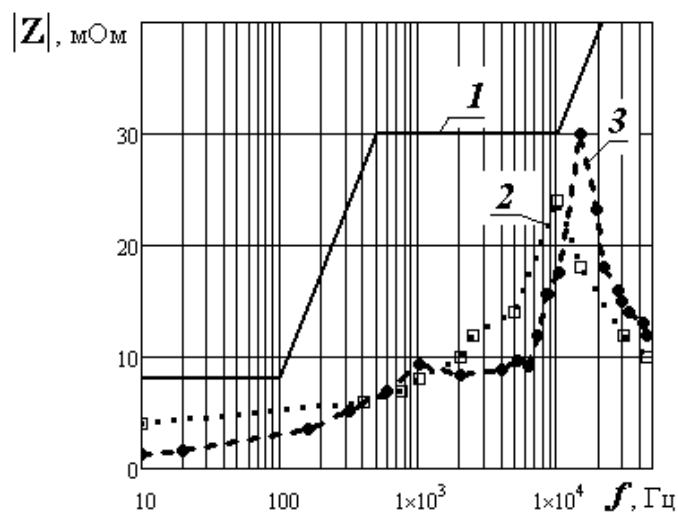


Рис. 4.1. Модуль выходного импеданса.

1 – норма по стандарту ESA; 2 – расчетные значения для имитационной модели импульсного стабилизатора напряжения; 3 – экспериментальные данные, полученные на имитационной модели импульсного стабилизатора напряжения.

В области рабочих частот модуляции (диапазон от 20 кГц до 60 кГц) модуль выходного импеданса также возрастает.

В области высоких частот (диапазон от 60 кГц до 1 МГц) на величину модуля выходного импеданса существенное влияние оказывают паразитные параметры элементов фильтра и монтажа.

5. Принципы управления импульсными преобразователями

В системах с ИП используют все основные принципы, разработанные в теории автоматического управления:

- жесткое программное управление, когда формирование управляющих воздействий производится по определенному заранее заданному закону, не зависящему от действующих возмущений и фактического значения выходных координат ИП (рис. 5.1, а).

Программное управление применяют в тех случаях, когда параметры нагрузки и источника питания изменяются незначительно, а к стабильности выходной координаты ИП не предъявляется жестких требований.

Программное управление широко применяют в автономных инверторах напряжения модуляционного типа;

- управление, основанное на информации о фактическом значении выходной координаты $y(t)$ или вектора состояния $\vec{x}(t)$, получаемой по каналу отрицательной обратной связи, в качестве которой используют значение отклонения координаты $y(t)$ (или некоторой функции от нее, например ее среднего, средневыпрямленного или действующего значения) от заданного значения $y_{on}(t)$ (рис. 5.1, б). Этот вид управления принято называть управлением по отклонению, задачей управления является минимизация отклонения $y(t)$ от $y_{on}(t)$ независимо от вызвавших его причин

$$\Delta y(t) = [y_{on}(t) - y(t)] \xrightarrow{\tau} \min$$

Благодаря этому достоинству управление по отклонению получило преимущественное распространение при построении стабилизированных ИП. Однако высокая точность управления в таких ИП может быть обеспечена только в установившихся режимах или при медленных изменениях дестабилизирующих факторов;

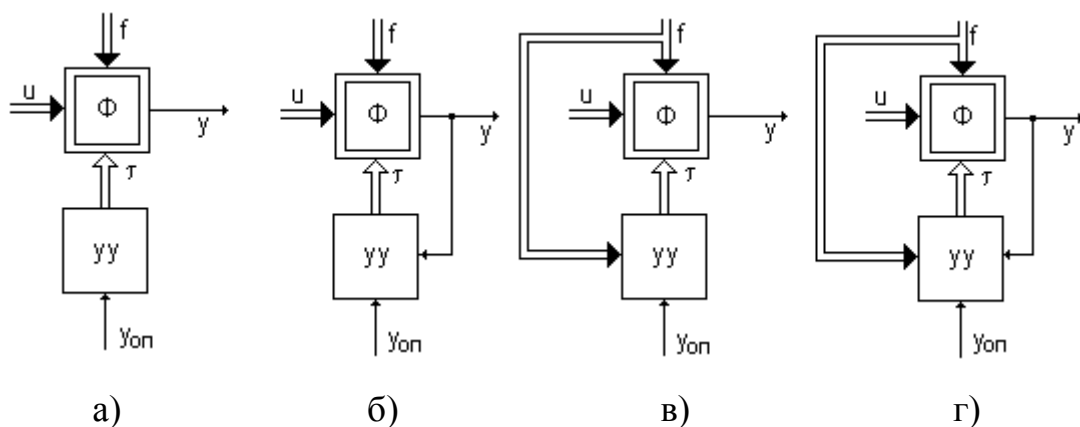


Рис 5.1. Принципы управления ИП.

- Иногда в стабилизированных ИП применяют управление, основанное на использовании информации о возмущениях $f(t)$, действующих на ИП (рис. 5.1, в). Целью такого управления - ослабление влияния возмущений

$f(t)$ на выходную координату $y(t)$, т. е. минимизация отклонения $\Delta y(t)$, обусловленного действием $f(t)$: $\Delta y[f(t)] \xrightarrow{\tau} \min$.

Основное достоинство управления по возмущению - высокое быстродействие контура управления. Однако полную компенсацию возмущений в ИП осуществить обычно не удастся, поэтому точность регулирования получается невысокой. Управление по возмущению применяют в тех случаях, когда требования к качеству выходной электроэнергии невысокие и для их удовлетворения следует ослабить влияние основных возмущений. Обычно для организации управления используют информацию о напряжении на входе ИП.

Применяют также комбинированное управление, сочетающее в себе управление по отклонению и по возмущению (рис. 5.1 ,г). При использовании комбинированного управления во многих случаях удается обеспечить хорошее качество выходной электроэнергии ИП в условиях действия возмущений при небольшом коэффициенте усиления в канале обратной связи и, следовательно, большом запасе устойчивости.

В ИП регулирование осуществляется модуляцией импульсной последовательности. В основных видах модуляции модулируемым параметром является один из временных признаков импульсной последовательности. Системы, основанные на использовании такой модуляции, называются времяимпульсными системами (ВИС), а под времяимпульсной модуляцией (ВИМ) понимают такой способ модуляции импульсной последовательности, при котором модулируемым параметром является один из ее временных признаков.

Весь процесс управления силовым блоком можно разбить на такты управления. Такт управления - это наименьший отрезок времени, в течение которого производится определенная последовательность переключений силовых ключей для достижения цели управления, относящейся к этому отрезку времени. Например, при широтно-импульсной модуляции такт

управления совпадает с периодом модуляции, т.е. промежутком времени, в течение которого осуществляются определенные операции по формированию управляющих импульсов, длительность (а в отдельных случаях и положение на временной оси) которых подчиняется принятому закону модуляции. Такт управления называют также тактом преобразования.

В зависимости от параметра управляющих импульсов, который модулируется при управлении ИП, выделяют следующие системы регулирования:

- системы с управляемым выпрямителем, у которых параметры выходного сигнала импульсной части определяются фазовым углом включения вентиляей;
- системы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ);
- системы с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ).

Дискретные системы с нелинейной импульсной частью по способу изменения параметров импульсной части можно разделить на системы с непрерывным и дискретным изменениями параметров. Так, системы с управляемым выпрямителем, ШИМ и ЧИМ, имеющие непрерывные регуляторы, относятся к системам с непрерывным изменением соответственно угла регулирования, длительности и частоты следования импульсов.

В зависимости от способа управления импульсной частью выделяют широтно-импульсные системы с управлением первого и второго рода, интегральным управлением, а также асинхронные.

При управлении первого рода длительность очередного импульса пропорциональна разности сигналов задания и ОС в начале периода. В случае управления второго рода длительность очередного импульса определяется интервалом изменения пилообразного сигнала от нуля в начале импульса до разности сигналов задания и ОС в конце.

При интегральном управлении с интегрированием в интервале одного периода длительность очередного импульса равна интервалу, в течение

которого интеграл от разности сигналов ОС и задания достигает некоторого порогового уровня.

В асинхронной схеме управления в отличие от управления второго рода пилообразный сигнал запускается в момент окончания заднего фронта импульса, т.е. момент запуска не синхронизирован жестко с периодом работы системы. Замкнутая система с асинхронным управлением является астатической вследствие дискретного интегрирования (суммирования) приращений длительности импульса.

Существуют системы управления второго рода с модуляцией переднего или заднего фронта импульса и двух фронтов.

В зависимости от способа управления импульсной частью системы ЧИМ, как и ШИМ, делятся на системы с управлением первого рода, второго рода, и интегральные. В отличие от систем с ШИМ здесь модулируется длительность периода.

При работе ИП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) могут наблюдаться следующие процессы.

1. Колебания на кратных частотах. Частота управляющих импульсов становится ниже заданной частоты модуляции, система начинает работать на частотах, кратных основной частоте. Эти процессы относятся к ограниченным периодическим процессам различных рангов $m \geq 2$, когда $f = f_0/m$, f_0 – заданная частота модуляции.

2. Высокочастотные колебания. Частота управляющих импульсов превышает заданную частоту модуляции ($f > f_0$).

3. Низкочастотные колебания. Частота этих колебаний много меньше заданной частоты модуляции ($f \ll f_0$). Процесс является слабозатухающим и проявляется в том, что модулируемый фронт импульсов управления изменяет своё положение на каждом периоде модуляции.

Если в системе с ШИМ имеют место перечисленные процессы, она может оказаться неустойчивой, частично или полностью неработоспособной. Избавиться от нежелательных явлений в системе можно путём подбора

оптимального сочетания параметров регулятора: коэффициентов при пропорциональной, интегральной, дифференциальной составляющих управляющего сигнала, амплитуды пилы, периода модуляции. Высокочастотные колебания можно устранить при помощи триггера, обеспечивающего одно переключение на периоде модуляции.

6. РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО СТАБИЛИЗАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследование работы схемы стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием.

Стабилизаторы линейных источников питания.

Стабилизатором напряжения называют устройство, поддерживающее с определенной точностью неизменным напряжение на нагрузке. Изменение напряжения на нагрузке может быть вызвано рядом причин: колебаниями напряжения первичного источника питания (сети переменного напряжения, аккумулятора, гальванического элемента), изменением нагрузки, изменением температуры окружающей среды и др.

1. Основные параметры стабилизаторов напряжения.

Параметры стабилизаторов напряжения позволяют сравнивать их по качеству работы, выбирать те, которые удовлетворяют требованиям эксплуатации электронных устройств. К таким параметрам относят: номинальное выходное напряжение $U_{вых}$, диапазон изменения входного напряжения $U_{вх.min}$ и $U_{вх.max}$, диапазон изменения тока нагрузки $I_{н.min}$ и $I_{н.max}$, коэффициент полезного действия η , коэффициент стабилизации $K_{ст}$, коэффициент сглаживания пульсаций $K_{сг}$ и быстродействие.

Главным параметром стабилизатора является его номинальное выходное напряжение $U_{вых.ном}$. Если стабилизатор позволяет регулировать выходное напряжение, то задается диапазон изменения выходного напряжения $U_{вых.min}$ и $U_{вых.max}$.

Диапазон изменения входного напряжения $U_{вх}$ позволяет установить пределы изменения напряжения на входе стабилизатора, при которых сохраняются точностные свойства стабилизатора.

Диапазон изменения тока нагрузки I_n позволяет установить пределы изменения тока нагрузки, при котором сохраняются точностные свойства стабилизатора.

Коэффициент полезного действия стабилизатора $\eta_{ст}$ — это отношение мощности, отдаваемой в нагрузку P_n к мощности $P_{пот}$, потребляемой от первичного источника питания:

$$\eta_{ст} = P_n / P_{пот} .$$

Коэффициент стабилизации $K_{ст}$ - это отношение относительного изменения входного напряжения $\Delta U_{вх} / \Delta U_{вх.ном}$ к вызываемому им относительному изменению выходного напряжения $\Delta U_{вых} / \Delta U_{вых.ном}$:

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх.ном}}{\Delta U_{вых} / U_{вых.ном}} .$$

Коэффициент сглаживания пульсаций — это отношение амплитудного значения пульсаций входного напряжения к амплитудному значению пульсаций выходного напряжения:

$$K_{сг} = U_{вх\sim} / U_{вых\sim} .$$

Быстродействие стабилизатора характеризует его способность быстро обрабатывать скачкообразные изменения входного напряжения или тока нагрузки. Обычно быстродействие стабилизатора определяют временем установления выходного напряжения при заданном скачкообразном изменении напряжения на входе или тока нагрузки.

Дифференциальное выходное сопротивление стабилизатора — это отношение приращения выходного напряжения к приращению тока нагрузки:

$$r_{\partial} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{н}} .$$

Кроме того, стабилизатор характеризуется выходным импедансом, который определяется отношением амплитуды гармонической составляющей выходного напряжения к амплитуде вызвавшего её гармонического изменения тока нагрузки:

$$z = \Delta U_{\text{вых}\sim} / \Delta I_{\text{н}\sim} .$$

На практике импеданс используют для анализа устойчивости системы «стабилизатор-потребитель». При этом руководствуются тем, что для устойчивости системы модуль входного импеданса потребителя должен быть больше модуля выходного импеданса стабилизатора во всём диапазоне частот.

Температурный коэффициент — это отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению температуры окружающей среды:

$$TKH = \Delta U_{\text{вых}} / (\Delta T U_{\text{вых}}) , \% / ^{\circ}\text{C} .$$

По выходной мощности стабилизаторы можно разделить на маломощные (до 1Вт), средней мощности (до 250 Вт) и большой мощности (свыше 250 Вт). Маломощные стабилизаторы используются в измерительной технике, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях. Стабилизаторы средней мощности используются для питания малых ЭВМ и маломощных электронных устройств. Мощные стабилизаторы применяют для питания лазерных установок, электронных микроскопов и др.

По точности поддержания выходного напряжения на нагрузке стабилизаторы делят на прецизионные (изменение напряжения не более 0,005%), точные (изменение напряжения от 0,01 до 0,005%), средней точности (изменение напряжения от 0,1 до 0,01%) и низкой точности (изменение напряжения от 1 до 0,1%). В прецизионных стабилизаторах для получения наивысшей точности поддержания выходного напряжения

используются специальные устройства, исключая влияние изменения температуры окружающей среды (термостаты или криостаты).

По принципу работы стабилизаторы делят на параметрические и компенсационные.

2. Параметрические стабилизаторы.

Основаны на использовании особенностей вольт-амперных характеристик некоторых полупроводниковых приборов — в основном, стабилитронов. Их отличает высокое выходное сопротивление, невысокий уровень стабилизации и низкий КПД. Такие стабилизаторы применяются только при малых нагрузках, обычно — как элементы схем (например, в качестве источников опорного напряжения).

Основа простейшего параметрического стабилизатора (рис. 6.1.) - цепочка из резистора $R1$ и стабилитрона $VD1$.

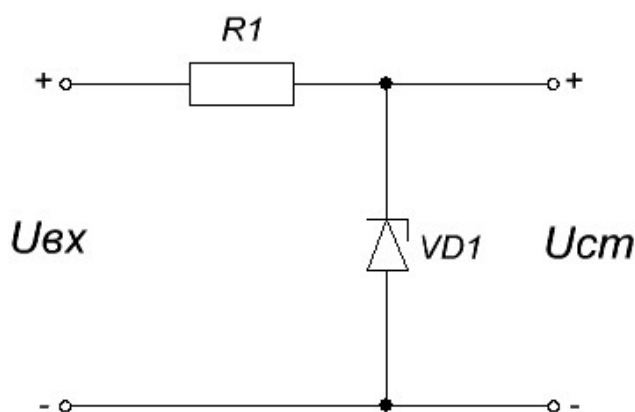


Рис. 6.1. Простейшая схема стабилизатора напряжения со стабилитроном.

Стабилитрон - это специальный диод, включенный в обратной полярности и работающий в режиме лавинного обратимого пробоя. Если повышать обратное напряжение на стабилитроне, то сначала ток будет небольшим, а по достижении напряжения стабилизации (указывается в справочных данных) резко возрастет, причём разность потенциалов на диоде остаётся почти постоянной при изменении тока в широком диапазоне. В

схеме на рис. 6.1. выходное напряжение равно разности потенциалов на диоде и поэтому постоянно при изменении входного напряжения в широких пределах. Чтобы ограничить возрастание тока через стабилитрон, его включают через резистор R1 (это так называемый балластный резистор). Входное напряжение стабилизатора должно быть по крайней мере на два или три вольта выше, чем требуемое выходное напряжение, чтобы задать соответствующий ток через стабилитрон, при котором обеспечивается его работа в режиме пробоя. При питании маломощных устройств часто обходятся таким простейшим стабилизатором, снимая выходное напряжение со стабилитрона.

Видно, что полный ток I , текущий от источника на входе, разветвляется по двум направлениям: на ток I_{cm} (обычно 5...20 мА), текущий через стабилитрон, и на ток I_n (такого же порядка), текущий в нагрузку. Ток I можно рассчитать по формуле:

$$I = (U_{ex} - U_{cm}) / R1 . \quad (6.1)$$

То есть для заданного напряжения U_{ex} ток I фактически постоянен. Теперь, в соответствии с первым законом Кирхгофа,

$$I = I_n + I_{cm} . \quad (6.2)$$

Таким образом, в данной схеме стабилизатора с увеличением тока нагрузки I_n ток через стабилитрон I_{cm} падает. При расчёте необходимо позаботиться о том, чтобы даже при наибольшем токе нагрузки ток через стабилитрон был бы всё ещё достаточным. Этот ток должен поддерживать стабилитрон за изгибом характеристики, где начинается пробой. С другой стороны, если нагрузка отключена, то весь ток течёт через стабилитрон, так что $I_{cm} = I$. В этом случае на диоде рассеивается большая мощность, равная

$$P_{max} = U_{cm} I . \quad (6.3)$$

Выбранный стабилитрон должен быть способен рассеивать эту мощность без повреждений.

Для стабилизатора со стабилитроном (рис. 6.1.) максимально допустимый ток нагрузки ограничен небольшим значением, а любое дальнейшее увеличение нагрузки приводит к уменьшению тока диода настолько, что он не может поддерживать своё номинальное напряжение стабилизации.

В большинстве случаев ток нагрузки должен быть намного больше, чем ток, который может течь через стабилитрон. При большем токе нагрузки используют дополнительный транзистор VT1, включенный как эмиттерный повторитель (рис. 6.2.). Если эмиттерный повторитель добавить к простому стабилизатору со стабилитроном, то доступный выходной ток возрастает в число раз, равное коэффициенту усиления тока транзистора.

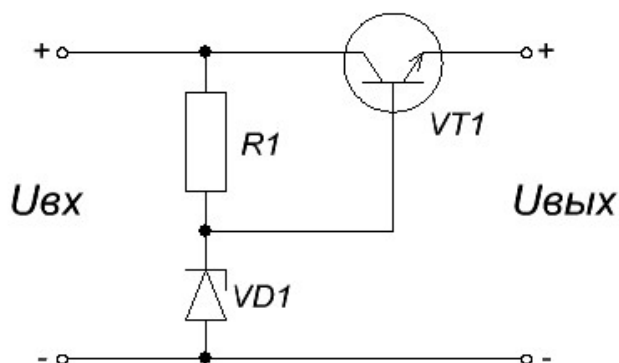


Рис. 6.2. Стабилизатор напряжения со стабилитроном и эмиттерным повторителем.

VT1 "повторяет" на нагрузке стабилизированное напряжение базы. Выходное напряжение $U_{вых}$ примерно на 0,7 В (падение напряжения на переходе база-эмиттер) меньше паспортного напряжения стабилизации стабилитрона. При больших токах нагрузки используют составной транзистор.

Главные недостатки данного стабилизатора – низкий коэффициент стабилизации 20-50 и низкий КПД 20-30%.

Комбинация стабилитрона и эмиттерного повторителя даёт заметное улучшение нагрузочной способности по сравнению с одним стабилитроном,

но коэффициент стабилизации не улучшается. Кроме того, тот факт, что у рассмотренных до сих пор стабилизаторов выходное напряжение фиксировано, может оказаться недостатком во многих применениях.

3. Компенсационные стабилизаторы.

Стабилизаторы компенсационного типа характеризуются тем, что напряжение на выходе остается практически неизменным при изменении входного напряжения или тока нагрузки в результате воздействия цепи отрицательной обратной связи на регулирующий элемент схемы. Таким образом, принципиальным отличием компенсационного стабилизатора от параметрического является наличие в схеме отрицательной обратной связи (рис. 6.3.).

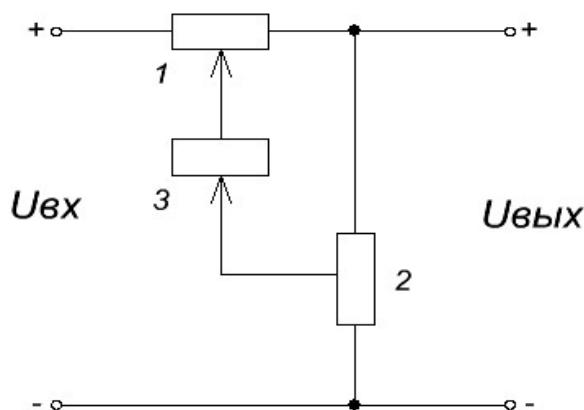


Рис. 6.3. Блок-схема компенсационного стабилизатора.

На рисунке приведена блок-схема компенсационного стабилизатора, состоящего из трех элементов:

- регулирующего 1,
- измерительного 2,
- усилительного 3.

Элемент 1 представляет собой регулируемое активное (для стабилизаторов постоянного тока) и реактивное (для стабилизаторов переменного тока) сопротивление, включенное последовательно с нагрузкой. Элемент 2 фиксирует отклонение напряжения на выходе стабилизатора от

некоторого эталонного напряжения. Элемент 3 усиливает изменение выходного напряжения и воздействует на регулирующий элемент, изменяя его сопротивление и поддерживая этим постоянство выходного напряжения с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы могут быть с непрерывным или импульсным регулированием. В импульсных стабилизаторах используется ключевой режим работы регулирующего элемента. В стабилизаторах с непрерывным регулированием регулирующий элемент работает в непрерывном режиме.

Таким образом, стабильность напряжения можно повысить ещё больше путём введения в схему усилителя для сравнения опорного напряжения стабилитрона с определённой частью выходного напряжения. Такая схема, обеспечивающая также регулировку выходного напряжения, показана на рис. 6.4. Здесь усилитель напряжения на транзисторе VT2 с резистором R1 в качестве коллекторной нагрузки служит источником сигнала для эмиттерного повторителя на транзисторе VT1. Напряжение на эмиттере транзистора VT2 поддерживается постоянным с помощью стабилитрона VD1. На базе транзистора VT2 через потенциометр R3 и резистор R4 подаётся определённая часть выходного напряжения. Поскольку потенциал эмиттера транзистора VT2 зафиксирован стабилитроном, схема сама регулирует выходное напряжение до тех пор, пока напряжение на базе транзистора VT2 не превысит напряжение стабилитрона на 0,7 В (падение напряжения на переходе база-эмиттер). Выходное напряжение можно изменять с помощью регулировочного потенциометра R3, устанавливая различные коэффициенты обратной связи.

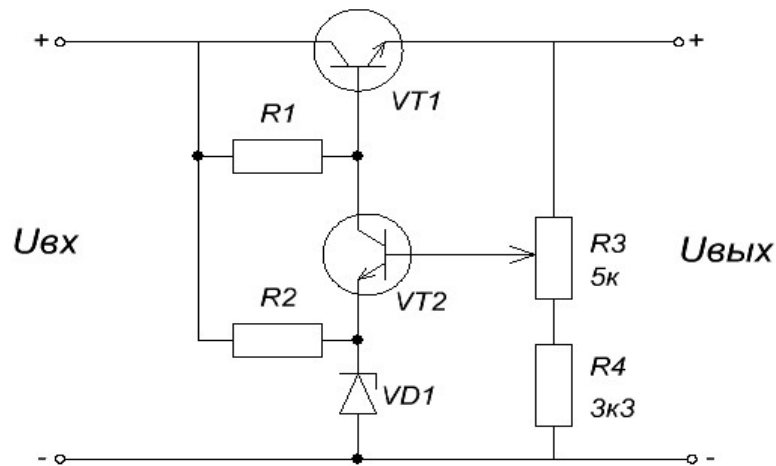


Рис. 6.4. Стабилизатор напряжения с усилителем рассогласования.

Рассмотренный компенсационный стабилизатор является стабилизатором с непрерывным регулированием. Основным его недостатком является невысокий КПД. В этом стабилизаторе мощность, потребляемая от источника, больше мощности, отдаваемой в нагрузку. Наибольший расход мощности имеет место в регулирующем элементе, так как напряжение на нём равно разности $U_{вх} - U_{вых}$ и через него проходит весь ток нагрузки. В связи с этим регулирующий элемент часто устанавливают на теплоотвод.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. По заданным значениям входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ напряжения, мощности нагрузки P_n и тока стабилизации стабилизатора $I_{ст}$ рассчитать значения сопротивления нагрузочных резисторов R_n , резисторов $R1$ и $R2$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Максимальное значение входного напряжения $U_{вх.маx} = 20 В$;

Минимальное значение входного напряжения $U_{вх.мин} = 12 В$;

Номинальное значение выходного напряжения $U_{вых.ном} = 6,3V \pm 1\%$;

Максимальная мощность нагрузки $P_{н.мах} = 300 мВт$;

Минимальная мощность нагрузки $P_{н.мин} = 100 мВт$;

Напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст} = 5 В$;

Ток стабилизации стабилитрона $I_{ст} = 5 мА$;

Падение напряжения на переходе база- эмиттер транзистора $U_{б-э} = 0,7 В$;

Коэффициент усиления транзистора по току $\beta = 50; 100$.

Параметры транзисторов: $\beta = 50; 100$; $T_F = 20 н$; $T_R = 1 м$; $C_{JC} = 0,5 н$;
 $C_{JE} = 0,6 н$.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Создать и верифицировать (проверить соответствие поведения модели логике поведения системы) модель линейного стабилизатора по схеме рис. 1.4. с заданным выходным напряжением.

2. Провести испытания схемы в заданных режимах эксплуатации с определением характерных параметров:

2.1. Статический режим.

Определить статическую ошибку, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций выходного напряжения и коэффициент полезного действия стабилизатора по результатам испытаний схемы в соответствии с таблицей:

Таблица 6.1.

$U_{вых}$	P_n	Измеренное $U_{вых}$	$K_{ст}$	K_n	η
$U_{вых.мах}$	$P_{н.мин}$				
$U_{вых.мин}$	$P_{н.мах}$				

Испытания провести при β транзисторов равном 50 и 100. В следующих экспериментах использовать значение β , которому соответствует лучший результат.

2.2. Динамический режим.

Определить время переходного процесса (время регулирования), перерегулирование, степень затухания при следующих условиях.

Степень затухания рассчитывается по следующей формуле:

$\xi = \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)$, где $\Delta y_{1,2}$ - два соседних перерегулирования.

2.2.1. Включение с нулевых начальных условий в соответствии с таблицей:

Таблица 6.2.

$U_{вх}$	P_H	Измеренное $t_{рег}$	Измеренное $\varepsilon_{дин}$	Измеренное ξ
$U_{вх. max}$	$P_{H. min}$			
$U_{вх. min}$	$P_{H. max}$			

2.2.2. Наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки в соответствии с таблицей:

Таблица 6.3.

$U_{вх}$	P_H	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дин}$	ξ
$U_{вх. min} - U_{вх. max} - U_{вх. min}$	$P_{H. min}$			
$U_{вх. min} - U_{вх. max} - U_{вх. min}$	$P_{H. max}$			
$U_{вх. min}$	$P_{H. min} - P_{H. max} - P_{H. min}$			
$U_{вх. max}$	$P_{H. min} - P_{H. max} - P_{H. min}$			

2.2.3. Определение выходного импеданса стабилизатора.

При внешнем периодическом воздействии по цепи нагрузки

$$i_H = I_H + I_{В.В} \sin(2\pi f_{В.В} t),$$

где $I_{В.В}$ и $f_{В.В}$ – амплитуда и частота внешнего периодического воздействия, рассчитать выходной импеданс Z по формуле:

$$z = \Delta U_{вых\sim} / \Delta I_{H\sim},$$

где $\Delta U_{вых\sim}$ – амплитуда переменной составляющей выходного напряжения; $\Delta I_{H\sim}$ – амплитуда переменной составляющей тока нагрузки.

Измерения провести при $I_{В.В} = 0, I_H$ и $f_{В.В} = 100$ Гц, 1 кГц, 10 кГц, 10 МГц. Результаты оформить в виде графика $z(f)$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Название, цель и программа работы.
2. Исследуемая схема.
3. Выполненное предварительное задание.
4. Результаты проведённых измерений и расчётов.
5. Диаграммы исследуемых процессов.
6. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Область использования линейных стабилизаторов.
2. За счёт чего улучшается стабилизация выходного напряжения в исследуемой схеме?
3. Назовите показатели качества регулирования.
4. Как выбирается резистор R_2 в исследуемой схеме стабилизатора.
5. Объясните влияние величины β транзистора на статическую ошибку.

6. Объясните происхождение выбросов напряжения на выходе схемы в динамическом режиме.
7. Как в схемах линейных стабилизаторов осуществляется защита от короткого замыкания в нагрузке?
8. Чем определяются частотные свойства линейного стабилизатора?
9. Как выбирается напряжение стабилизации стабилитрона?
10. Для чего в исследуемой схеме необходим делитель напряжения на резисторах R_3 , R_4 ? Как осуществляется подстройка выходного напряжения?
11. Каким методом можно практически оценить устойчивость системы «источник-потребитель»?

7. РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫМ И ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРАМИ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследование работы схемы ИП с управлением по пропорционально-интегральному и пропорционально-интегрально-дифференциальному законам.

1. Типовые законы управления.

Для того чтобы добиться желаемого качества процесса управления или регулирования, т.е. требуемой точности системы и качества переходного процесса, есть два способа. Первый состоит в изменении параметров данной системы, так как с изменением параметров изменяются коэффициенты передачи, частотные характеристики, а значит, и качество процесса.

Если же изменением параметров не удастся получить необходимый результат или если такое изменение существенно ухудшает, например энергетические показатели ИП, то применяют второй способ - изменение структуры системы введением дополнительных звеньев - корректирующих устройства (КУ). Основная задача корректирующих устройств состоит в улучшении точности системы и качества переходных процессов.

Корректирующие устройства могут быть последовательными с введением дифференцирующих, интегрирующих и упреждающих звеньев и параллельными в виде местных обратных связей различного типа.

В настоящее время в теории и технике преимущественное распространение нашел метод последовательной коррекции с использованием звеньев, формируемых из операционных усилителей, охваченных цепями отрицательной обратной связи. Такое активное корректирующее устройство (называемое регулятором) совмещает функции управляющего и корректирующего звеньев и позволяет создавать

астатические или близкие к ним системы. На практике широко применяются следующие типовые регуляторы:

- *П* – пропорциональный (рис. 7.1, а), с передаточной функцией $W(p) = R_2/R_1$;

- *И* – интегральный (рис. 7.1, б), с передаточной функцией $W(p) = 1/pRC = 1/pT$;

- *ПИ* – пропорционально-интегральный (рис. 7.1, в), с передаточной функцией $W(p) = R_2/R_1 + 1/pR_1C = k + 1/pT$;

- *ПИД* – пропорционально-интегрально-дифференциальный (рис. 7.1, г), с передаточной функцией $W(p) = k + pT_\delta + 1/pT_u$, где $k = \frac{T_1 + T_2}{T_3}$, $T_\delta = \frac{T_1 T_2}{T_3}$, $T_u = T_3 = R_1 C_2$.

Введение корректирующих устройств приводит обычно к снижению быстродействия системы относительно предельно возможных показателей.

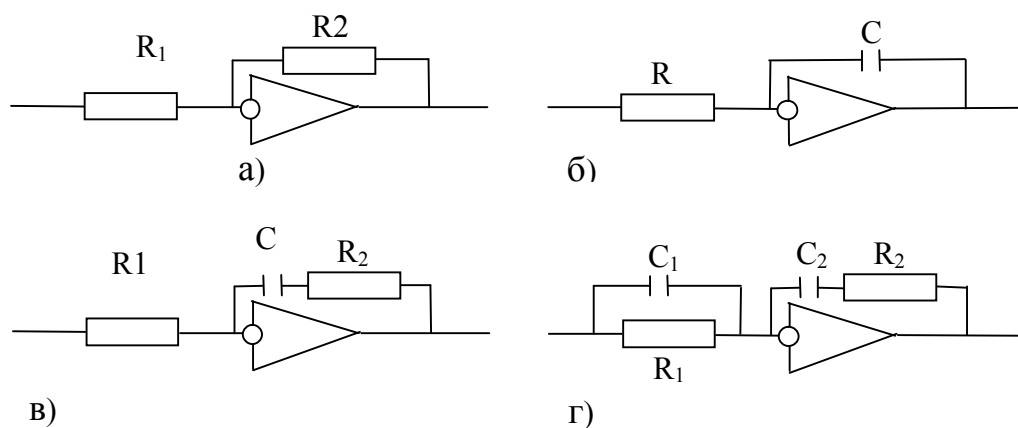


Рис. 7.1. Структурные схемы типовых регуляторов.

В регуляторах, реализующих различные варианты типового пропорционально-интегрально-дифференциального закона управления, функция управления, связывающая сигналы на входах компаратора и

определяющая моменты переключения ключа имеет вид

$$f(t) = \kappa_n x(t) + T_\partial \dot{x}(t) + \frac{1}{T_u} \int_0^t x dt + AP\{t/T\}, \quad (7.1)$$

где $x(t) = U_{вых} - U_{он}$ - сигнал ошибки; $U_{он}$ - номинальное значение выходного напряжения; $\dot{x}(t)$ - производная сигнала ошибки; κ_n, T_∂ - коэффициенты передачи; T_u - постоянная времени интегратора; $AP\{t/T\}$ - сигнал временной развертки (пила) с амплитудой AP ; $\{a\}$ - дробная часть числа a .

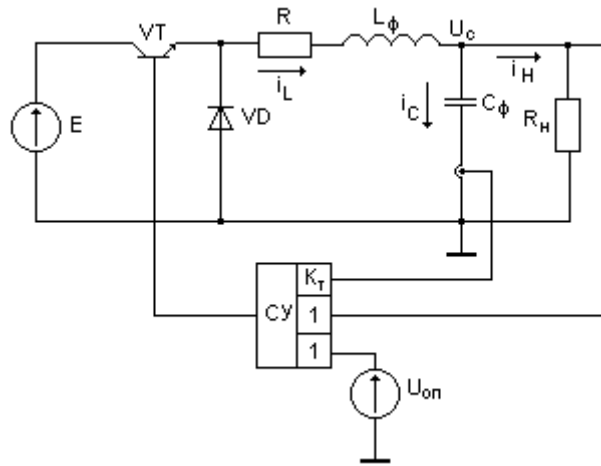


Рис. 7.2. Схема импульсного преобразователя постоянного напряжения.

В преобразователях с "токовым" управлением (рис. 7.2) также реализуется принцип определения полной информации о состоянии системы, когда функция управления формируется из ошибки x и $n-1$ ее производных. Для преобразователя с непрерывной частью в виде LC- фильтра в качестве производной сигнала ошибки используется ток конденсатора выходного фильтра:

$$i_c = C_\phi \dot{x}$$

При этом уравнения законов управления в релейной системе содержат переменные состояния

$$f(t) = \kappa_n x(t) + T_\partial \dot{x}(t) = \kappa_n x(t) + T_\partial i_c / C_\phi. \quad (7.2)$$

Система с П-регулятором является статической, и статическая ошибка убывает с ростом коэффициента пропорциональности K_p . Однако начиная с определённого значения с ростом K_p увеличивается степень колебательности. То есть с увеличением K_p качество системы в установившемся режиме улучшается, а в переходном режиме ухудшается.

При включении интегрального слагаемого в закон управления (ПИ-регулятор) система становится астатической и улучшается качество системы в установившемся режиме. Однако при этом ухудшается качество системы в переходном режиме, и с определённого K_i система становится неустойчивой.

Введение в закон управления дифференцирующего члена (ПД-регулятор) оказывает стабилизирующее влияние (может сделать неустойчивую систему устойчивой) и улучшает качество системы в переходном режиме. На качество системы в установившемся режиме (при постоянных внешних воздействиях) он никакого влияния не оказывает. Но следует иметь в виду, что при чрезмерном увеличении коэффициента при производной K_d качество системы в переходном режиме может ухудшиться. Ниже будет подробно рассмотрено влияние воздействия по производной на свойства системы автоматического регулирования.

Все основные положения о влиянии дифференцирующего и интегрирующего членов на качество системы сохраняются и при рассмотрении ПИД-закона.

2. Физический смысл введения воздействия по производной.

Одним из эффективных и часто применяемых средств коррекции является введение производных в закон регулирования. Введение производных в закон регулирования способствует подавлению колебаний, а тем самым ведет к увеличению запасов устойчивости и улучшению качества переходных процессов. Рассмотрим суть этого метода коррекции на примере системы управления с пропорциональным регулятором. Управляющее

воздействие u_1 , формируемое в пропорциональном регуляторе, пропорционально отклонению x регулируемой величины Y от ее заданного значения Y_{on} :

$$u_1 = k_p x = k_p (Y_{on} - Y), \quad (7.3)$$

где k_p - коэффициент пропорциональности. При введении производной в закон регулирования управляющее воздействие содержит дополнительную составляющую, пропорциональную первой производной отклонения x , и закон регулирования имеет вид

$$u_2 = k_p x + k_d \frac{dx}{dt} \quad (7.4)$$

Предположим, что отклонение x регулируемой величины и первая производная dx/dt изменяются во времени, как показано на рис. 7.3, а и б соответственно. Графики управляющих воздействий, формируемых в соответствии с формулами (7.3) и (7.4), показаны на рис. 7.3, в. Сравнив кривые u_1 и u_2 , можно отметить следующее.

На интервалах времени $[0, t_1]$, $[t_2, t_3]$, ..., когда отклонение возрастает, само отклонение x и производная dx/dt имеют одинаковые знаки. Их сложение в соответствии с выражением (7.4) увеличивает воздействие регулятора по сравнению с законом (7.3). Следовательно, наличие производной в законе регулирования форсирует действие регулятора на участках возрастания отклонения регулируемой величины [28].

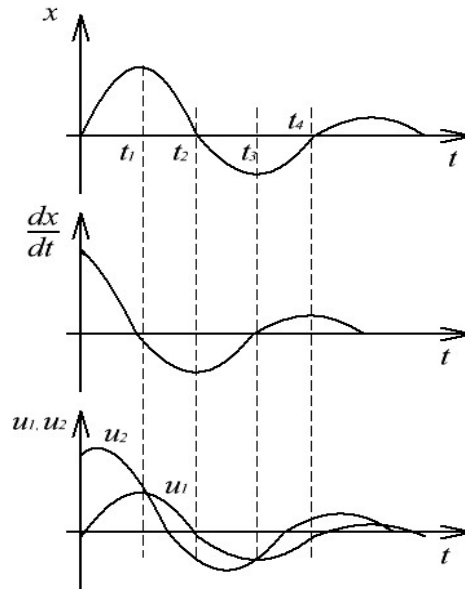


Рис. 7.3. Влияние коррекции по производной.

На интервалах времени $[t_1, t_2]$, $[t_3, t_4]$, ..., когда отклонение уменьшается, то есть система приближается к состоянию равновесия, отклонение x и производная dx/dt имеют разные знаки. Поэтому составляющая, пропорциональная производной, в формуле (7.4) будет вычитаться из составляющей, пропорциональной отклонению, а это уменьшает воздействие на объект по сравнению с законом (7.3). Следовательно, наличие производной в законе регулирования тормозит действие регулятора на участках уменьшения отклонения регулируемой величины и уменьшает выброс в противоположную сторону.

Из рис. 7.3, в видно, что управляющее воздействие u_2 , формируемое регулятором с дополнительным воздействием по производной, опережает управляющее воздействие u_1 , пропорциональное отклонению. Поэтому говорят, что регулятор с дополнительным воздействием по производной работает как бы с опережением (с предварением), улучшая качество регулирования за счет учета тенденции последующего развития процесса.

В данной работе предлагается исследовать схему понижающего преобразователя постоянного напряжения (рис. 7.2) с ПИ- и ПИД-регуляторами.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. По заданным значениям входного U_{ex} и выходного U_{on} напряжения, мощности нагрузки P_n рассчитать значения сопротивления нагрузочных резисторов R_n , индуктивности дросселя L .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Максимальное значение входного напряжения $U_{ex.max} = 60 B$;

Минимальное значение входного напряжения $U_{ex.min} = 30 B$;

Заданное значение выходного напряжения $U_{on} = 27 B$;

Максимальная мощность нагрузки $P_{n.max} = 120 Bm$;

Минимальная мощность нагрузки $P_{n.min} = 30 Bm$;

Падение напряжения коллектор-эмиттер транзистора $U_{к-э} = 30 мВ$;

Ёмкость конденсатора $C = 300 мкФ$;

Амплитуда пилообразного сигнала $A_p = 2,5 B$;

Длительность периода модуляции $T = 20 мкс$.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Создать и верифицировать (проверить соответствие поведения модели логике поведения системы) модель ИП по рис. 7.4 с управлением по ПИ-закону.

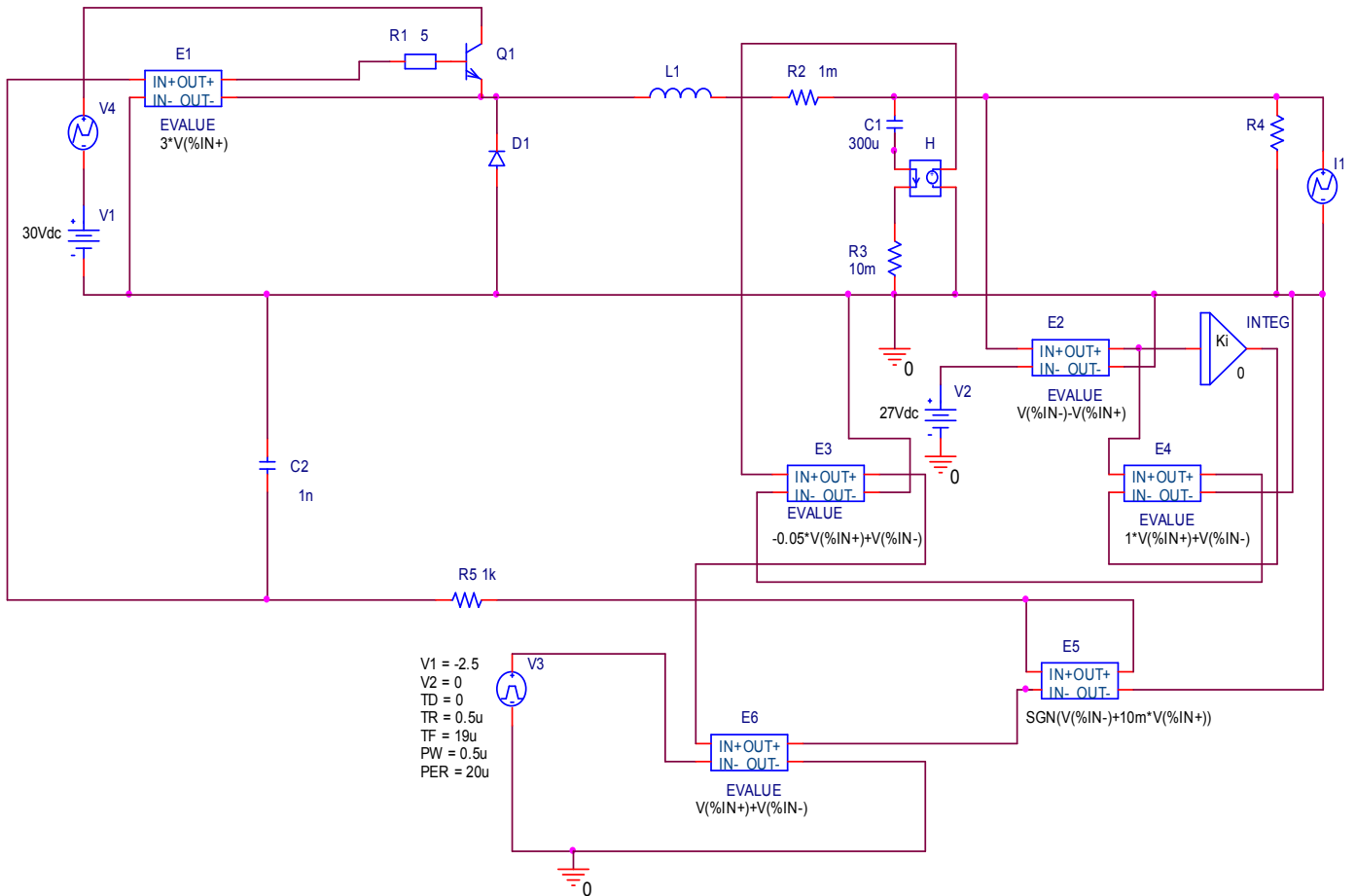


Рис. 7.4. Модель понижающего ППН с управлением по ПИ-закону.

В модели ППН на рис. 7.4 выходное и опорное напряжения подаются на элемент E2, где вычисляется ошибка $x(t) = U_{on} - U_{вых}(t)$. Сигнал ошибки поступает на INTEG и на E4. INTEG выполняет функцию интегрирующего звена – осуществляет интегрирование ошибки с некоторым коэффициентом K_i . В элементе E4 вычисляется пропорциональная составляющая управляющего сигнала (сигнал ошибки умножается на коэффициент пропорциональности K_p), которая складывается с интегральной составляющей. Далее к полученной сумме в элементе E3 прибавляется дифференциальная составляющая – производная сигнала ошибки, умноженная на некоторый коэффициент K_d . В качестве производной сигнала ошибки $d(U_{on} - U_{вых})/dt$ используется ток конденсатора, взятый со

знаком «-», так как производная выходного напряжения, или напряжения на конденсаторе C_1 , пропорциональна этому току со знаком «-»:

$$d(U_{on} - U_{вых})/dt = -dU_{вых}/dt = -dU_C/dt = -I_C/C.$$

Управляющий сигнал с выхода Е3 сравнивается с пилообразным сигналом развёртки V3 с помощью сумматора Е6 и компаратора Е5. В зависимости от результата сравнения сигналов транзисторный ключ Q1 будет находиться в открытом или закрытом состоянии: пока управляющий сигнал с выхода Е3 превышает пилообразный, Q1 открыт, как только управляющий сигнал становится чуть ниже, Q1 закрывается.

Резисторы R2 и R3 учитывают активные сопротивления обмотки дросселя и конденсатора. Резистор R1 служит для задания тока в цепи базы Q1.

Источники импульсного напряжения V4 и импульсного тока I1 подключаются только в п. 2.2.2 для исследования реакции системы на наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки, все остальные эксперименты необходимо проводить без них.

При исследовании работы схемы понижающего ППН с управлением по ПИ-закону принять значение коэффициента пропорциональности K_p равным 1. Для коэффициента при производной K_d установить малое значение -0,05, то есть дифференциальная составляющая в данном случае не оказывает влияния на управление, которое осуществляется ПИ-регулятором.

Получить осциллограммы переходного процесса при включении с нулевых начальных условий для различных значений коэффициента интегрирования K_i из диапазона 0-500, выбрать оптимальное значение K_i , обеспечивающее наилучшие статические и динамические характеристики для сочетаний U_{ex} и P_n , указанных в таблице 7.1.

Таблица 7.1.

U_{ex}	$P_{\text{н}}$
$U_{\text{ex.min}}$	$P_{\text{н.min}}$
$U_{\text{ex.min}}$	$P_{\text{н.max}}$
$U_{\text{ex.max}}$	$P_{\text{н.min}}$
$U_{\text{ex.max}}$	$P_{\text{н.max}}$

При этом статическая ошибка не должна превышать $\varepsilon_{\text{дон}} = 0,5\%$, время регулирования $t_{\text{рег}}$ определяется временем вхождения $U_{\text{вых}}$ в «трубку» $\pm \varepsilon_{\text{дон}}$.

2. Провести испытания схемы в заданных режимах эксплуатации с определением характерных параметров:

2.1. Статический режим.

Определить статическую ошибку, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций выходного напряжения и коэффициент полезного действия ИП по результатам испытаний схемы в соответствии с таблицей:

Таблица 7.2.

U_{ex}	$P_{\text{н}}$	$U_{\text{вых}}$	$K_{\text{ст}}$	$K_{\text{н}}$	η
$U_{\text{ex.max}}$	$P_{\text{н.min}}$				
$U_{\text{ex.min}}$	$P_{\text{н.max}}$				

2.2. Динамический режим.

Определить время переходного процесса (время регулирования), перерегулирование, степень затухания при следующих условиях.

Степень затухания рассчитывается для колебательного процесса по следующей формуле: $\xi = \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)$, где $\Delta y_{1,2}$ - два соседних

перерегулирования. Для апериодического процесса степень затухания не определяется.

2.2.1. Включение с нулевых начальных условий в соответствии с таблицей:

Таблица 7.3.

$U_{вх}$	$P_{н}$	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дин}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх.max}$	$P_{н.min}$				
$U_{вх.min}$	$P_{н.max}$				

2.2.2. Наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки в соответствии с таблицей:

Таблица 7.4.

$U_{вх}$	$P_{н}$	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дин}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх.min} - U_{вх.max} - U_{вх.min}$	$P_{н.min}$				
$U_{вх.min} - U_{вх.max} - U_{вх.min}$	$P_{н.max}$				
$U_{вх.min}$	$P_{н.min} - P_{н.max} - P_{н.min}$				
$U_{вх.max}$	$P_{н.min} - P_{н.max} - P_{н.min}$				

Для имитации наброса и сброса входного напряжения в модель схемы ИП (рис 7.4) нужно включить источник импульсного напряжения V4, а для имитации наброса и сброса тока нагрузки – источник импульсного тока I1.

2.2.3. Определение выходного импеданса стабилизатора.

Для этого эксперимента вместо источника импульсного тока I1 необходимо включить источник синусоидального тока.

При внешнем периодическом воздействии по цепи нагрузки

$$i_H = I_H + I_{B.B} \sin(2\pi f_{B.B} t),$$

где $I_{B.B}$ и $f_{B.B}$ – амплитуда и частота внешнего периодического воздействия, рассчитать выходной импеданс Z по формуле:

$$z = \Delta U_{\text{вых}\sim} / \Delta I_{H\sim},$$

где $\Delta U_{\text{вых}\sim}$ – амплитуда переменной составляющей выходного напряжения; $\Delta I_{H\sim}$ – амплитуда переменной составляющей тока нагрузки.

Измерения провести при $U_{\text{ex}}=45\text{В}$, $P_H=120\text{Вт}$, $I_{B.B} = 0,25I_H$ и $f_{B.B}$, изменяющейся в диапазоне 0,1 – 100 кГц. Снять пять точек на первой декаде частотного диапазона и десять-пятнадцать точек на второй и третьей декадах. При этом необходимо определить частоты, на которых наблюдается максимум импеданса. Построить график зависимости $Z(f_{B.B})$ с помощью программы Microsoft Office Excel, для оси абсцисс применить логарифмическую шкалу. Проанализировать полученную зависимость, выделить характерные зоны.

3. Используя модель ИП из п.1, реализовать управление ИП по ПИД-закону, то есть ввести производную ошибки. При полученных в п.1 коэффициентах K_p и K_i подобрать оптимальное значение коэффициента при производной K_d из диапазона 0,5 – 1,5 чтобы улучшить динамические характеристики (устранить перерегулирование, обеспечить минимум времени переходного процесса) для следующих сочетаний U_{ex} и P_H :

Таблица 7.5.

U_{ex}	P_H
$U_{ex.min}$	$P_{H.min}$
$U_{ex.min}$	$P_{H.max}$
$U_{ex.max}$	$P_{H.min}$
$U_{ex.max}$	$P_{H.max}$

4. Провести испытания схемы по программе п. 2. Сравнить результаты экспериментов в п. 2 и п. 4, сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Название, цель и программа работы.
2. Исследуемая схема.
3. Выполненное предварительное задание.
4. Результаты проведённых измерений и расчётов.
5. Диаграммы исследуемых процессов.
6. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите преимущества импульсных стабилизаторов напряжения (ИСН) перед линейными. Чем они объясняются?
2. Какие принципы управления используются в системах с ИП?
3. В чём заключается адаптивная функция системы управления ИП?
4. Назовите два основных способа обеспечения требуемой точности и качества переходного процесса в регулируемой системе.

5. Назовите основные типы регуляторов, приведите их схемы на ОУ, уравнения передаточных функций.
6. Дайте определение импеданса по выходной шине ИСН и назовите характерные области его частотной зависимости.
7. Как реализуется цифровой ПИД-регулятор?

8. РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО БАЛАНСУ НЕОБХОДИМОЙ И НАКОПЛЕННОЙ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГИИ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследование работы схемы ИП с системой управления, построенной на основе баланса необходимой и запасённой в системе энергии.

В преобразовательной технике наиболее простым подходом к синтезу систем управления является использование уравнения баланса между текущим значением внутренней (запасенной системой) энергии и её значением в установившемся режиме. В качестве входных параметров системы управления предлагается использовать постоянно контролируемые значения токов и напряжений, дающих полную картину процессов получения, накопления и отдачи энергии. Учитывая и анализируя энергетические процессы в преобразователе можно добиться оптимальных динамических характеристик в широком диапазоне изменения мощностей. В соответствии с принципом наименьшего действия стратегия управления, обеспечивающая минимум интеграла по времени от уравнения баланса, обеспечивает и минимальное время переходного процесса.

Рассмотрим реализацию этого подхода на примере импульсного преобразователя напряжения (рис. 8.1), в котором текущее значение накопленной LC-фильтром энергии равно

$$W = \frac{C}{2} U_H^2(t) + \frac{L}{2} (i_L(t) - i_H(t))^2 \operatorname{sgn}(i_L(t) - i_H(t)), \quad (8.1)$$

где L , C – индуктивность дросселя и емкость конденсатора LC-фильтра; $U_H(t)$ – выходное напряжение; $i_L(t)$ – ток дросселя; $i_H(t)$ – ток нагрузки; $\operatorname{sgn}(i_L(t) - i_H(t))$ – знак тока конденсатора (определяет знак пульсирующей составляющей энергии дросселя).

Пусть переключение ключевого элемента (Кл) осуществляется по смене знака баланса между текущим значением внутренней энергии, запасенной непрерывной частью ИП (LC-фильтром), и значением энергии LC-фильтра в установившемся режиме. Тогда после простых преобразований (8.1) закон управления можно представить в виде:

$$F_3 = (U_H^2(t) - U_{оп}^2) + \rho^2 (i_L(t) - i_H(t))^2 \operatorname{sgn}(i_L(t) - i_H(t))$$

$$F_K = \begin{cases} 1 & \text{при } F_3 < 0; \\ 0 & \text{при } F_3 > 0, \end{cases} \quad (8.2)$$

где $F_3 = \frac{2}{C} \left(W - \frac{CU_{он}^2}{2} \right)$ – сигнал пропорциональный текущему значению баланса между запасенной LC-фильтром энергией и энергией $\frac{CU_{он}^2}{2}$, необходимой LC-фильтру при выходном напряжении, равном заданному $U_H = U_{оп}$ и нулевом значении тока конденсатора $i_C(t) = i_L(t) - i_H(t) = 0$; $\rho = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление LC-фильтра; $U_{оп}$ – заданное напряжение; F_K – состояние Кл (при $F_K = 1$ включено, при $F_K = 0$ выключено).

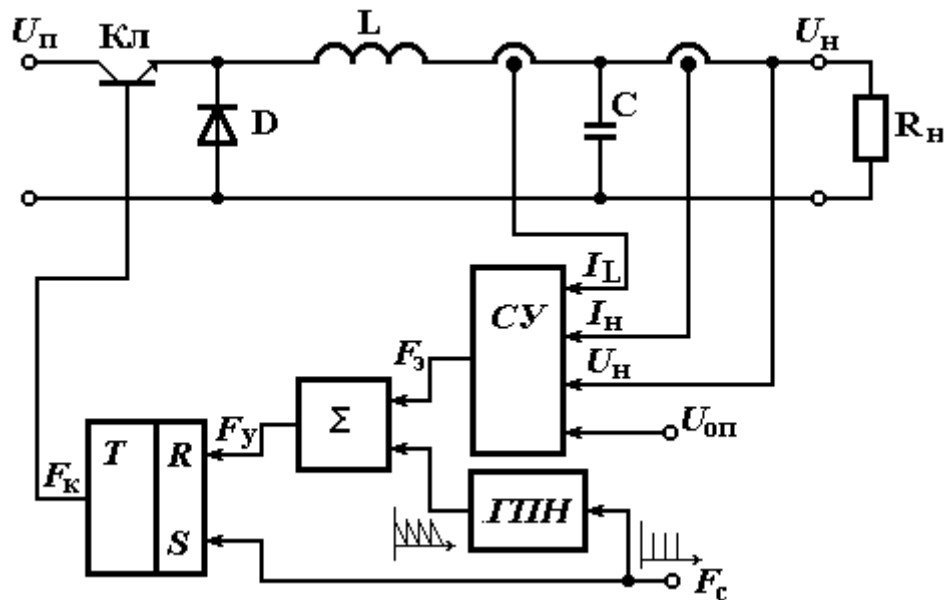


Рис. 8.1. Схема ИП.

В схеме (рис. 3.1) с линейным сигналом развертки $A_p(\{t/T\}-1)$, где A_p – амплитуда; $\{t/T\}$ – дробная часть отношения t/T , T – длительность

периода модуляции, управление осуществляется синхронизирующим F_c и управляющим F_y сигналами.

При широтно-импульсной модуляции заднего фронта импульса закон управления имеет вид:

$$F_y = F_э + A_p \left(\left\{ \frac{t}{T} \right\} - 1 \right);$$

$$F_k = \begin{cases} 1 & \text{при } t_n < t < t_{n.k}; \\ 0 & \text{при } t_{n.k} < t < t_{n+1}. \end{cases} \quad (8.3)$$

где t_n, t_{n+1} – моменты синхронизации; $t_{n.k}$ – момент выключения Кл, определяемый наименьшим положительным корнем уравнения $F_y = 0$ на n -ом периоде модуляции. Амплитуда пилообразного сигнала развёртки определяется следующим образом:

$$A_p = \frac{U_H^2 T^2}{LC}. \quad (8.4)$$

Данный подход к построению системы управления обеспечивает наилучшие динамические характеристики системы, а также позволяет однозначно определить коэффициенты в законе управления, исходя из параметров элементов управляемой схемы ИП.

Известно, что для улучшения статических и динамических характеристик системы применяют корректирующие устройства (КУ). Все КУ можно разделить на линейные и нелинейные. В последние годы больше применяются нелинейные КУ, позволяющие реализовать нелинейные законы управления. Во многих случаях это позволяет улучшить свойство проектируемых систем более простым способом, нежели применение сложных линейных КУ.

Нелинейные КУ изменяют параметры самих звеньев автоматической системы. Причём изменяются только динамические параметры звеньев – постоянная времени и эквивалентный коэффициент усиления, а их статические характеристики остаются неизменными. Изменение постоянных времени и коэффициента усиления способствует ускорению затухания переходных процессов в системе.

С точки зрения теории автоматического управления систему с управлением по закону (8.2) можно представить как систему с нелинейной коррекцией:

$$\begin{aligned}
 F_9 &= (U_n(t) + U_{оп}) (U_n(t) - U_{оп}) + \rho^2 i_C(t) \operatorname{sgn}(i_C(t)) i_C(t) = \\
 &= K(x(t))x(t) + K(\dot{x}(t))\dot{x}(t)
 \end{aligned}
 \tag{8.5}$$

где $x(t) = U_n(t) - U_{оп}$ - сигнал ошибки; $U_{оп}$ - номинальное значение выходного напряжения; $\dot{x}(t) = i_C(t)/C$ - производная сигнала ошибки; $K(x(t))$ и $K(\dot{x}(t))$ - нелинейные коэффициенты передачи при ошибке и её производной.

То есть в данном случае с изменением ошибки $x(t)$ и её производной $\dot{x}(t)$ изменяются и их коэффициенты передачи, что позволяет получить оптимальные динамические показатели, так как в переходном процессе, когда выходное напряжение растёт, ошибка $x(t)$ уменьшается, а коэффициент при ошибке $K(x(t))$ увеличивается. То есть воздействие по ошибке, несмотря на то, что сама ошибка уменьшается, остаётся значительным на протяжении всего переходного процесса. Коэффициент при производной $K(\dot{x}(t))$ увеличивается или уменьшается синхронно с производной, поэтому скорость процесса ограничивается сильнее по мере приближения к установившемуся режиму. Таким образом, в системе с управлением по балансу энергии осуществляется нелинейная коррекция, которая обеспечивает эффективное изменение воздействия регулятора в переходном процессе, чтобы получить минимальное время регулирования и устранить динамическую ошибку.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. По заданным значениям входного U_{ex} и выходного U_{on} напряжения, мощности нагрузки P_n рассчитать значения сопротивления нагрузочных резисторов R_n , индуктивности дросселя L , характеристического сопротивления LC-фильтра ρ , амплитуды сигнала развёртки A_p .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Максимальное значение входного напряжения $U_{ex.max} = 60 B$;

Минимальное значение входного напряжения $U_{ex.min} = 30 B$;

Заданное значение выходного напряжения $U_{on} = 27 B$;

Максимальная мощность нагрузки $P_{n.max} = 120 Bm$;

Минимальная мощность нагрузки $P_{n.min} = 30 Bm$;

Падение напряжения коллектор-эмиттер транзистора $U_{к-э} = 30 мВ$;

Ёмкость конденсатора $C = 300 мкФ$;

Амплитуда пилообразного сигнала $A_p = 2,5 B$;

Длительность периода модуляции $T = 20 мкс$.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Создать и верифицировать (проверить соответствие поведения модели логике поведения системы) модель ИП по рис. 8.2 с управлением на основе баланса необходимой и запасённой в системе энергии.

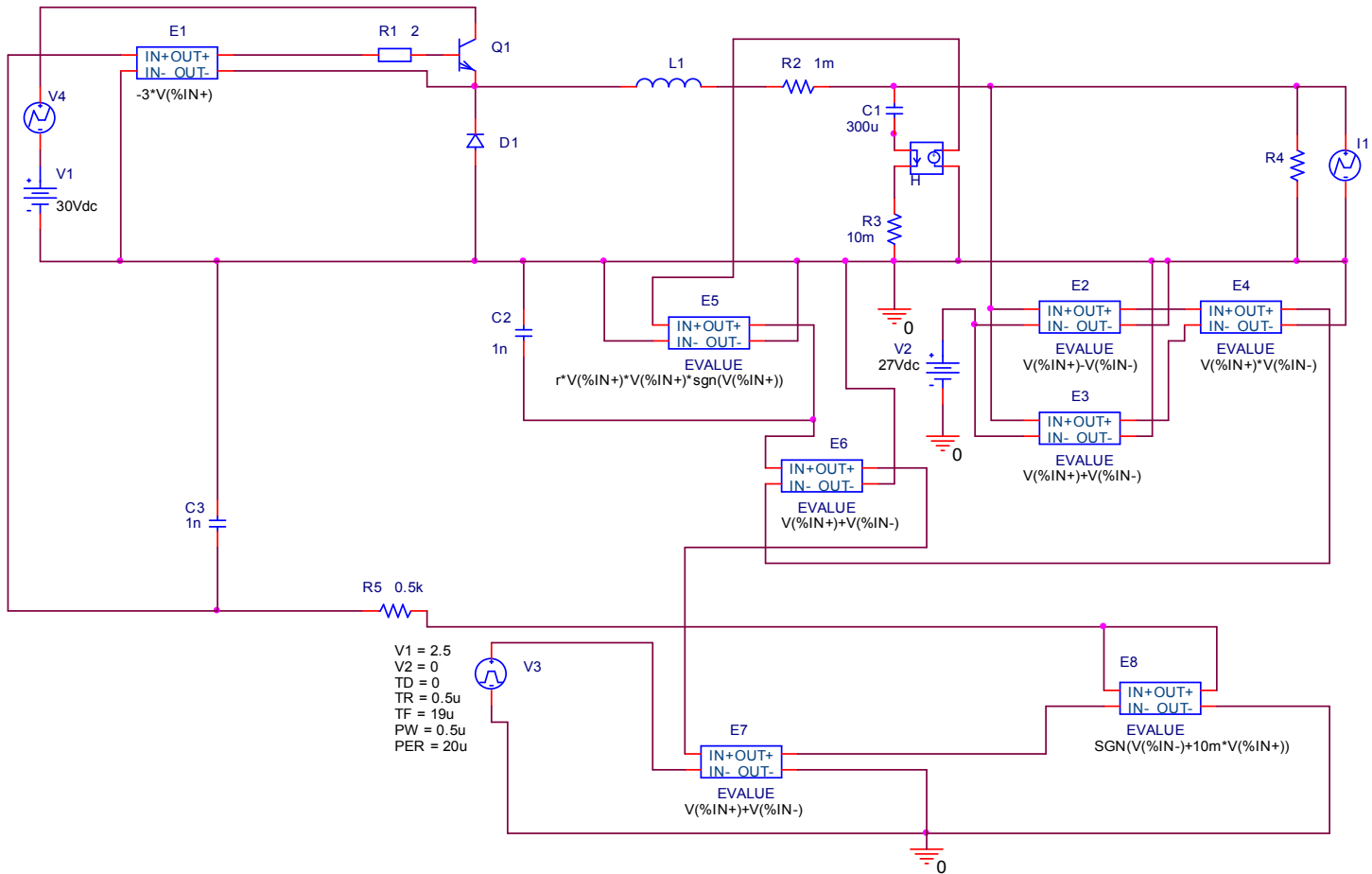


Рис. 8.2. Модель понижающего ППН с управлением на основе баланса энергии.

В модели ППН на рис. 8.2 выходное и опорное напряжения подаются на элемент E2, где вычисляется ошибка $x(t) = U_{on} - U_{вых}(t)$, а также на элемент E3, в котором определяется сумма $U_{on} + U_{вых}(t)$ (нелинейный коэффициент при ошибке). Полученные разность и сумма перемножаются в E4 и на выходе E4 получается разность квадратов $U_{вых}^2(t) - U_{on}^2$. Слагаемое в законе

управления (8.2), содержащее ток конденсатора $i_C(t)$ вычисляется в элементе E5, на рис 8.2 параметр r обозначает квадрат характеристического сопротивления LC – фильтра ($\rho^2 = L/C$). В E6 сигналы с выходов E4 и E5 суммируются, образуя на выходе E6 управляющий сигнал, который сравнивается с пилообразным сигналом развёртки V3 с помощью сумматора E7 и компаратора E8. В зависимости от результата сравнения сигналов транзисторный ключ Q1 будет находиться в открытом или закрытом состоянии: пока управляющий сигнал с выхода E6 по модулю превышает пилообразный, Q1 открыт, как только управляющий сигнал становится чуть ниже, Q1 закрывается. Резисторы R2 и R3 учитывают активные сопротивления обмотки дросселя и конденсатора. Резистор R1 служит для задания тока в цепи базы Q1. Источники импульсного напряжения V4 и импульсного тока I1 подключаются только в п. 2.2.2 для исследования реакции системы на наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки, все остальные эксперименты необходимо проводить без них.

2. Провести испытания схемы в заданных режимах эксплуатации с определением характерных параметров:

2.1. Статический режим.

Определить статическую ошибку, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций выходного напряжения и коэффициент полезного действия ИП по результатам испытаний схемы в соответствии с таблицей:

Таблица 8.1.

U_{ex}	P_n	$U_{вых}$	$K_{ст}$	K_n	η
$U_{ex.max}$	$P_{n.min}$				
$U_{ex.min}$	$P_{n.max}$				

2.2. Динамический режим.

Определить время переходного процесса (время регулирования), перерегулирование, степень затухания при следующих условиях.

Время регулирования $t_{рег}$ определяется временем вхождения $U_{вых}$ в «трубку» $\pm \varepsilon_{дон}$, $\varepsilon_{дон} = 0,5\%$.

Степень затухания рассчитывается для колебательного процесса по следующей формуле: $\xi = \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)$, где $\Delta y_{1,2}$ - два соседних перерегулирования. Для апериодического процесса степень затухания не определяется.

2.2.1. Включение с нулевых начальных условий в соответствии с таблицей:

Таблица 8.2.

$U_{вх}$	P_H	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дон}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх.max}$	$P_{H.min}$				
$U_{вх.min}$	$P_{H.max}$				

2.2.2. Наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки в соответствии с таблицей:

Таблица 8.3.

$U_{вх}$	P_H	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дон}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх.min} - U_{вх.max} - U_{вх.min}$	$P_{H.min}$				
$U_{вх.min} - U_{вх.max} - U_{вх.min}$	$P_{H.max}$				
$U_{вх.min}$	$P_{H.min} - P_{H.max} - P_{H.min}$				
$U_{вх.max}$	$P_{H.min} - P_{H.max} - P_{H.min}$				

Для имитации наброса и сброса входного напряжения в модель схемы ИП (рис 8.2) нужно включить источник импульсного напряжения V4, а для имитации наброса и сброса тока нагрузки – источник импульсного тока I1.

2.2.3. Определение выходного импеданса стабилизатора.

Для этого эксперимента вместо источника импульсного тока II необходимо включить источник синусоидального тока.

При внешнем периодическом воздействии по цепи нагрузки

$$i_H = I_H + I_{B.B} \sin(2\pi f_{B.B} t),$$

где $I_{B.B}$ и $f_{B.B}$ – амплитуда и частота внешнего периодического воздействия, рассчитать выходной импеданс Z по формуле:

$$z = \Delta U_{вых\sim} / \Delta I_{H\sim},$$

где $\Delta U_{вых\sim}$ – амплитуда переменной составляющей выходного напряжения; $\Delta I_{H\sim}$ – амплитуда переменной составляющей тока нагрузки.

Измерения провести при $U_{ex}=45В$, $P_H=120ВТ$, $I_{B.B} = 0,25I_H$ и $f_{B.B}$, изменяющейся в диапазоне 0,1 – 100 кГц. Снять пять точек на первой декаде частотного диапазона и десять-пятнадцать точек на второй и третьей декадах. Построить график зависимости $Z(f_{B.B})$ с помощью программы Microsoft Office Excel, для оси абсцисс применить логарифмическую шкалу. Проанализировать полученную зависимость, выделить характерные зоны.

3. Сравнить результаты проведённых экспериментов с результатами, полученными в работе № 2, сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Название, цель и программа работы.
2. Исследуемая схема.
3. Выполненное предварительное задание.
4. Результаты проведённых измерений и расчётов.
5. Диаграммы исследуемых процессов.
6. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие виды разделяют корректирующие устройства? Какие КУ обладают преимуществом? Приведите примеры.
2. Какие процессы, приводящие к потере устойчивости, могут возникнуть в системах с времяимпульсной модуляцией?
3. Приведите с пояснениями вывод закона управления ИП на основе баланса энергии.
4. Назовите преимущества управления ИП по балансу энергии.
5. Что такое нелинейная коррекция и как она реализуется?
6. Какими параметрами электролитических конденсаторов определяется амплитуда пульсаций напряжения на них?

9. РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УПРАВЛЕНИЕМ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Исследование работы схемы ИП, управление которым осуществляется методом с прогнозированием.

В преобразовательной технике энергетические и динамические процессы в ИП взаимно обусловлены, а изменение координат, характеризующих движение системы, связано с накоплением и передачей энергии в реактивных элементах непрерывной части ИП, которая должна обладать свойствами фильтра. Следовательно, процессы управления нельзя рассматривать изолированно от процессов преобразования электроэнергии, а

синтез структуры управления ИП целесообразно осуществлять по моделям, с прогнозированием процессов в схеме после коммутации импульсного элемента. Согласно такому подходу, для формирования структуры управления в схемах с непрерывной частью второго порядка (например, схема ИП на рис.8.1) необходимо измерять и соответственно прогнозировать пульсирующую составляющую тока дросселя $\tilde{i}_L = i_C$, определяющую реактивную мощность, потребляемую при перезаряде реактивных элементов непрерывной части (LC-фильтра).

При этом типовой закон управления с коррекцией по производной (7.2) принимает вид:

$$F(t) = x(t) + k_m i_C(t) + k_m Y_p(t), \quad (9.1)$$

$$VT = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq t_n \\ 0 & \text{при } t \geq t_{нк} \end{cases}$$

В системах с модуляцией заднего фронта импульса, где k_m – коэффициент передачи, t_n – момент синхронизации, $t_{нк}$ – момент коммутации ключевого элемента.

Согласно (9.1) в установившемся режиме в момент коммутации $Y_p(t_{нк}) = -i_c(t_{нк})$, а сигнал ошибки $x(t_{нк}) = 0$, если $Y_p(t)$ вычислять по формуле:

$$Y_p(t) = \frac{T}{2L} (U_{вх} \left\{ \frac{t}{T} \right\}^2 - U_{вых}), \quad (9.2)$$

где T – период модуляции, $\{t/T\}$ – дробная часть отношения t/T – «пила» с амплитудой $A_p = 1B$.

Быстродействие системы будет максимальным, если

$$k_m = \frac{1 - 0,5\gamma_{\min}}{\sqrt{1 - (0,5\gamma_{\min})^2}} \rho, \text{ где } \gamma_{\min} = \frac{U_{ном}}{U_{вх.макс}}. \quad (9.3)$$

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Изучить краткие теоретические сведения.
2. По заданным значениям входного $U_{вх}$ и выходного $U_{он}$ напряжения, мощности нагрузки P_n рассчитать значения сопротивления нагрузочных резисторов R_n , индуктивности дросселя L , коэффициента передачи k_m .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Максимальное значение входного напряжения $U_{вх.макс} = 60 B$;

Минимальное значение входного напряжения $U_{вх.мин} = 30 B$;

Заданное значение выходного напряжения $U_{он} = 27 B$;

Максимальная мощность нагрузки $P_{н.макс} = 120 Bm$;

Минимальная мощность нагрузки $P_{н.мин} = 30 Bm$;

Падение напряжения коллектор-эмиттер транзистора $U_{к-э} = 30 мВ$;

Ёмкость конденсатора $C = 300 мкФ$;

Амплитуда пилообразного сигнала $A_p = 1 В$;

Длительность периода модуляции $T = 20 мкс$.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Создать и верифицировать (проверить соответствие поведения модели логике поведения системы) модель ИП по рис. 9.1 с управлением по закону (9.1) на основе прогнозирования процессов в схеме после коммутации импульсного элемента.

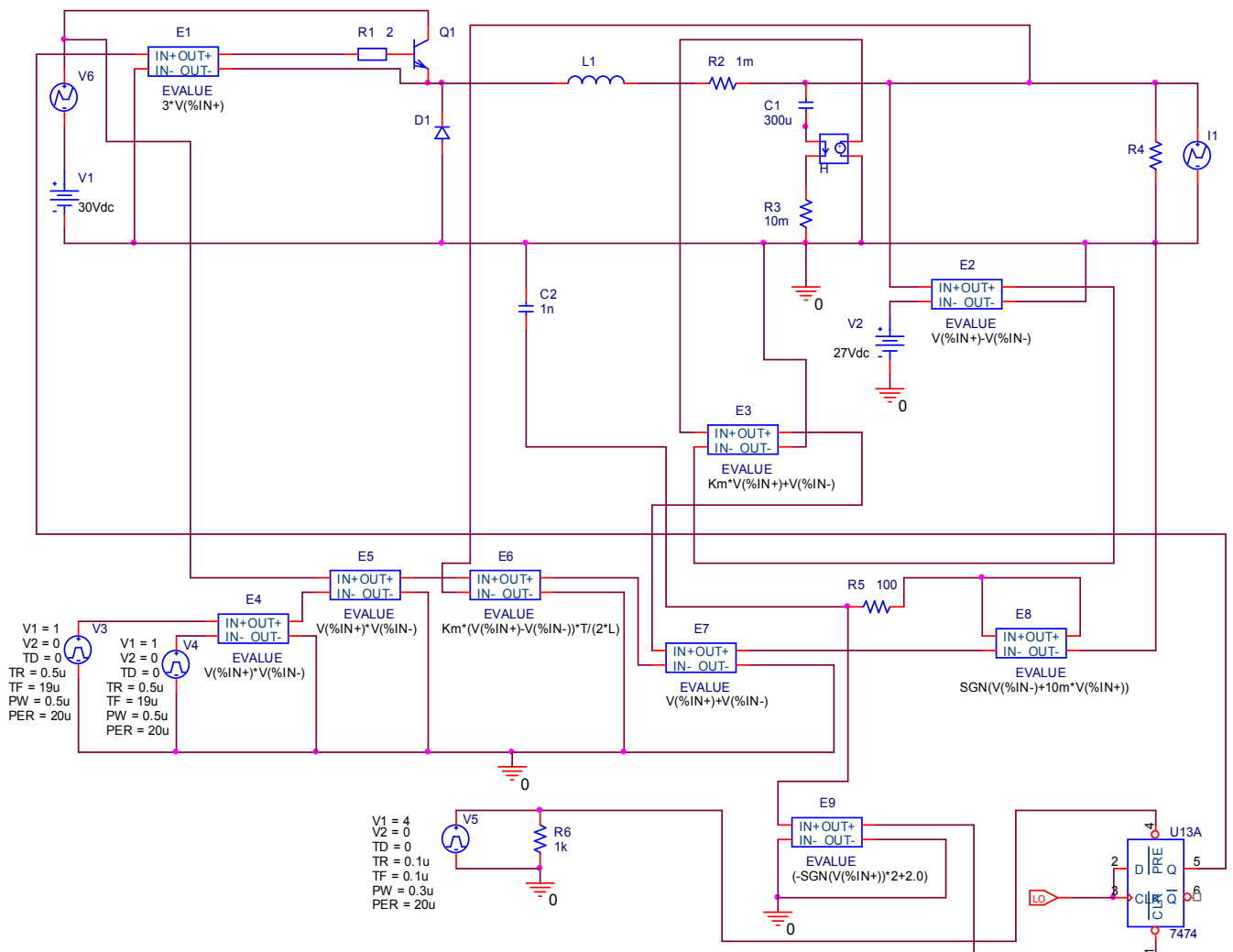


Рис. 9.1. Модель понижающего ППН с управлением на основе прогнозирования процессов в схеме после коммутации импульсного элемента.

В модели ППН на рис. 9.1 для вычисления сигнала ошибки между выходным и опорным напряжениями $x(t) = U_{on} - U_{вых}(t)$ используется элемент E2. Далее к полученному значению ошибки в элементе E3 прибавляется производная ошибки (ток $i_C(t)$), умноженная на коэффициент k_m . Чтобы сформировать сигнал развёртки по формуле (9.2) вначале в элементе E4 перемножаются два пилообразных сигнала с единичной амплитудой V3 и V4, затем к полученному сигналу в E5 прибавляется входное напряжение, а в E6 из этой суммы вычитается выходное напряжение и производится умножение на соответствующий формуле (9.2) коэффициент, а также на k_m . Сумма ошибки и её производной с выхода E3 (управляющий сигнал) сравнивается с полученным на выходе E6 сигналом развёртки с помощью сумматора E7 и компаратора E8. В зависимости от результата сравнения на выходе E8 присутствуют следующие значения: -1, если сигнал ошибки по модулю превышает сигнал развёртки; +1, если сигнал ошибки по модулю меньше сигнала развёртки. Из полученных значений на выходе E8 в элементе E9 формируются управляющие сигналы для RS-триггера: из -1 – сигнал высокого уровня, а из +1 – сигнал низкого уровня. Ко второму управляющему входу триггера, подключен источник импульсного напряжения V5. Короткий импульс низкого уровня с выхода V5 в начале каждого периода модуляции устанавливает на выходе RS-триггера логическую 1, которая открывает транзисторный ключ Q1. Запирание Q1 произойдёт, когда с E9 придёт сигнал низкого уровня, то есть когда управляющий сигнал по модулю станет меньше сигнала развёртки. Таким образом, Q1 включается по синхроимпульсу в начале периода и выключается по состоянию схемы, то есть осуществляется модуляция заднего фронта импульса. RS-триггер необходим в схеме, чтобы обеспечить однократное срабатывание ключа на периоде модуляции и устранить высокочастотные колебания. Резисторы R2 и R3 учитывают активные сопротивления обмотки дросселя и конденсатора. Резистор R1 служит для задания тока в цепи базы

Q1. Источники импульсного напряжения V_6 и импульсного тока I_1 подключаются только в п. 2.2.2 для исследования реакции системы на наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки, все остальные эксперименты проводить без них.

2. Провести испытания схемы в заданных режимах эксплуатации с определением характерных параметров:

2.1. Статический режим.

Определить статическую ошибку, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций выходного напряжения и коэффициент полезного действия ИП по результатам испытаний схемы в соответствии с таблицей:

Таблица 9.1.

$U_{вх}$	P_n	$U_{вых}$	$K_{ст}$	K_n	η
$U_{вх.max}$	$P_{n.min}$				
$U_{вх.min}$	$P_{n.max}$				

Динамический режим.

Определить время переходного процесса (время регулирования), перерегулирование, степень затухания при следующих условиях.

Время регулирования $t_{рег}$ определяется временем вхождения $U_{вых}$ в «трубку» $\pm \varepsilon_{дон}$, $\varepsilon_{дон} = 0,5\%$.

Степень затухания рассчитывается для колебательного процесса по следующей формуле: $\xi = \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2)$, где $\Delta y_{1,2}$ - два соседних перерегулирования. Для апериодического процесса степень затухания не определяется.

2.2.1. Включение с нулевых начальных условий в соответствии с таблицей:

Таблица 9.2.

$U_{вх}$	P_H	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дин}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх. max}$	$P_{H. min}$				
$U_{вх. min}$	$P_{H. max}$				

2.2.2. Наброс и сброс входного напряжения и тока нагрузки в соответствии с таблицей:

Таблица 9.3.

$U_{вх}$	P_H	$t_{рег}$	$\varepsilon_{дин}$	Число перерегулирований	ξ
$U_{вх. min} - U_{вх. max} - U_{вх. min}$	$P_{H. min}$				
$U_{вх. min} - U_{вх. max} - U_{вх. min}$	$P_{H. max}$				
$U_{вх. min}$	$P_{H. min} - P_{H. max} - P_{H. min}$				
$U_{вх. max}$	$P_{H. min} - P_{H. max} - P_{H. min}$				

Для имитации наброса и сброса входного напряжения в модель схемы ИП (рис 9.2) нужно включить источник импульсного напряжения V6, а для имитации наброса и сброса тока нагрузки – источник импульсного тока I1.

2.2.3. Определение выходного импеданса стабилизатора.

Для этого эксперимента вместо источника импульсного тока I1 необходимо включить источник синусоидального тока.

При внешнем периодическом воздействии по цепи нагрузки

$$i_H = I_H + I_{В.В} \sin(2\pi f_{В.В} t),$$

где $I_{в.в}$ и $f_{в.в}$ – амплитуда и частота внешнего периодического воздействия, рассчитать выходной импеданс Z по формуле:

$$z = \Delta U_{вых\sim} / \Delta I_{н\sim},$$

где $\Delta U_{вых\sim}$ – амплитуда переменной составляющей выходного напряжения; $\Delta I_{н\sim}$ – амплитуда переменной составляющей тока нагрузки.

Измерения провести при $U_{вх} = 45В$, $P_n = 120Вт$, $I_{в.в} = 0,25I_n$ и $f_{в.в}$, изменяющейся в диапазоне 0,1 – 100 кГц. Снять пять точек на первой декаде частотного диапазона и десять-пятнадцать точек на второй и третьей декадах. Построить график зависимости $Z(f_{в.в})$ с помощью программы Microsoft Office Excel, для оси абсцисс применить логарифмическую шкалу. Проанализировать полученную зависимость, выделить характерные зоны.

В следующих экспериментах источник синусоидального тока отключить.

3. Анализ нештатных переключений.

3.1. Исключить из исследуемой схемы RS-триггер. Для этого отсоединить выход триггера от входа Е1 и подать на Е1 сигнал с выхода Е9. Увеличить коэффициент при производной ошибки в 2 раза. При минимальных значениях $U_{вх}$ и P_n снять диаграмму работы ключевого элемента вместе с диаграммой сигнала развёртки. Затем снова включить триггер в схему и снять те же диаграммы. Проанализировать результаты, сделать вывод.

3.2. В схеме с включённым триггером поставить при производной расчетное значение k_m , а сигнал развёртки уменьшить в 4 раза. При минимальных значениях $U_{вх}$ и P_n снять диаграмму работы ключевого элемента вместе с диаграммой сигнала развёртки. Проанализировать результат, сделать вывод.

4. Сравнить результаты проведённых экспериментов с результатами, полученными в работах № 2 и №3, сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Название, цель и программа работы.
2. Исследуемая схема.
3. Выполненное предварительное задание.
4. Результаты проведённых измерений и расчётов.
5. Диаграммы исследуемых процессов.
6. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияет соотношение выходного (источника) и входного (нагрузки) импедансов на устойчивость системы источник питания – нагрузка?
2. Дайте определение интервала широтно-импульсной модуляции, назовите его составляющие.
3. Назовите основные виды ШИМ.
4. Объясните влияние воздействия по производной на свойства системы автоматического регулирования.
5. Приведите вывод закона управления без коррекции по производной по критерию равенства нулю среднего за период напряжения на индуктивности дросселя. Укажите какая переменная в этом уравнении прогнозируется и на основании каких допущений.
6. В чём основное отличие модуляций ШИМ-1 и ШИМ-2?

ЛИТЕРАТУРА

1. Вадутов О. С. Лабораторный практикум по теории автоматического управления. – Томск: изд. ТПУ, 1995. – 96 с.
2. Гладышев П. С., Павлов В. Б. Динамика дискретно-управляемых полупроводниковых преобразователей. Под ред. Шиловского А. К. – Киев: Наук. Думка, 1983. – 224 с.
3. Времяимпульсные системы автоматического управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, Р. У. Мадыгулов и др.: Под общ. ред. И. М. Макарова. – М.: Машиностроение, 1991. – 288 с.
4. Волович Г. И. Динамика вентильных источников вторичного электропитания постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 192 с.
5. Казанцев Ю. М. Автоматизированное проектирование электронных устройств. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1999 – 88 с.
6. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления. Спб: Политехника, 2002. – 520 с.
7. Сазонов В. В. Принцип инвариантности в преобразовательной технике. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. И. М. Готтлиб. «Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы». Москва: Постмаркет, 2000 – 552 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Особенности импульсных и линейных источников питания	3
2. Классификация импульсных преобразователей напряжения	5
3. Регулируемые ИП	6
4. Анализ устойчивости регулируемой системы	9
5. Принципы управления импульсными преобразователями	11
6. РАБОТА №1	16
7. РАБОТА №2	29
8. РАБОТА №3	43
9. РАБОТА №4	53
ЛИТЕРАТУРА	61