

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Электротехника и электроника»

Ю. В. Бладыко

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-43 01 01 «Электрические станции»,  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43 01 03 «Электроснабжение»,  
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 3 частях

Часть 3

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2021

УДК 621.3+621.38(076.5)(075.8)

ББК 31.2я7

Б68

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра электротехники УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» (заведующий кафедрой, кандидат технических наук, доцент *В. А. Ковалев*);  
доцент УО «Белорусская государственная академия авиации», кандидат технических наук, доцент *М. И. Полуянов*

**Бладыко, Ю. В.**

Б68 Практические занятия в электронной лаборатории : учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» : в 3 ч. Ч. 3. / Ю. В. Бладыко. – Минск: БНТУ, 2021. – 59 с.

ISBN 978-985-583-202-8 (Ч. 3).

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов при проведении практических занятий по курсам «Электротехника и электроника», «Электротехника и промышленная электроника», «Электроника», «Электроника и информационно-измерительная техника», «Электроника и микропроцессорная техника».

Размещение тем практических занятий соответствует последовательности изложения материала курса электроники, которая принята кафедрой. Третья часть пособия состоит из 6 тем для изучения электроники с помощью Electronics Workbench. Электронная лаборатория на персональном компьютере помогает исследованию преобразовательных устройств. По каждой теме приведены файлы для электронной лаборатории и вопросы для контроля знаний студентов.

Первая часть вышла в БНТУ в 2015 году.

Вторая часть вышла в БНТУ в 2018 году.

УДК 621.3+621.38(076.5)(075.8)

ББК 31.2я7

ISBN 978-985-583-202-8 (Ч. 3)

ISBN 978-985-550-495-6

© Бладыко Ю. В., 2021

© Белорусский национальный технический университет, 2021

## Практическое занятие № 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

#### Содержание занятия

1. Исследование однофазных выпрямителей. Решить задачу 13.12 [2]. При проверке решения задачи двухполупериодного выпрямителя в EWB (файл **rect12.ewb**, рис. 16.1) обратить внимание на содержимое окна *Description*. Присоединяя осциллограф к зажимам 1–3, 1–2, 2–3, заметить изменение амплитуды выпрямленного напряжения.

#### Двухполупериодное выпрямление

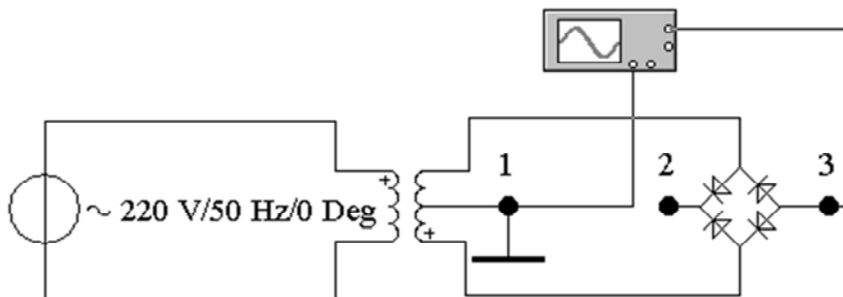


Рис. 16.1. Двухполупериодное выпрямление (файл **rect12.ewb**)

2. Решить задачу 13.13 [2]. Проверить решение задачи ограничения тока диода в EWB (файл **rect13.ewb**, рис. 16.2).

3. Решить задачу 13.14 [2]. Проверить решение задачи в EWB (файл **rect14.ewb**, рис. 16.3). Найти отношение показаний вольтметров  $U_H/U_2$ .

4. Исследовать выпрямитель, работающий на аккумулятор (файл **rect15.ewb**, рис. 16.4). Решить задачу 13.15 [2]. Проверить решение задачи в EWB.

### Ограничение тока диода

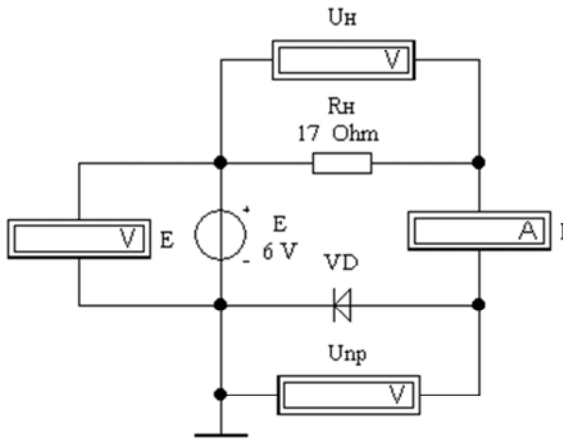


Рис. 16.2. Ограничение тока диода (файл **rect13.ewb**)

### Однополупериодное выпрямление

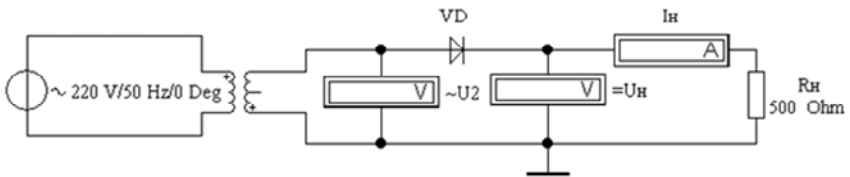


Рис. 16.3. Однополупериодное выпрямление (файл **rect14.ewb**)

### Зарядка аккумулятора

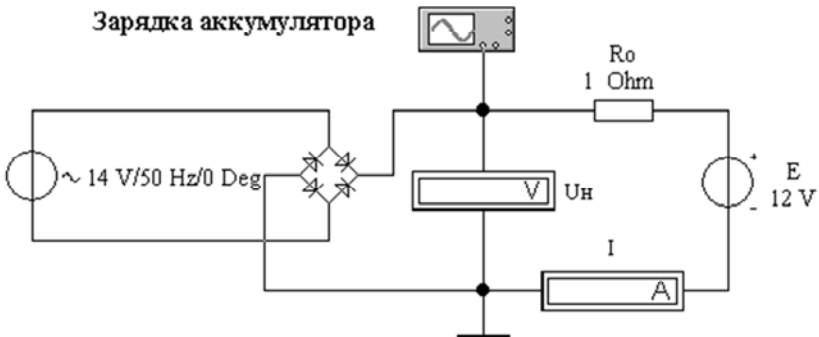


Рис. 16.4. Выпрямитель, работающий на аккумуляторе (файл **rect15.ewb**)

5. Исследовать выпрямители со сглаживающими фильтрами. Ознакомиться с однополупериодным выпрямителем с  $RC$ -фильтром (файл **rect\_1.ewb**, рис. 16.5).

### Однополупериодный выпрямитель с $RC$ -фильтром

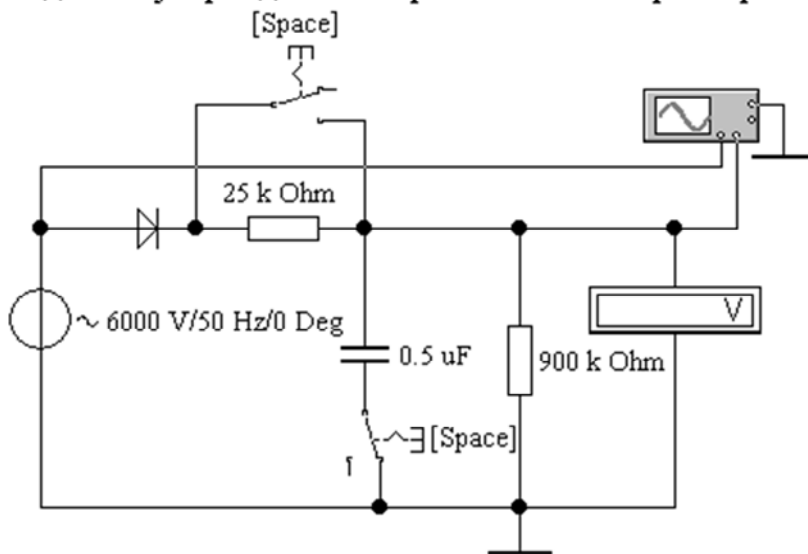


Рис. 16.5. Однополупериодный выпрямитель с  $RC$ -фильтром (файл **rect\_1.ewb**)

6. Изучить однополупериодный выпрямитель с  $LC$ -фильтром (файл **rect17.ewb**, рис. 16.6). Решить задачу 13.17 [2]. Проверить решение задачи в EWB. Определить коэффициент пульсаций по показаниям вольтметров  $U_{ac}/U_{dc}$  для разных сглаживающих фильтров.

7. Исследовать мостовой выпрямитель с  $C$ -фильтром (файл **rect\_2.ewb**, рис. 16.7).

8. Исследовать нулевой выпрямитель с разными сглаживающими фильтрами (файл **rect\_3.ewb**, рис. 16.8). Проверить основные соотношения для данной схемы выпрямления по Приложению 5 [3].

9. Исследовать мостовой выпрямитель с разными сглаживающими фильтрами (файл **rect\_3.ewb**, рис. 16.9). Проверить основные соотношения для данной схемы выпрямления по Приложению 5 [3].

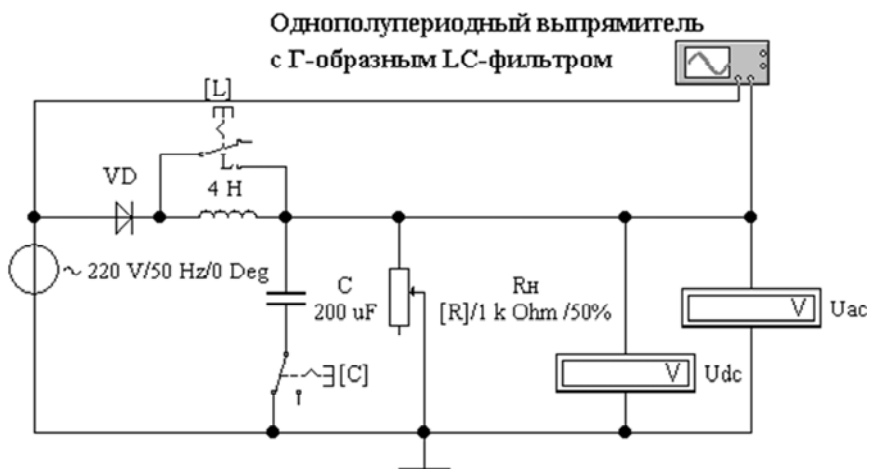


Рис. 16.6. Однополупериодный выпрямитель  
с LC-фильтром (файл `rect17.ewb`)



Рис. 16.7. Мостовой выпрямитель  
с C-фильтром (файл `rect_2.ewb`)



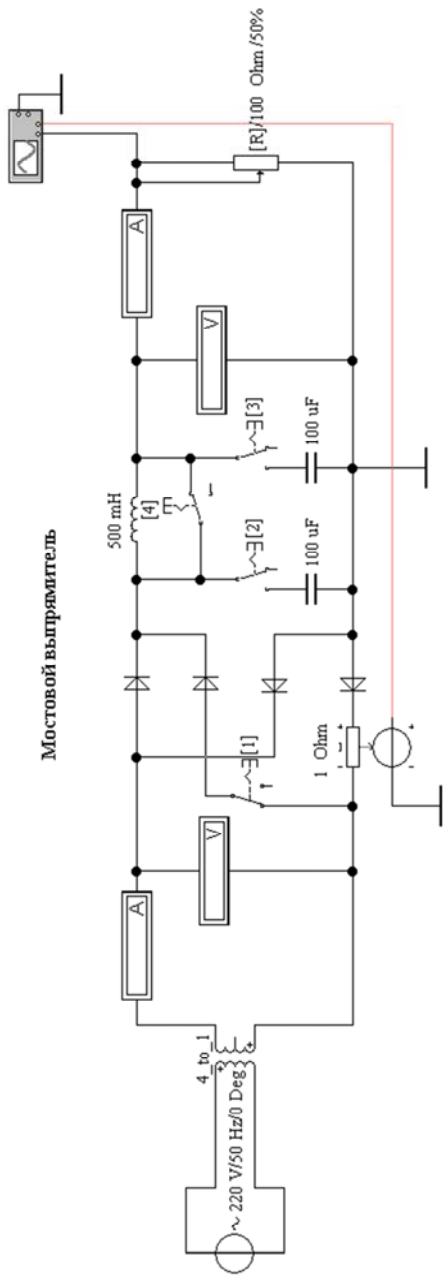


Рис. 16.9. Однофазный мостовой выпрямитель (файл lab4.ewb)



10. Исследование трехфазных схем выпрямления. Трехфазный нулевой выпрямитель (схема В. Ф. Миткевича) (файл **rect\_4.ewb**, рис. 16.10). Проверить отношение  $U_d/U_{2\phi}$  для данной схемы выпрямления по прил. 5 [3]. Обратите внимание, как изменятся результаты при включении сглаживающего фильтра, при обрыве цепи одного из диодов.

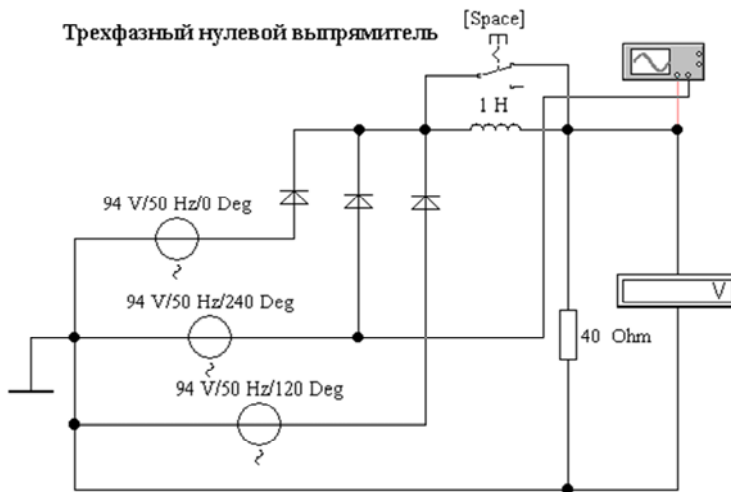


Рис. 16.10. Трехфазный нулевой выпрямитель (файл **rect\_4.ewb**)

11. Исследовать трехфазный мостовой выпрямитель (схема А. Н. Ларионова) (файл **rect\_5.ewb**, рис. 16.11). Проверить отношение  $U_d/U_{2\phi}$  для данной схемы выпрямления по прил. 5 [3]. Обратите внимание, как изменятся осциллограммы и выходное напряжение при включении сглаживающего фильтра, при обрыве цепи одного (двух) диодов.

12. Решить задачу 13.16. При проверке решения задачи в EWB (файл **rect16.ewb**, рис. 16.12) обратить внимание на содержимое окна *Description*.

13. Расчитать свой вариант РГР 1 [3]. Проверить решения задачи в EWB. Возможно альтернативное задание: получить напряжение нагрузки, равное порядковому номеру студента в журнале.

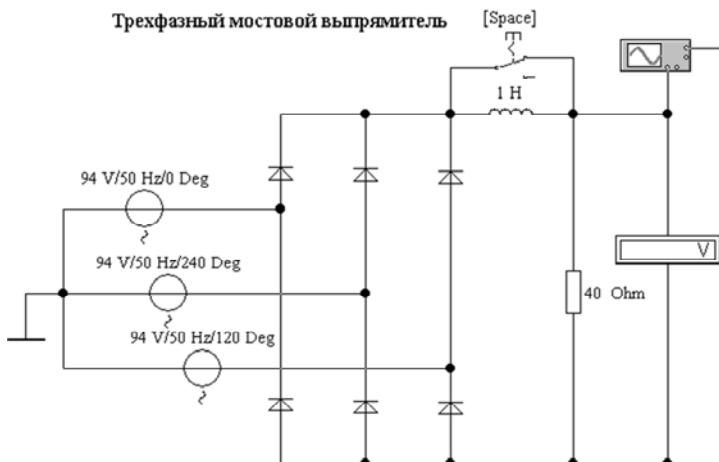


Рис. 16.11. Трёхфазный мостовой выпрямитель (файл **rect\_5.ewb**)

**Схема Ларионова**  
(трёхфазный мостовой выпрямитель)

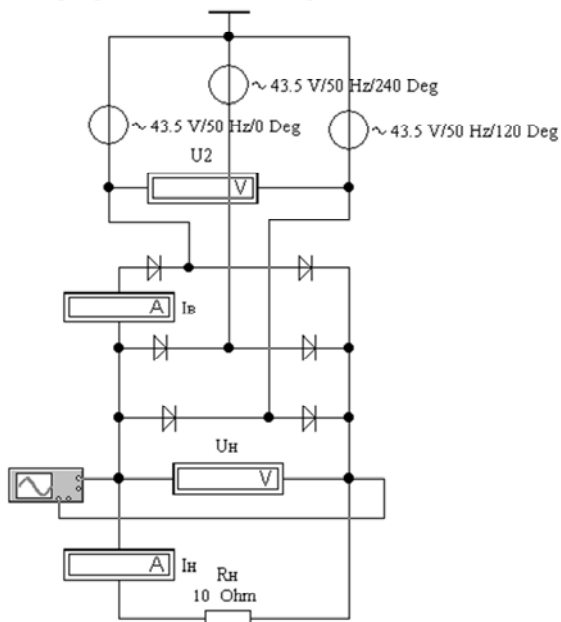


Рис. 16.12. Трёхфазный мостовой выпрямитель (файл **rect16.ewb**)

## Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия выпрямителей.
2. Как влияет емкостный фильтр на величину обратного напряжения на вентиле?
3. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении сглаживающего фильтра?
4. Достоинства и недостатки разных типов фильтров.
5. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания?
6. По каким критериям осуществляется выбор вентиля?
7. Как определяется мощность и коэффициент трансформации трансформатора в выпрямителях?
8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при обрыве одного вентиля в исследуемых выпрямителях?

## Практическое занятие № 17

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ, АКТИВНЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ, УМНОЖИТЕЛЕЙ НАПЯЖЕНИЯ

#### Содержание занятия

1. Исследование активных сглаживающих фильтров. Рассмотреть работу транзисторного фильтра (файл **act\_sf1.ewb**, рис. 17.1) при различных амплитудах функционального генератора.

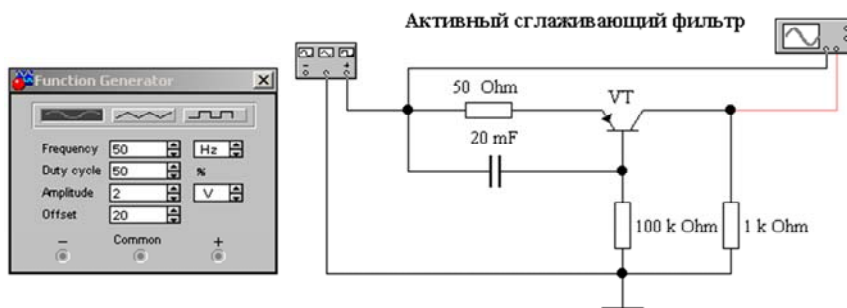


Рис. 17.1. Транзисторный фильтр (файл **act\_sf1.ewb**)

Исследовать транзисторный фильтр со схемой Ларионова (файл **tranz\_f.ewb**, рис. 17.2). Обратит внимание на подключение транзистора, составленного по схеме Дарлингтона. Выяснить, как влияет несимметричное напряжение источника и величина сопротивления нагрузки на процесс сглаживания.

Исследовать транзисторный фильтр с транзистором, составленным из трех (файл **tr\_filt.ewb**, рис. 17.3). Рассмотреть работу фильтра при различных амплитудах функционального генератора и при различных настройках схемы (клавиша «R»).

2. Исследование параметрических стабилизаторов напряжения. Проверить решение задачи 13.9 [2] в EWB (файл **stab1.ewb**, рис. 17.4), обратит внимание на содержимое окна *Description*. Рассчитать коэффициент стабилизации напряжения.

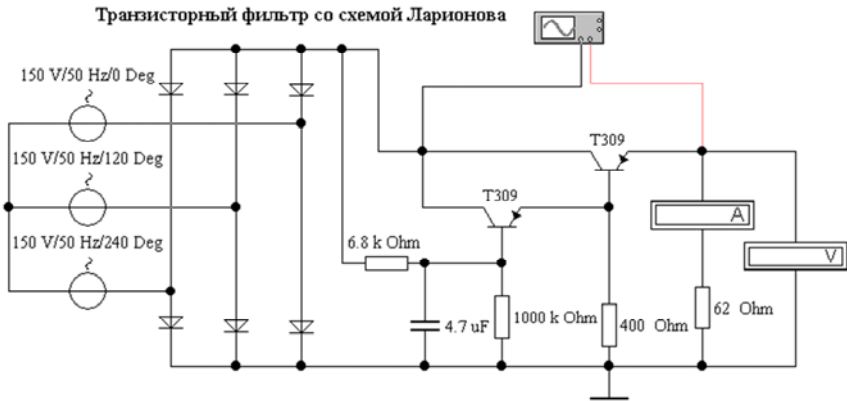


Рис. 17.2. Транзисторный фильтр со схемой Ларионова (файл **tranz\_f.ewb**)

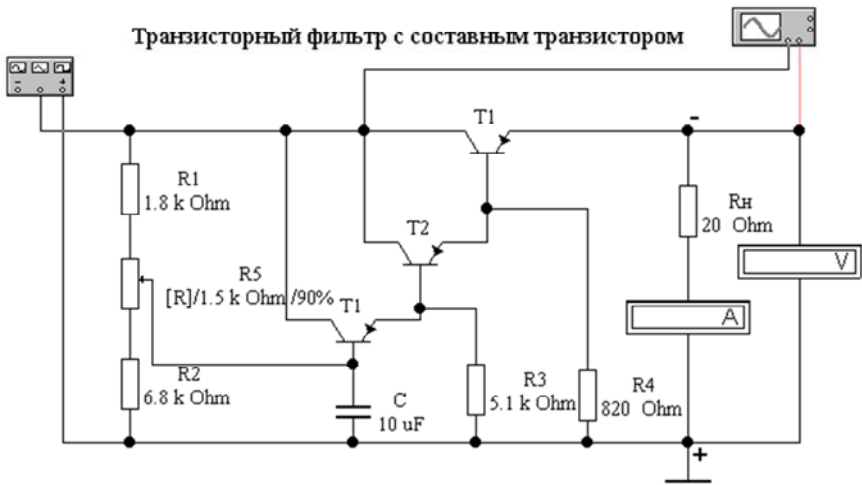


Рис. 17.3. Транзисторный фильтр, составленный из трех транзисторов (файл **tr\_filt.ewb**)

Решить задачу 13.19. Проверить решение задачи в EWB (файл **stab2.ewb**, рис. 17.5), сравнить решение с содержимым окна *Description*.

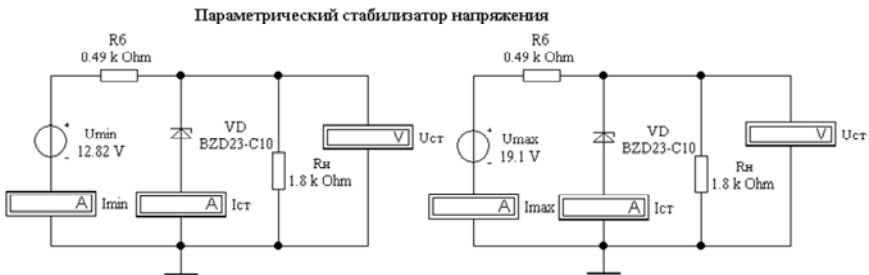


Рис. 17.4. Параметрический стабилизатор напряжения (файл **stab1.ewb**)

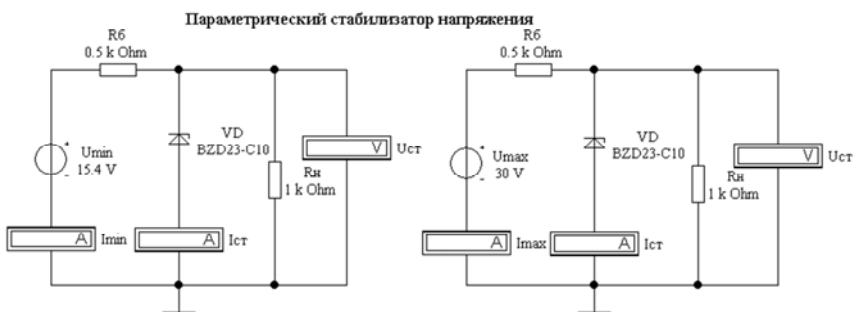


Рис. 17.5. Параметрический стабилизатор напряжения (файл **stab2.ewb**)

Решить задачу 13.20. Проверить решение задачи в EWB (файл **stab3.ewb**, рис. 17.6), сравнить решение с содержимым окна *Description*.

Исследовать параметрические стабилизаторы напряжения с термокомпенсацией и на транзисторе для больших токов (файл **stab\_prm.ewb**, рис. 17.7). Рассмотреть работу при изменении сопротивления нагрузки (клавиша «R»). Рассчитать коэффициент стабилизации напряжения.

Исследовать двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения (файл **stab4.ewb**, рис. 17.8). Рассмотреть работу при изменении напряжения источника (клавиша «R»). Рассчитать коэффициент стабилизации напряжения.

Исследовать мостовые параметрические стабилизаторы напряжения (файл **stab5.ewb**, рис. 17.9). Оценить стабилизацию при изменении амплитуды функционального генератора.

## Определение КПД стабилизатора

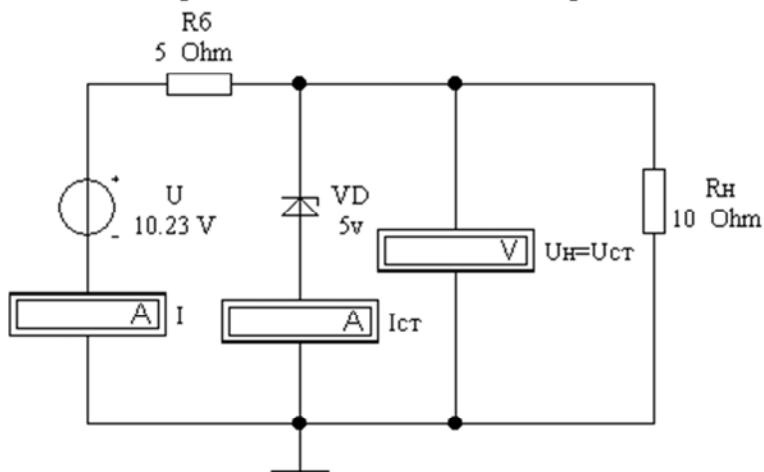


Рис. 17.6. Определение КПД стабилизатора (файл **stab3.ewb**)

Исследовать параметрический стабилизатор напряжения с источником тока на БТ (файл **stab6.ewb**, рис. 17.10). Оценить стабилизацию при изменении амплитуды функционального генератора.

Исследовать параметрические стабилизаторы напряжения на транзисторах и ОУ (файл **stab7.ewb**, рис. 17.11). Оценить стабилизацию при изменении амплитуды функционального генератора.

Исследовать транзисторный стабилизатор (файл **stab8.ewb**, рис. 17.12). Оценить стабилизацию при изменении входного напряжения.

3. Исследование компенсационных стабилизаторов напряжения. Исследовать компенсационный стабилизатор напряжения (файл **stab9.ewb**, рис. 17.13). Оценить стабилизацию при изменении амплитуды функционального генератора.

Познакомиться с лабораторной установкой для исследования компенсационного стабилизатора напряжения (файл **lab4.ewb**, рис. 17.14). Рассмотреть работу при изменении напряжения источника (клавиша «S»). Рассчитать коэффициент стабилизации напряжения.

4. Исследование стабилизаторов тока (файлы **stabtok1.ewb**, **stabtok2.ewb**, **stabtok3.ewb**, рис. 17.15, 17.16, 17.17). Оценить стабилизацию тока при изменении величины входного напряжения.

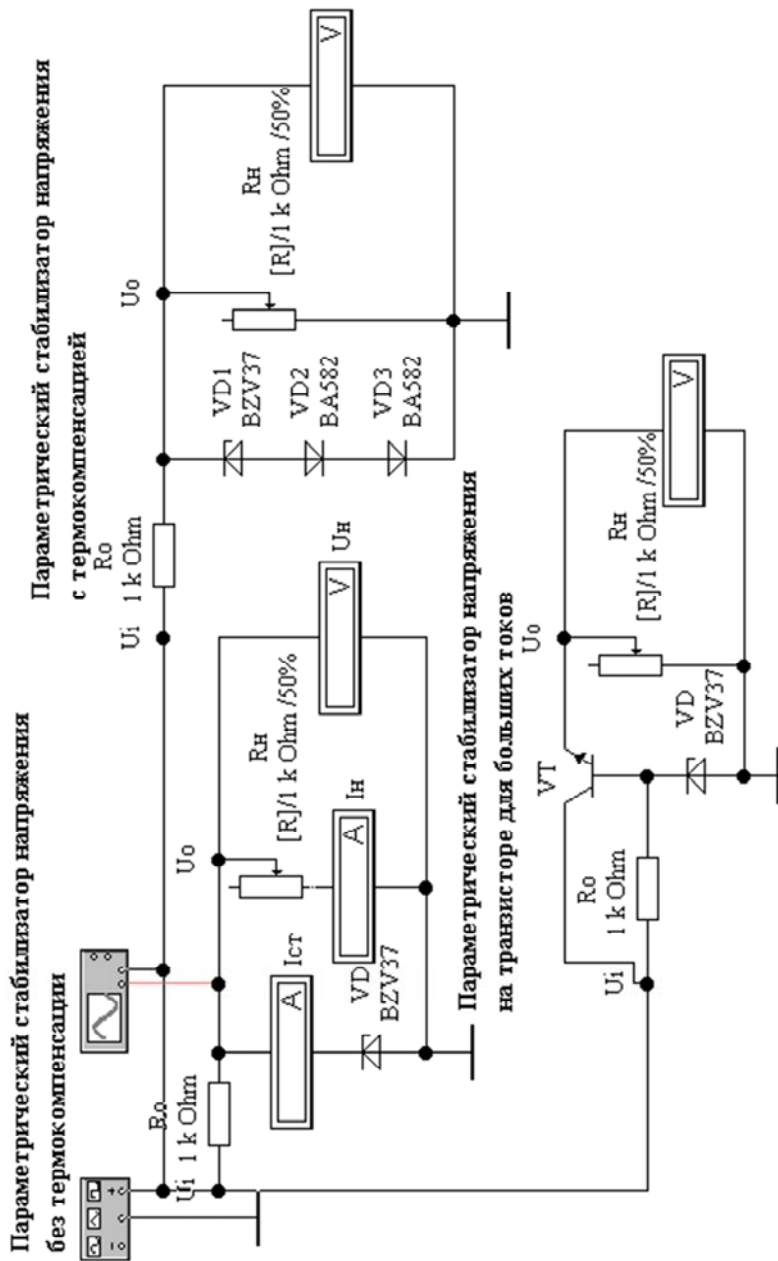


Рис. 17.7. Параметрические стабилизаторы напряжения (файл `stab_prm.ewb`)



**Параметрический стабилизатор напряжения  
двухкаскадный**

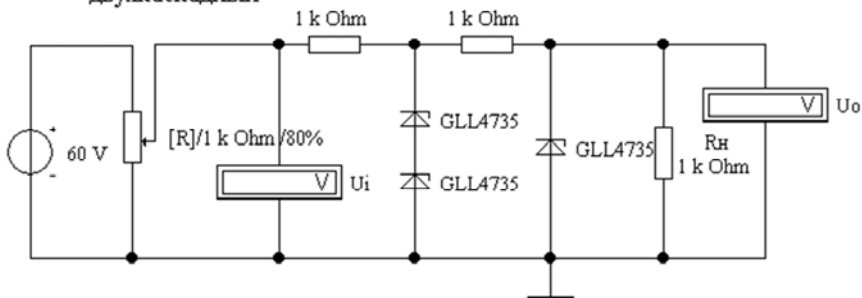


Рис. 17.8. Двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения (файл **stab4.ewb**)



Рис. 17.9. Мостовые схемы стабилизаторов напряжения (файл **stab.ewb**)

Параметрический стабилизатор напряжения  
с источником тока на БТ

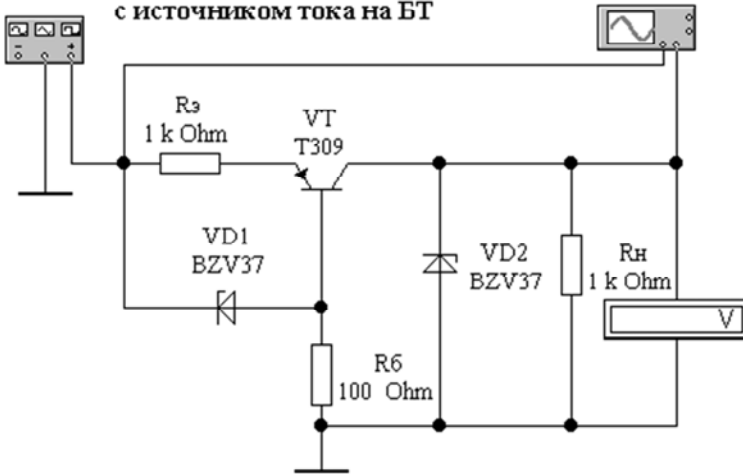
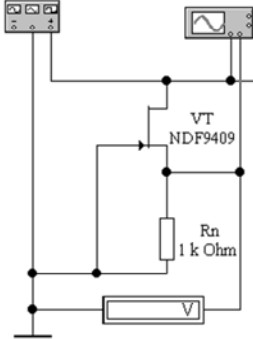


Рис. 17.10. Стабилизатор напряжения с источником тока на БТ (файл `stab6.ewb`)

Параметрический стабилизатор напряжения  
(тока) на полевом транзисторе



Параметрический стабилизатор напряжения  
(тока) на биполярном транзисторе и ОУ

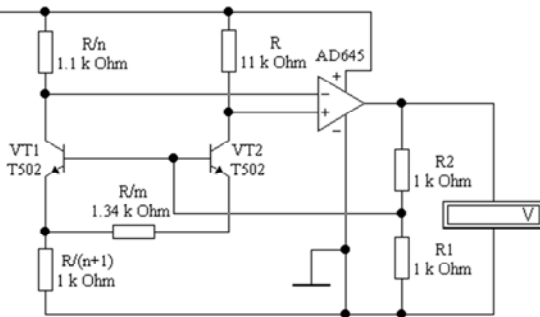


Рис. 17.11. Стабилизаторы напряжения на транзисторах и ОУ (файл `stab7.ewb`)

### Транзисторный стабилизатор

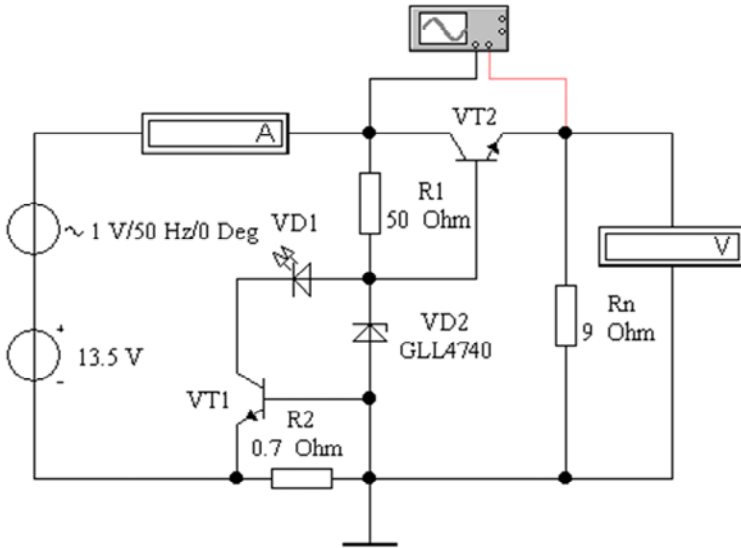


Рис. 17.12. Транзисторный стабилизатор (файл **stab8.ewb**)

### КОМПЕНСАЦИОННАЯ СХЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

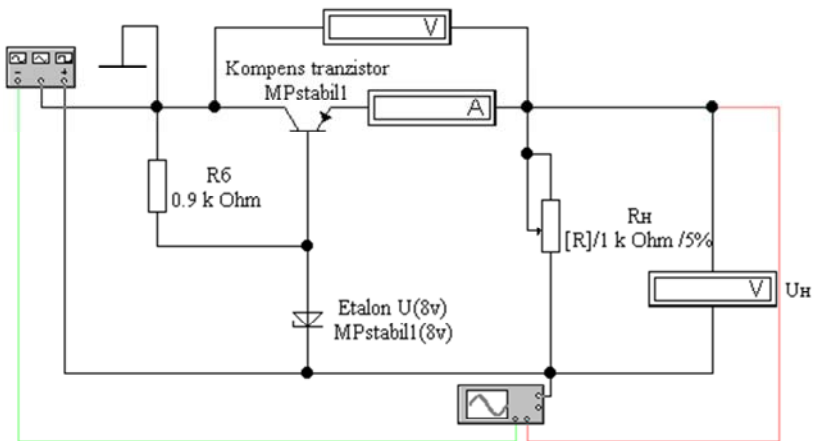


Рис. 17.13. Компенсационный стабилизатор напряжения (файл **stab9.ewb**)

### Компенсационный стабилизатор постоянного напряжения

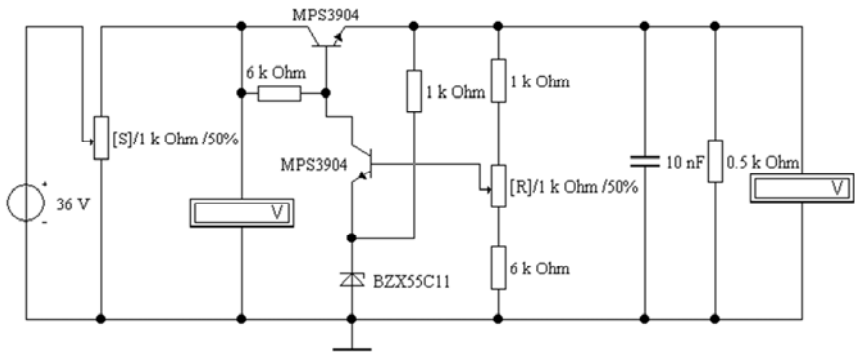


Рис. 17.14. Компенсационный стабилизатор напряжения (файл **lab4.ewb**)

### Стабилизатор тока

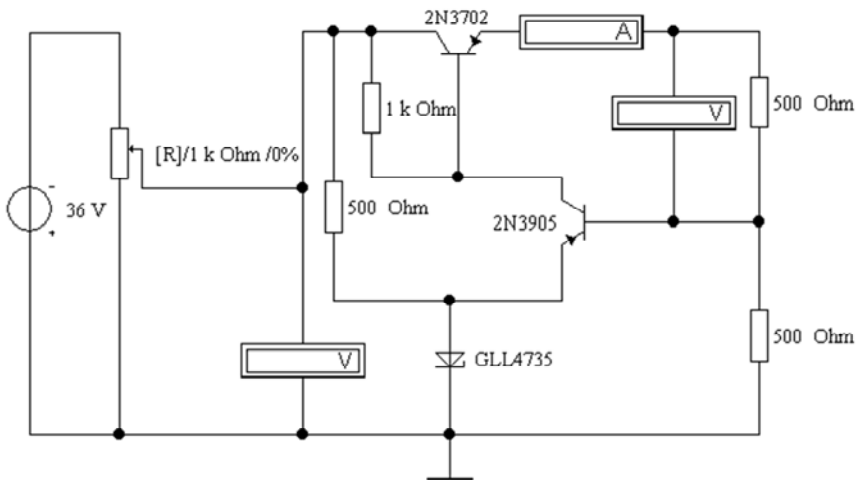


Рис. 17.15. Стабилизатор тока (файл **stabtok1.ewb**)

### Стабилизатор тока

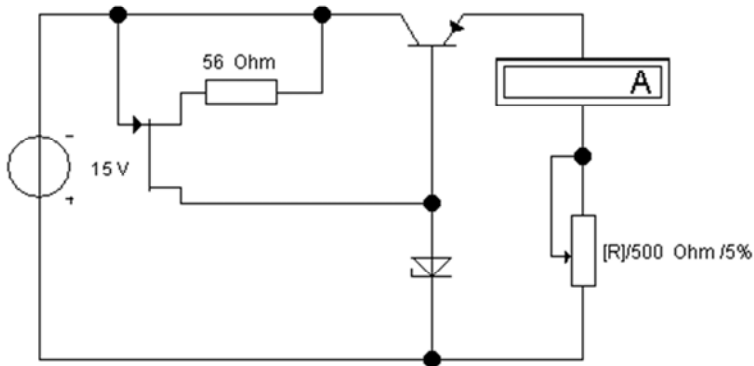


Рис. 17.16. Стабилизатор тока (файл **stabtok2.ewb**)

5. Исследование умножителей напряжения (файлы **multipl1.ewb**, **multipl2.ewb**, **multipl3.ewb**, **multipl4.ewb**, рис. 17.18, 17.19, 17.20, 17.21). Обратит внимание на умножение **амплитудного** значения напряжения источника и на снижение напряжения при подключении нагрузки.

### Стабилизатор тока

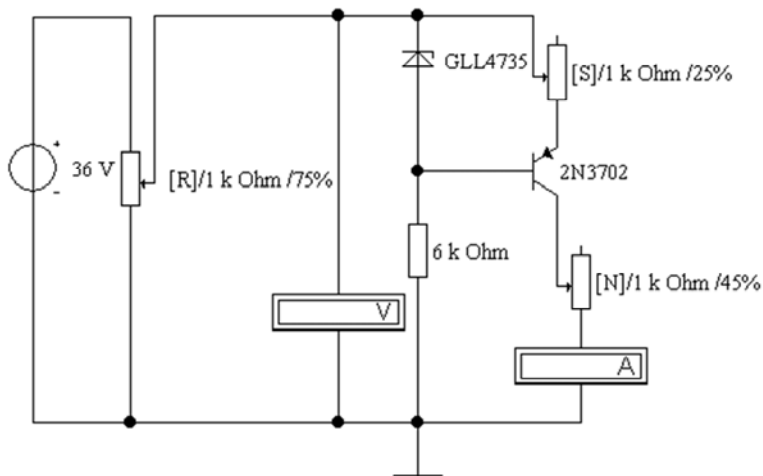


Рис. 17.17. Стабилизатор тока (файл **stabtok3.ewb**)

### Симметричная схема удвоения напряжения

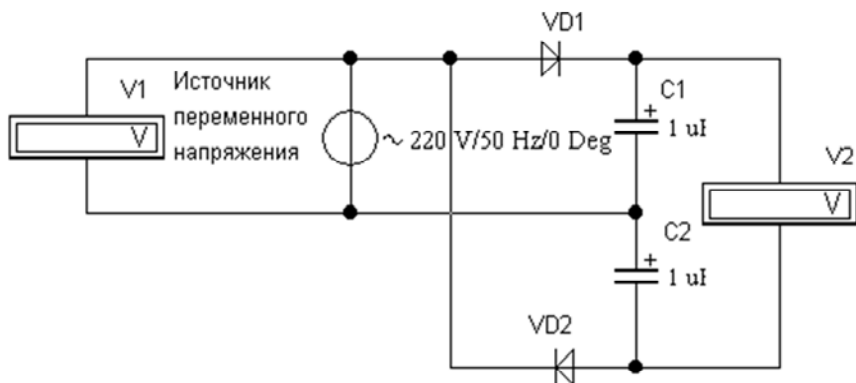


Рис. 17.18. Удвоитель напряжения (файл **multipl1.ewb**)

### Умножитель напряжения

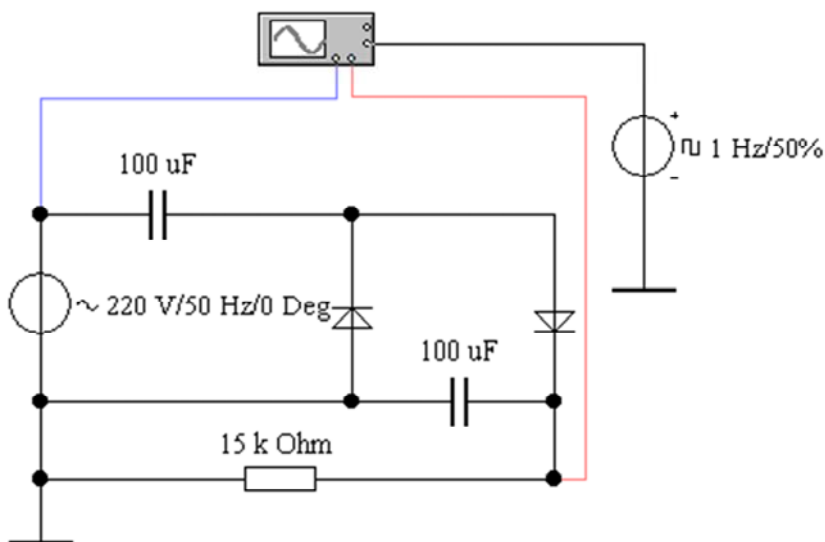


Рис. 17.19. Удвоитель напряжения последовательного типа (файл **multipl2.ewb**)

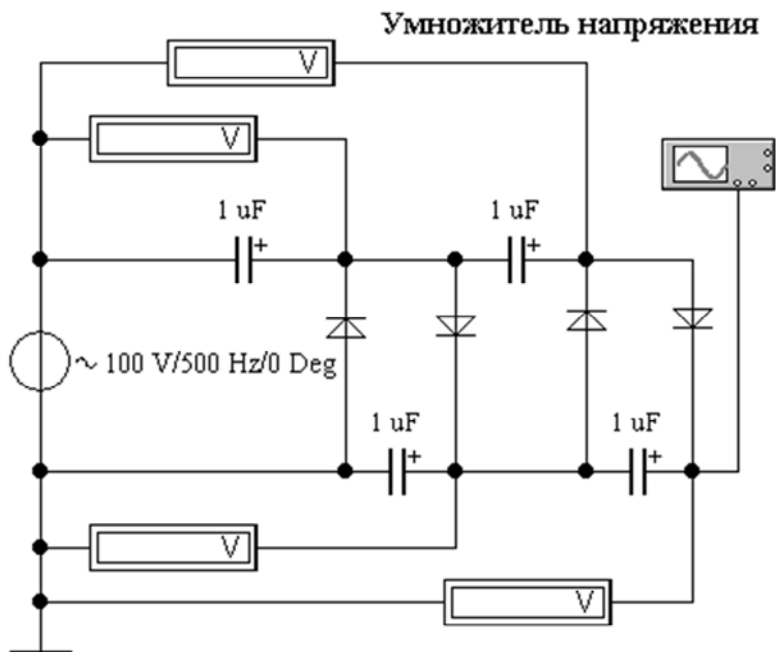


Рис. 17.20. Умножитель напряжения последовательного типа  
(файл **multipl3.ewb**)

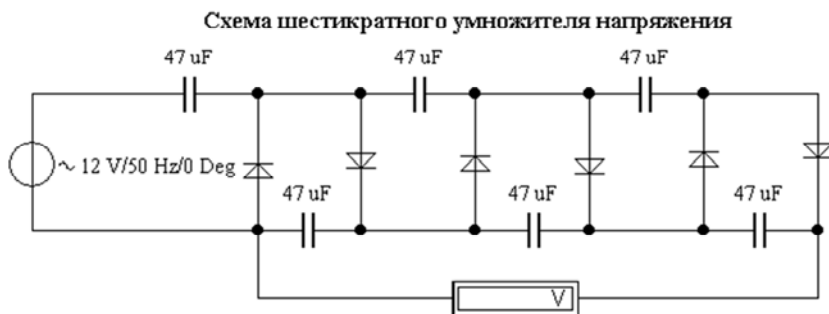


Рис. 17.21. Схема шестикратного умножителя напряжения  
(файл **multipl4.ewb**)

## Контрольные вопросы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов?
2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор напряжения и тока?
3. Поясните назначение элементов схемы компенсационного стабилизатора напряжения?
4. От каких элементов зависит коэффициент стабилизации?
5. Как можно осуществить регулирование  $U_{\text{вых}}$  стабилизатора напряжения?
6. Поясните принцип действия стабилизатора тока.
7. Как можно изменить выходной ток стабилизатора?
8. Почему стабилизатор тока может работать только на нагрузку с  $R$  меньше  $R_{\text{н max}}$ ?
9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?
10. Почему транзисторы оказывают сглаживающее действие?
11. Как реализуются схемы умножения напряжения?
12. Назовите достоинства и недостатки умножителей напряжения.



## Практическое занятие № 18

### ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

#### Содержание занятия

1. Исследование многофазных выпрямителей. Рассмотреть работу шестифазного выпрямителя (файл **rec\_6faz.ewb**, рис. 18.1).

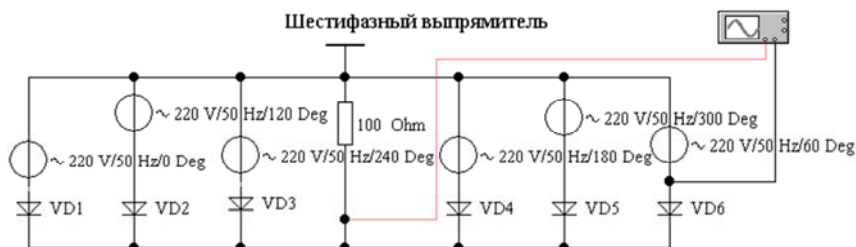


Рис. 18.1. Шестифазный выпрямитель (файл **rec\_6faz.ewb**)

Рассмотреть работу шестифазного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку (файл **rec\_6f\_z.ewb**, рис. 18.2).

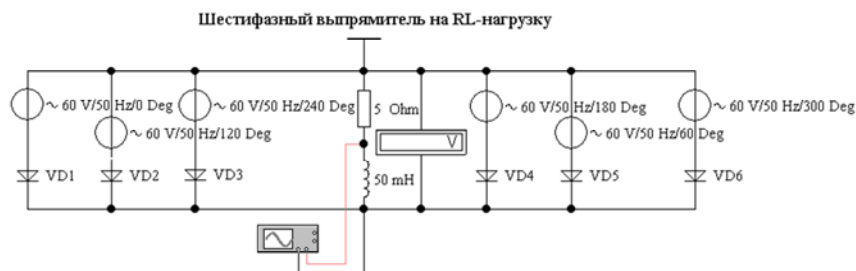


Рис. 18.2. Шестифазный выпрямитель, работающий на активно-индуктивную нагрузку (файл **rec\_6f\_z.ewb**)

Исследовать двойной трехфазный выпрямитель с уравнительным реактором (файл **rec\_6fyр.ewb**, рис. 18.3).

Исследовать двенадцатипульсный выпрямитель при последовательном соединении мостов (файл **rec\_12a.ewb**, рис. 18.4) и параллельном соединении мостов (файл **rec\_12b.ewb**, рис. 18.5).

### Двойной трехфазный выпрямитель с уравнивающим реактором

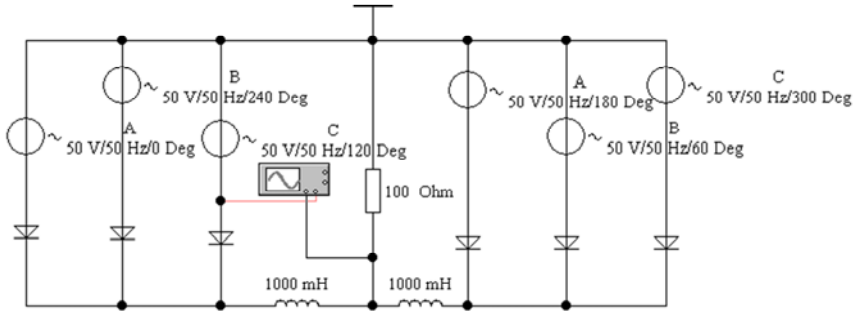


Рис. 18.3. Двойной трехфазный выпрямитель с уравнивающим реактором (файл `rec_6fyr.ewb`)

### Двенадцатипульсный выпрямитель

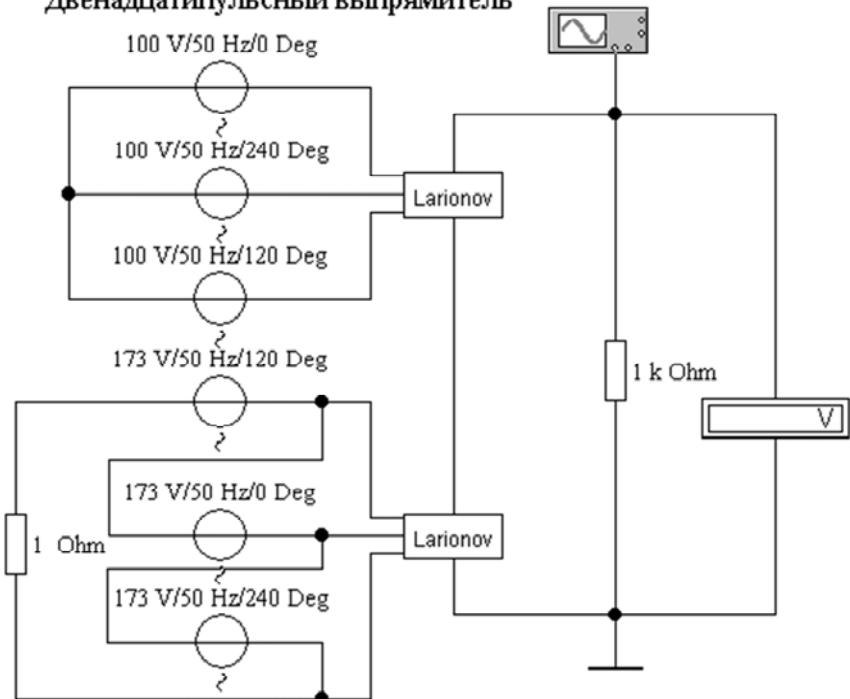


Рис. 18.4. Двенадцатипульсный выпрямитель при последовательном соединении мостов (файл `rec_12a.ewb`, рис. 18.6)

## Двенадцатипульсный выпрямитель

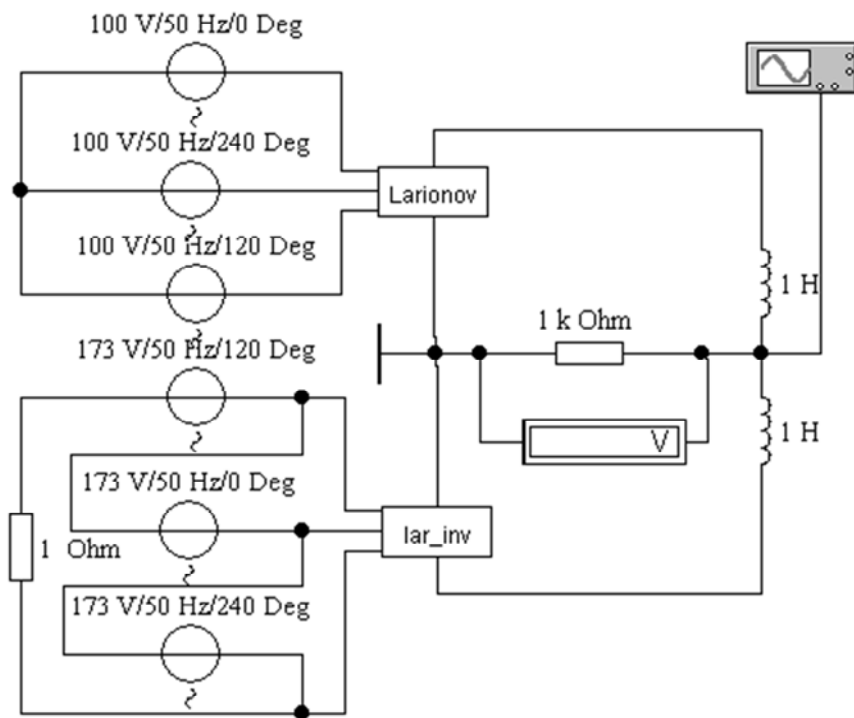


Рис. 18.5. Двенадцатипульсный выпрямитель при параллельном соединении мостов (файл **rec\_12b.ewb**)

2. Исследование управляемых выпрямителей. Рассмотреть работу однополупериодной (файл **rec\_a1.ewb**, рис. 18.6) и двухполупериодной (файл **rec\_a2.ewb**, рис. 18.7) схем с фазовым управлением.

Исследовать однополупериодный управляемый выпрямитель (файл **rec\_a3.ewb**, рис. 18.8).

Исследовать двухполупериодный управляемый выпрямитель (файл **rec2\_tir.ewb**, рис. 18.9). Обратите внимание на модель тиристора – управляемый напряжением ключ.

### Однополупериодная схема с фазовым управлением

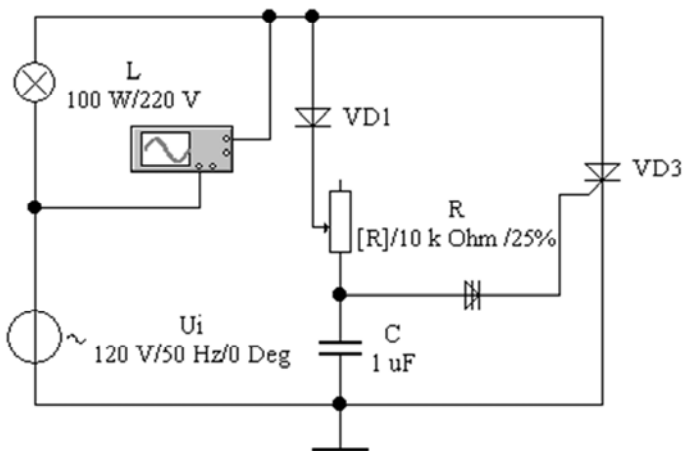


Рис. 18.6. Однополупериодная схема с фазовым управлением  
(файл `rec_a1.ewb`)

### Двухполупериодная схема с фазовым управлением

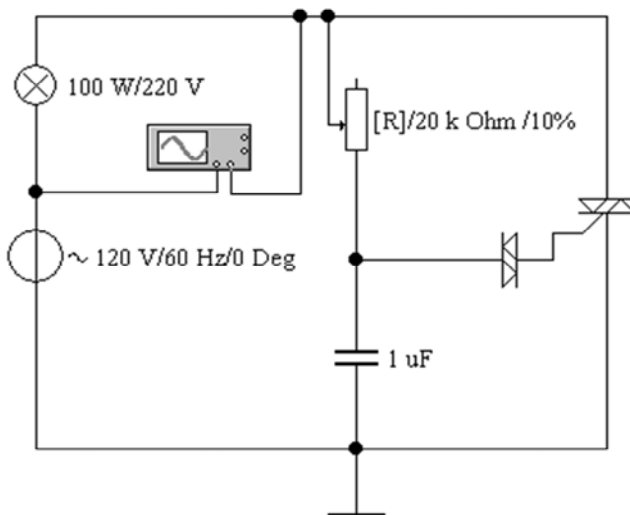


Рис. 18.7. Двухполупериодная схема с фазовым управлением  
(файл `rec_a2.ewb`)

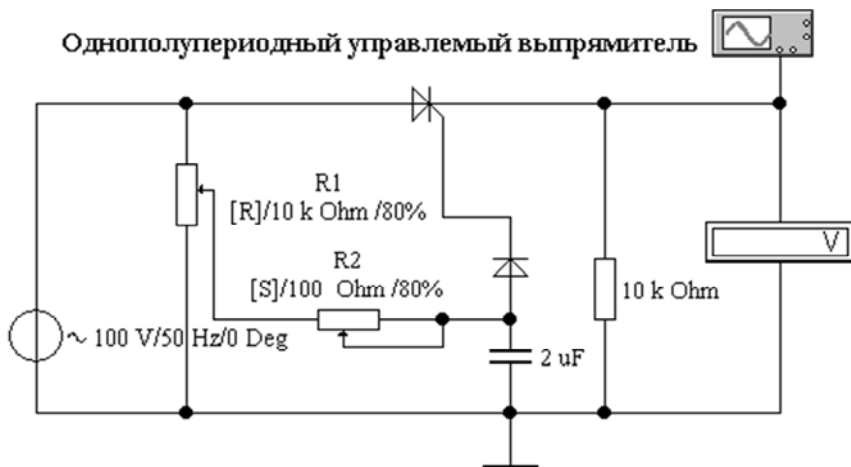


Рис. 18.8. Однополупериодный управляемый выпрямитель (файл **rec\_a3.ewb**)

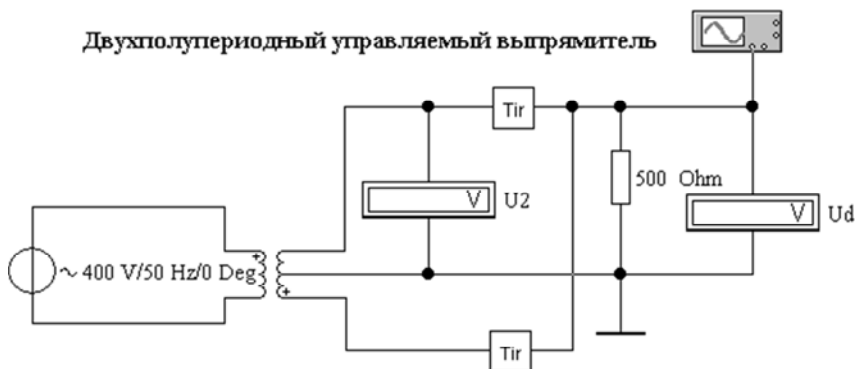


Рис. 18.9. Двухполупериодный управляемый выпрямитель (файл **rec2\_tir.ewb**)

Определить угол управления  $\alpha$  тиристорами следующими способами:

- 1) по осциллографу, используя визирные линии в режиме Expand

$$\alpha = \Delta t \cdot f \cdot 360^\circ,$$

где  $\Delta t$  – разница моментов времени  $T_2 - T_1$  прохождения напряжения через 0 и включения тиристора;

2) среднее значение напряжения на активной нагрузке

$$U_d = U_{d0} \cdot (1 + \cos \alpha) / 2,$$

где  $U_{d0} = 0,9 \cdot U_2$  для двухполупериодного выпрямителя ( $U_{d0} = 0,45 \cdot U_2$  для однополупериодного), откуда угол управления

$$\alpha = \arccos(2 \cdot U_d / U_{d0} - 1);$$

3) при использовании модели тиристора – управляемый напряжением ключ:

$$\alpha = \arcsin(U_y / (U_2 \cdot \sqrt{2})),$$

где  $U_y$  – напряжение срабатывания ключа (Turn-on voltage).

Исследовать схемы управляемых выпрямителей (файлы **tiris\_3.ewb** и **tiris\_4.ewb**, рис. 18.10 и 18.11). Изменить угол управления  $\alpha$  тиристорами с помощью клавиши «R».

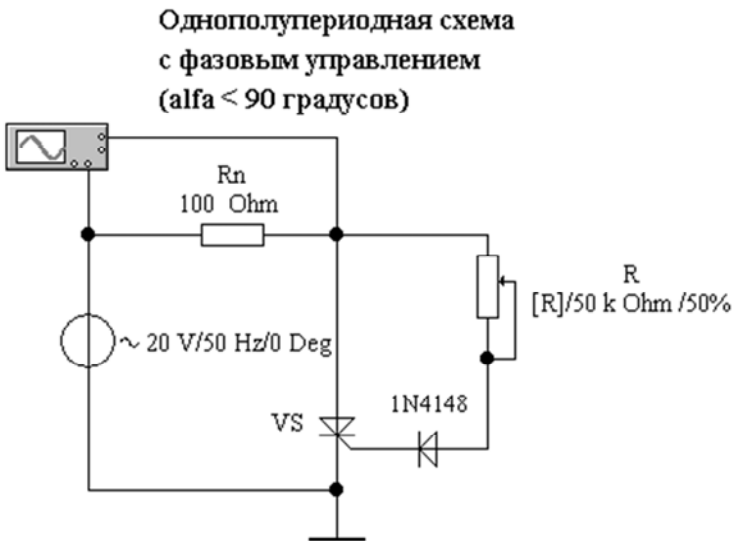


Рис. 18.10. Однополупериодная схема с фазовым управлением с помощью резистора ( $\alpha < 90^\circ$ ) (файл **tiris\_3.ewb**)

Однополупериодная схема  
с фазовым управлением с помощью цепи RC-диод  
( $\alpha < 180$  градусов)

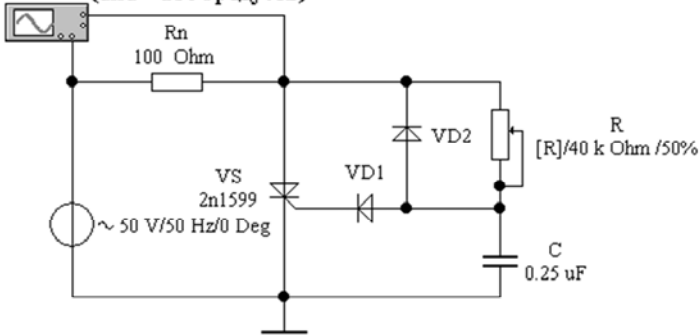


Рис. 18.11. Однополупериодная схема с фазовым управлением с помощью цепи RC-диод ( $\alpha < 180^\circ$ ) (файл **tiris\_4.ewb**)

Исследовать схему управления с помощью цепи RC-VD для регулятора переменного напряжения (файл **tiris\_5.ewb**, рис. 18.12). Управление тиристором *VS2* выполняется аналогично *VS1*.

Ведомая схема управления с цепью RC-диод  
для регулятора переменного тока

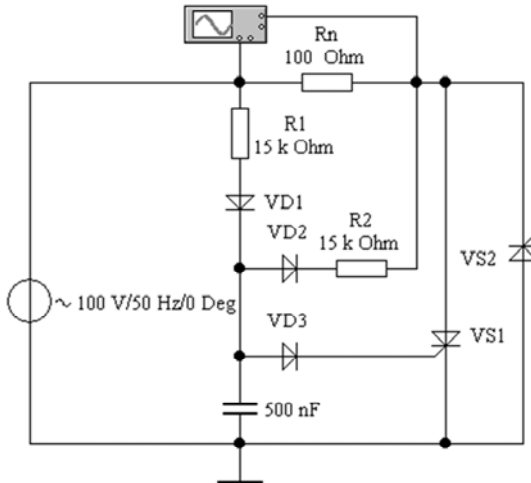


Рис. 18.12. Ведомая схема управления с помощью цепи RC-VD для РПН (файл **tiris\_5.ewb**)

## Контрольные вопросы

1. Что называют управляемым выпрямителем?
2. Для чего применяются эти выпрямители?
3. Каковы их основные достоинства?
4. Почему тиристоры применяют в качестве вентилей в управляемых выпрямителях?
5. Назовите основные элементы управляемых выпрямителей и их назначение.
6. Что такое угол управления  $\alpha$  и как его можно измерить с помощью осциллографа?
7. Каковы основные характеристики управляемого выпрямителя?
8. Можно ли в мостовой схеме в качестве вентилей использовать четыре тиристора?
9. Чем отличается шестифазный выпрямитель от схемы Ларионова?
10. Что дает уравнивающий реактор в схеме двойного трехфазного выпрямления?
11. Когда применяется последовательное, а когда параллельное соединение мостов в двенадцатипульсном выпрямителе?



## Практическое занятие № 19

### ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ В КРИВОЙ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА

#### Содержание занятия

1. Использование разложения в ряд Фурье для анализа несинусоидальных напряжений и токов. Синтез и анализ несинусоидальных кривых (файл **fourier.ewb**, рис. 19.1).

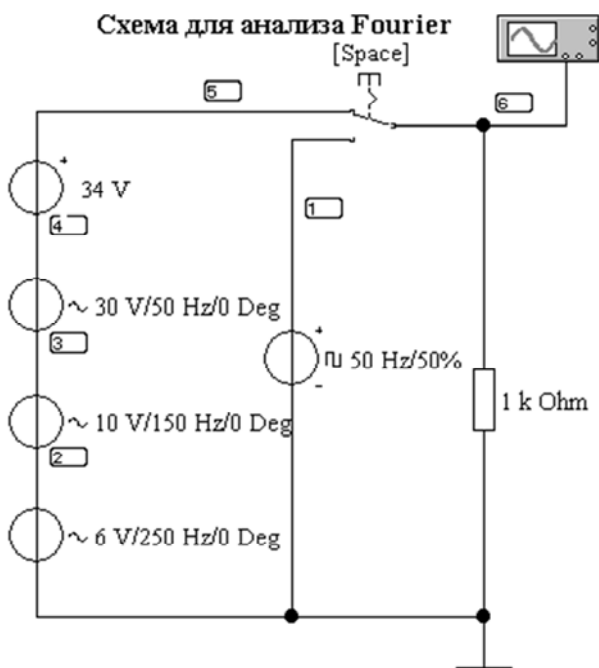


Рис. 19.1. Синтез и анализ несинусоидальных кривых (файл **fourier.ewb**)

Синтезированная кривая на экране осциллографа показана на рис. 19.2.

Нумерация узлов в схеме выполняется командой меню *Circuit*→*Schematic Options...*→*Show nodes*. Фурье-анализ – командой *Analysis*→*Fourier...* (рис. 19.3).

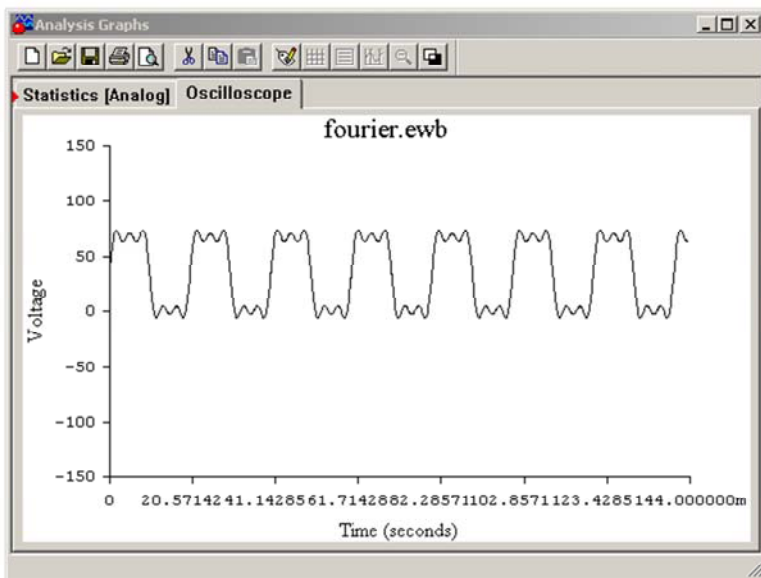


Рис. 19.2. Синтез несинусоидальной кривой (файл **fourier.ewb**).

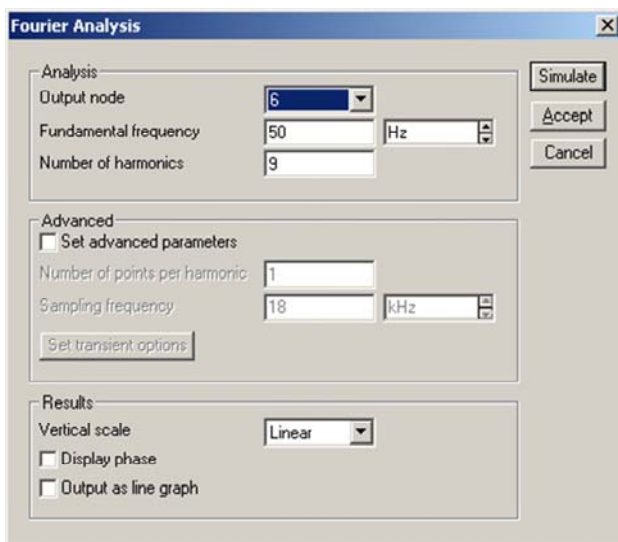


Рис. 19.3. Анализ несинусоидальной кривой (файл **fourier.ewb**)

Обратить внимание на выбор номера выходного узла (Output node) и частоты основной гармонике (Fundamental frequency). Результаты анализа Фурье после нажатия кнопки «*Simulate*» появляются во вкладке *Fourier* (рис. 19.4).

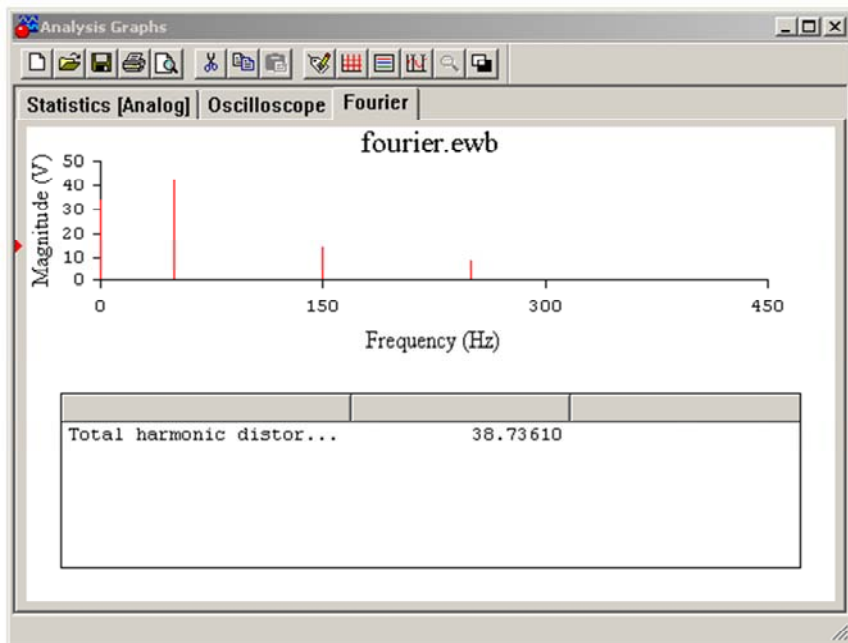


Рис. 19.4. Результаты анализа несинусоидальной кривой (файл **fourier.ewb**)

Сравнить расчетное значение коэффициента гармоник  $k_3 = \left( \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} \right) / U_1$  (окно *Description*) с вычисленной программой (Total harmonic distortion).

Нажать в окне *Analysis Graphs* третью кнопку справа (Toggle Cursors) и, используя курсоры, измерить амплитуды спектра и соответствующие им частоты (рис. 19.5). Сравнить их с данными источников цепи, сделать вывод о приемлемой точности анализа Фурье.

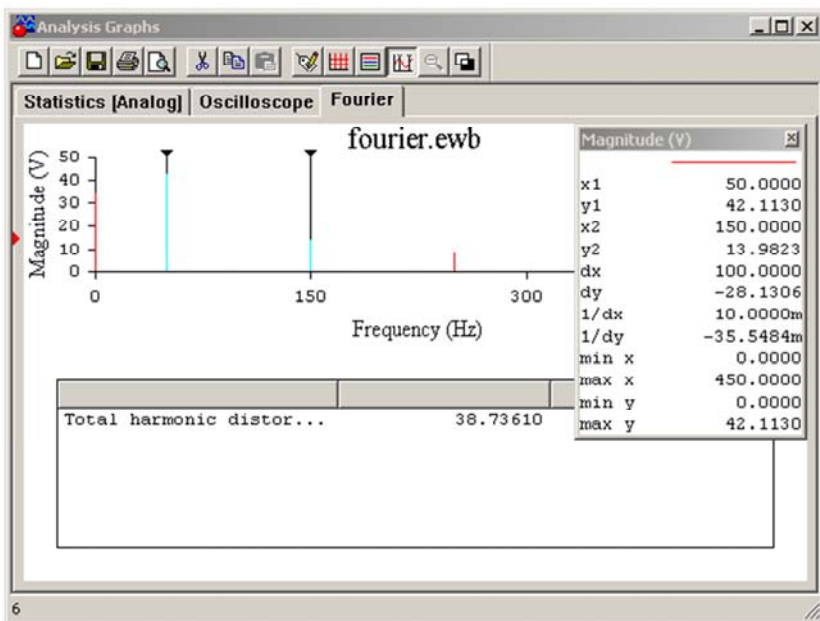


Рис. 19.5. Измерение амплитуд с помощью курсоров (файл **fourier.ewb**)

В цепи переключатель Space (клавиша Пробел) установить в нижнее положение и повторить анализ Фурье для источника прямоугольного сигнала. Выяснить, какие гармоники появляются при такой форме сигнала.

2. Изучить высшие гармоники в кривой выпрямленного напряжения однофазных выпрямителей (файл **rc\_fouri.ewb**, рис. 19.6).

Выполнить Фурье-анализ для двухполупериодной схемы без фильтра (рис. 19.7).

Измерить амплитуды спектра и соответствующие им частоты. Рассчитать коэффициент пульсаций  $k_{п} = U_{m(1)}/U_0$  для основной гармоники (с частотой  $m \cdot f_c$ ). Сравнить с табличным значением.

Выполнить Фурье-анализ для однополупериодной схемы без фильтра (переключатель 1 разомкнут).

Выполнить то же для схем с фильтрами (C-фильтр с  $C = 50; 150$  мкФ; L-фильтр; Г-образный, П-образные фильтры). Рассчитать коэффициент сглаживания каждого фильтра  $k_{сгл} = k_{п1}/k_{п2}$ .

Гармонический анализ напряжения однофазных выпрямителей

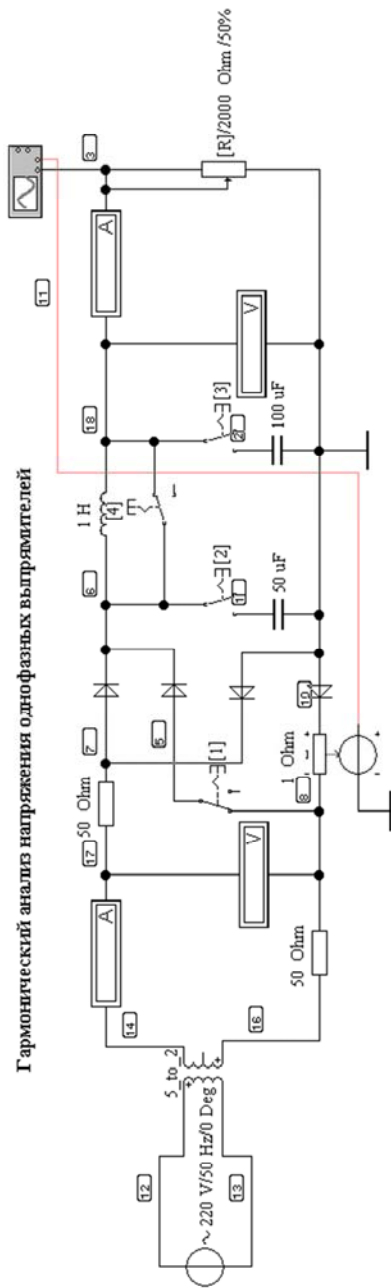


Рис. 19.6. Гармонический анализ напряжения однофазных выпрямителей (файл **rs\_four1.ewb**)

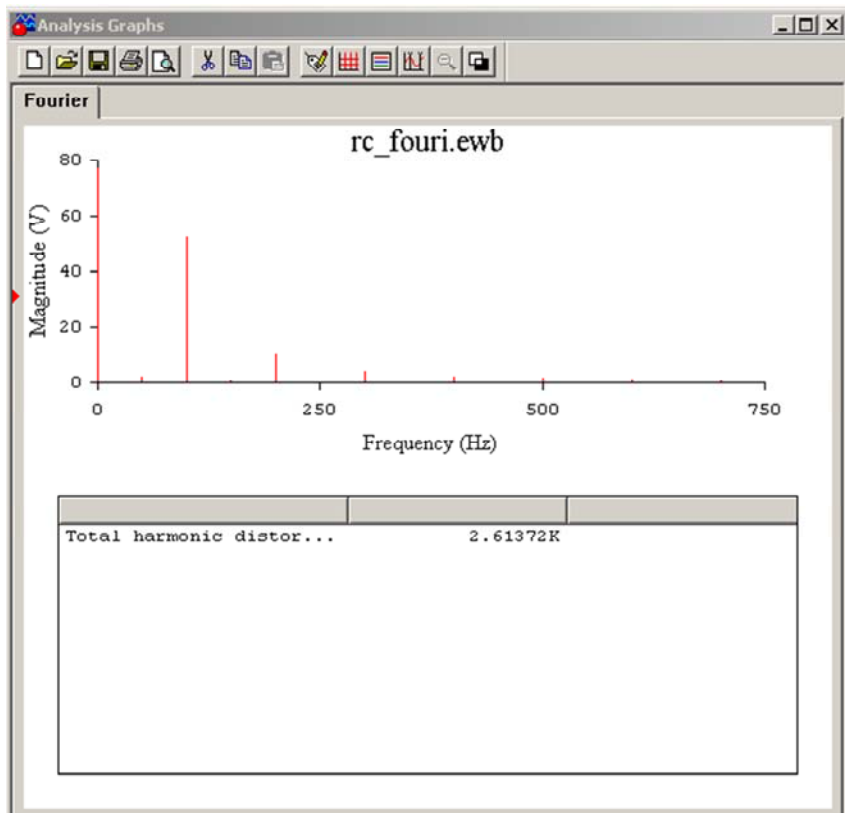


Рис. 19.7. Гармонический анализ напряжения мостового выпрямителя (файл **rc\_fouri.ebw**)

3. Выполнить Фурье-анализ для трех- и многофазных схем выпрямления (**rect\_4f.ebw**, **rect\_5f.ebw**, **rect\_6f.ebw**, рис. 19.8, 19.9, 19.10). Рассчитать коэффициент пульсаций  $k_{\text{п}} = U_{m(1)} / U_0$  для основной гармоники (с частотой  $m \cdot f_c$ ). Сравнить с табличным значением.

Обратить внимание на уменьшение амплитуд высших гармоник при включении сглаживающих фильтров.

Выполнить Фурье-анализ для трехфазной мостовой несимметричной схемы выпрямления (файл **rect\_nes2.ebw**, рис. 19.11). Изменяя угол управления (клавишей «R»), проследить за изменением спектрального состава.

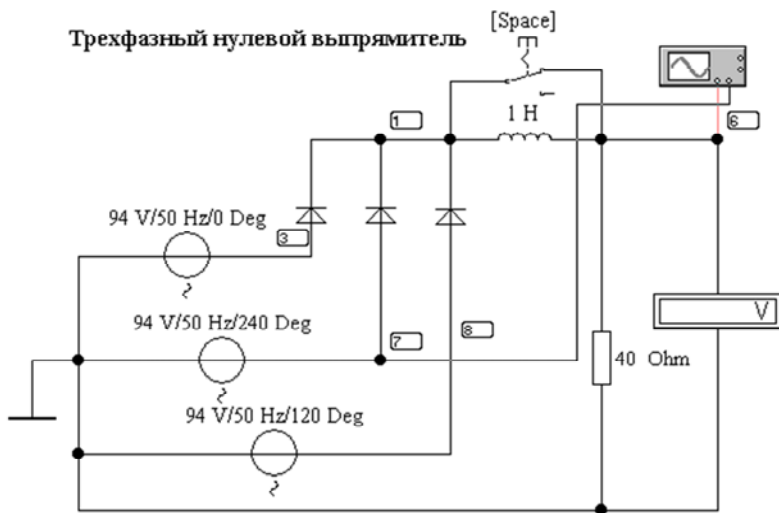


Рис. 19.8. Трёхфазный нулевой выпрямитель (файл `rect_4f.ewb`)

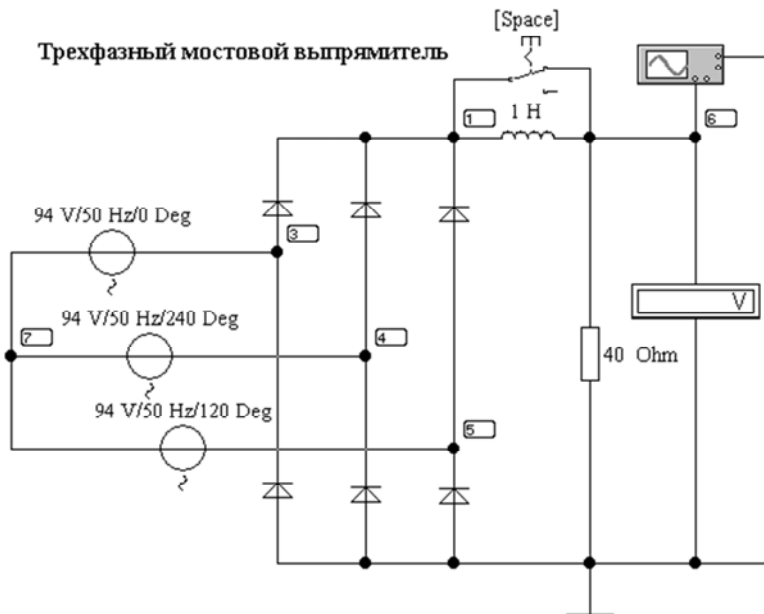


Рис. 19.9. Трёхфазный мостовой выпрямитель (файл `rect_5f.ewb`)

# Шестифазный выпрямитель

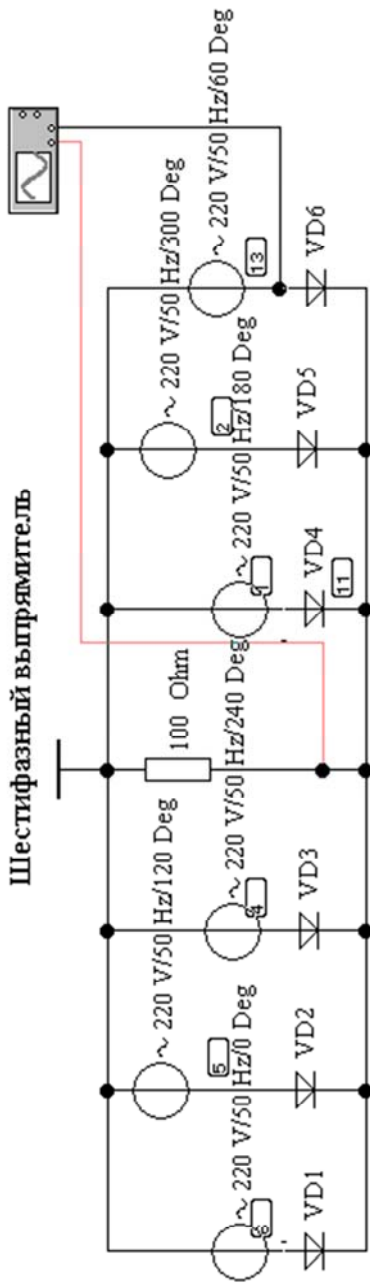


Рис. 19.10. Шестифазный выпрямитель (файл **rect\_6f.ewb**)



## Трехфазный мостовой несимметричный выпрямитель

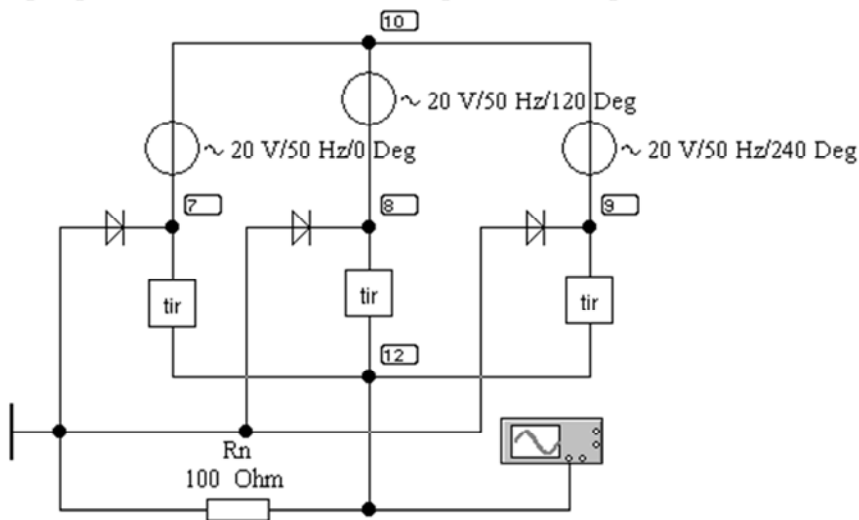


Рис. 19.11. Трехфазный мостовой несимметричный выпрямитель  
(файл `rect_nes2.ewb`)

4. Изучить высшие гармоники в кривой потребляемого тока (файл `irm_four.ewb`, рис. 19.12). Исследовать работу источника реактивной мощности (сетевых фильтров) по осциллограммам.

Выполнить Фурье-анализ для узлов выпрямителя (до сетевого фильтра, узел 45) и источника (после сетевого фильтра, узел 41). Сравнить коэффициенты гармоник. Обратите внимание на отсутствие гармоник, кратных трем. Отметить необходимость устранения 5-й и 7-й гармоник. Рассчитать резонансные частоты сетевых фильтров:

$$f_5 = 1 / \left( 2\pi \cdot \sqrt{3L_5C_5} \right) = 5 \cdot f_1;$$

$$f_7 = 1 / \left( 2\pi \cdot \sqrt{3L_7C_7} \right) = 7 \cdot f_1.$$

Схема подключения фیلтровокомпенсирующего устройства  
(Источник реактивной мощности)

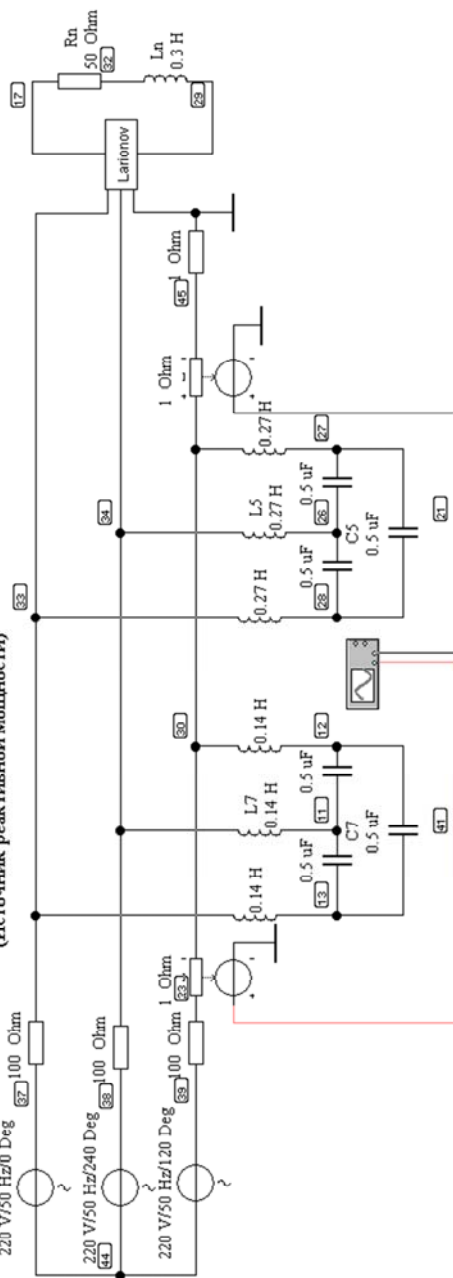


Рис. 19.12. Трехфазный мостовой несимметричный выпрямитель (файл **irm\_four.cwb**)

## Контрольные вопросы

1. Как рассчитать коэффициент гармоник?
2. Перечислить гармоники, составляющие прямоугольный периодический сигнал?
3. Для чего применяют сглаживающие фильтры в выпрямителях?
4. Какова частота основной гармоники выпрямленного напряжения в однофазной двухполупериодной схеме?
5. Какова частота основной гармоники выпрямленного напряжения в схеме Ларионова?
6. Какие гармоники присутствуют в кривой потребляемого тока схемы Ларионова?
7. Для чего применяют сетевые фильтры?
8. На какие гармоники рассчитывают сетевые фильтры в трехфазных сетях?

## Практическое занятие № 20

### РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

#### Содержание занятия

1. Исследование регуляторов переменного напряжения (РПН). Два встречно-параллельно соединенных «тиристора» (файл **rpn2.ewb**, рис. 20.1). Вспомнить, как регулировать напряжение при использовании модели тиристора – управляемого напряжением ключа.

#### Регулятор переменного напряжения

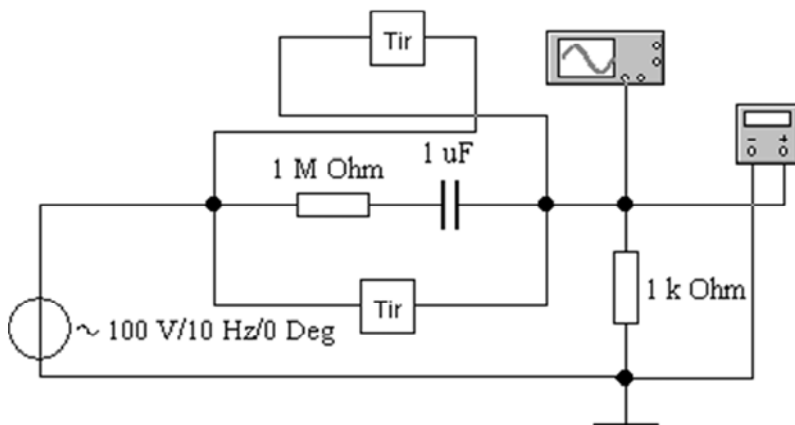
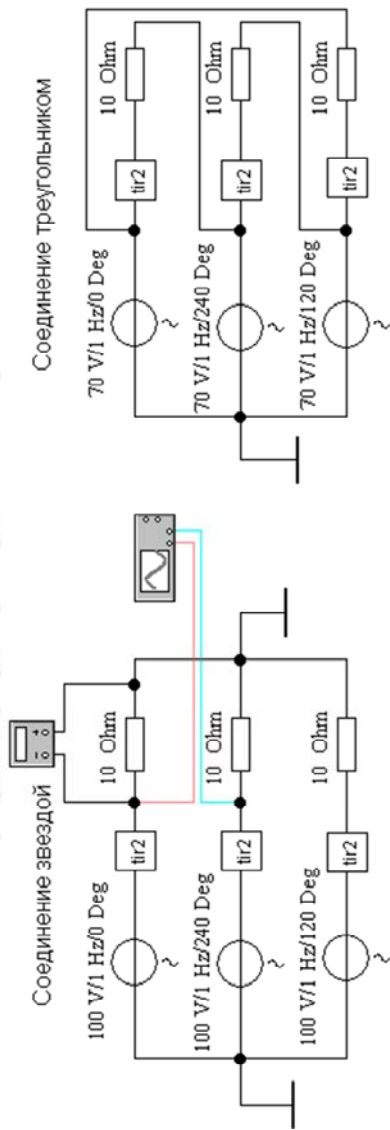


Рис. 20.1. Регулятор переменного напряжения (файл **rpn2.ewb**)

Исследование трехфазных регуляторов переменного напряжения (файл **rpn3.ewb**, рис. 20.2). Подключая осциллограф поочередно к каждой схеме, убедиться в работоспособности регуляторов напряжения всех фаз.

Исследовать реверсивный трехфазный регулятор переменного напряжения (файл **rpn3revs.ewb**, рис. 20.3). Обратит внимание на изменение порядка чередования фаз при нажатии клавиши «Space» (Пробел).

### Трехфазные регуляторы переменного напряжения



### Соединение приемников звездой, регуляторов - треугольником

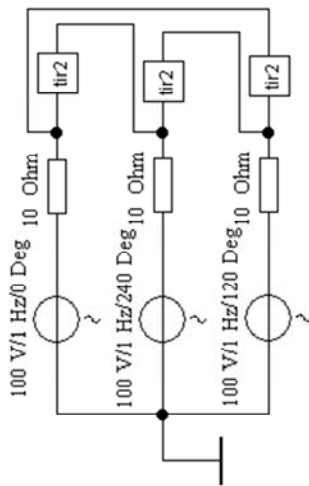


Рис. 20.2. Трехфазные регуляторы переменного напряжения (файл **gpn3.ewb**)

### Реверсивный трехфазный регулятор переменного напряжения

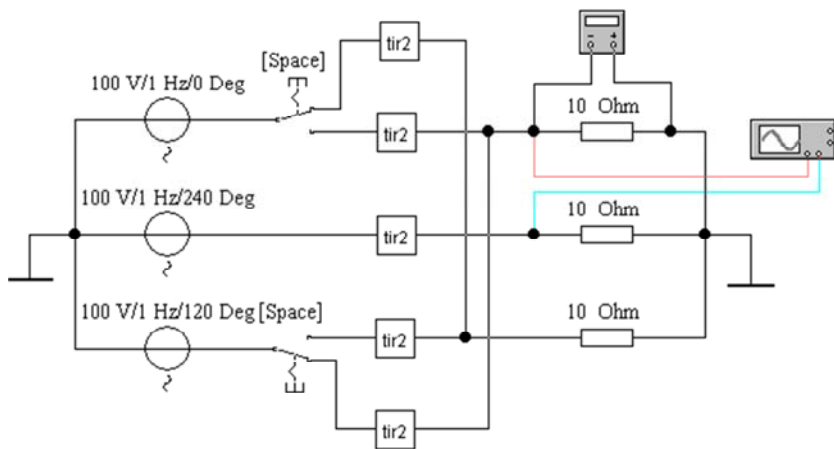


Рис. 20.3. Реверсивный трехфазный регулятор переменного напряжения (файл **rpn3revs.ewb**)

Исследовать РПН с одним тиристором в силовой цепи (файл **rpn4.ewb**, рис. 20.4). Нажимая клавишу «R», выполнить регулирование переменного напряжения.

### Регулятор переменного напряжения

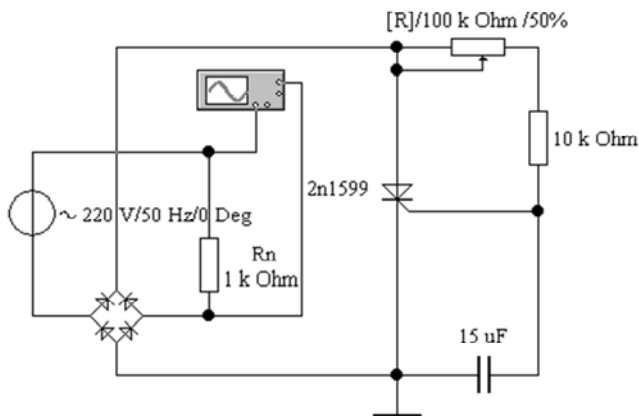


Рис. 20.4. Регулятор переменного напряжения с одним тиристором (файл **rpn4.ewb**)

Исследовать способы регулирования переменного напряжения: высокочастотный (файл **rpn5.ewb**, рис. 20.5) и низкочастотный (файл **rpn51.ewb**, рис. 20.6).

**РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ОДНИМ ТИРИСТОРОМ  
(способ регулирования - высокочастотный)**

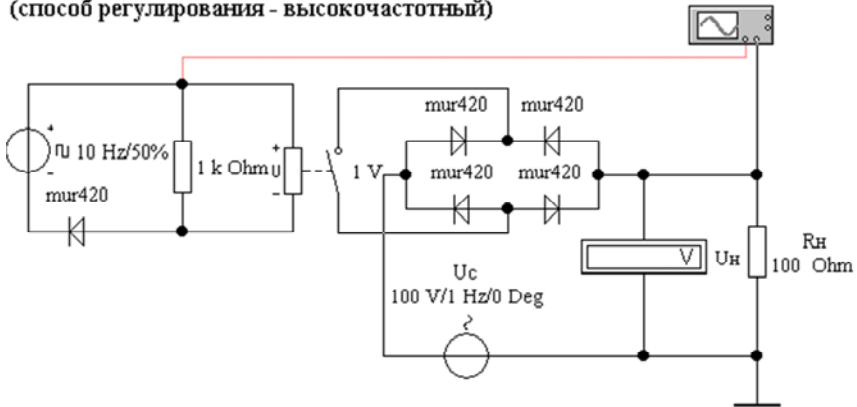


Рис. 20.5. Регулятор переменного напряжения (ВЧ регулирование)  
(файл **rpn5.ewb**)

**РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ОДНИМ ТИРИСТОРОМ  
(способ регулирования - низкочастотный)**

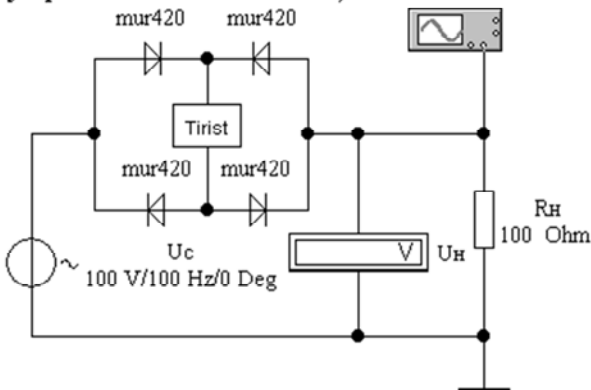


Рис. 20.6. Регулятор переменного напряжения (НЧ регулирование)  
(файл **rpn51.ewb**)

Возможность регулирования выпрямленного напряжения на стороне переменного напряжения при создании управляемого выпрямителя на повышенное напряжение (файл **rpn22.ewb**, рис. 20.7).

**Управляемый выпрямитель на повышенное напряжение**

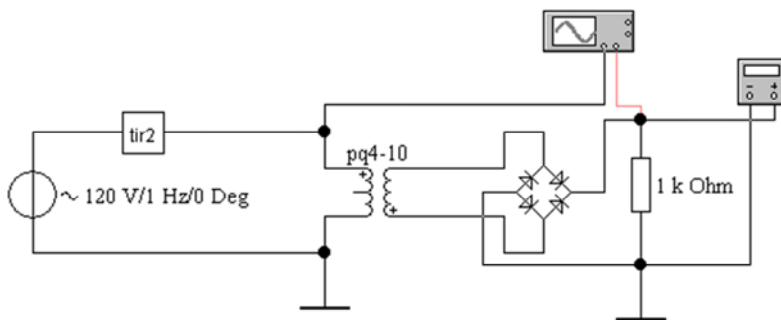


Рис. 20.7. Управляемый выпрямитель на повышенное напряжение (файл **rpn22.ewb**)

2. Исследование импульсных преобразователей постоянного напряжения (ИППН). ИППН с узлом параллельной коммутации ( $C_k$  параллельно  $V_{Sc}$ ) (файл **ippn1.ewb**, рис. 20.8).

**ИППН с узлом параллельной коммутации  
( $C_k$  параллельно  $V_{Sc}$ )**

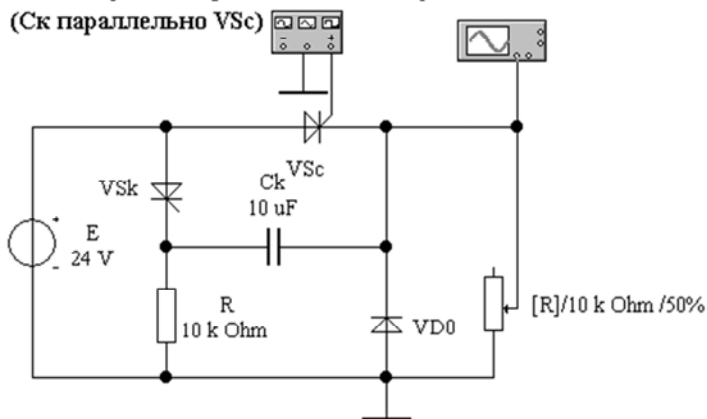


Рис. 20.8. ИППН с узлом параллельной коммутации ( $C_k$  параллельно  $V_{Sc}$ ) (файл **ippn1.ewb**)



ИППН с узлом параллельной коммутации ( $Ck$  параллельно  $Rn$ ) (файл **ippn2.ewb**, рис. 20.9). Для открытия силового тиристора  $VSc$  дважды нажать клавишу «1», для его закрытия – дважды клавишу «2».

**ИППН с узлом параллельной коммутации ( $Ck$  параллельно  $Rn$ )**  
(вкл. - клавиша 1 дважды; выкл. - клавиша 2 дважды)

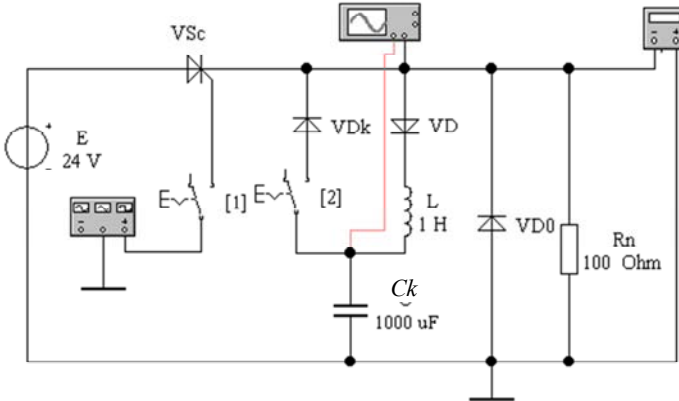


Рис. 20.9. ИППН с узлом параллельной коммутации ( $Ck$  параллельно  $Rn$ ) (файл **ippn2.ewb**)

Исследование реверсивного ИППН (файл **ippn\_rev.ewb**, рис. 20.10).

**Импульсный преобразователь постоянного напряжения**  
(ИППН) реверсивный

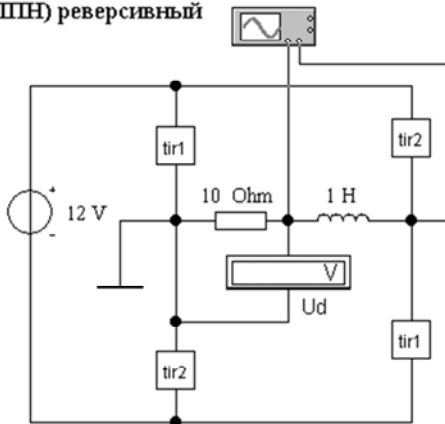


Рис. 20.10. Реверсивный ИППН (файл **ippn\_rev.ewb**)

Исследование повышающего ИППН (файл **ippn\_up.ewb**, рис. 20.11). Объяснить, почему напряжение нагрузки выше напряжения источника питания. Выяснить способы регулирования напряжения.

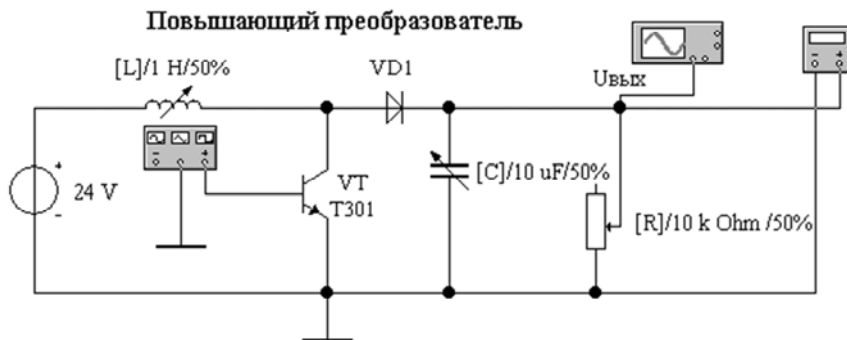


Рис. 20.11. Повышающий ИППН (файл **ippn\_up.ewb**)

Исследование понижающего ИППН (файл **ippn\_d.ewb**, рис. 20.12).

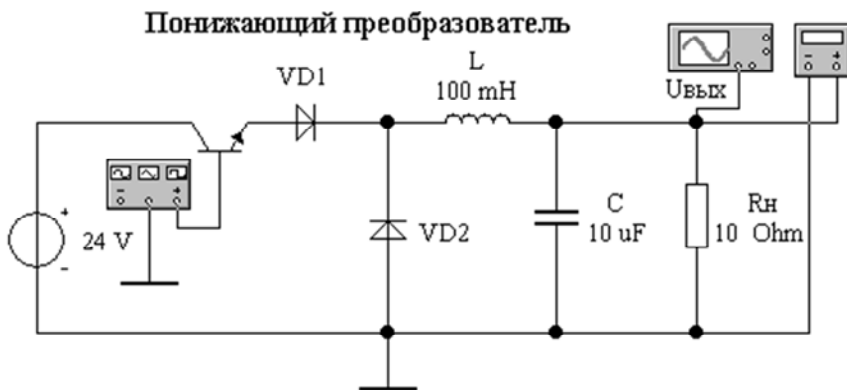


Рис. 20.12. Понижающий ИППН (файл **ippn\_d.ewb**)

## Контрольные вопросы

1. Назовите способы регулирования переменного напряжения.
2. Каковы достоинства и недостатки низкочастотного способа регулирования переменного напряжения.
3. Перечислите схемы трехфазных РПН?
4. Для чего предназначен реверсивный трехфазный РПН?
5. Как классифицируют ИППН по узлам искусственной коммутации?
6. Для чего предназначен реверсивный ИППН?
7. Почему напряжение нагрузки повышающего ИППН выше напряжения источника питания?

## Практическое занятие № 21

### АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

#### Содержание занятия

1. Исследование автономных инверторов (АИ). Автономный инвертор напряжения (файл **ain2.ewb**, рис. 21.1). Обратите внимание на использование модели тиристора – управляемого временем ключа Time-Delay Switch и ограниченного времени работы схемы.

#### Автономный инвертор напряжения (АИН)

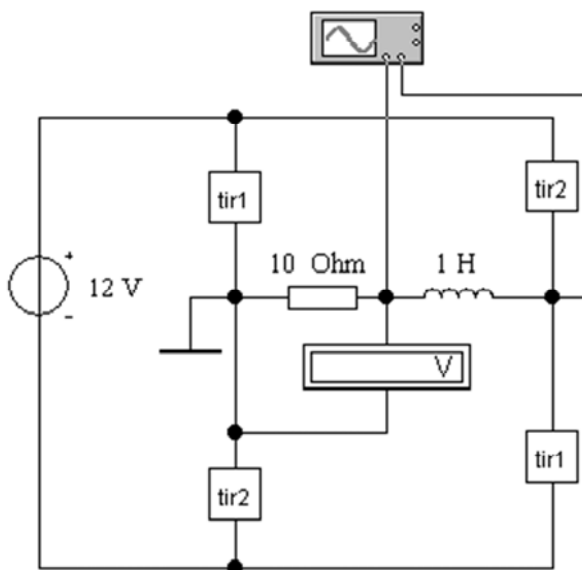


Рис. 21.1. Автономный инвертор напряжения (файл **ain2.ewb**)

Исследование трехфазных автономных инверторов напряжения (файл **ain3.ewb**, рис. 21.2). Алгоритм работы ключей приведен в окне *Description*. Переключая осциллограф с помощью клавиши «Space» (Пробел), обратить внимание на различие осциллограмм линейного и фазного напряжений. Зарисовать их.

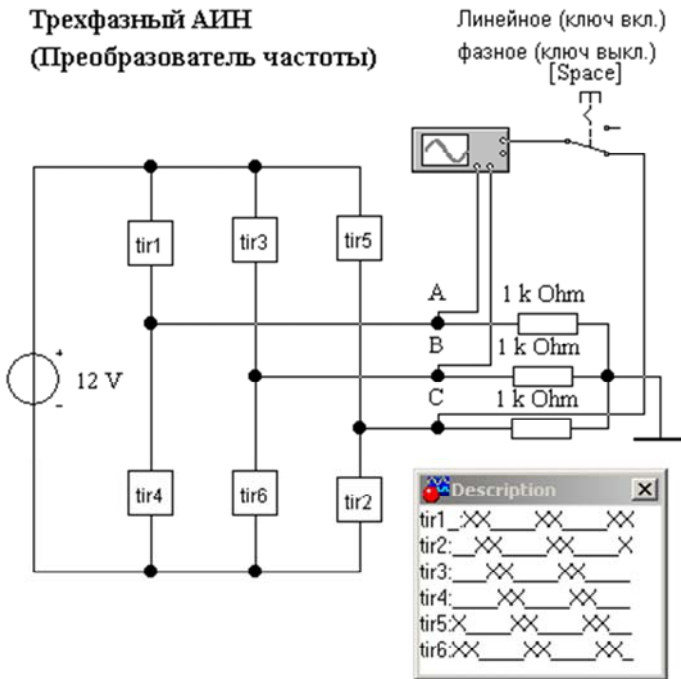


Рис. 21.2. Трёхфазный автономный инвертор напряжения (файл **ain3.ewb**)

При исследовании трёхфазного автономного инвертора напряжения (файл **ain32.ewb**, рис. 21.3), вентили которого работают с перекрытием, зарисовать осциллограмму и сравнить с предыдущими. Алгоритм работы ключей приведен в окне *Description*.

### Трёхфазный АИН: работа вентилях с перекрытием (Преобразователь частоты)

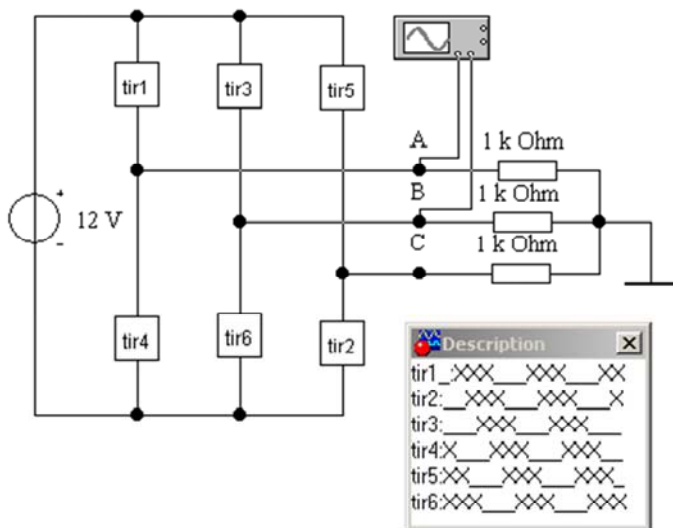


Рис. 21.3. Трёхфазный автономный инвертор напряжения:  
работа вентилях с перекрытием (файл **ain32.ewb**)

Исследование автономного инвертора тока (файлы **ait.ewb**,  
рис. 21.4 и **ait2.ewb**, рис. 21.5).

### Автономный инвертор тока (АИТ)

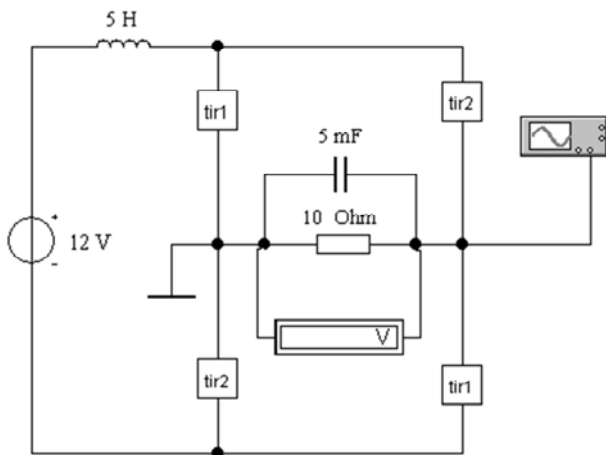


Рис. 21.4. Автономный инвертор тока (файл **ait.ewb**)

### АИТ с нулевым выводом

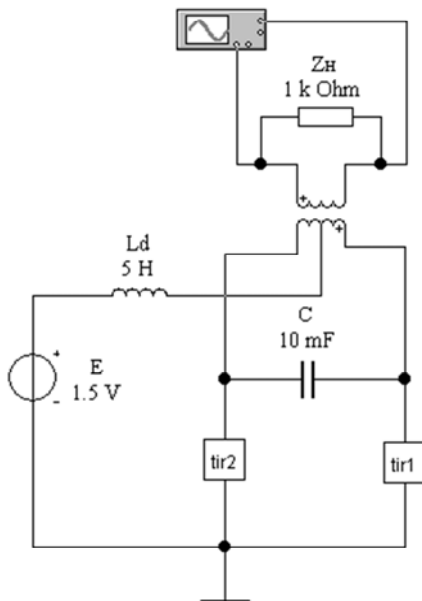


Рис. 21.5. Автономный инвертор тока с нулевым выводом (файл **ait2.ewb**)

Исследование автономного резонансного инвертора (АИР) (файл **air.ewb**, рис. 21.6). Выяснить, как влияют на частоту выходного напряжения значения индуктивности и емкости.

### Автономный резонансный инвертор (АИР)

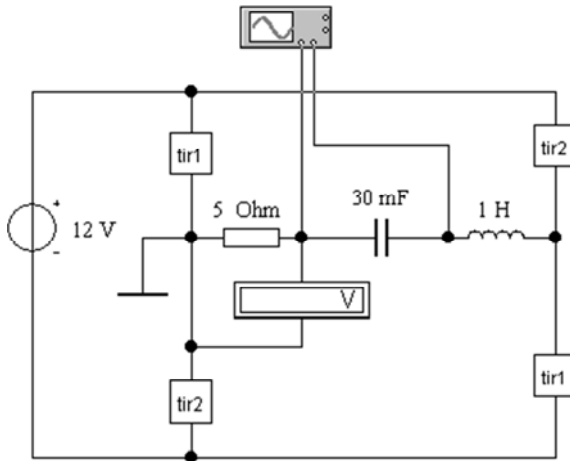


Рис. 21.6. Автономный резонансный инвертор (файл **air.ewb**)

2. Исследование преобразователей частоты (ПЧ). Изучить ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (файл **pc1.ewb**, рис. 21.7).

### Преобразователь частоты (с промежуточным звеном постоянного тока)

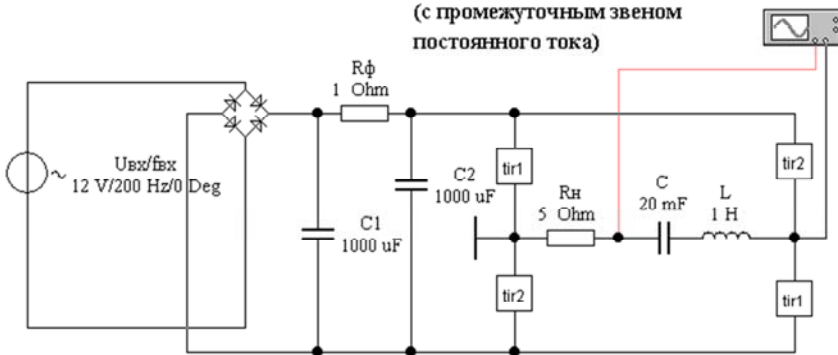


Рис. 21.7. Преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока (файл **pc1.ewb**)



Изучить непосредственный преобразователь частоты (файл **pc2.ewb**, рис. 21.8). Выяснить, как можно изменять частоту напряжения на нагрузке. Снять осциллограмму при обрыве фазы.

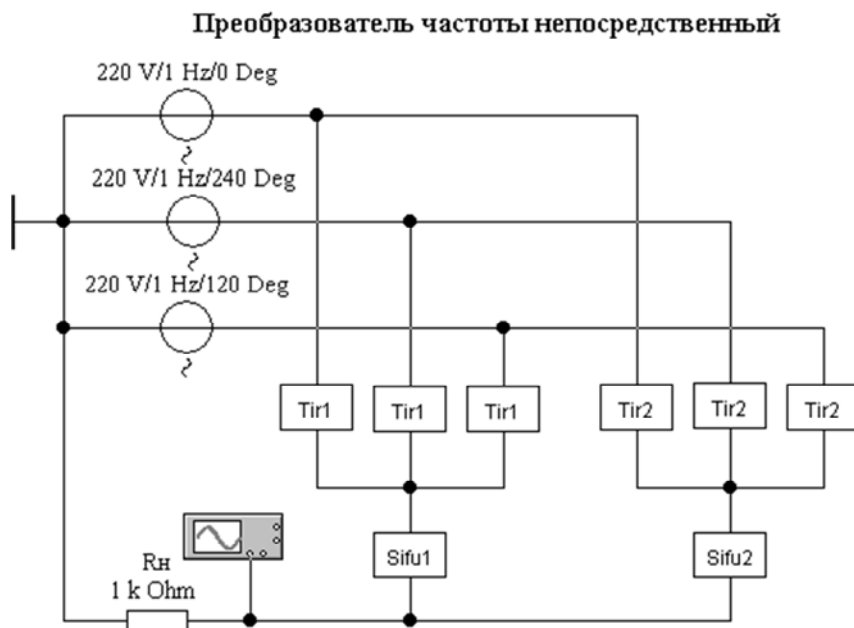


Рис. 21.8. Непосредственный преобразователь частоты (файл **pc2.ewb**)

### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен автономный инвертор?
2. Как классифицируются автономные инверторы?
3. Какова форма напряжения в АИН, АИТ, АИР?
4. Какой алгоритм работы вентиля применяется в трехфазных АИТ?
5. Почему нельзя допускать открытого состояния всех вентилях в АИН, а в АИТ это делать можно?
6. Для чего предназначен преобразователь частоты?
7. В чем разница между ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока и непосредственным ПЧ?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлащук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC : лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В. И. Карлащук. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

2. Бладыко, Ю. В. Сборник задач по электротехнике и электронике : учебное пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Ю. В. Бладыко [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2013. – 478 с.

3. Бладыко, Ю. В. Электроника : методическое пособие к выполнению расчетно-графической работы / Ю. В. Бладыко, Г. С. Климович, Л. С. Пекарчик. – Минск: БНТУ, 2005. – 71 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 16 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ .....	3
Практическое занятие № 17 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ, АКТИВНЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ, УМНОЖИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ .....	12
Практическое занятие № 18 ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ .....	25
Практическое занятие № 19 ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ В КРИВОЙ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА .....	33
Практическое занятие № 20 РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	44
Практическое занятие № 21 АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ .....	52
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	58

Учебное издание

**БЛАДЫКО** Юрий Витальевич

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-43 01 01 «Электрические станции»,  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43 01 03 «Электроснабжение»,  
1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»

В 3 частях

Часть 3

Редактор *А. Д. Спичёнок*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 20.04.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,48. Уч.-изд. л. 2,72. Тираж 100. Заказ 251.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.