



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная электроника»

В. А. Карпов, О. М. Ростокина

ТЕЛЕМЕХАНИКА

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 07
«Информационные технологии и управление
в технических системах»
дневной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.314(075.8)
ББК 32.859я73
К26

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 10 от 01.06.2020 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *В. С. Захаренко*

Карпов, В. А.
К26 Телемеханика : практикум по выполнению лаборатор. работ по одним.
дисциплине для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и
управление в технических системах» днев. формы обучения / В. А. Карпов, О. М. Росто-
кина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 25 с. – Систем. требования: РС не ниже
Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ;
Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Предназначен для получения и закрепления знаний, требуемых в рамках учебной
программы по предмету «Телемеханика» на лабораторных занятиях в процессе самостоятельной
работы.

Для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в
технических системах» дневной формы обучения.

УДК 621.314(075.8)
ББК 32.859я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2021

Лабораторная работа № 1

Исследование унифицированных выходных сигналов устройств телемеханики (ТМ)

Цель работы: исследование преобразователей напряжение-ток, используемых в системах ТМ для передачи информации на расстояние.

Теоретические сведения

Телемеханика – это, по сути, управление на расстоянии. В любом виде управление подразумевает определённое воздействие на объект управления с целью достижения определённых его количественных характеристик. Функциональная схема системы управления представлена на рисунке 1, где использованы следующие обозначения:

ОУ – объект управления;

УСР – усилитель рассогласования;

БОС – блок обратной связи;

СС – схема сравнения;

$X_{упр}$ – задающее управляющее воздействие;

y – выходной параметр ОУ, который должен быть пропорционален задающему управляющему воздействию $X_{упр}$;

$X_{ос}$ – сигнал обратной связи, имеющий такую же размерность, что и задающее управляющее воздействие;

$K_{ос}$ – коэффициент преобразования БОС;

$U_{упр}$ – управляющее воздействие на ОУ, при котором изменяется выходной параметр ОУ – y ;

$U_{воз}$ – возмущающее воздействие, которое при неизменном управляющем воздействии также приводит к изменению выходного параметра ОУ – y .

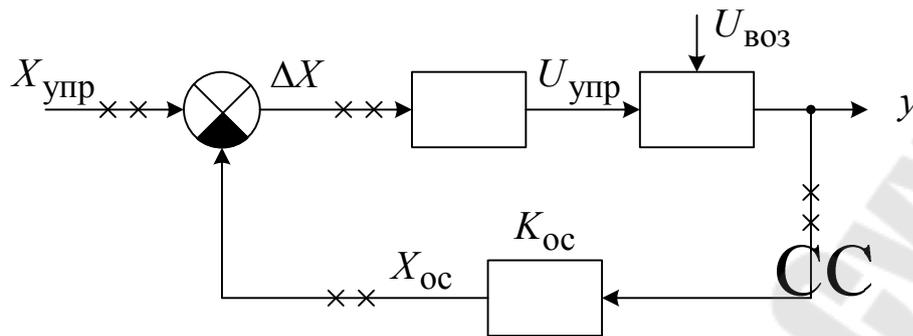


Рис. 1. Обобщённая схема системы ТМ

Сущность работы данной системы состоит в том, что выходной параметр y зависит только от управляющего воздействия $X_{упр}$ и не зависит от возмущающих воздействий $U_{воз}$. Это достигается выполнением двух условий:

- 1) коэффициент усиления УСР должен быть достаточно высоким;
- 2) коэффициент передачи БОС не должен изменяться при наличии $U_{воз}$.

При соблюдении этих условий можно считать, что $\Delta X = X_{упр} - X_{ос} \approx 0$ или $X_{упр} \approx X_{ос}$ или $X_{упр} = K_{ос} \cdot y \rightarrow y = \frac{X_{упр}}{K_{ос}}$.

Поскольку $K_{ос}$ является стабильной величиной (второе условие), то выходной параметр ОУ y пропорционален управляющему воздействию $X_{упр}$.

Такое построение систем управления используется чрезвычайно широко в современной технике, поскольку реализовать ОУ лишённый влияния $U_{воз}$, как правило, не представляется возможным, в отличие от реализации БОС.

Телемеханические системы управления отличаются от традиционных тем, что отдельные составные части могут быть пространственно разнесены, а связь между ними должна осуществляться на значительном расстоянии. Все возможные варианты связей такого рода отмечены на рис. 1 «крестиками». В промышленных условиях на линии связи воздействуют различные возмущающие факторы – помехи. Информация по линиям связи может передаваться в виде напряжения или тока. Наибольшее распространение в промышленной электронике получили сигналы в виде тока, поскольку это более помехоустойчивые сигналы. Поясним

это в сравнении с сигналами в виде постоянного напряжения. На рисунке 2 представлена система связи с сигналами в виде напряжения – а) и в виде тока – б). На данных схемах приняты следующие обозначения:

ИС – источник сигнала;

ПС – приёмник сигнала;

E – напряжение, несущее полезную информацию;

$U_{\text{ВХ}}$ – напряжение, выделяемое на входном сопротивлении приёмника сигнала;

$I_{\text{ВХ}}$ – ток, выделяемый в ПС;

r – сопротивление провода линии связи;

I – ток, несущий полезную информацию;

$R_{i\text{T}}$, $R_{i\text{H}}$ – выходное сопротивление ИС для источника тока и источника напряжения;

$R_{\text{ВХТ}}$, $R_{\text{ВХН}}$ – входное сопротивление приёмника токового сигнала и сигнала в виде напряжения;

$E_{\text{ПОМ}}$ – напряжение помехи, проникающее в линию связи по тем или иным причинам.

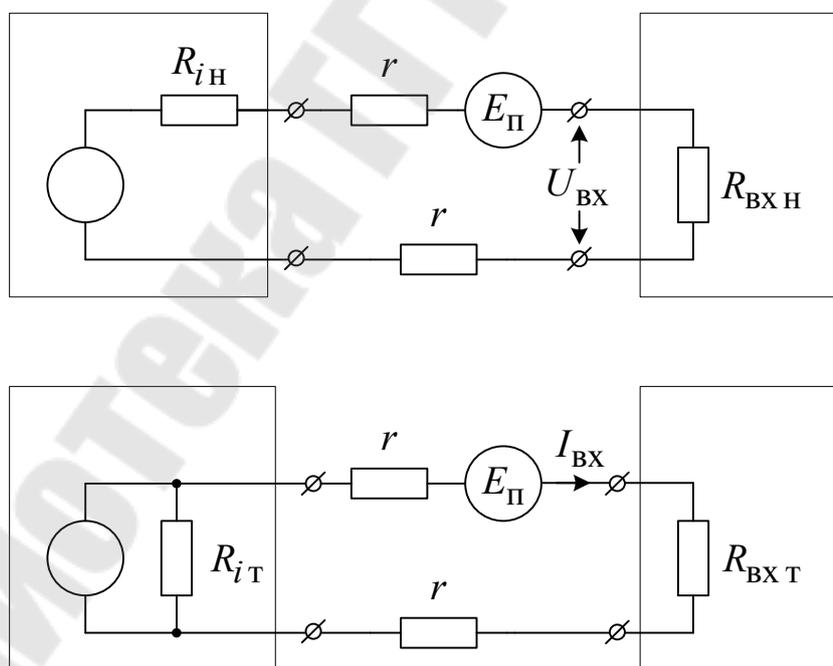


Рис. 2. Схема связи источника сигнала (ИС) и приёмника сигнала (ПС): а) – в виде напряжения; б) – в виде тока

Для связи в виде напряжения на входном сопротивлении ПС выделяется следующее напряжение:

$$U_{\text{вх}} = \frac{E + E_{\text{п}}}{R_{i\text{н}} + 2r + R_{\text{вхн}}} \cdot R_{\text{вхн}} = (E + E_{\text{п}}) \frac{1}{1 + \frac{R_{i\text{н}} + 2r}{R_{\text{вхн}}}} \approx (E + E_{\text{п}}) \left(1 - \frac{R_{i\text{н}} + 2r}{R_{\text{вхн}}} \right).$$

Для связи в виде тока можно получить:

$$I_{\text{вх}} = \left(I + \frac{E_{\text{п}}}{R_{i\text{т}}} \right) \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{вхт}} + 2r}{R_{i\text{т}}}} \approx \left(I + \frac{E_{\text{п}}}{R_{i\text{т}}} \right) \left(1 - \frac{R_{\text{вхт}} + 2r}{R_{i\text{т}}} \right).$$

В идеальном случае $R_{i\text{н}} = 0$, $R_{i\text{т}} = \infty$, $R_{\text{вхн}} = \infty$, $R_{\text{вхт}} = 0$. При соблюдении этих условий погрешности в передаче отсутствуют в обеих схемах.

Реальные значения параметров могут быть оценены следующими значениями:

$$R_{i\text{н}} \sim 1 \text{ Ом}, R_{\text{вхн}} \sim 100 \text{ кОм}, 2r = 100 \text{ Ом},$$

$$R_{i\text{т}} = 10^6 \text{ Ом}, R_{\text{вхт}} \approx 500 \text{ Ом}.$$

Тогда погрешность в передаче от влияния r может быть оценена вторыми слагаемыми, стоящими в последних круглых скобках заключительных выражений:

$$\delta_{\text{н}} = \frac{R_{i\text{н}} + 2r}{R_{\text{вхн}}}; \delta_{\text{т}} = \frac{R_{\text{вхт}} + 2r}{R_{i\text{т}}}.$$

$$\delta_{\text{н}} = \frac{1 + 100}{10^5} = 0,1\%; \delta_{\text{т}} = \frac{500 + 100}{10^6} = 0,06\%.$$

Погрешности сравнимы. Погрешность от $E_{\text{п}}$ в потенциальной схеме полностью входит в напряжение прикладываемое к $R_{\text{вхн}}$, а в токовой схеме как слагаемое $\frac{E_{\text{п}}}{R_{i\text{т}}}$. Допустим, что $E_{\text{п}} = 50 \text{ мВ}$, тогда,

полагая $E = 10 \text{ В}$, $I = 20 \text{ мА}$, получим:

$$\delta_{\text{н}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{10} = 0,5\%; \delta_{\text{т}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3} = 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,00025\%.$$

Из полученных количественных соотношений видно, что токовая схема передачи информации менее подвержена влиянию помех, в $2 \cdot 10^3$ раз более эффективна по сравнению с потенциальной.

Из изложенного выше ясно, что токовые схемы передачи информации нашли более широкое применение с системах телемеханики.

В лабораторной работе исследуются преобразователи напряжение-ток.

Методика моделирования преобразователей

Моделирование производится в среде Micro-Cap. В среде Micro-Cap необходимо построить схему, представленную на рис. 3. На ОУ1 реализован дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления, равным n . На ОУ2 реализован повторитель напряжения, через который подаётся напряжение на нагрузку U_H на третий вход дифференциального усилителя, имеющего по этому входу единичный коэффициент усиления. Таким образом, напряжение U_1 на выходе первого ОУ будет равно:

$$U_1 = (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})n + U_H.$$

С другой стороны, напряжение U_1 равно:

$$U_1 = I_H \cdot R_0 + U_H.$$

Приравняв эти выражения, получаем:

$$(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})n + U_H = I_H \cdot R_0 + U_H$$

$$\text{или } I_H = \frac{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}}{R_0} n.$$

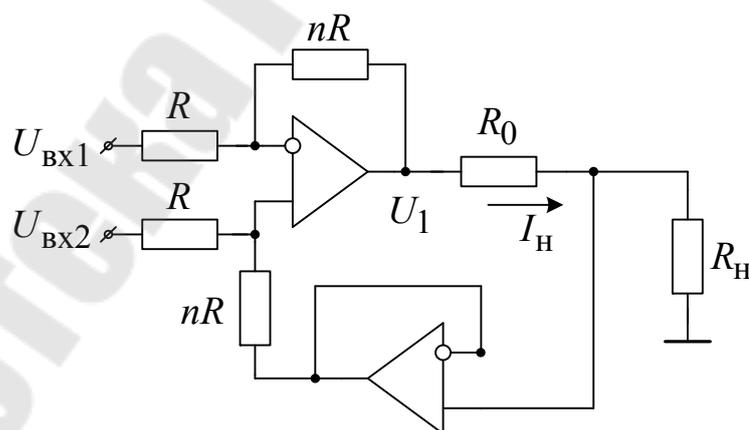


Рис. 3. Схема преобразователя напряжение-ток

1. Рассчитать схему согласно заданного варианта, приведённого в таблице 1 (вариант задаёт преподаватель).

Таблица 1

Задаваемая величина	Номер варианта						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Диапазон входного напряжения, В	0...5	-5...1	0...10	-10...10	0...5	-5...5	-10...10
Диапазон выходного тока, мА	0...5	0...20	-5...1	4...20	4...30	0...5	0...10
Диапазон напряжения на нагрузке, В	0...5	0...10	-10...10	0...10	0...10	0...10	0...10

2. В режиме анализа по постоянному току отобразить зависимость $I_H = f(U_{вх})$. Сравнить с расчётными значениями.

3. Определить выходное сопротивление схемы, изменяя сопротивление R_H от $0,1 \cdot R_H$ до R_H , измеряя при этом значения токов I_{H1} и I_{H2} .

Примечание. Выходное сопротивление ПНТ определяется из эквивалентной схемы, представленной на рис. 4.

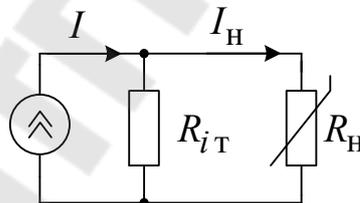


Рис. 4. Эквивалентная схема определения выходного сопротивления ПНТ

$$I_H = I \cdot \frac{R_{iT} \cdot R_H}{R_{iT} + R_H} \cdot \frac{1}{R_H} = I \cdot \frac{R_{iT}}{R_{iT} + R_H}.$$

$$\begin{cases} I_{H1} = I \cdot \frac{R_{iT}}{R_{iT} + R_{H1}}; \\ I_{H2} = I \cdot \frac{R_{iT}}{R_{iT} + R_{H2}}. \end{cases}$$

$$\frac{I_{H1}}{I_{H2}} = \frac{R_{iT}}{R_{iT} + R_{H1}} \cdot \frac{R_{iT} + R_{H2}}{R_{iT}} \rightarrow R_{iT} = \frac{R_{H2} - R_{H1} \cdot \frac{I_{H1}}{I_{H2}}}{\frac{I_{H1}}{I_{H2}} - 1},$$

где $I_{H1}(R_{H1})$, $I_{H2}(R_{H2})$.

4. Определить выходное сопротивление для случая, когда используется ОУ общего применения (*LM324*) и прецизионный ОУ (*OP77*).

5. Определить выходное сопротивление при разбросе сопротивлений.

Контрольные вопросы

1. Для чего используется преобразователь напряжение-ток?
2. Вывести соотношение выходного тока ПНТ.
3. Почему токовая схема передачи информации более предпочтительна по сравнению со схемой передачи информации в виде напряжения?
4. Найти при каких соотношениях в схеме на рис. 2а), б) погрешность от сопротивления проводов будет одинакова.
5. Рассчитать погрешность в передаче линии связи при неидентичных значениях выходного сопротивления.

Лабораторная работа № 2

Исследование объектов управления устройств телемеханики

Цель работы: исследование исполнительных элементов телемеханических систем на примере электрогидравлики.

Теоретические сведения

Гидравлические системы управления широко используются в современной промышленности, особенно это касается электрогидравлических систем, так как это системы, в которых показание основного параметра – расхода осуществляется электрическим сигналом. Связующее звено между расходом рабочей жидкости в гидравлической системе и электрическим сигналом – это электропропорциональный магнит (ЭПМ), представляющий собой электромагнитный аппарат, в котором якорь производит поступательные движения в зависимости от тока, протекающего по обмотке возбуждения индуктора.

Конструктивное устройство ЭПМ представлено на рис. 1.

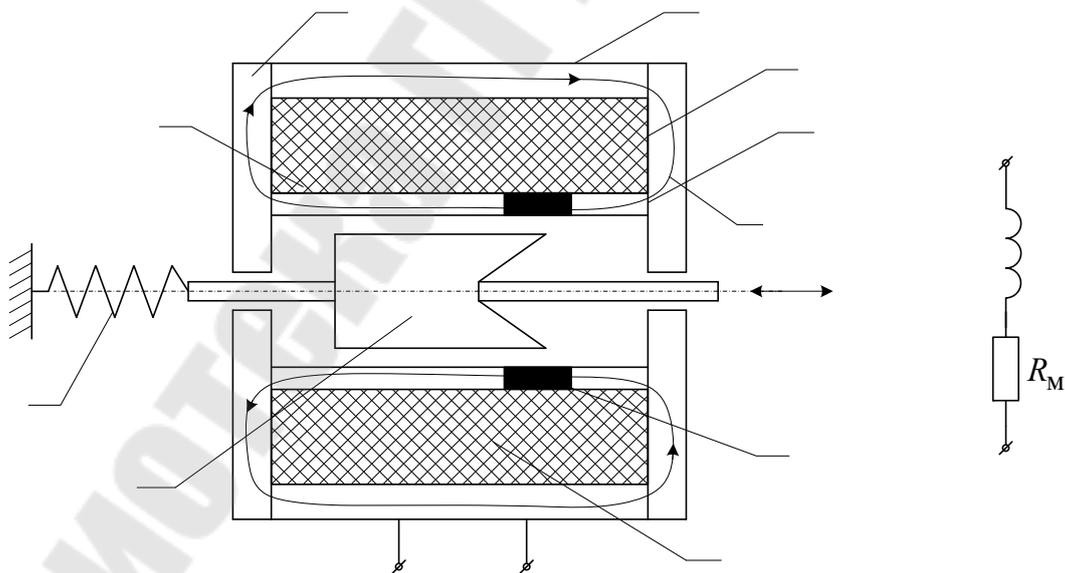


Рис. 1. Конструктивное устройство ЭПМ: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – немагнитная вставка; 4 – якорь; 5 – пружина. L – индуктивность ЭПМ; R_M – сопротивление меди; Φ – силовые линии магнитного потока

Принцип действия ЭПМ состоит в том, что за счёт немагнитной вставки 3 и определённой конфигурации торца якоря 4 магнитный поток Φ , создаваемый обмоткой возбуждения 2 и проходящий по магнитопроводу 1, взаимодействует с якорем 4 таким образом, что на некотором перемещении осевое усилие якоря 4 не зависит от перемещения, а зависит только от тока, протекающего по обмотке 2.

На рис. 2 представлены характеристики ЭПМ – усилие F от тока I и перемещения x .

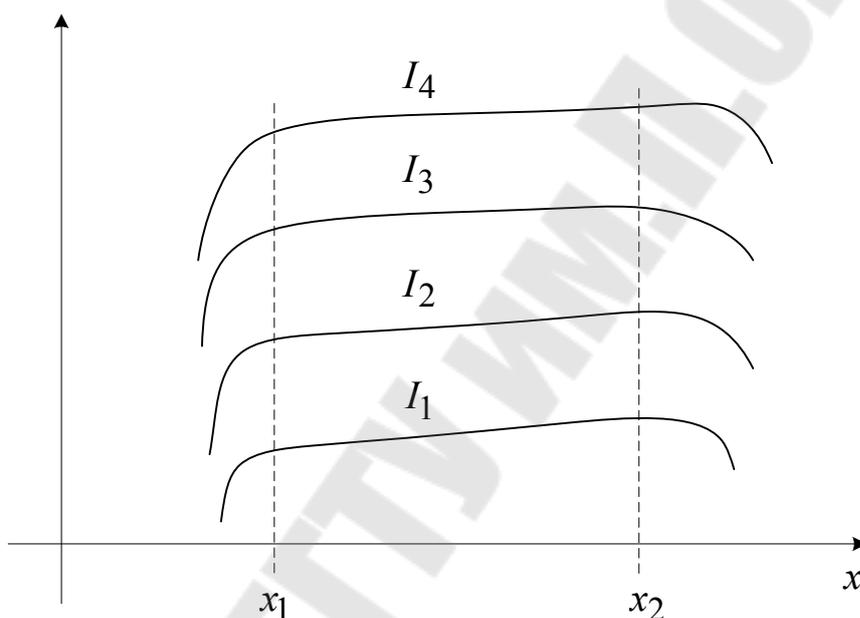


Рис. 2. Зависимости усилия F от тока I и перемещения x ЭПМ

Таким образом, подпружиненный ЭПМ представляет собой двигатель с линейным перемещением. Якорь ЭПМ механически связан с золотником гидравлической системы, в которой при изменении положения золотника изменяется расход и, тем самым, меняется положение исполнительных органов или частота вращения гидромоторов и/или гидровращателей.

Особенностью управления током ЭПМ является то обстоятельство, что при электрическом сопротивлении обмотки возбуждения $4 \div 24$ Ом и индуктивностью $0,2 \div 0,6$ Гн, напряжение питания изменяется (не является стабильным) и электрическое сопротивление также изменяется в зависимости от температуры (обмотка выполнена из медного провода). В тоже время ток обмотки возбуждения – усилие – перемещение – расход. Т.е. при изменении возмущающих воздействий (температура и напряжение питания)

изменяется расход. Регулятор должен обеспечить независимость (инвариантность) расхода от возмущающих воздействий.

Методика моделирования управления ЭПМ

На рис. 3 представлена схема управления ЭПМ за счёт питания постоянным напряжением и напряжением ШИМ последовательно.

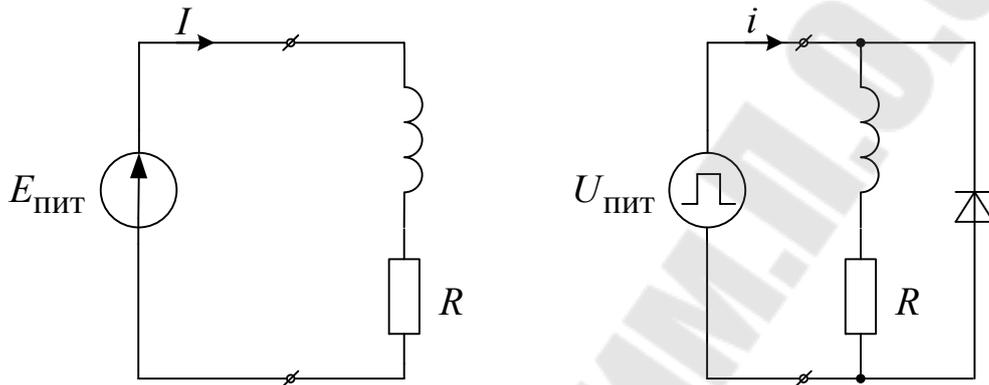


Рис. 3. Управление током ЭПМ: а) – постоянным напряжением $E_{пит}$; б) – ШИМ напряжением $U_{пит}$

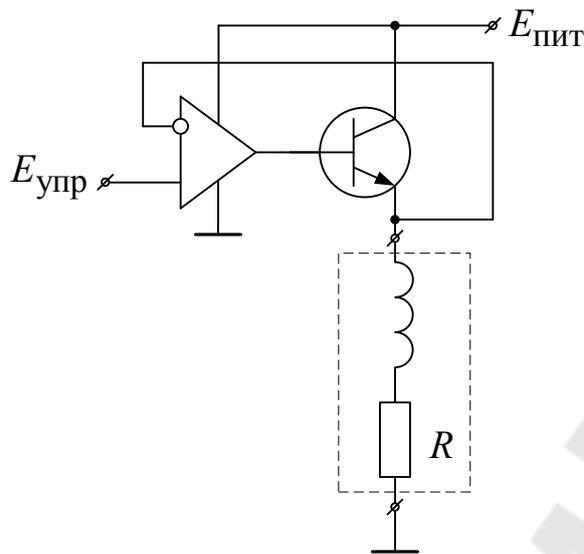
Моделирование необходимо провести согласно конкретным значениям, указанным в таблице. Данные из таблицы 1 задаёт преподаватель.

Таблица 1

Задаваемая величина	Номер варианта						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Диапазон $E_{пит}$, В	12	12	24	24	24	12	12
Диапазон $U_{пит}$, В	0,1÷0,9	0,1÷0,9	0,2÷0,8	0,2÷0,8	0,25÷0,85	0,3÷0,7	0,1÷1,0
Индуктивность L , Гн	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,2
Сопротивление R , Ом	4	4	34	24	34	6	6
Частота $U_{пит}$, Гц	100	150	160	150	200	80	120

а)

1. Для питания ЭПМ постоянным напряжением реализовать схему, представленную на рис. 4.



DA

Рис. 4. Управление током ЭПМ постоянным напряжением

2. Найти зависимость тока ЭПМ I от управляющего напряжения $E_{упр}$.
3. Найти зависимость мощности рассеяния на транзисторе VT от тока ЭПМ I .
4. Найти зависимость I от $E_{упр}$ при температуре ЭПМ $-40; +20; +80$ °С.
5. Найти зависимость I от $E_{пит}$ (при $E_{упр} \sim 0,5E_{упр\max}$).

Пункты 1-5 выполнить в режиме анализа на постоянном токе.

6. Для питания ЭПМ ШИМ напряжением необходимо сформировать последовательность импульсов согласно табл. 1. Провести анализ согласно п.п. 2-5 в режиме анализа переходных процессов. Значение $t_{и}/T$ задавать из ряда 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 0,9.

7. Оценить время переходного процесса установления тока в ЭПМ сравнить его со временем при питании постоянным напряжением.

8. Оценить параметры диода VD , по которым его следует выбирать: I_{\max} , $U_{\text{обрат}}$, $I_{\text{пр}}$.

Контрольные вопросы

1. Зачем необходим диод VD и какое название он носит при питании индуктивных элементов?

2. Объяснить разницу в мощностях рассеивания при питании ШИМ и постоянным напряжением.
3. Объяснить влияние температуры на ток ЭПМ.
4. Чем объясняются и определяются пульсации тока в ЭПМ при питании его ШИМ напряжением?
5. В чём разница в питании постоянным током и ШИМ последовательностью высокой частоты?
6. Имеют ли существенное значение пульсации тока в ЭПМ?
7. Какой способ питания наиболее предпочтителен и по какой причине?

Лабораторная работа № 3

Исследование широтно-импульсных генераторов напряжения

Цель работы: изучение и проектирование ШИ-генераторов напряжения для управления исполнительными элементами телемеханических систем на примере ЭПМ.

Теоретические сведения

Для управления током в ЭПМ могут использоваться два способа: либо изменяется уровень питающего напряжения, либо при неизменном уровне напряжения изменяется длительность импульса при неизменном периоде. Последний способ получил наибольшее распространение в связи с меньшим рассеянием мощности на регулирующем элементе обеспечением пульсаций тока на фоне среднего значения.

Типовая схема генератора ШИМ напряжения представлена на рис. 1.

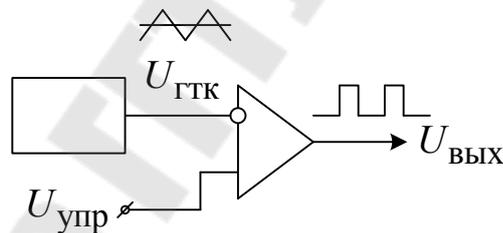


Рис.1. Функциональная схема генератора ШИМ напряжения

Генератор ШИМ напряжения представляет собой генератор прямоугольных импульсов, длительность которых изменяется управляющим напряжением. Для создания такого генератора используется генератор треугольных напряжений ГТН и компаратор К (см. рис. 1). Временные диаграммы, поясняющие работу генератора ШИМ напряжения, представлены на рис. 2.

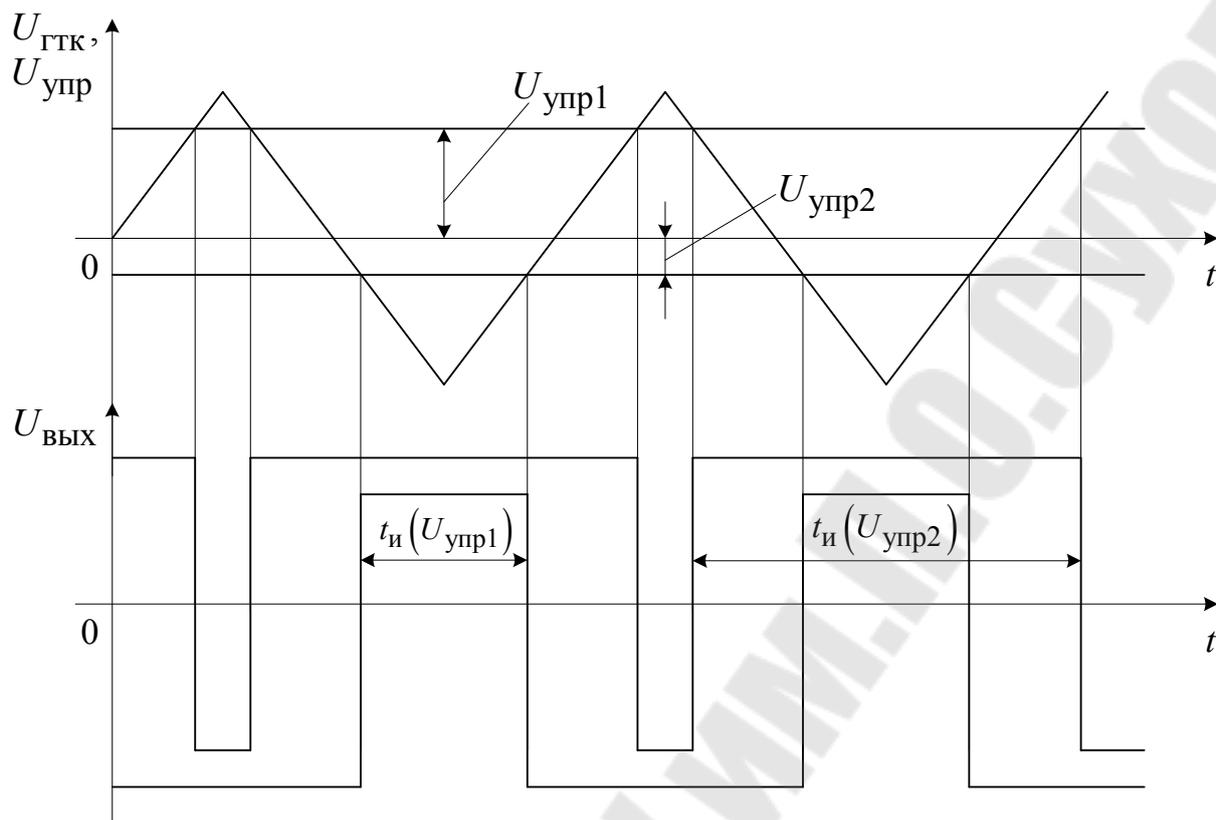


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы генератора ШИМ напряжения

В интервалы времени, когда напряжение $U_{ГТК}$ больше, чем $U_{упр}$, на выходе компаратора устанавливается низкий уровень напряжения и наоборот. Таким образом, при изменении $U_{упр}$ изменяется $t_{и}$. Так осуществляется модуляция отношения $t_{и}/T$. Временные диаграммы $U_{ВЫХ}(U_{упр1})$ и $U_{ВЫХ}(U_{упр2})$ для наглядности смещены относительно друг друга по оси ординат.

Для реализации ГТК рассмотрим схему, представленную на рис.

3.

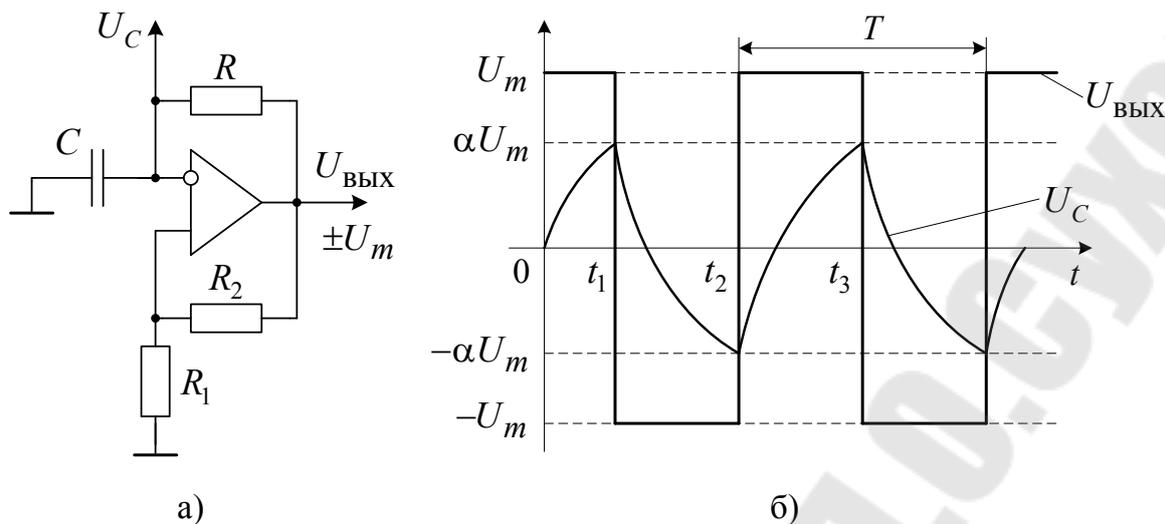


Рис. 3. Схема генератора прямоугольных колебаний

При подаче напряжения питания на схему на выходе установится максимальное напряжение U_m , на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение αU_m , где α – коэффициент деления цепи положительной обратной связи, реализованной делителем R_1 , R_2 , равный $\alpha = R_1 / (R_1 + R_2)$. Предварительно разряженный конденсатор C начинает заряжаться. Это происходит до тех пор, пока напряжение U_C не достигнет уровня αU_m и немного превысит его. После этого выходное напряжение ОУ поменяет полярность и установится на уровне $-U_m$. На временной диаграмме это момент времени t_1 . Далее напряжение на конденсаторе начнёт перезаряжаться, стараясь зарядиться до уровня $-U_m$. Перезаряд C будет продолжаться до момента времени t_2 , т.е. пока напряжение на конденсаторе не станет равно $U_C = -\alpha U_m$. После чего $U_{\text{ВЫХ}}$ станет равно U_m и процесс перезаряда конденсатора повторится, только в противоположную сторону до U_m . В интервал времени $t_1 \div t_2$ $U_C(t)$ имеет вид:

$$U_C(t) = (\alpha U_m + U_m) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) = U_m (1 + \alpha) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right).$$

Интервал времени $t_1 \div t_2$ – это половина периода формируемого напряжения. Найти его можно из следующего равенства:

$$U_m (1 + \alpha) \left(1 - e^{-\frac{0,5T}{RC}} \right) = 2\alpha U_m.$$

После решения полученного уравнения можно получить:

$$0,5T = RC \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}$$

или

$$T = 2RC \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}.$$

На рис. 3, б) видно, что экспоненциальное напряжение $U_c(t)$ близко по форме к треугольному напряжению. Это отличие происходит из-за того, что конденсатор C заряжается от источника напряжения через резистор R , ток заряда которого изменяется (уменьшается) по мере заряда конденсатора. Линейное выходное напряжение можно получить, заряжая конденсатор от источника тока так, как это показано на рис. 4. В качестве времязадающей цепи в данном случае использовать не RC -цепь, а интегратор на основе ОУЗ. На ОУ 2 реализован инвертор напряжения поскольку интегратор является инвертирующим. Таким образом, инвертор и интегратор реализуют времязадающую RC -цепь с линейным напряжением на конденсаторе. Напряжение на выходе интегратора (на конденсаторе C) изменяется по следующему закону:

$$U_{\text{ГТК}}(t) = U_m \frac{t}{RC},$$

откуда $\frac{T}{2}$ находим из равенства:

$$U_m \frac{0,5T}{RC} = 2\alpha U_m.$$

$$T = 4\alpha RC.$$

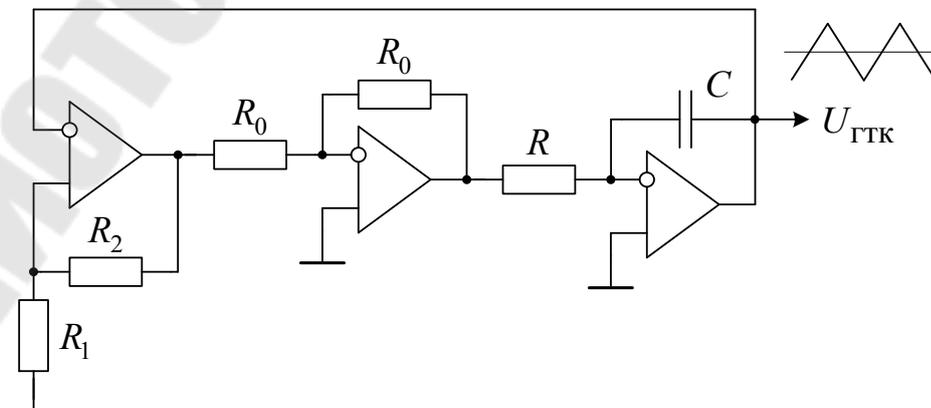


Рис. 4. Генератор треугольного напряжения

Таким образом, генератор ШИМ напряжения можно представить следующим образом (см. рис. 5).

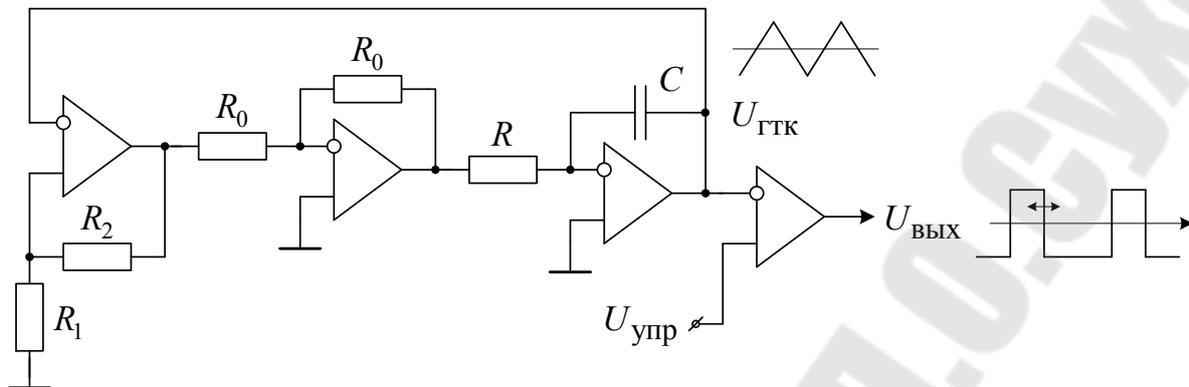


Рис. 5. Генератор ШИМ напряжения

Методика моделирования генератора ШИМ напряжения

1. Собрать схему генератора ШИМ напряжения, представленную на рис. 5. Рассчитать элементы генератора с параметрами согласно заданного преподавателем варианта, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Параметры	Номер варианта						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Частота ШИМ напряжения, Гц	80	100	120	150	180	200	220
Максимальное напряжение $U_{ГТК}$, В	5	7	10	5	7	10	12
Диапазон изменения управляющего напряжения, В	+5÷-5	0÷5	0÷10	0÷5	0÷9	-10÷10	0÷5

2. Составить схему согласования $U_{упр}$ с $U_{ГТК\max}$. Проанализировать работу генератора ШИМ напряжения в режиме переходных процессов. Добиться изменения t_n/T в диапазоне 0,02÷0,98.

3. Определить влияние температуры на отношение t_n/T при неизменном $U_{упр}$.

4. Собрать схему, представленную на рис. 3. Прodelать пункты 2, 3 для этой схемы.
5. Сравнить схемы генераторов ШИМ напряжения с точки зрения линейности зависимости $t_{и}/T$ от $U_{упр}$.

Контрольные вопросы

1. В чём преимущества управления током в ЭПМ с помощью генератора ШИМ напряжения по сравнению с управлением постоянным напряжением?
2. Объяснить работу генератора треугольных колебаний.
3. Можно ли подключить генератор ШИМ напряжения непосредственно к ЭПМ?
4. Нарисовать временные диаграммы, если в компараторе инвертирующий и неинвертирующий входы поменять местами.
5. К чему приведёт при формировании треугольных колебаний то обстоятельство, что напряжение насыщения на выходе ОУ имеет различное значение по модулю?
6. Объяснить к чему приведёт подача напряжения на неинвертирующий вход ОУЗ (рис. 5).
7. Возможно ли построить схему генератора ШИМ напряжения на основе схемы, представленной на рис. 4 (без компаратора)?

Лабораторная работа № 4

Исследование ключевого усилителя мощности для ШИМ напряжения

Цель работы: изучение и проектирование ключевых усилителей мощности для питания исполнительных элементов телемеханических (ТМ) систем на примере электропропорционального магнита.

Теоретические сведения

Электропропорциональный магнит (ЭПМ) имеет достаточно низкоомный импеданс. Типовые значения индуктивности находятся на уровне $0,2 \div 0,6$ Гн, а электрическое сопротивление на постоянном токе (сопротивление «меди») – $4 \div 24$ Ом. Напрямую, к выходу ОУ общего применения, ЭПМ подключить невозможно. Для согласования напряжения управления током ЭПМ необходим усилитель мощности. Поскольку для управления током в ЭПМ используется ШИМ напряжение, то требуется ключевой усилитель мощности. На рис. 1 представлена схема управления током ЭПМ с использованием ключа Кл, управляемого от генератора ШИМ напряжения (ГШИН), где E – напряжение питания (12 или 24 В); VD – возвратный диод; $U_{упр}$ – напряжение управления длительностью ШИМ напряжения $\left(\frac{t_n}{T}\right)$. В схеме присутствует возвратный диод, необходимость которого вызвана тем обстоятельством, что перед размыканием Кл, в индуктивности ЭПМ L протекает ток, зависящий от $\frac{t_n}{T}$, который после размыкания продолжает протекать по индуктивности (согласно законов коммутации ток в индуктивности мгновенно измениться не может). Если VD отсутствует, то ток продолжает протекать через разомкнутый Кл, сопротивление которого велико. При этом на Кл создаётся высокое напряжение, которым ключ пробивается (выходит из строя). Установка VD создаёт путь для протекания тока ЭПМ, тем самым предотвращает пробой Кл.

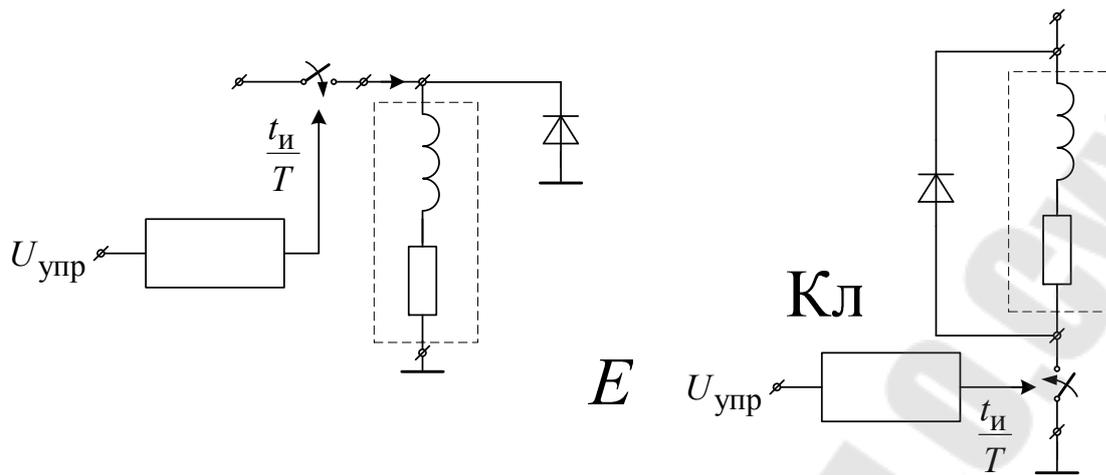


Рис. 1. Схема управления током ЭПМ с использованием ключевого элемента Кл: а) – схема с ключом верхнего уровня; б) – схема с ключом нижнего уровня

Схема, представленная на рис. 1, а), называется схемой с ключом верхнего уровня – один полюс Кл подключён к источнику питания E , а схема на рис. 1, б) – нижнего уровня, где один полюс Кл подключён к земле. Наибольшее распространение получили схемы с Кл верхнего уровня, поскольку в борт сети земля является массой, т.е. нет необходимости использовать дополнительный провод для связи ЭПМ с блоком управления. На рис. 2 представлены временные диаграммы, поясняющие изменение тока через ЭПМ в зависимости от соотношения $t_{и}/T$. Представлен установившийся режим. I_0 – среднее значение тока через ЭПМ.

а)

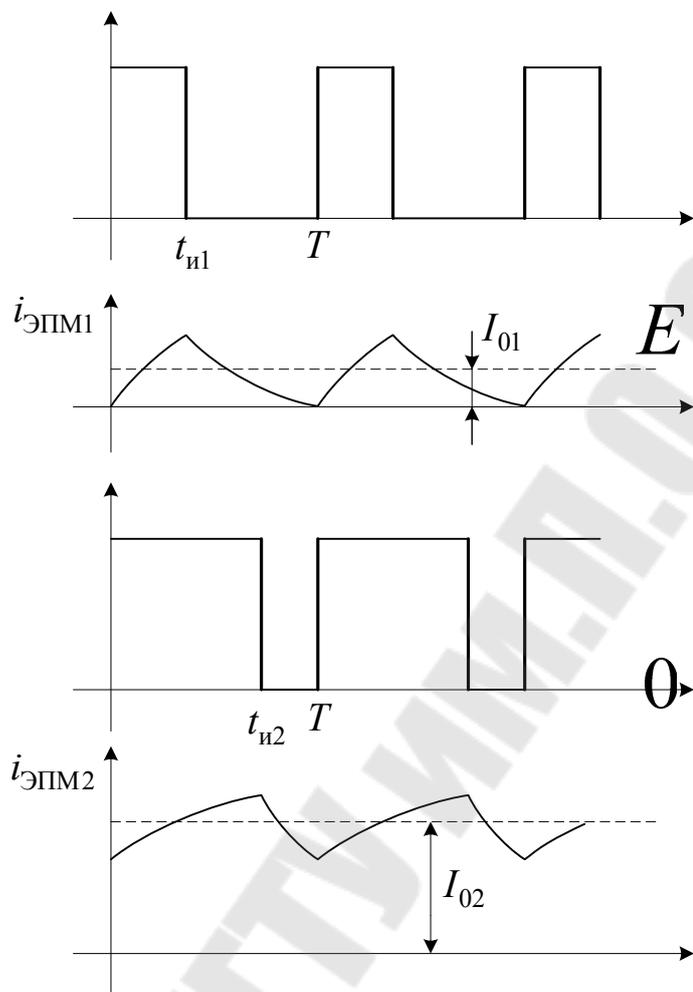


Рис. 2. Изменение тока в ЭПМ при различных значениях $t_{и}$ ($t_{и1} < t_{и2}$)

Электрическая схема ключевого усилителя мощности верхнего уровня для управления ЭПМ представлена на рис. 3.

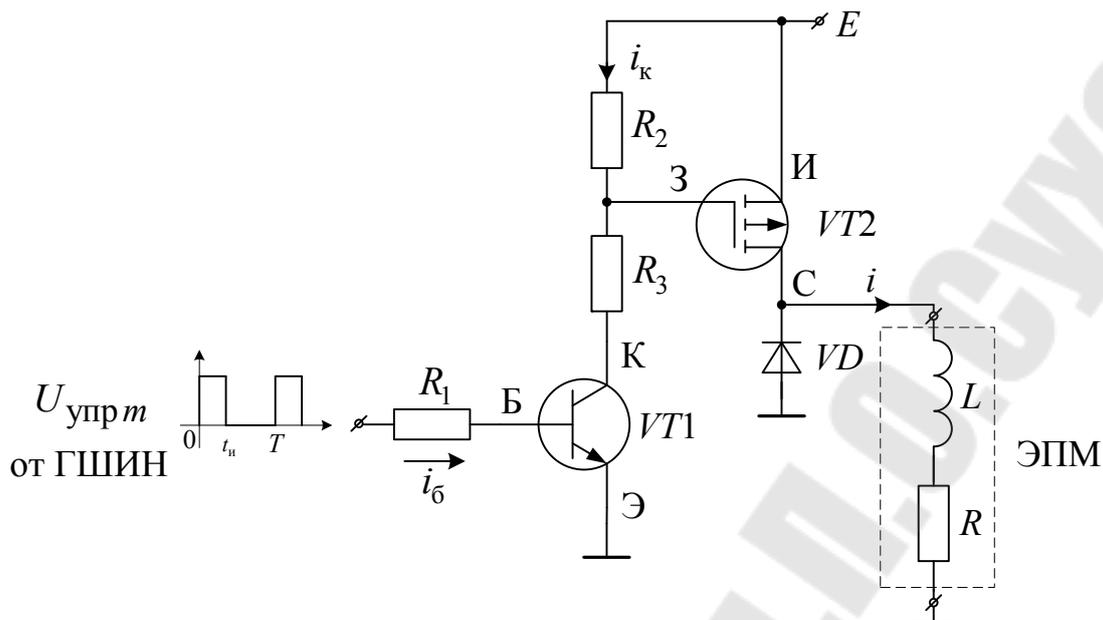


Рис. 3. Электрическая схема ключевого усилителя мощности

Ключевой усилитель мощности содержит ключ на основе полевого транзистора $VT2$ (ключевого VМОП-транзистора) p -типа, управление которым осуществляется изменением падения напряжения на резисторе R_2 . Если напряжение на резисторе R_2 близко к нулю (ток через резистор крайне мал), то $VT2$ – заперт, т.е. обладает очень высоким сопротивлением (десятки МОм), если напряжение на R_2 больше, чем напряжение отсечки $U_{отс}$ (как правило, для VМОП-транзисторов $2 \div 4$ В), то сопротивление ключа очень мало (десятки Ом). Сопротивление ключа – это сопротивление сток-исток. Сопротивление затвор-исток имеет значение десятки и сотни МОм. Биполярный транзистор $VT1$ маломощный и служит для сдвига уровня напряжения $U_{ГШИН}$ с напряжением управления $U_{ЗИ}$ транзистора $VT2$. Транзистор $VT1$ также работает в ключевом режиме. Если $VT1$ заперт, т.е. $I_k \sim 0$, то падение напряжения на $R_2 \sim 0$, т.е. заперт и силовой ключ на транзисторе $VT2$. Если $VT1$ насыщен, то $U_{кэ} \sim 0$ и ток коллектора $VT1$ создаёт падение напряжения на R_2 . Если $i_k \cdot R_2 > U_{отс}$, то $VT2$ насыщен и силовой ключ открыт.

Условие насыщения транзистора $VT1$ следующие:

$$i_б > \frac{i_k}{\beta},$$

где β – коэффициент усиления тока транзистора $VT1$ в схеме с общим эмиттером.

Условие отсечки $VT1 - U_{бэ} < 0,7 \text{ В}$.

Таким образом, для расчёта номинальных значений резисторов $R_1 \div R_3$ необходимо знать уровни управляющего напряжения $U_{ГШИН}$. Положим, что высокий уровень $U_{ГШИН} = U_{\max}$, а низкий уровень – U_{\min} . Рассчитаем условие насыщения $VT1$. Ток базы $VT1$ находится из следующего соотношения:

$$i_{б} = \frac{U_{\max} - U_{бэ}}{R_1}.$$

Ток коллектора $i_{к} < i_{б} \cdot \beta$. Он в свою очередь определяется следующим образом:

$$i_{к} = \frac{E - U_{кЭН}}{R_3 + R_2},$$

где $U_{кЭН}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер, как правило $U_{кЭН} < U_{бэ}$.

Таким образом,

$$i_{к} = \frac{E - U_{кЭН}}{R_3 + R_2} < \beta \frac{U_{\max} - U_{бэ}}{R_1}.$$

Например, пусть $E = 24 \text{ В}$; $\beta = 20$; $U_{бэ} = 0,6 \text{ В}$; $U_{кЭН} = 0,4 \text{ В}$; $U_{\max} = 12 \text{ В}$. Тогда выбираем $i_{б} = 0,5 \text{ мА}$ и рассчитываем R_1 .

$$R_1 = \frac{U_{\max} - U_{бэ}}{i_{б}} = \frac{12 - 0,7}{0,5 \cdot 10^{-3}} = \frac{11,3}{0,5} \cdot 10^3 = 22,6 \text{ кОм}.$$

Выбираем ток $i_{к} < i_{б} \cdot \beta$, т.е.

$$i_{к} < 20 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ мА}.$$

Положим, что ток $i_{к} = 5 \text{ мА}$, тогда находим $(R_2 + R_3)$:

$$R_2 + R_3 = \frac{E - U_{кЭН}}{i_{к}} = \frac{24 - 0,4}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{23,6}{5 \cdot 10^{-3}} = 4,72 \cdot 10^3 = 4,72 \text{ кОм}.$$

Например, если $U_{отс} = 4 \text{ В}$, то $i_{к} \cdot R_2 > 4 \text{ В}$.

$$R_2 > \frac{4}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,8 \text{ кОм}.$$

$$R_3 = 4,72 - 0,8 = 3,92 \text{ кОм}.$$

Таким образом, можно выбрать $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 3,7 \text{ кОм}$, $R_1 = 20 \text{ кОм}$. Для того, чтобы $VT1$ закрылся, необходимо выполнить $U_{\min} < 0,7 \text{ В}$.

Методика моделирования ключевого усилителя мощности

1. Рассчитать элементы электрической схемы, представленной на рис. 3 для заданного преподавателем варианта параметров, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Параметры	Номер варианта						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
U_{\max} , В	12	5	10	5	10	12	3
U_{\min} , В	0,5	-5	-10	0	5	6	-3
$VT1$	BC847	BC846	BC848	BC849	BC850	KT315	KT3105
$VT2$	IRF9Z34	IRF9Z32	IRF9Z32	IRF9Z34	IRF9130	IRF9131	IRF9Z34
L , Гн	0,2	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,3
R , Ом	6	4	24	20	4	6	6
E , В	12	12	24	24	12	24	12

Параметры β ; $U_{\text{бэ}}$; $U_{\text{кэн}}$; $U_{\text{отс}}$ найти из описания технических характеристик транзисторов.

2. Рассчитать максимальный ток через ЭПМ, в соответствии с которым выбрать возвратный диод VD . Частота ШИМ напряжения берётся из задания к л/р №2. Максимальный ток через VD определяется как E/R . Выбрать VD по I_{\max} и $U_{\text{обр}} > E$.

3. Для проверки работы схемы сдвига уровня необходимо составить схему с выбранными элементами и проанализировать её в режиме постоянного тока для двух значений $U_{\text{ГШИМ}} - U_{\max}$ и U_{\min} . Убедиться в том, что U_{R_2} соответствует уровням переключения $VT2$.

4. Подключить силовой ключ на $VT2$ совместно с ЭПМ и в режиме анализ по постоянному току убедиться, что $VT2$ переключается.

5. Найти среднее значение тока I_0 через ЭПМ для 4-5 значений $t_{\text{и}}/T$. Найти пульсации тока для этих значений. Построить график зависимостей I_0 и ΔI от $t_{\text{и}}/T$.

6. Найти значение тока через диод VD для тех же значений $t_{\text{и}}/T$.

Контрольные вопросы

1. Какие условия необходимо соблюдать для обеспечения ключевого режима полевого транзистора?
2. Какие условия необходимо соблюдать для обеспечения ключевого режима биполярного транзистора?
3. Из каких соображений выбирается возвратный диод?
4. Зачем необходим возвратный диод при индуктивной нагрузке?
5. Как изменяются пульсации тока в ЭПМ с увеличением частоты, почему?
6. Пояснить что такое «установившийся режим изменения тока в ЭПМ» при питании его ШИМ напряжением и что такое переходной режим установления тока?
7. Сравнить переходной процесс установления тока в ЭПМ при подаче на него ШИМ напряжения и постоянного напряжения.
8. От каких параметров ЭПМ зависит время переходного процесса установления тока в магните?
9. Сравнить время установления тока в ЭПМ при питании его напряжением и ШИМ напряжением при одинаковых значениях средних питающих напряжений.

**Карпов Владимир Александрович
Ростокина Ольга Михайловна**

ТЕЛЕМЕХАНИКА

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-53 01 07
«Информационные технологии и управление
в технических системах»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 31.03.21.

Рег. № 54Е.

<http://www.gstu.by>