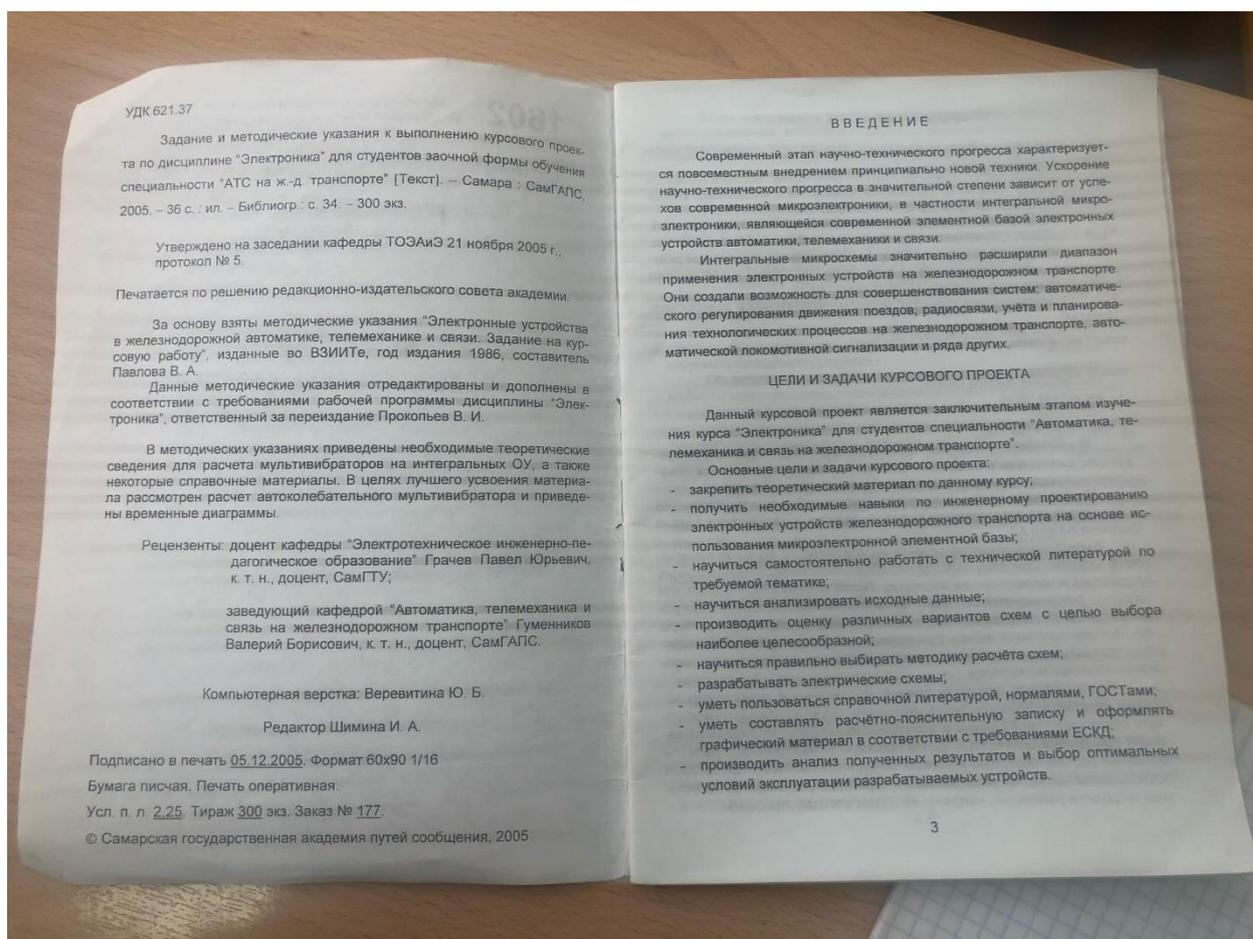


## Решение задачи для четырех вариантов (шифры 26,20,72 и 97)



## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Студенту необходимо выполнить один вариант задания в соответствии со своим шифром.

Курсовой проект должен состоять из двух частей: текстовой (расчётно-пояснительная записка) и графической, выполненной чертёжными инструментами на миллиметровой или чертёжной бумаге карандашом или тушью.

Пояснительная записка представляет собой текстовый документ, выполненный в соответствии с требованиями ГОСТов 2.105-85 и 2.106-88. С перечнем ГОСТов, применяемых при оформлении технической документации, можно ознакомиться по литературе [15]. Общий объём записки должен примерно составлять 12-15 страниц текста.

Ориентировочная структура расчётно-пояснительной записки следующая:

- титульный лист (см. приложение 1);
- задание;
- введение;
- обоснование выбора схемы;
- расчётная часть;
- заключение;
- список литературы.

В пояснительную записку кроме текста должны входить иллюстрирующие материалы в виде схем (электрических принципиальных, эквивалентных) отдельных узлов, графиков и временных диаграмм.

Графическая часть, в качестве которой обычно представляется принципиальная электрическая схема устройства, выполняется на листе формата А4 или А3.

Выполнение курсового проекта надо начинать с изучения технического задания. При этом необходимо обратить внимание на назначение устройства и условия его эксплуатации. После ознакомления с заданием студенту рекомендуется составить календарный график выполнения работы. Затем студент должен составить список используемой литературы по данному вопросу с учётом рекомендуемых литературных источников. При составлении списка следует учитывать новизну используемых научно-технических материалов.

После анализа исходных данных, изложенных в техническом задании, студент должен составить аналитический обзор схем, позволяющих реализовать эти данные и в результате выбрать оптимальный вариант принципиальной схемы. Далее проводятся электрические расчёты основных параметров узлов и элементов этой схемы, на основе которых производится выбор их типонаименований. При этом учитываются допустимые мощности рассеяния, напряжения и токи в элементах схемы.

4

Затем выполняется графическая часть курсового проекта и пишется заключение, в котором содержатся основные выводы по результатам выполненной работы.

После оформления пояснительной записки и графической части студент должен подготовиться к защите курсового проекта, согласно расписанию.

Во введении пояснительной записки необходимо кратко описать назначение устройства, аналогичных разрабатываемому, в современной технике. Особое внимание уделить возможностям использования их на железнодорожном транспорте. Следует подчеркнуть актуальность разрабатываемых устройств и основные тенденции развития.

Во введении следует также осветить постановку задачи и кратко охарактеризовать основное содержание курсового проекта. Общий объём введения не должен превышать 2-3 страниц.

В разделе "Обоснование выбора схемы" проводится анализ исходных данных и различных вариантов технической реализации проектируемого по заданию устройства.

По результатам анализа производится выбор наиболее рационального варианта схемы, отвечающего требованиям исходных данных.

В этом же разделе приводятся временные диаграммы для различных частей схемы, поясняющие принцип её работы, а также основные теоретические положения по принципу действия схемы, излагается методика расчёта основных элементов схемы. Объём этого раздела не должен превышать 4-5 страниц.

В расчётной части обязательным является выбор интегральной схемы, удовлетворяющей требуемым условиям, а также расчёт отдельных элементов схемы, обеспечивающих требуемые параметры рассчитываемого устройства.

По результатам расчёта составляется принципиальная электрическая схема проектируемого устройства с указанием типонаименований элементов схемы. Общий объём расчётной части не должен превышать 10-12 страниц.

В заключении приводятся основные выводы по выполненной работе, и производится оценка полученных результатов.

В список использованной литературы включаются литературные источники, которыми пользовался студент при проектировании заданного устройства.

Пояснительная записка должна быть написана на одной стороне листа бумаги с полями: слева – 30 мм, справа – 15 мм.

Листы пояснительной записки сброшюровываются. Форма титульного листа курсового проекта представлена в приложении 1. Нумерация страниц записки – сквозная, кроме титульного листа. Нумеруются также все приложения, вшитые в записку.

5

Текст пояснительной записки иллюстрируется схемами, временными диаграммами, графиками, номограммами и др. Особое внимание необходимо обратить на выполнение временных диаграмм рассчитанного устройства. Пример правильного построения изменений напряжений в различных узлах автоколебательного мультивибратора:  $u_{\text{ант}}(t)$ ,  $u_{\text{кв}}(t)$  и  $u_{\text{к}}(t)$  приведён в приложении 4. На осях обязательно показывать условное обозначение откладываемой величины, единицы измерения и масштабы. Каждая иллюстрация должна иметь тематическое наименование и свой порядковый номер, на который делается ссылка в тексте с сокращённым словом «смотри», например, (см. рис. 1) и т. д. Номер таблицы проставляется в верхнем правом углу, а номер рисунка – внизу под рисунком.

Содержание отдельных абзацев записки должно быть четким, лаконичным, но без ущерба для ясности изложения. Изложение во всех главах должно вестись от первого лица во множественном числе, например, «принимаем», «выбираем» и др. Обозначения, определения во всей записке должны быть едиными. Единицы измерения различных величин должны быть указаны в соответствии с требованиями международной системы единиц измерения СИ. Сокращения слов в тексте и подписях под иллюстрациями, как правило, не допускаются. Исключения составляют слова, сокращения которых общеприняты, а также приводимые в тексте поясняющие надписи, например: «вкл.», «выкл.» и т. п. Наименования разделов пояснительной записки должны быть краткими, соответствовать содержанию и записываться в виде заголовков. Переносы в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если в тексте записки приводится ряд цифровых величин одной размерности, единицу измерения указывают только после последнего числа, например, 1,05; 3,0; 5,0 мкс.

Расчётные формулы должны записываться в виде отдельной строки. Общеизвестные формулы пояснений не требуют. Если же используются узкоспециальные расчётные формулы, то следует сослаться на источник, откуда они заимствованы, например, «... на основании [2]».

6

Неотъемлемой частью курсового проекта является составление принципиальной схемы заданного устройства. Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связей между ними, и даёт детальное представление о принципах работы устройства. Элементы на схеме изображаются в виде условных графических обозначений, каждому из которых присваивается буквенно-позиционное обозначение, состоящее из буквенного обозначения элемента и порядкового номера, записанного после него арабской цифрой того же шрифта.

Рекомендуется обозначать:

резисторы  $R1, R2, \dots$ ;

конденсаторы  $C1, C2, \dots$ ;

ОУ  $DA1, DA2, \dots$ ;

диоды  $VD1, VD2, \dots$ ;

транзисторы  $VT1, VT2, \dots$

Младшие порядковые номера присваиваются элементам, стоящим на входе, а старшие – по мере приближения к выходу.

Перечень элементов принципиальной схемы (спецификация) выполняется в виде таблицы на отдельном листе, который подшивается в конце пояснительной записки.

В этой таблице для каждого условного обозначения элемента приводятся данные о типе элемента, номинале величины, округлённой до ближайшего стандартного значения, допуск на разброс параметров и количество элементов. Пример оформления спецификации представлен ниже.

№ п/п	Обозначение	Тип	Количество
1	$R1$	Резистор МЛТ-0,5-12 кОм±10 %	1
2	$C1, C2$	Конденсатор К10-30-1мкФ±10 %	2
3	$VD1$	Диод полупроводниковый Д226А	1
4	$DA1$	Операционный усилитель К140УД6	1

Полностью оформленный курсовой проект подписывается студентом и сдаётся на проверку. Курсовой проект проверяется преподавателем, ведущим данную дисциплину, который подписывает расчётно-пояснительную записку.

На защите курсового проекта студент должен в течение 5 минут кратко изложить материал курсового проекта и ответить на поставленные вопросы.

7

### ЗАДАНИЕ

Разработать и рассчитать релаксационный генератор на ИОУ (интегральной схеме операционного усилителя) в соответствии с данными, представленными в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Исходные данные	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид генератора	Мультивибратор									
Режим работы	автоколебательный				ждущий					
Период следования импульсов $T$ , мс	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	-	-	-	-	-
Частота запускающих импульсов $f_{\text{зп}}$ , кГц	-	-	-	-	-	5	6	7	8	9

Таблица 2

Исходные данные	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длительность выходного импульса $t_{\text{н}}$ , мкс	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Длительность фронта выходного импульса $t_{\text{ф}}$ , мкс	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$	$\leq 0,9$	$\leq 1$	$\leq 1,5$	$\leq 2$	$\leq 2,5$	$\leq 3$	$\leq 4$

Проанализировать неустойчивость длительности генерируемых импульсов разработанного релаксационного генератора в зависимости от разброса параметров навесных элементов.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Перед выполнением курсового проекта студент должен хорошо поработать по рекомендуемой литературе материал следующих разделов курса: усилители электрических сигналов (особенно свойства ИОУ в режиме большого сигнала) и функциональные узлы импульсных устройств (особенно импульсные генераторы на базе операционных усилителей).

Затем в соответствии с заданием необходимо разработать схему релаксационного генератора и, пользуясь приложением 2, выбрать операционный усилитель, на основе которого будет разрабатываться требуемое устройство. В приложении 2 представлены основные параметры интегральных схем операционных усилителей серий 140, 153, 154, 284, 544, 155, 574. Затем необходимо проверить, выполняются ли условия, обеспечивающие нормальную работу выбранного операционного усилителя в данной схеме. Наконец, следует произвести требуемый расчёт и выбор типономиналов элементов схемы (приложение 3), обеспечивающих требуемые по заданию параметры. Разработанная принципиальная схема должна содержать составленную студентом спецификацию элементов (см. пример на с. 7). После этого можно приступать к оформлению пояснительной записки и графической части курсового проекта.

### РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные свойства интегральных операционных усилителей (ИОУ) используемые при построении импульсных генераторов различного назначения, - это наличие двух парафазных входов (инвертирующего и неинвертирующего), большое входное (сотни килоом и более) и малое выходное (десятки и сотни ом) сопротивления, большой (десятки и сотни тысяч) коэффициент усиления по напряжению.

Полярность выходного напряжения интегрального операционного усилителя (ИОУ) определяется соотношением между  $u_{\text{вх}}^+(t)$ , действующим на неинвертирующем входе, и  $u_{\text{вх}}^-(t)$ , действующим на инвертирующем входе. Если  $u_{\text{вх}}^+(t) - u_{\text{вх}}^-(t) > 0$ , то на выходе формируется напряжение со знаком плюс, если  $u_{\text{вх}}^-(t) - u_{\text{вх}}^+(t) > 0$ , то полярность выходного напряжения отрицательная.

Выходное напряжение  $u_{\text{вых}}(t) = 0$  при  $u_{\text{вх}}^+(t) = u_{\text{вх}}^-(t)$ .

Следовательно, ИОУ усиливает входной дифференциальный сигнал  $u_{\text{диф}}(t) = u_{\text{вх}}^+(t) - u_{\text{вх}}^-(t)$ , а выходное напряжение усилителя

$$u_{\text{вых}}(t) = K u_{\text{диф}}(t),$$

где  $K$  - коэффициент усилителя ИОУ при линейном режиме его работы.

Линейный режим работы ИОУ сохраняется только при изменении входного напряжения в пределах нескольких милливольт. При этом ИОУ обладает высокими усилительными свойствами. За пределами этого диапазона выходное напряжение ИОУ достигает максимума и становится независимым от входного, а полярность его зависит от знака дифференциального входного сигнала.

Возможность построения мультивибратора на ИОУ обусловлена тем, что при соединении выхода ИОУ с его неинвертирующим входом получаем замкнутую резисторную или резисторно-конденсаторную цепь положительной обратной связи, обеспечивающую возможность возникновения лавинообразных процессов. При этом напряжение на выходе ИОУ меняется скачкообразно от своего максимального значения до минимального и наоборот - при изменении знака напряжения входного дифференциального сигнала.

Мультивибратор является релаксационным генератором. Он может работать либо в режиме автоколебаний, либо в ждущем режиме.

В режиме автоколебаний он не имеет состояния устойчивого равновесия. При работе мультивибратора в этом режиме существуют два чередующихся состояния квазиравновесия. Состояние квазиравновесия характеризуется сравнительно медленным изменением тока и напряжений, приводящих к некоторому критическому состоянию, при котором создаются условия для скачкообразного перехода мультивибратора из одного состояния в другое. Период колебаний при этом зависит от параметров схемы.

В ждущем режиме мультивибратор имеет состояние устойчивого равновесия и состояния квазиравновесия. Переход из первого во второе происходит в результате воздействия внешних запускающих импульсов, а возвращение в устойчивое состояние - самостоятельно по истечении некоторого времени, зависящего от параметров схем.

Таким образом, в данном случае каждый раз после запуска мультивибратор генерирует один цикл колебаний. При реализации мультивибратора в автоколебательном режиме и получении последовательности прямоугольных импульсов знак входного дифференциального сигнала  $u_{\text{диф}}(t)$  должен изменяться периодически в ходе процессов, протекающих непосредственно в самой схеме.

В ждущем мультивибраторе  $u_{\text{диф}}(t)$  принимает один знак под действием запускаемого импульса, а противоположный - в результате изменений электрического состояния схемы.

Рассмотрим особенности проектирования автоколебательного генератора импульсов на одном ИОУ (рис. 1, а). В данном случае положительная обратная связь обеспечивается делителем напряжения на резисторах  $R_1, R_2$ . Причем резистор  $R_1$  включён между выходом и неинвертирующим входом ИОУ. Цепь отрицательной обратной связи образована элементами  $R$  и  $C$ , формирующими напряжение на инвертирующем входе ИОУ. Такой автогенератор иногда называют мультивибратором с запаздывающей отрицательной обратной связью, действие которой во время протекания в устройстве коротких лавинообразных процессов исключается за счёт свойств конденсатора времязадающей цепи (ВЗЦ).

В момент  $t = 0$  (рис. 1, б) включаются источники питания ИОУ. При этом начинает возрастать напряжение  $u_{\text{вых}}(t)$ , а следовательно, и напряжение, снимаемое с делителя  $R_1, R_2$  и поданное на неинвертирующий вход  $u_{\text{вх}}^+(t)$ , что вызывает дальнейшее увеличение выходного напряжения  $u_{\text{вых}}(t)$ , т. е. происходит лавинообразный процесс, в результате которого  $u_{\text{вых}}$  скачкообразно возрастает до значения  $+E$  (это первое состояние квазиравновесия), а напряжение  $u_{\text{вх}}^+(t)$  - до значения  $\gamma E$ , где  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Напряжение  $u_{\text{вх}}^-(t)$  при этом практически не изменяется и равно нулю.

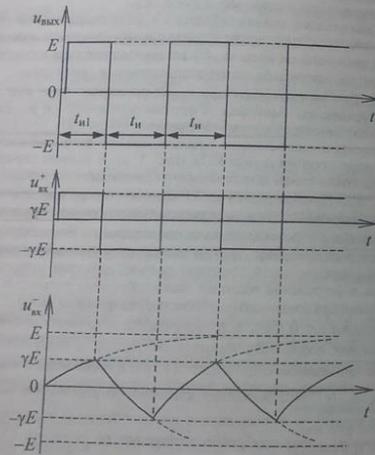
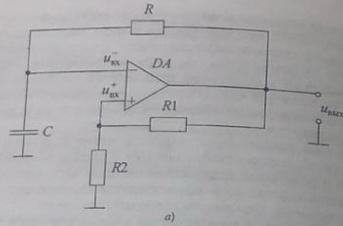


Рис. 1  
12

С изменением времени  $t$  напряжение  $u_{\text{вх}}(t)$  за счёт заряда конденсатора  $C$  через резистор  $R$  увеличивается по экспоненциальному закону и стремится к своему установившемуся значению  $+E$ .

Однако в момент времени  $t = t_{\text{н1}}$  напряжение  $u_{\text{вх}}(t)$  становится равным  $u_{\text{вх}}^+(t)$ , ОУ переходит в линейный режим, и так как начиная с этого момента дифференциальное напряжение меняет знак, в схеме развивается регенеративный процесс, сопровождающийся почти скачкообразным изменением выходного напряжения, которое изменяет полярность на противоположную. В результате окончания этого лавинообразного процесса  $u_{\text{вх}}(t) = -E$ , а  $u_{\text{вх}}^+(t) = -\gamma E$ . Конденсатор начинает разряжаться через резистор  $R$  и стремится перезарядиться до напряжения  $-E$ .

В момент, когда при перезарядке конденсатора напряжение  $u_{\text{вх}}^-(t)$  достигает значения  $-\gamma E$ , вновь возникает регенеративный процесс, завершающийся переключением схемы во второе состояние квазиравновесия. Таким образом, периодически происходит переход мультивибратора из одного состояния квазиравновесия в другое.

Первый импульс имеет меньшую длительность  $t_{\text{н1}}$ , так как он формируется при зарядке конденсатора от нуля до значения  $\gamma E$ , и  $t_{\text{н1}}$  определяется по формуле:

$$t_{\text{н1}} = \tau \ln \frac{1}{1-\gamma}, \text{ где } \tau = RC.$$

Длительность последующих импульсов определяется по формуле:

$$t_{\text{н}} = \tau \ln \frac{-E - \gamma E}{-E + \gamma E},$$

после преобразования

$$t_{\text{н}} = \tau \ln \frac{1+\gamma}{1-\gamma} = \tau \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (1)$$

Период следования импульсов

$$T = 2t_{\text{н}} = 2\tau \ln \frac{1+\gamma}{1-\gamma} = 2\tau \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (2)$$

В данном случае скважность генерируемых импульсов  $Q$  равна 2. В том случае, если по заданию требуется получить генерируемые импульсы скважности  $\frac{T}{t_{\text{н}}} \neq 2$ , то цепь заряда конденсатора делают отличной от цепи разряда конденсатора (рис. 2).

Период следования импульсов в этом случае

$$T = C(R' + R'') \ln \frac{1+\gamma}{1-\gamma} = C(R' + R'') \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right),$$

где  $R'$  и  $R''$  - сопротивления зарядного и разрядного резисторов соответственно.

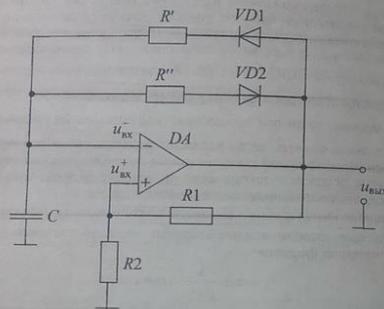


Рис. 2

Синфазный сигнал  $u_{\text{вх}}(t)$  определяется соотношением  $u_{\text{вх}}(t) = \gamma E$ , а максимальный дифференциальный сигнал  $u_{\text{вх}}'(t) = 2\gamma E$ .

При выборе интегральной схемы операционного усилителя (ИОУ) необходимо обратить особое внимание на тот факт, что во избежание выхода из строя ИОУ требуется выполнение условия  $2\gamma E \leq u_{\text{дифмакс}}$ , следовательно,  $\gamma \leq \frac{u_{\text{дифмакс}}}{2E}$ , где  $u_{\text{дифмакс}}$  - допустимый дифференциальный сигнал.

Например, при  $u_{\text{дифмакс}} = 10 \text{ В}$  и  $E = 15 \text{ В}$  в соответствии с формулой (1)  $t_{\text{н}} = \tau \ln 2$ , а допустимая величина  $\gamma \approx 0,3$ .

Выбор сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , с одной стороны, должен обеспечивать выполнение вышеуказанного условия для  $\gamma$ , а с другой стороны - обеспечивать требуемую по заданию длительность генерируемого импульса  $t_{\text{н}}$  по формуле (1).

Сумма сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  не является критической, её можно выбирать в довольно широких пределах (от 10 кОм до 1 МОм). Причём нужно обратить внимание, что выбранные значения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  не должны быть меньше минимального сопротивления нагрузки, регламентированного техническими условиями по применению ОУ -  $R_{\text{н мин}}$ . Однако изменение соотношения  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  влияет на период следования импульсов и длительность генерируемого импульса (см. формулы (1) и (2)).

Чем меньше  $\tau = RC$ , тем быстрее происходит перезаряд конденсатора и тем выше частота выходного сигнала.

Кроме того, следует иметь в виду, что при малых значениях постоянной времени  $RC$  может наблюдаться явление возбуждения паразитных колебаний. Для обеспечения устойчивости генерации коротких импульсов целесообразно использовать наиболее рациональный путь - уменьшение коэффициента связи по неинвертирующему входу  $\gamma$  при значениях  $RC$ , принимающих критическую величину, при которой возможно возбуждение паразитных колебаний. При этом стабильная работа мультивибратора наблюдается при значениях  $\gamma \ll 1$ .

Анализ неустойчивости длительности выходного импульса разрабатываемого релаксационного генератора в зависимости от разброса параметров навесных элементов  $R, R_1, R_2, C$  основывается на предположении идеальности свойств ИОУ и отношений величин его входного и выходного сопротивлений  $R_{\text{вх}}, R_{\text{вых}}$ .

Реальные значения  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  оказывают влияние на длительность и форму генерируемых импульсов. Однако это влияние незначительно, если сопротивления резисторов  $R, R_2$  удовлетворяют неравенствам:  $R_{\text{вх}} \gg R \gg R_{\text{вых}}, R_{\text{вх}} \gg R_2 \gg R_{\text{вых}}$ .

В современных ИОУ указанные неравенства могут быть выполнены одновременно, поскольку отношение  $\frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вых}}}$  у них порядка  $10^3 - 10^4$  и более.

Таким образом, считая, что применяемый ИОУ позволяет избежать влияния  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  на длительность импульса  $t_{\text{н}}$ , неустойчивость длительности импульса целесообразно оценить лишь по отношению к разбросу параметров навесных элементов  $R, R_1, R_2, C$ .

Анализ выполним, пользуясь обобщенной формулой  $t_n = \tau \ln(1 - \chi \xi)$ , где  $\tau = RC$ ;  $\xi = \gamma(1-\gamma)^{-1} = \frac{R_2}{R_1}$ , а параметр  $\chi$  учитывает отношение максимальных значений выходного напряжения ИОУ положительной и отрицательной полярностей, т. е.  $\chi = \frac{u_{\text{вых макс}}^+}{u_{\text{вых макс}}^-}$ .

Используя эту формулу, можно определить, что  $\frac{dt_n}{t_n} = \frac{d\tau}{\tau} + \frac{\chi d\xi + \xi d\chi}{(1 + \chi\xi) \ln(1 + \chi\xi)}$  и после перехода к конечным приращениям и относительным величинам ( $\delta t_n = \frac{\Delta t_n}{t_n}$ ,  $\delta C = \frac{\Delta C}{C}$  и т. д.) получим:

$$\delta t_n = \delta C + \delta R + \frac{\chi d\xi + \xi d\chi}{(1 + \chi\xi) \ln(1 + \chi\xi)}$$

Значения  $\chi$ ,  $\delta C$ ,  $\delta R$ ,  $\delta \xi$ ,  $\delta \chi$  определяются техническими характеристиками применяемых элементов. Значение  $\delta t_n$  даёт представление о стабильности длительности генерируемых импульсов.

Решая данное уравнение относительно  $\xi$  и соответственно  $\gamma$ , можно оценить влияние  $\gamma$  на стабильность длительности генерируемых импульсов.

Проведённый таким образом анализ даёт следующий вывод: уменьшение  $\gamma$  сопровождается ростом стабильности длительности генерируемых импульсов.

Длительности фронтов выходных импульсов в рассматриваемом мультивибраторе зависят от предельной скорости нарастания выходного напряжения  $V_{\text{вых макс}}$  используемой микросхемы операционного усилителя:

$$t_{\phi} \approx \frac{E}{V_{\text{вых макс}}} \quad (3)$$

Например, если скорость нарастания выходного напряжения, обеспечиваемая микросхемой  $V_{\text{вых макс}} = 10$  В/мкс, а  $E = 15$  В, то длительность фронтов импульса равна 1,5 мкс.

Амплитуда выходного импульса в первом приближении определяется значением напряжения источника питания  $U_{\text{м макс}} \approx 0,9E_{\text{п}}$ .

Для уменьшения выходного напряжения часто применяют схему со встречно включёнными стабилизаторами (рис. 3).

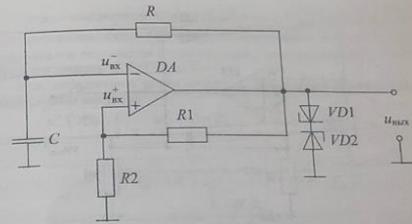
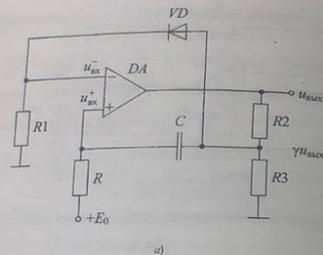


Рис. 3

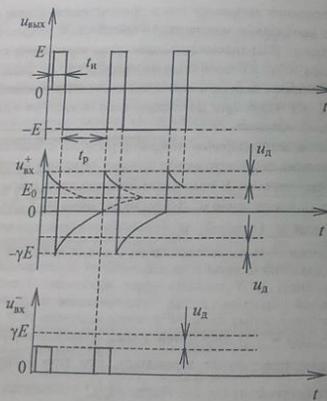
Для получения импульсов почти прямоугольной формы с большой скважностью необходимо использовать генератор, в котором резисторно-конденсаторная ВЗЦ (времязадающая цепь) подключена к неинвертирующему входу ИОУ, а в цепи отрицательной обратной связи последовательно с резистором верхнего плеча делителя включён диод (рис. 4, а). Делитель  $R_2, R_3$  необходим для ограничения синфазных и дифференциальных входных напряжений.

В режиме автоколебаний генератор работает следующим образом. В момент подключения источников питания выходное напряжение ИОУ начинает увеличиваться. В результате действия положительной обратной связи выходное напряжение  $u_{\text{вых}}(t)$  достигнет значения  $E$  (рис. 4, б).

При этом  $u_{\text{вх}}^+(t) = \gamma E$ ,  $u_{\text{вх}}^-(t) = \gamma E - u_{\text{д}}$ , где  $u_{\text{д}}$  - напряжение на открытом диоде. Так как сопротивление диода в начале процесса его отпирания достаточно велико, отрицательная обратная связь по инвертирующему входу ИОУ сначала будет небольшой и компенсируется положительной обратной связью. В дальнейшем сопротивление диода уменьшится, но к этому времени процесс перехода ИОУ в режим ограничения ( $u_{\text{вых}}(t) = +E$ ) закончится. После установления режима ограничения конденсатор начнёт заряжаться, при этом напряжение  $u_{\text{вх}}^+(t)$  уменьшается, стремится к  $E_0$ . Когда  $u_{\text{вх}}^+(t)$  сравняется с  $u_{\text{вх}}^-(t)$ , произойдёт лавинообразный процесс, который закончится переходом ИОУ в состояние, при котором  $u_{\text{вых}}(t) = -E$ ,  $u_{\text{вх}}^+(t) = -\gamma E - u_{\text{д}}$ ,  $u_{\text{вх}}^-(t) = 0$ .



а)



б) Рис. 4 18

Теперь конденсатор начнёт разряжаться, стремясь перезарядиться до напряжения  $-(\gamma E + E_0)$ . Когда уменьшающееся напряжение  $u_{\text{вх}}^-(t)$  отрицательной полярности достигнет нуля, снова произойдёт лавинообразный процесс и т. д.

При определении длительности  $t_n$  необходимо учесть, что при формировании импульса

$$u_{\text{вх}}^+(0) = \gamma E, \quad u_{\text{вх}}^+(\infty) = E_0, \quad \text{а } u_{\text{вх}}^-(t_n) = \gamma E - u_{\text{д}}$$

Тогда

$$t_n = \tau \ln \frac{E_0 - \gamma E}{E_0 - \gamma E + u_{\text{д}}} = -\tau \ln \left( 1 - \frac{u_{\text{д}}}{\gamma E - E_0} \right) \quad (4)$$

$$\tau = C \frac{R + R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

Если учесть, что  $u_{\text{д}} \ll \gamma E - E_0$ , то  $t_n \approx \frac{\tau u_{\text{д}}}{\gamma E - E_0}$ .

Для уменьшения  $t_n$  необходимо уменьшать напряжение  $E_0$ , но при этом ухудшается стабильность времени разряда  $t_p$ , поскольку крутизна времязадающего напряжения (ВЗН) при уменьшении  $E_0$  уменьшается.

Время разряда  $t_p$  определяется следующими значениями времязадающего напряжения при разряде:

$$u_{\text{вх}}^+(0) = -(\gamma E + u_{\text{д}}), \quad u_{\text{вх}}^+(\infty) = E_0, \quad u_{\text{вх}}^+(t_p) = 0, \quad \text{а}$$

$$t_p = \tau \ln \frac{E_0 + \gamma E + u_{\text{д}}}{E_0} \quad (5)$$

Чтобы ИОУ не вышел из строя, необходимо выполнять условия:

$$\gamma E \leq u_{\text{сф макс}}, \quad \gamma E \leq u_{\text{дф макс}}$$

Тогда

$$t_n = \frac{\tau u_{\text{д}}}{u_{\text{дф макс}} - E_0}$$

$$t_p = \tau \ln \frac{E_0 + u_{\text{дф макс}} + u_{\text{д}}}{E_0} \quad (6)$$

а скважность последовательности импульсов

$$Q = 1 + \frac{u_{\text{дф макс}} - E_0}{u_{\text{д}}} \ln \frac{E_0 + u_{\text{дф макс}} + u_{\text{д}}}{E_0} \quad (7)$$

При проектировании мультивибраторов в ждущем режиме используют схемы с различным включением времязадающей цепи (ВЗЦ). Можно включить ВЗЦ между выходом ИОУ и его неинвертирующим входом (ВЗЦ). Можно включить ВЗЦ между выходом ИОУ и его инвертирующим входом. Схема мультивибратора в ждущем режиме с ВЗЦ, включенной между выходом ИОУ и его инвертирующим входом, изображена на рис. 5, а и работает следующим образом. В исходном состоянии, до подачи запускающего импульса,  $u_{вх}^+(t) \approx 0$ ,  $u_{вх}^-(t) = -\gamma E$ , где  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ .

Потому  $u_{вых}(t) = +E$ , а конденсатор  $C$  через диод  $VD1$  зарядился до напряжения  $\gamma_1 E$ , где  $\gamma_1 = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$ . Делитель  $R_3, R_4$  служит для уменьшения входного напряжения.

При подаче запускающего импульса с амплитудой  $u_{зап}(t) > \gamma E$  (рис. 5, б) выходное напряжение ИОУ начинает уменьшаться. Благодаря положительной обратной связи процесс уменьшения напряжения  $u_{вых}(t)$  будет лавинообразным, в результате чего станет равным  $-E$ , а конденсатор начнет перезарядиться. Входное напряжение  $u_{вх}^+(t)$  при этом изменяется по закону  $u_{вх}^+(t) = -2\gamma_1 E e^{-\frac{t}{\tau}}$ , где  $\tau = C \left[ R + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right]$ .

Диод  $VD1$  при этом закрыт. Длительность генерируемого импульса отрицательной полярности определяется временем, в течение которого напряжение  $u_{вх}^+(t)$ , уменьшаясь, достигнет уровня  $-\gamma E$ :

$$u_{вх}^+(t_n) = -2\gamma_1 E e^{-\frac{t_n}{\tau}} = -\gamma E,$$

откуда

$$t_n = \tau \ln \frac{2\gamma_1}{\gamma}. \quad (8)$$

При  $u_{вх}^+(t) = -\gamma E$  выходное напряжение  $u_{вых}(t)$  начинает возрастать с большой скоростью, обусловленной положительной обратной связью, стремясь к значению  $+E$ . Перезарядившийся конденсатор начинает заряжаться через диод, стремясь зарядиться до напряжения  $\gamma_1 E$ . Постоянная времени цепи заряда конденсатора  $\tau_3 = \frac{C R_3 R_4}{R_3 + R_4}$ , если пренебречь сопротивлением открытого диода.

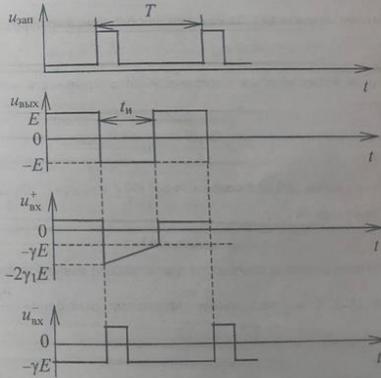
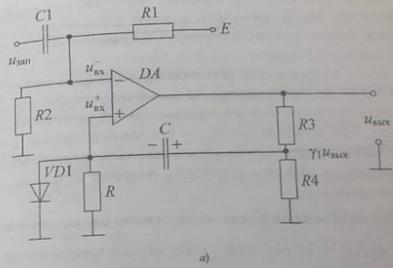


Рис. 5

Время восстановления исходного состояния генератора  $t_n$  определяется постоянной времени  $\tau_3$  и равно длительности переходного процесса заряда конденсатора, которая, как известно из курса ТОЭ, при погрешности  $< 0,5\%$  равна  $5\tau_3$ , т. е.  $t_n = 5\tau_3$ .

Для нормальной работы генератора необходимо выполнение условия  $t_n \leq T - t_n$ , где  $T$  - период следования запускающих импульсов.

Если требуется получить выходные импульсы положительной полярности, то в схеме на рис. 5, а необходимо полярность включения диода  $VD1$  и полярность напряжения источника питания делителя  $R_1, R_2$  изменить на обратную и запустить генератор импульсами отрицательной полярности.

Дифференциальное входное напряжение рассматриваемого генератора  $u_{дф}(t) = -2\gamma_1 E e^{-\frac{t}{\tau}} + \gamma E$ , а его максимальное значение составляет  $(2\gamma_1 - \gamma)E$ .

Чтобы не вывести ИОУ из строя, необходимо выполнить условия:

$$(2\gamma_1 - \gamma)E \leq u_{дф \text{ макс}}, \quad \gamma E \leq u_{сф \text{ макс}}.$$

Тогда в соответствии с формулой (8) длительность импульса определится:

$$t_n = \tau \ln \frac{2\gamma_1 E}{\gamma E} = \tau \ln \frac{1 + u_{дф \text{ макс}}}{u_{сф \text{ макс}}}. \quad (9)$$

Если учесть, что для современных ИОУ  $u_{дф \text{ макс}} = u_{сф \text{ макс}}$  [8] (см. графу 7 приложения 2), то

$$t_n = \tau \ln 2. \quad (10)$$

Для повышения стабильности длительности импульса необходимо выбирать ИОУ с максимальными значениями отношений  $\frac{u_{дф \text{ макс}}}{E}$  и

$$\frac{u_{дф \text{ макс}} + u_{сф \text{ макс}}}{2E}.$$

Схема мультивибратора в ждущем режиме с ВЗЦ, включенной между выходом ИОУ и его инвертирующим входом, изображена на рис. 6, а.

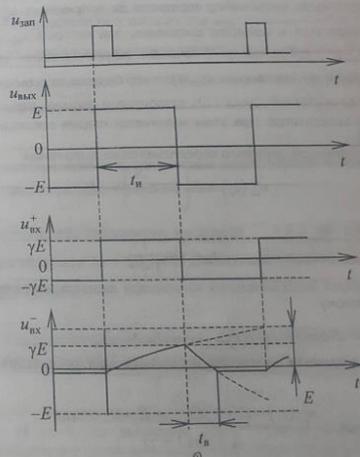
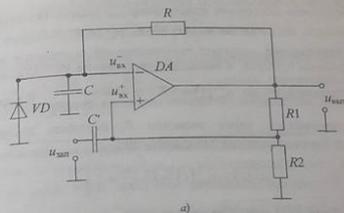


Рис. 6

В исходном состоянии конденсатор  $C$ , зашунтированный диодом  $VD1$ , разряжен, напряжение  $u_{\text{вых}}(t) = -E$ ,  $u_{\text{вх}}^+(t) = -\gamma E$  (рис. 6, б). При лавинообразном процессе, и выходное напряжение ИОУ становится равным  $+E$ , соответственно  $u_{\text{вх}}^+(t) = \gamma E$ , а  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Конденсатор  $C$  начинает заряжаться через резистор  $R$ , стремясь зарядиться до напряжения  $E$  в соответствии с выражением:

$$u_C(t) = u_{\text{вх}}^+(t) = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где  $\tau = RC$ . Диод  $VD1$  при этом закрыт.

Фактически конденсатор зарядится до напряжения  $u_{\text{вх}}^+(t) = \gamma E$  и ИОУ возвратится в исходное состояние, при котором  $u_{\text{вых}}(t) = -E$ , а  $u_{\text{вх}}^+(t) = -\gamma E$ . Конденсатор  $C$  начинает перезаряжаться, стремясь перезарядиться до напряжения  $u_{\text{вых}}(t) = -E$ . Однако по окончании отрезка времени  $t_n$ ,  $u_{\text{вх}}^-(t) = 0$ , диод  $VD1$  откроется, и процесс дальнейшего перезаряда прекратится. При этом закончится стадия восстановления генератора.

Длительность импульса определяется из выражения

$$u_{\text{вх}}^-(t_n) = E \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{\tau}} \right) = \gamma E,$$

откуда

$$t_n = \tau \ln \frac{1}{1 - \gamma}. \quad (11)$$

Во время восстановления генератора входное напряжение изменяется по закону

$$u_{\text{вх}}^-(t) = (1 + \gamma) E e^{-\frac{t}{\tau}} - E,$$

критерием окончания процесса восстановления генератора является условие

$$u_{\text{вх}}^-(t_n) = (1 + \gamma) E e^{-\frac{t_n}{\tau}} - E = 0, \text{ откуда} \\ t_n = \tau \ln(1 + \gamma). \quad (12)$$

Нормальная работа генератора обеспечивается при выполнении условия  $t_n \leq T - t_n$ , откуда  $T \geq \tau \ln \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma}$ .

Для генерирования импульсов отрицательной полярности в схеме генератора на рис. 6, а достаточно изменить полярность включений диода на обратную и запускать генератор импульсами положительной полярности.

Дифференциальный и синфазный сигналы, как видно из рис. 6, б, связаны соотношением  $u_{\text{дф}} = u_{\text{сф}} - \gamma E$ . Чтобы исключить возможность выхода из строя ИОУ, требуется выполнить условия:  $\gamma E \leq u_{\text{сф макс}}$ ,

$$\gamma E \leq u_{\text{дф макс}}, \text{ откуда } \gamma \leq \frac{u_{\text{дф макс}}}{E} \text{ или } \gamma \leq \frac{u_{\text{сф макс}}}{E}.$$

Например, для ИОУ, у которого  $u_{\text{дф макс}} = u_{\text{сф макс}} = 10 \text{ В}$ ,  $E = 15 \text{ В}$ ,

$$\gamma_{\text{доп}} = \frac{2}{3}, \text{ а длительность импульса согласно формуле (11) } t_n = \tau \ln 3.$$

В этом случае длительность генерируемого импульса зависит только от постоянной времени  $\tau$ .

В качестве примера, рассчитаем автоколебательный мультивибратор, выделив при этом основные моменты.

Дано: период следования импульсов  $T = 0,1 \text{ мс}$ ; длительность выходного импульса  $t_n = 50 \text{ мкс}$ ; длительность фронта выходного импульса  $t_f \leq 0,5 \text{ мкс}$ .

1. Осуществляем выбор схемы. Для этого находим числовое значение скажности последовательности импульсов  $Q$ :

$$Q = \frac{T}{t_n} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 2,$$

так как  $Q = 2$ , то выбираем самое простое схемное решение мультивибратора с одной времязадающей цепью (см. рис. 1, а).

2. Осуществляем выбор операционного усилителя. Определяем по заданной длительности фронта минимальную скорость изменения выходного напряжения, которую должен иметь выбираемый ОУ:

$$V_{\text{н макс}} \geq \frac{E}{t_{\phi}}$$

(напомним, что амплитуда импульса здесь определяется как положительный или отрицательный период напряжения от 0 до  $\pm E$ ). Принимая, что  $E = \pm 12$  В, имеем:

$$V_{\text{н макс}} \geq \frac{12}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 24 \text{ В/мкс.}$$

Из приложения 2 находим, что подходящими свойствами обладают ОУ типов: К140УД10, К140УД11, К154УД2, К154УД3, К574УД1. Выбираем К140УД11, для которого  $V_{\text{н макс}} \geq 30$  В/мкс и выписываем все электрические параметры.

3. Производим расчёт сопротивлений цепей ООС и ПОС. Для данного ОУ  $R_{\text{н мин}} \geq 2$  кОм, а  $R_{\text{вх}} > 10^3$  кОм. Так как должно выполняться условие  $R_{\text{вх}} \gg (R_1, R_2, R) \gg R_{\text{н мин}}$ , то выбираем сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R$  по 10 кОм и рассчитываем сопротивление резистора  $R_2$ . Находим предварительно значение  $\gamma_{\text{макс}}$ :

$$\gamma_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{сф макс}}}{2E}$$

Для ОУ обычно выполняется условие  $U_{\text{сф макс}} = U_{\text{дф макс}}$ , поэтому

$$\gamma_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{сф макс}}}{2E} = \frac{11,5}{2 \cdot 12} \approx 0,5.$$

Выбираем  $\gamma = 0,5$ ,  $\gamma_{\text{макс}} = 0,5$ ,  $0,5 = 0,25$  и находим сопротивление резистора  $R_2$  из соотношения  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

$$\text{откуда } R_2 = \frac{\gamma R_1}{1 - \gamma} = \frac{0,25 \cdot 10 \cdot 10^3}{1 - 0,25} = 3,34 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из приложения 3, воспользовавшись строкой 1, выбираем числовое значение сопротивления  $R_2 - 3,3$  кОм. Уточняем значение  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{3,3}{10 + 3,3} = 0,248.$$

4. Рассчитываем ёмкость времязадающего конденсатора  $C$  из формулы

$$t_{\text{н}} = RC \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right), \text{ т. е.}$$

$$C = \frac{t_{\text{н}}}{R \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)} = \frac{50 \cdot 10^{-9}}{10^4 \cdot \ln \left( 1 + \frac{2 \cdot 3,3 \cdot 10^3}{10^4} \right)} =$$

$$= 9,85 \text{ нФ} = 9,85 \cdot 10^{-3} \text{ мкФ.}$$

Из приложения 3 выбираем номинальное значение ёмкости  $C = 0,01$  мкФ.

5. Уточняем временные параметры генерируемой последовательности.

Период повторения импульсов

$$T = 2RC \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) = 2 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \ln \left( 1 + \frac{2 \cdot 3,3 \cdot 10^3}{10^4} \right) = 101,4 \text{ мкс.}$$

соответственно длительность импульсов  $t_{\text{н}}$ :

$$t_{\text{н}} = \frac{T}{2} = \frac{101,4}{2} = 50,7 \text{ мкс.}$$

6. Оценим влияние разброса числовых значений элементов схемы на временные параметры генерируемых импульсов, полагая, что все навесные элементы имеют 5 %-й разброс числовых значений, а изменения параметров ОУ учитывать не будем. Определим максимально возможное относительное отклонение  $T$  и  $t_{\text{н}}$  от заданных исходя из того, что соответствующие отклонения  $R$  и  $C$  коррелированы. Получим максимальную длительность импульса из соотношения

$$t_{\text{н макс}} = R_{\text{макс}} C_{\text{макс}} \ln \left( 1 + \frac{2R_{2\text{макс}}}{R_{1\text{мин}}} \right);$$

$$t_{\text{н макс}} = 10,5 \cdot 10^3 \cdot 10,5 \cdot 10^{-9} \ln \left( 1 + \frac{2 \cdot 3,46 \cdot 10^3}{9,5 \cdot 10^3} \right) = 60,3 \text{ мкс.}$$

27

и минимальную длительность импульса

$$t_{\text{н мин}} = R_{\text{мин}} C_{\text{мин}} \ln \left( 1 + \frac{2R_{2\text{мин}}}{R_{1\text{макс}}} \right);$$

$$t_{\text{н мин}} = 9,5 \cdot 10^3 \cdot 9,5 \cdot 10^{-9} \ln \left( 1 + \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^3}{10,5 \cdot 10^3} \right) = 42,4 \text{ мкс.}$$

Соответственно  $T_{\text{макс}} = 2t_{\text{н макс}} = 120,6$  мкс,

$$T_{\text{мин}} = 2t_{\text{н мин}} = 84,8 \text{ мкс.}$$

Таким образом, максимально возможное относительное отклонение  $t_{\text{н}}$  составляет

$$\delta t_{\text{н}} = \frac{|\Delta t_{\text{н макс}}|}{t_{\text{н задан}}}$$

где  $|\Delta t_{\text{н макс}}| = \max |\Delta t_{\text{н задан}} - t_{\text{н}}|$ .

В нашем случае

$$\delta t_{\text{н}} = \frac{|t_{\text{н задан}} - t_{\text{н макс}}|}{t_{\text{н задан}}} = \frac{|50 - 60,3|}{50} = 0,206 = 20,6 \%.$$

На основании проведённых расчётов затем строятся временные диаграммы последовательностей импульсов напряжения на выходе мультивибратора, на неинвертирующем и инвертирующем входах, причём на графиках должны быть приведены расчётные временные параметры длительности импульсов и их периода следования, а не заданные.

28

Приложение 1

Образец оформления титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
САМАРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

Кафедра теоретических основ электротехники,  
автоматики и электроники

Пояснительная записка к курсовому проекту

по дисциплине

"ЭЛЕКТРОНИКА"

Тема курсового проекта

"РАСЧЕТ МУЛЬТИВИБРАТОРА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ"

Вариант № 12

Выполнил: Иванов И. Ю.  
Шифр 00-АТС-6065  
Проверил: Петров В. В.

САМАРА 2006

29

ТАБЛИЦА ПАРАМЕТРОВ ОУ

Тип	E, В	I <sub>полн</sub> , МА	U <sub>нак-в</sub> , В	R <sub>н.контр</sub> , КОМ	K <sub>н</sub>	U <sub>факт</sub> , В	I <sub>кв</sub> , МА	ΔI <sub>кв</sub> , МА	R <sub>кв</sub> , МОМ	U <sub>см</sub> , МВ	ΔU <sub>ср</sub> ΔT, мВ/°С	K <sub>в</sub> вкл. В/квс	f <sub>г</sub> МГц	Внутр. коррек.	Примечание
K140УД5А	±12	-	-	-	5	±6,5	5000	1000	0,05	10	50	6	14	-	Ср. кл. Точности
K140УД5Б	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Общ. прим.
K140УД5В	-	-	-	-	1000	-	10000	5000	0,003	5	10	-	-	-	Прецизионный
K140УД6	±15	4	±11	1	30000	±15	30	25	1	10	20	2	1,0	+	Общ. прим.
K140УД7	±15	2,8	±11,5	0,5	50000	±11	200	50	-	4	6	10	1	0,8	+
K140УД8	±15	9	±10	0,5	50000	±12	0,2	0,15	1000	20	50	5	1,0	+	Общ. прим.
K140УД9	±12	8	±10	1	35000	±6	100	-	0,3	5	35	0,4	5	-	Ср. кл. Точности
K140УД10	±15	10	±12	2	50000	±6	500	150	0,4	-	50	50	15	-	Прецизионный ОУ общ. прим.
K140УД11	±15	10	±12	2	25000	±11,5	500	200	1000	10	70	30	15	-	Быстродействие ОУ общ. прим.
K140УД12	±12	0,03	±2	5	50000	±1,2	7,5	3	50	5	3	2	0,3	+	Микроинтегральный ОУ с программируемыми параметрами
K140УД13	±15	0,17	±12	10	100000	±12	50	15	5	-	5	2	0,005	+	Предусилитель пост. тока ИДТ-интегрального типа с регулируемым коэффициентом усиления
K140УД14	±15	0,6	±10	1	50000	±6	2	0,2	30	0,2	15	-	0,5	-	Прецизионный ОУ с низким уровнем дрейфа

Тип	E, В	I <sub>полн</sub> , МА	U <sub>нак-в</sub> , В	R <sub>н.контр</sub> , КОМ	K <sub>н</sub>	U <sub>факт</sub> , В	I <sub>кв</sub> , МА	ΔI <sub>кв</sub> , МА	R <sub>кв</sub> , МОМ	U <sub>см</sub> , МВ	ΔU <sub>ср</sub> ΔT, мВ/°С	K <sub>в</sub> вкл. В/квс	f <sub>г</sub> МГц	Внутр. коррек.	Примечание
K153УД1А	±15	6	±10	2	15000	±8	1500	500	0,2	7,5	30	0,2	1	-	Общ. прим. Один из первых стеч. ОУ
K153УД1Б	±15	6	±9	2	10000	±8	2000	500	0,3	10	100	0,5	1	-	Средн. класса
K153УД2	±15	6	±10	2	20000	±12	1500	500	0,3	10	100	0,5	1	-	Средн. класса
K153УД3	±15	3,6	±11	2	25000	±8	200	50	0,4	2	15	-	1	-	Микроинтегральный ОУ с малым потребл. ОУ с
K153УД4	±6	0,8	±4	1	5000	±5	400	150	0,2	5	50	-	1	-	Прямое усиление дрейфа шума
K153УД5	±15	3,5	±10	2	125000	±13,5	100	20	1	2,5	5	-	0,3	-	Среднего класса
K153УД6	±15	3	±10	2	50000	±12	75	10	0,3	2	15	-	1	+	Быстродействие ОУ
K154УД1	±15	0,12	±12	2	200000	±10	20	10	-	3	30	10	1	+	Быстродействие с переменным усилит. 3 вкл.
K154УД2	±15	6	±10	2	100000	±10	100	20	-	3	20	60	15	-	Быстродействие 0,5 вкл.
K154УД3	±15	7	±9,5	2	80000	±10	225	30	-	9	30	80	15	-	Быстродействие 0,5 вкл. с малым уровнем дрейфа шума
K284УД1	±9	2,5	±5	5	20000	±6	1	-	5	10	50	-	0,4	-	ОУ с полярным транзистором на входе и малым уровнем шума
K544УД1	±15	3,5	±10	2	50000	±10	0,15	0,05	10	15	20	-	1	+	Широкополосный ОУ
K544УД2	±15	7	±10	2	20000	±10	0,1	0,1	10	30	50	20	15	+	малый дрейф
K155УД1	±15	5	±10	2	500000	±13,5	100	20	1	1,5	5	-	0,8	-	Широкополосный ОУ
K374УД1	±15	6	±10	1	50000	±10	0,5	0,2	10000	50	100	90	10	+	Быстродействие ОУ

Приложение 3  
Шкала номинальных значений сопротивлений резисторов

Класс точности	Шкала значений сопротивлений, Ом																							
	1,0	1,1	1,5	1,6	2,3	2,4	3,3	3,6	4,7	5,1	6,8	7,5	1,2	1,3	1,8	2,0	2,7	3,0	3,9	4,3	5,6	6,2	8,2	9,1
1 ±5%	1,0	1,1	1,5	1,6	2,3	2,4	3,3	3,6	4,7	5,1	6,8	7,5	1,2	1,3	1,8	2,0	2,7	3,0	3,9	4,3	5,6	6,2	8,2	9,1
2 ±10%	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	15	22	33	47	68	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200	3300	4700	6800
3 ±20%	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	15	22	33	47	68	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200	3300	4700	6800

Значение сопротивления резисторов определяется умножением соответствующего числа из таблицы на коэффициент 10<sup>k</sup>, где k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Шкала номинальных значений емкостей конденсаторов

Класс точности	Шкала значений емкостей, пФ																							
	1,0	1,1	1,5	1,6	2,3	2,4	3,3	3,6	4,7	5,1	6,8	7,5	1,2	1,3	1,8	2,0	2,7	3,0	3,9	4,3	5,6	6,2	8,2	9,1
1 ±5%	1,0	1,1	1,5	1,6	2,3	2,4	3,3	3,6	4,7	5,1	6,8	7,5	1,2	1,3	1,8	2,0	2,7	3,0	3,9	4,3	5,6	6,2	8,2	9,1
2 ±10%	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	15	22	33	47	68	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200	3300	4700	6800
3 ±20%	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	10	15	22	33	47	68	100	150	220	330	470	680	1000	1500	2200	3300	4700	6800

Временные диаграммы напряжений мультивибратора

