

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ИЗУЧЕНИЕ НАГРУЖЕННОГО И НЕНАГРУЖЕННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ РЭС

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний для студентов Самарского университета, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств

Составители: *В.А. Зеленский,*
К.И. Сухачев

САМАРА
Издательство Самарского университета
2020

УДК 621.3(075)
ББК 32.844я7

Составители: *В.А. Зеленский, К.И. Сухачев*

Рецензент канд. техн. наук, доц. К. Е. В о р о н о в

Изучение нагруженного и ненагруженного резервирования РЭС: методические указания / составители: *В.А. Зеленский, К.И. Сухачев*. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 20 с.: ил.

Излагаются основные принципы и методы резервирования для обеспечения надежности РЭС, рассматриваются области их применения. Приводятся примеры расчета надежности параллельно последовательных схем надежности и подробное описание лабораторных стендов для изучения нагруженного и ненагруженного резервирования РЭС.

Методические указания могут применяться при проведении лабораторных работ и практических занятий по дисциплинам «Теоретические основы конструирования и надежности», «Методы обеспечения надежности РЭС».

Предназначены для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств.

Методические указания разработаны на кафедре «Конструирование и технология электронных систем и устройств».

УДК 621.3(075)
ББК 32.844я7

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные понятия и определения.....	4
2. Расчет параллельно-последовательных схем надежности	7
3. Описание лабораторного стенда	11
4. Порядок выполнения лабораторной работы	18
Контрольные вопросы	19
Список использованной литературы	19

1. Основные понятия и определения

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 резервированием называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Таким образом, резервирование – это эффективный метод повышения надежности объекта путем введения избыточности. В свою очередь, избыточность – это дополнительные средства и (или) возможности, сверхминимально необходимые для выполнения объектом заданных функций. Введением избыточности обеспечивается нормальное функционирование объекта после возникновения отказа в его элементах.

Методы резервирования (рис. 1) разделяют по виду резервирования, способу соединения элементов, кратности резервирования, способу включения резерва, режиму его работы и восстанавливаемости.

К дополнительным средствам и возможностям при резервировании относятся элементы, введенные в структуру системы в качестве резервных, функциональные и информационные средства и возможности, использование избытка времени и запасов нагрузочной способности.

Функциональное резервирование – это резервирование, при котором заданная функция может выполняться различными способами и техническими средствами.

Информационное резервирование – это резервирование с применением избыточности информации.

Временное резервирование связано с использованием резервов времени. При этом предполагается, что на выполнение объектом требуемой работы отводится время, которое заведомо больше минимально необходимого.

Нагрузочное резервирование – это резервирование с применением нагрузочных резервов. Оно заключается в обеспечении оптимальных запасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки.

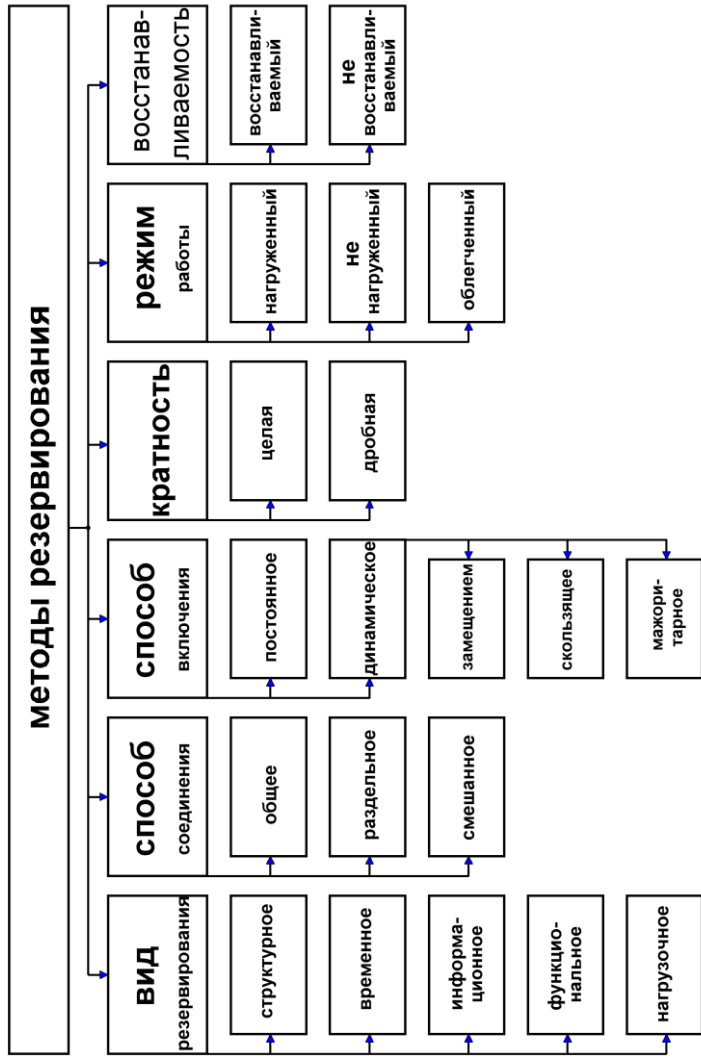


Рис. 1. Виды резервирования

Часто динамическое резервирование представляет собой **резервирование замещением**, при котором функции основного элемента в случае его отказа передаются резервному. Резервирование с включением резерва замещением обладает следующими преимуществами:

- не нарушает режима работы резерва;
- сохраняет в большей степени надежность резервных элементов, так как при работе основных элементов они находятся в нерабочем состоянии;
- позволяет задействовать резервный элемент в цепях на несколько основных элементов.

Существенным недостатком резервирования замещением является необходимость наличия переключающих устройств. При раздельном резервировании число переключающих устройств равно числу основных элементов, что может значительно понизить надежность всей системы. Поэтому резервировать замещением целесообразно крупные узлы или всю систему, при этом надежность переключающих устройств должна быть достаточно высокой.

Распространенным видом резервирования замещением является *скользящее резервирование*, при котором группа основных элементов системы резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

В зависимости от режима работы резервных элементов до отказа основного элемента различают следующие виды резерва:

- **нагруженный** (один или несколько резервных элементов находятся в режиме основного элемента);
- **облегченный** (один или несколько резервных элементов находятся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент);
- **ненагруженный** (один или несколько резервных элементов находятся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента).

Элементы нагруженного резерва имеют тот же уровень надежности (безотказности, долговечности и сохраняемости), что и резервируемые ими основные элементы объекта, поскольку ресурс резервных элементов расходуется так же, как и основных.

Элементы облегченного резерва обладают более высоким уровнем надежности, так как интенсивность расхода ресурса резервных элементов до момента включения их вместо отказавших элементов значительно ниже, чем у основных. При ненагруженном резерве ресурс резервных элементов начинает расходоваться практически только с момента включения их вместо отказавших элементов.

По способу резервирования объекта (элемента объекта) различают резервирование *общее* и *раздельное*.

При общем резервировании объект резервируется в целом, вместо одного объекта предусматривается одновременная эксплуатация двух или более объектов, однотипных или аналогичных по выполняемым функциям. Этот способ достаточно простой; он широко применяется при резервировании наиболее ответственных систем.

При раздельном резервировании резервируются отдельные элементы объекта или группы элементов, которые обычно встроены в объект; раздельно могут резервироваться как отдельные элементы системы, так и достаточно крупные ее части (блоки).

Динамическое резервирование может быть раздельным и общим, позволяет использовать резервные элементы не только в нагруженном, но и в облегченном и ненагруженном резерве, что, в свою очередь, позволяет сохранить ресурс резервных элементов, повысить надежность электрической системы в целом и уменьшить расход энергии.

2. Расчет параллельно-последовательных схем надежности

Удобной графической интерпретацией последовательно-параллельных структур являются блок-схемы надежности или RBD (reliability block diagram). Эта визуальная модель представляет надежность взаимосвязи между компонентами и не всегда

соответствует реальному соединению элементов системы. Расчет показателей надежности в рамках этих моделей может осуществляться различными методами – формульными, логико-вероятностными, интегральными соотношениями, статистическим моделированием. В данной работе будет рассмотрен простейший метод расчета показателей надежности невосстанавливаемых последовательно-параллельных систем, основанный на использовании соотношений теории вероятностей, полученных из теорем полной вероятности и теорем сложения и умножения вероятностей. Метод ориентирован на произвольное распределение случайного времени возникновения отказов элементов. Ограничимся рассмотрением экспоненциального случая. Для одного «экспоненциального» элемента формулы основных показателей безотказности сведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные показатели безотказности элемента с экспоненциально распределенной наработкой до отказа

Наименование показателя	Аналитическое выражение
Вероятность безотказной работы на интервале $(0, t)$	$P(t) = e^{-\lambda t}$
Вероятность отказа на интервале $(0, t)$	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Плотность распределения случайной наработки до отказа	$f(t) = Q'(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
Интенсивность отказов	λ
Средняя наработка до отказа	$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$

Последовательное соединение элементов представляет собой избыточную структуру без резервирования. Отказ каждого из элементов приводит к отказу системы в целом. Блок-схема надежности последовательного соединения n элементов представлена на рис. 2.

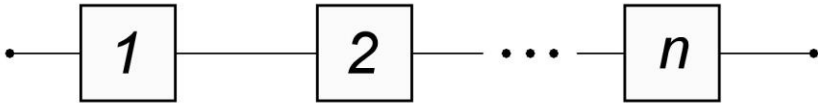


Рис. 2. Последовательное соединение элементов

Вероятность безотказной работы $P(t)$ для последовательного соединения определяется как произведение вероятностей безотказной работы ее элементов $p_i(t)$:

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t). \quad (1)$$

Для экспоненциального случая:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \dots e^{-\lambda_n t} = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} = e^{-\Lambda t}. \quad (2)$$

Параллельное соединение элементов представляет собой избыточную структуру с нагруженными (активными) резервными элементами, показанную на блок-схеме (рис. 3).

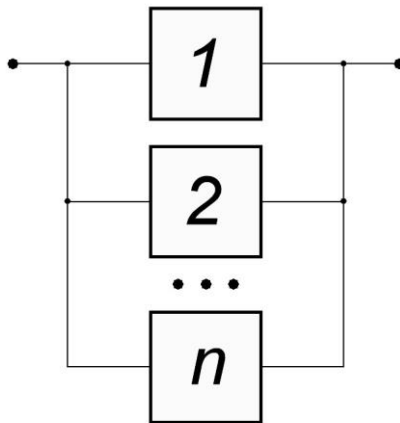


Рис. 3. Параллельное соединение элементов

Одновременно работают все n элементов. Система работоспособна, пока работает хотя бы один элемент. Отказом системы является отказ всех ее элементов. Тогда вероятность отказа систе-

мы $Q(t)$ будет равна произведению вероятностей отказа ее элементов $q_i(t)$:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t). \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)). \quad (4)$$

Вероятность безотказной работы для равнонадежных элементов:

$$P(t) = 1 - (1 - p_i(t))^n = 1 - (q(t))^n. \quad (5)$$

Реальные высоконадежные системы обычно представляют собой совокупность произвольно соединенных резервированных схем. Такие системы называют сложными последовательно-параллельными системами. Для расчета показателей безотказности таких систем применяется процедура последовательного расчета звеньев по приведенным выше формулам и замене резервированного звена одним элементом с известной вероятностью безотказной работы. Эта процедура повторяется до тех пор, пока система не будет сведена к известной последовательно-параллельной конфигурации. На рис. 4 представлена простейшая последовательно-параллельная схема, состоящая из участка с нагруженным резервным включением блоков B и C , и блока A , включенного без резервирования.

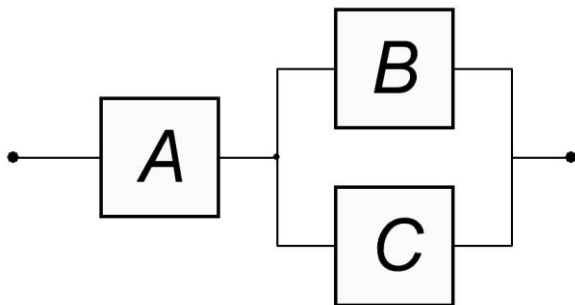


Рис. 4. Последовательно-параллельная схема

Для расчета надежности данной схемы необходимо выполнить две операции. На первом этапе вычисляется вероятность безотказной работы параллельного участка: $P_{BC}(t) = P_B(t) + P_C(t) - P_B(t)P_C(t)$. После чего схема замещается неизбыточной структурой из двух элементов, вероятность безотказной работы которой равна произведению вероятности безотказной работы участка A и участка BC : $P(t) = P_A(t)P_{BC}(t) = P_A(t)(P_B(t) + P_C(t) - P_B(t)P_C(t))$.

3. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа по изучению нагруженного и ненагруженного резервирования проводится на стенде, в состав которого входят основной и резервный блоки питания, а также преобразователь напряжения в частоту ПНЧ в роли нагрузки зарезервированной системы питания. В состав стенда также включены устройства коммутации, позволяющие переводить его в схему с постоянным – нагруженным или в схему с динамическим – ненагруженным резервированием (рис. 5 и рис. 6 соответственно).

В качестве нагрузки был выбран ПНЧ для возможности наглядно оценить девиацию частоты выходного сигнала при моделировании неисправностей (*постепенный или внезапный отказы*) в основном блоке питания. Частотный выход позволяет оценить нестабильность напряжения питания генератора при переключении на резервный комплект. Поэтому для выполнения лабораторной работы одного встроенного вольтметра недостаточно, и к выходным клеммам стенда необходимо подключить запоминающий осциллограф.

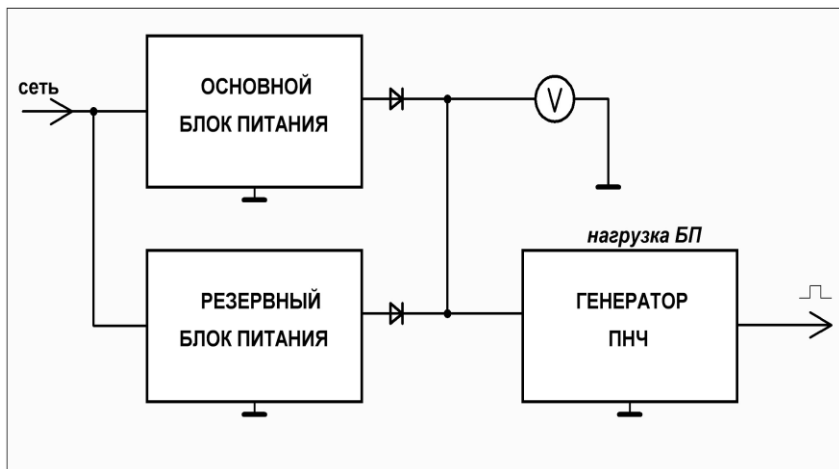


Рис. 5. Структурная схема лабораторного стенда в режиме нагруженного резервирования

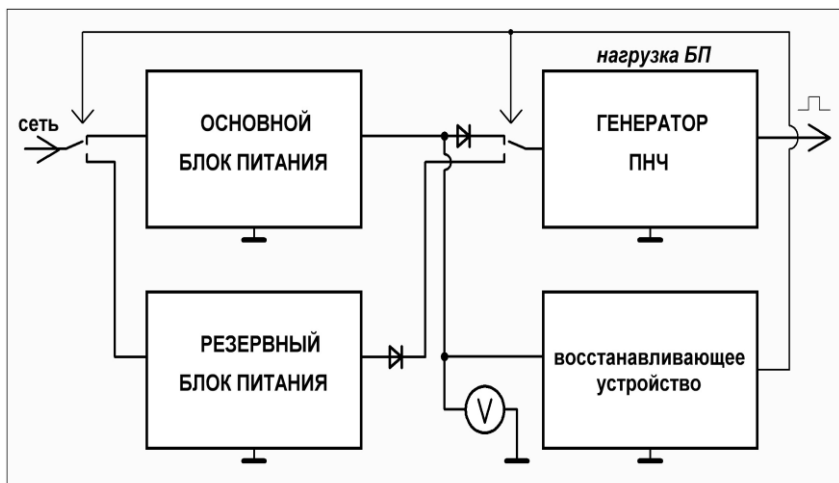


Рис. 6. Структурная схема лабораторного стенда в режиме ненагруженного резервирования

Рассмотрим более детально схему нагруженного резерва (рис. 5). Схемы основного и резервного блока питания одинаковы и представлены на рис. 7. Из схемы видно, что блок питания – это импульсный двухтактный преобразователь, построенный по топологии двухтактной импульсной схемы (push pull). В качестве генератора выступает ШИМ ИМС **K1156EY2** (аналог UC3825), которая напрямую управляет силовыми ключами. Ключи, поочередно открываясь, коммутируют ток в первичной обмотке понижающего ВЧ трансформатора, напряжение с которого выпрямляется одноактным выпрямителем со средней точкой и фильтруется LC-фильтром. Обратная связь подключается к инвертирующему входу усилителя ошибки ШИМ контроллера. Для имитации постепенного отказа в цепь обратной связи введена регулировка выходного напряжения блока питания. Постепенное понижение выходного напряжения может быть вызвано, например, старением электролитических конденсаторов входного фильтра, или изменением номиналов элементов в цепях обвязки ШИМ-контроллера. Отказы такого рода не сразу приводят к выходу блока питания из строя, но могут ограничить выходную мощность, увеличить уровень пульсации выходного напряжения, а при дальнейшей эксплуатации послужить причиной возникновения внезапного отказа.

Для имитации внезапного отказа в силовую часть блока питания встроены выключатель, который резко размыкает цепь. Таким образом, могут имитироваться любые внезапные отказы, приводящие к полному выходу блока из строя. Примером таких неисправностей может являться пробой выходных транзисторов (который, как правило, является следствием предшествующего отказа, например в схеме ШИМ-контроллера), либо пробой диодов выходного выпрямителя. Причиной внезапного отказа также может являться обрыв проводников в блоке или на печатной плате.

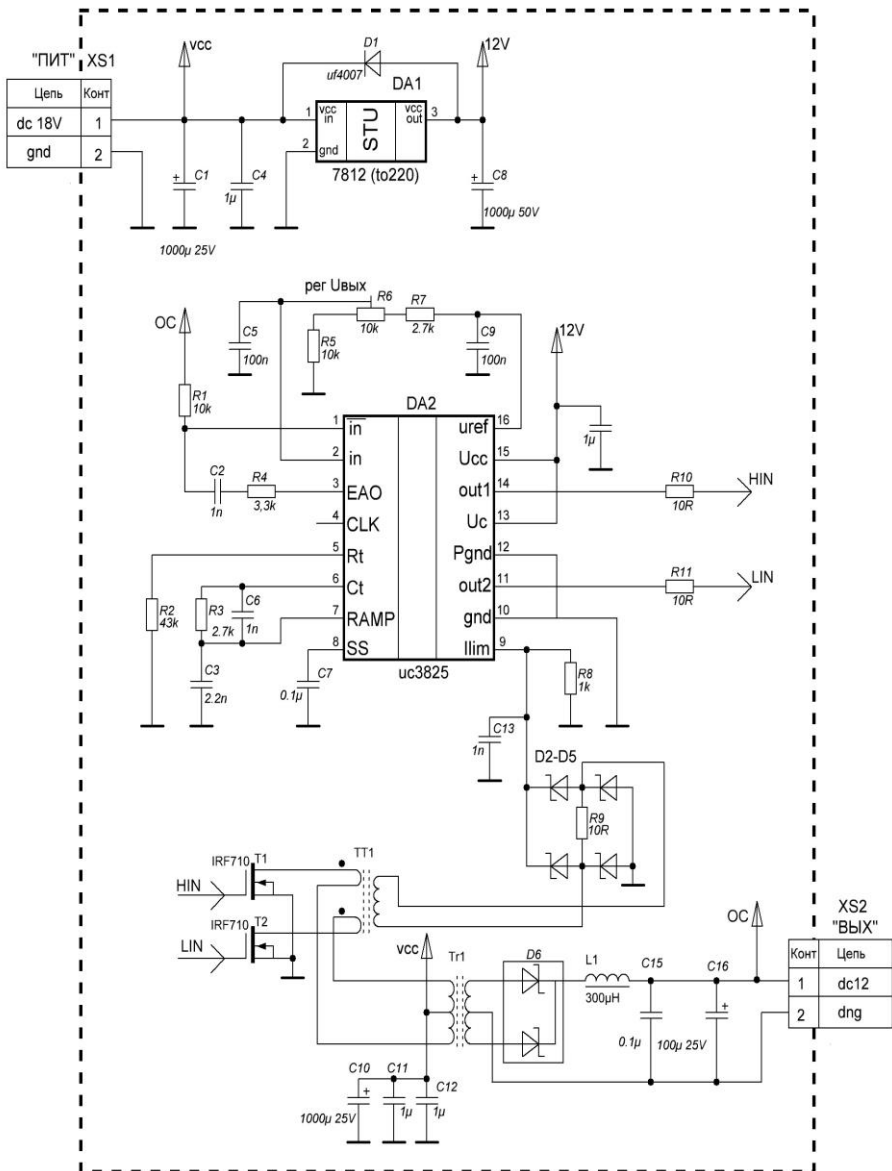


Рис. 7. Принципиальная схема блоков питания

Схема преобразователя напряжения в частоту приведена на рис. 8. Она выполнена на ИМС таймера КР1006ВИ1 (аналог NE555), на управляющий вход которого через делитель подается напряжение с зарезервированной системы питания. Так как питание таймера и цепи заряда емкости СЗ реализовано через ИМС стабилизатора, то изменение напряжения на управляющем входе приводит к изменению частоты выходного сигнала.

В режиме нагруженного резерва одновременно включены оба блока питания. Подключение к нагрузке осуществлено через диоды, благодаря чему на ней всегда больший уровень напряжения из двух. При снижении напряжения основного блока при постепенном отказе или при полном прекращении подачи питания резервный блок подпитывает нагрузку. И наоборот, возможен вариант, когда первым выйдет из строя второй комплект – тогда всю нагрузку на себя берет основной БП.

Схема ненагруженного резервирования (рис. 6) отличается наличием переключающих элементов и восстанавливающего устройства (ВУ), принципиальная схема которого представлена на рис. 9. Устройство необходимо для реализации динамического резервирования. Восстанавливающее устройство реализовано на ИМС компаратора, с широким гистерезисом. Компаратор сравнивает опорный уровень напряжения с напряжением основного блока питания, при снижении которого компаратор включает резервный комплект и отключает основной посредством ЭМ реле. В схеме восстанавливающего устройства присутствует RC-цепочка, позволяющая изменять время реакции ВУ на изменение напряжения основного БП.

Чем выше время реакции, тем сильнее падает напряжение на нагрузке, вызывая изменение частоты сигнала с ПНЧ.

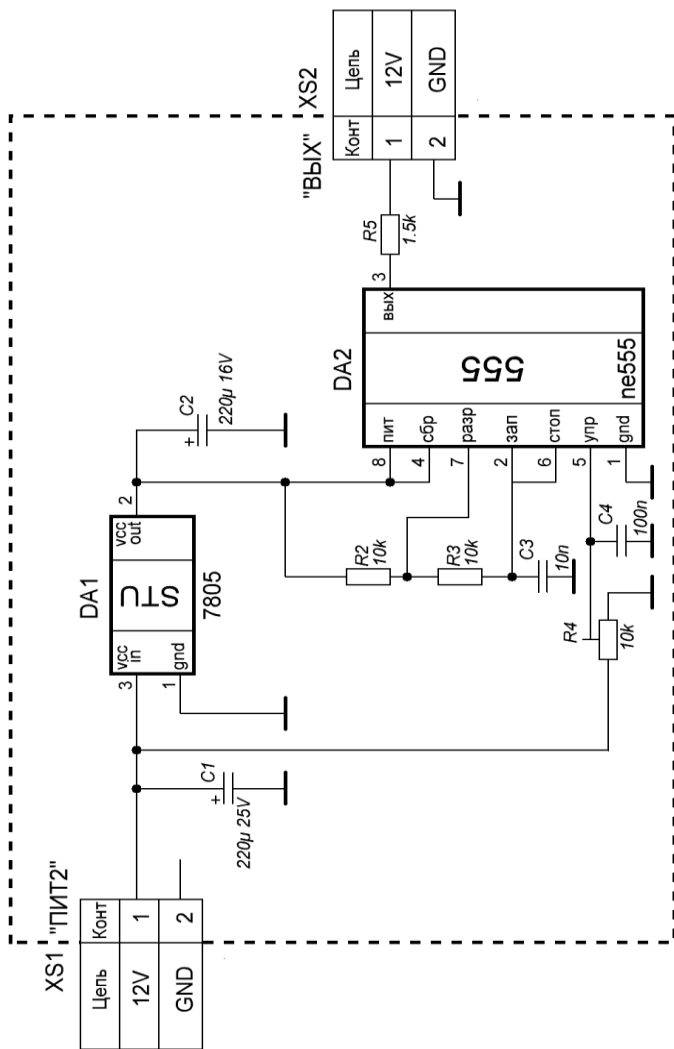


Рис. 8. Принципиальная схема ПНЧ

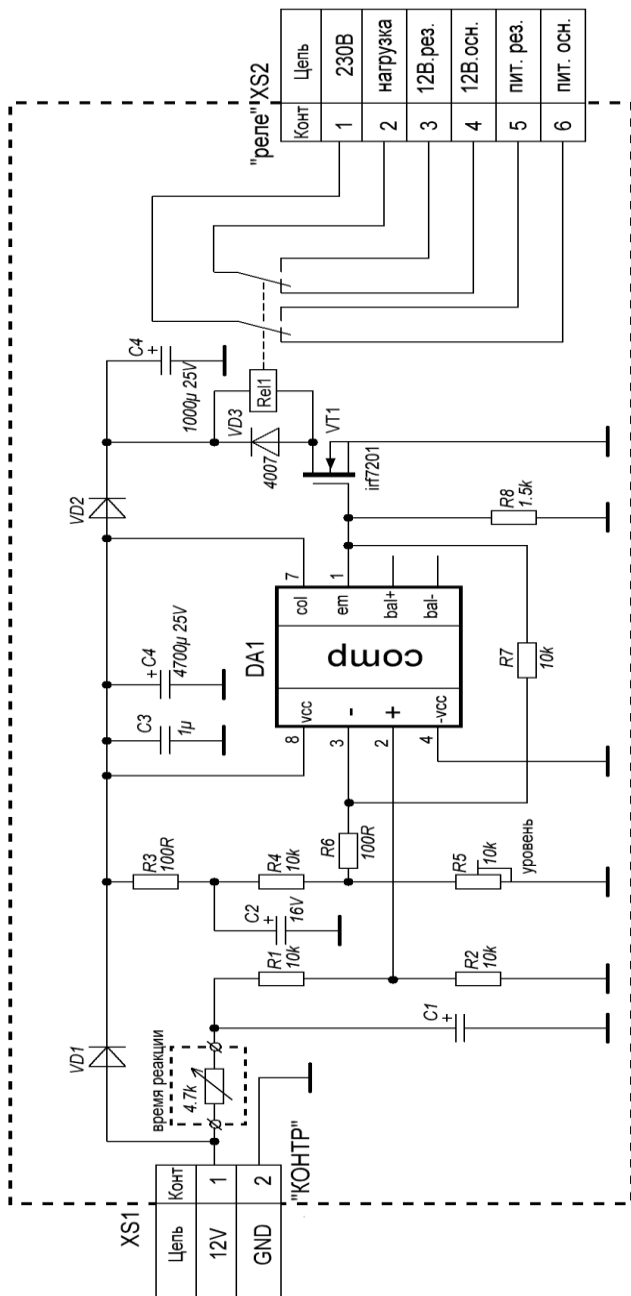


Рис. 9. Принципиальная схема восстанавливающего устройства

4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить принципы постоянного и динамического резервирования.

2. Разобраться с принципом работы лабораторного стенда и его основных блоков.

3. По схемам электрическим принципиальным (рис. 7 и рис. 9), вычислить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов для импульсного блока питания и восстанавливающего устройства.

4. Составить схемы надежности для двух вариантов резервирования. Рассчитать параметры надежности резервированных систем питания (нагрузка в расчет не входит).

5. Получить допуск у преподавателя.

6. В режиме «без резервирования» снять кривую зависимости частоты выходного сигнала от напряжения. Напряжение изменять потенциометром, имитирующим постепенный отказ, и контролировать встроенным вольтметром. Выявить порог, при котором наступает отказ блока.

7. Переключить устройство в режим «нагруженного резервирования». Провести имитацию постепенного и внезапного отказов.

8. Перевести устройство в режим «ненагруженного резерва». На минимальном времени реакции ВУ детектировать уровень напряжения, при котором происходит переключение между основным и резервными БП. Измерить величину гистерезиса. Снять зависимость отклонения «просадки» выходного напряжения на нагрузке и частоты выходного сигнала от времени реакции ВУ.

9. Провести сравнение системы питания без резервирования с нагруженным и ненагруженным резервированием. Сделать выводы.

10. Представить отчет на проверку преподавателю. Ответить на вопросы по теме.

Отчет должен быть представлен в печатной форме и должен содержать: название дисциплины; название лабораторной работы;

теоретическое описание рассмотренных методов резервирования; описание исследуемой системы; теоретические расчеты надежностей системы в разных режимах работы; экспериментальные данные в виде таблиц и графиков; выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы резервирования, по каким признакам их можно классифицировать?
2. Области применения тех или иных способов резервирования.
3. Особенности динамических методов резервирования, достоинства и недостатки.
4. Какую функцию выполняет восстанавливающее устройство? Какими характеристиками оно должно обладать?
5. Как рассчитать надежность системы с нагруженным резервированием по типу «*1 из n*»?
6. Объяснить метод расчета сложных последовательно-параллельных систем.

Список использованной литературы

1. Зеленский, В.А. Основы конструкторско-технологического проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие / В.А. Зеленский. – Самара: Издательство Самарского университета, 2016. – 80 с.
2. Викторова, В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем: учебное пособие / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – Москва: 2013. – 219 с.
3. Головин, И.Н. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем / И.Н. Головин Б.В. Чуварыгин, А.Э. Шура-Бура. – Москва: Радио и связь, 1984. – 176 с.

Методические материалы

**ИЗУЧЕНИЕ НАГРУЖЕННОГО
И НЕНАГРУЖЕННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ РЭС**

Методические указания

Составители: *Зеленский Владимир Анатольевич,*
Сухачев Кирилл Игоревич

Редактор *А.С. Никитина*
Компьютерная вёрстка *А.С. Никитиной*

Подписано в печать 10.08.2020. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,25.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 50(P1M)/2020.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.