

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

**Кафедра электропитание
устройств связи**

Конспекты лекций по курсу

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Составитель: Алиев У.Т.

Ташкент 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Лекция 1.	Введение Источники электроэнергии. Нетрадиционные источники энергии.....	3
2.	Лекция 2.	Трансформаторы. Устройство и принцип действия. Режимы работы трансформатора.....	8
3.	Лекция 3.	Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы. Трансформаторы тока и напряжения. Трехфазные цепи. Трехфазные трансформаторы	14
4.	Лекция 4.	Электрические машины.....	21
5.	Лекция 5.	Выпрямители. Однофазные схемы выпрямления	33
6.	Лекция 6.	Трехфазные схемы выпрямления. Тиристорные управляемые выпрямители.....	38
7.	Лекция 7.	Сглаживающие фильтры. Умножители напряжения.....	49
8.	Лекция 8	Стабилизаторы. Параметрические стабилизаторы. Тиристорные стабилизаторы.....	58
9.	Лекция 9.	Компенсационные стабилизаторы с непрерывным регулированием.	63
10.	Лекция 10.	Импульсные стабилизаторы напряжения.....	68
11.	Лекция 11.	Преобразователи напряжения.....	71
2.	Лекция 12.	Двухтактные преобразователи с независимым возбуждением. Тиристорные преобразователи.....	73
13.	Лекция 13.	Тиристорные преобразователи.....	75
14.	Лекция 14.	Электромагнитная совместимость источников электропитания с системой электроснабжения.....	77
15.	Лекция 15.	Источники электропитания персональных компьютеров.....	87
16.	Лекция 16.	Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры.....	94
		Литература.....	99

Лекция №1

Введение. Источники электроэнергии. Нетрадиционные источники энергии

1. Источники электроэнергии

Электрическую энергию получают из других видов энергии непосредственно или путём промежуточных преобразований. Для этого используют природные энергетические ресурсы – органическое и ядерное топливо, а также возобновляемые источники энергии: течение рек, водопады, океанские приливы, солнечную радиацию, ветер, геотермальные источники, биомассу и т.д.

Электрическую энергию широко используют во многих отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, на транспорте, в системе связи, в науке, быту и т.д. Производство электрической энергии и её распределение относится к отрасли энергетики. Поэтому энергетика является ключевой отраслью народного хозяйства страны.

Источники электрической энергии разделяются на первичные и вторичные источники. Первичные источники электрической энергии преобразуют энергию разных видов на электрические энергии. К ним относятся генераторы, аккумуляторы и т.п. Вторичные источники электрической энергии преобразуют электрическую энергию одного вида или одного параметра на электрическую энергию другого вида или другого параметра. К ним относятся трансформаторы, выпрямители и т.п.

2. Нетрадиционные источники энергии

Возобновляемые источники энергии - это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Возобновляемые источники энергии привлекают своей относительной экологической чистотой, и поэтому появляется принципиальная возможность открывать и использовать новые источники энергии. Наиболее интересными видами ВИЭ являются солнечная энергия, тепловая геотермальная энергия, приходящая из недр Земли, гидравлическая энергия от использования приливно-отливных явлений и энергия ветра, порождаемых гравитационным взаимодействием Земли, Луны и Солнца.

Наибольшая плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю, составляет примерно 1 кВт/м^2 в диапазоне длин волн $0.3\text{-}2.5 \text{ мкм}$. Это излучение называется коротковолновым и включает видимый спектр. Для населённых пунктов в зависимости от места, времени суток и погоды потоки солнечной энергии, достигающие Земли, меняются от 3 до 10 МДж/м^2 в день. Солнечное излучение характеризуется энергией фотонов в максимуме распределения (порядка 2 эВ), определяемой при температуре поверхности Солнца в 6000°К . Потоки энергии излучения, связывающие атмосферу с

поверхностью Земли, тоже порядка 1 кВт/м^2 , но они перекрывают другой спектральный диапазон - от 5 до 25 мкм, называемый длинноволновым, с максимумом около 10 мкм. По спектру коротковолновое и длинноволновое излучения расположены друг от друга достаточно далеко и могут быть легко различимы.

Для наиболее подробно показать, можно ли использовать энергию солнечного излучения в качестве энергии, подводимой к солнечному устройству, ориентированному определённым образом, в определённом месте и в определённое время. Для этого полезным будет представление геометрии Земли и Солнца. На рис.1 изображена структура Земли. Земля обращается за 24 часа вокруг своей оси (ось обозначена точками северного и южного полюсов N и S). Ось перпендикулярна экваториальной плоскости Земли. Точки P, E и G на поверхности Земли характеризуются широтой φ и долготой ψ .

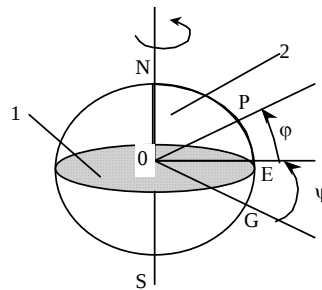


Рис.1. Схема определения широты φ и долготы ψ ,
1 - экваториальная плоскость, 2 - меридиональная плоскость.

Часовой угол ω в точке P есть угол, на который Земля поворачивается с момента солнечного полдня. Так как Земля поворачивается за 1 час на $360^\circ/24 = 15^\circ$, то часовой угол определяется выражением

$$\omega = (15^\circ \cdot \text{ч}^{-1}) (t_{\text{solar}} - 12 \text{ ч}) = (15^\circ \cdot \text{ч}^{-1}) - (t_{\text{zone}} - 12 \text{ ч}) + \omega_{\text{eq}} + (\psi - \psi_{\text{zone}}),$$

где t_{solar} и t_{zone} - соответственно локальное солнечное и декретное время (в часах); ψ_{zone} - долгота, на которой находится Солнце, когда t_{zone} соответствует полудню (когда солнечное и декретное время совпадают, т.е. $t_{\text{solar}} = t_{\text{zone}}$).

Земля обращается вокруг Солнца за 1 год. Направление земной оси остаётся фиксированным в пространстве под углом $\delta_0 = 23.5^\circ$ к нормали к плоскости вращения. Угол между направлением к Солнцу и экваториальной плоскостью называется *склонением* δ и является мерой сезонных изменений. Склонение есть широта точки, для которой Солнце находится в зените в полдень по солнечному времени. В северном полушарии δ плавно меняется от $\delta_0 = +23.5^\circ$ в период летнего солнцестояния до $\delta_0 = -23.5^\circ$ в период зимнего солнцестояния. Аналитически получено выражение:

$$\delta = \delta_0 * \text{Sin}[360^\circ * (284 + n) / 365],$$

где n - день, года ($n = 1$ соответствует 1 Январю).

Лучистая энергия Солнца, распространяющаяся во все стороны, составляет $4 \cdot 10^{20}$ млн. кВт. Из этого количества на Землю приходится менее одной миллиардной части, что составляет $1.78 \cdot 10^{17}$ Вт, в то время, как потребляемая энергия на Земле составляет около $3 \cdot 10^{11}$ МДж. На поверхность Земли попадает малое количество энергии за счёт следующих факторов:

- высоты Солнца над горизонтом из-за наклона оси вращения Земли;
- состояния атмосферы;
- оптических свойств поверхности.

При наиболее благоприятных условиях, то есть в районах близких к экватору, когда Солнце в Зените, а небо безоблачно, на 1 м^2 поверхности может поступать до 1 кВт лучистой энергии.

Существует два способа преобразования солнечной энергии: прямое преобразование солнечного излучения в электрическую (фотопреобразователи) и преобразование в тепловую энергию (солнечные коллекторы). Для прямого преобразования солнечного излучения используются полупроводниковые материалы.

Полупроводниковые материалы, из которых изготавливаются солнечные элементы, имеют удельное сопротивление от 10^{-2} до 10^2 Ом·см. Полупроводники бывают р-типа или n-типа. Процесс преобразования солнечной энергии в электрическую сопровождается фотоэлектрическим эффектом. Он возникает в поверхностных слоях полупроводника, толщиной 2-3 мкм в виде некоторого количества свободных электронов. С появлением в теле полупроводника свободных электронов и при наличии разности электрических потенциалов в нём возникает электрический ток. Разность потенциалов образуется между облучаемой поверхностью полупроводника и его теневой стороной за счёт внедрения в его поверхностные слои специальных добавок (рис.2).

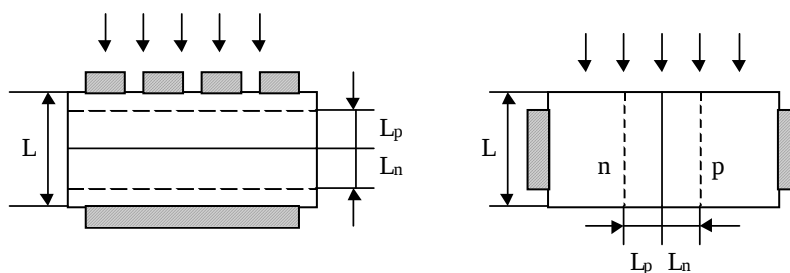


Рис.2. Схема р-п перехода

Один из добавок (n-типа) образует дополнительные электроны и отрицательный заряд поверхности, другой (р-типа) - дефицит электронов и, следовательно, положительный заряд. На границе образуется контактная разность потенциалов вследствие диффузии электронов. Если полупроводник с дырочной (р-типа) проводимостью освещается, то его электроны, поглощая кванты света, переходят на полупроводник с электронной (n-типа) проводимостью. В замкнутой цепи при этом образуется электрический ток.

Чаще всего используют солнечные элементы из кремния. Кремний - один из самых распространённых элементов на Земле. Элементы производятся путём плавления кремния и затем выращивания кристаллического кремния в виде круглых стержней диаметром от 5 до 10 см. Для получения непосредственно полупроводниковых элементов эти стержни разрезаются на тонкие пластинки толщиной около 300 мкм, которые и служат основной частью фотоэлектрических элементов.

При освещении фотоэлемент генерирует электрическое напряжение величиной 0,5 В. Независимо от типа и схемы включения все (большие и малые) фотоэлементы генерируют напряжение 0,5 В. По иному обстоит дело с выходным током элемента. Он зависит от интенсивности света и размера элемента, под которым подразумевается площадь поверхности. Сила тока зависит также от длины волны света и его интенсивности, причём она прямо пропорциональна интенсивности его излучения. Чем ярче свет, тем больший ток генерируется солнечным элементом. В наземных условиях с интенсивностью светового излучения 1 кВт/м² КПД данных элементов может достичь 22-26%, а у промышленных образцов - 10-14%.

В связи с энергетическим кризисом во многих развитых странах Европы приняты и реализуются крупномасштабные целевые программы освоения нетрадиционных энергоресурсов, в частности, энергии ветра. Ветер является случайным неуправляемым природным процессом, вызванный действием Солнца и вращением Земли. К характерным особенностям ветра, как энергетического источника, относится, прежде всего, его непостоянство, которое обусловлено главным образом большой изменчивостью скоростей. Это приводит к изменению кинетической энергии ветрового потока в больших пределах даже в течение относительно малых промежутков времени. То есть от нулевой энергии при штиле и до, во много раз превышающей расчётной в периоды буревых и ураганных усилий скорости.

Сила и направление ветра в различных зонах по-разному изменяется в зависимости от высоты над поверхностью Земли. Например, в северном полушарии ближе к поверхности Земли (20÷50 м) средняя скорость составляет 7-9 м/с. Скорость ветра, превышающая 25÷30 м/с, может нанести серьёзный ущерб народному хозяйству и поэтому энергию ветра для её преобразования в механическую или в электрическую энергию эффективно можно использовать при скорости ветра от 3 м/с до 25 м/с.

Энергия воздушного потока с поперечным сечением F равна

$$E = m \cdot v^2 / 2$$

Секундная масса m воздуха, протекающая со скоростью v через это сечение соответствует

$$m = \rho \cdot F \cdot v$$

тогда

$$E = \rho \cdot v^3 \cdot F / 2$$

где ρ – плотность воздуха, равная для нормальных условий 1,23 кг/м³ (при $t = 15^\circ\text{C}$, $p = 101,3$ кПа или 760 мм рт.ст). Таким образом, энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости. Ветроколесо может

преобразовать в полезную работу только часть этой энергии, которая оценивается коэффициентом использования энергии ветра. Современные ветродвигатели (ВД) при работе в нормальном режиме преобразуют в механическую работу не более 45–48% кинетической энергии ветрового потока. Для идеального случая по теории И.Е.Жуковского

$$\xi = E_{\text{ВД}} / E, \quad \xi = 0,593$$

то есть часть полной энергии потока, воспринятой ветроколесом, которую ветродвигатель преобразует в механическую энергию.

Удельная мощность (секундная энергия), которая заключена в потоке, имеющем поперечное сечение, равное 1 м^2 при $t = 15^\circ\text{С}$ и $\rho = 101,3 \text{ кПа}$ округленно составляет:

Скорость ветра, м/с	4	6	8	10	14	18	22
Мощность потока, кВт/м ²	0,04	0,13	0,31	0,61	1,67	3,6	6,25

Секундная работа или мощность, Н·м/с, развиваемая ветроколесом, определяется по формуле:

$$P = \rho \cdot v^3 \cdot F \cdot \xi / 2$$

Воздушный поток, как и любое движущиеся тело, обладает энергией движения, или запасом кинетической энергии. Эта кинетическая энергия с помощью ветроколеса или другого рабочего органа преобразуется в механическую энергию. В зависимости от назначения ветроустановки механическая энергия с помощью исполнительных механизмов (генератора, компрессора, электролизёра и т.д.) может быть преобразована в электрическую, тепловую, механическую энергию, а так же в энергию сжатого воздуха.

Лекция №2

Трансформаторы. Устройство и принцип действия. Режимы работы трансформатора

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий электрическую энергию переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию переменного тока с другими параметрами. Меняющимися параметрами могут быть: ток, напряжение, число фаз, форма кривой напряжения (в специальных трансформаторах - частота).

В устройствах электропитания трансформатор чаще всего применяется для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины. *По мощности* трансформаторы бывают силовыми (на мощность от единиц кВА до сотен кВА) и маломощными (от единиц ВА до единиц кВА). Маломощные трансформаторы применяются в аппаратуре связи и радиоаппаратуре в качестве согласующих или разделительных трансформаторов или для преобразования напряжения или тока. Силовые трансформаторы применяются в цепях питания радиопредприятий и предприятий проводной связи.

Трансформатор - это аппарат переменного тока и на постоянном токе не работает!

Любой трансформатор состоит из двух основных элементов - замкнутого стального сердечника и обмоток, намотанных медным проводом. Сердечник трансформатора делается из пластин специальной электротехнической стали. Толщина этих пластин зависит от рабочей частоты трансформатора, чем больше частота, тем тоньше пластины. *По форме сердечника и способу расположения на нём обмоток* трансформаторы бывают стержневые, броневые (Ш-образные), ториодальные и ленточные разрезные. *По схемному исполнению* (т.е. по числу обмоток) трансформаторы бывают *одно-, двух- и многообмоточные*. Обмотка, включённая в сеть источника электрической энергии, называется *первичной*, а обмотка, включённая в сеть приёмника энергии (потребителя), называется *вторичной*. Первичная обмотка трансформатора есть только одна, а вторичных может быть несколько. Однообмоточный трансформатор называется *автотрансформатором* (пример - бытовой трансформатор в стабилизаторе для ТВ). У него вторичной обмоткой служат отпайки от первичной обмотки. В нём между первичной и вторичной сторонами есть и магнитная и электрическая связь. *Двухобмоточный трансформатор* имеет одну первичную и одну вторичную обмотки. Они электрически изолированы друг от друга. *Многообмоточный трансформатор* имеет одну первичную и несколько вторичных обмоток, причём все обмотки электрически не связаны между собой.

По рабочей частоте трансформаторы условно можно разделить на трансформаторы:

- пониженной частоты (ниже 50 Гц);
- промышленной частоты (50 Гц);
- повышенной частоты (100 Гц - 10 кГц);
- высокой частоты (выше 10 кГц).

По числу фаз трансформаторы бывают однофазные (рис. 1) и многофазные (трёхфазные, шестифазные и т.д.). Число фаз первичной обмотки определяется числом фаз источника электрической энергии, а число фаз вторичной обмотки определяется назначением трансформатора в схеме. По напряжению трансформаторы бывают низковольтные (напряжение любой его обмотки меньше 1000 В) и высоковольтные (напряжение хотя бы одной выше 1000 В).

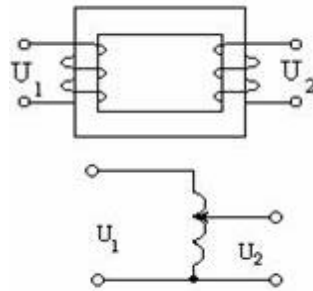


Рис.1. Однофазный трансформатор

1. Конструкция трансформаторов

Основными частями трансформатора являются стальной замкнутый сердечник (магнитопровод) и намотанные на нём обмотки. Сердечники бывают: стержневыми, броневыми, тороидальными, ленточными разрезными (рис. 2).

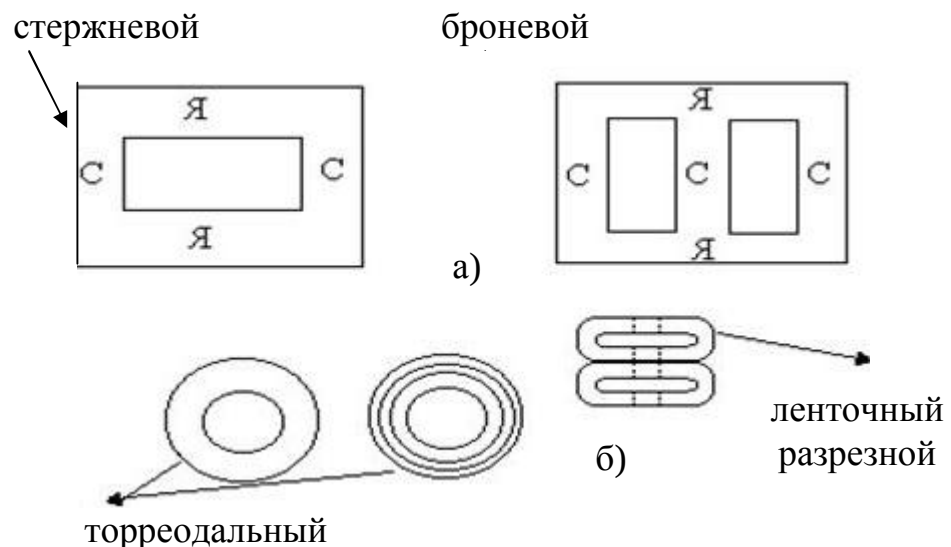


Рис. 2. Конструкция трансформаторов

Те части сердечника, на которые одеваются обмотки, называются *стержнями*, а те части, которые служат для замыкания магнитной цепи и не несут обмоток, называются *ярмом* (рис. 3). В стержневых однофазных

трансформаторах обмотки одеваются на оба стержня (половина каждой обмотки на один и половина на другой). В броневого (Ш - образных) однофазных трансформаторах обе обмотки одеваются на средний стержень, а в трёхфазных первичная и вторичная обмотка каждой фазы одевается на свой стержень. Торреодальные трансформаторы делаются только однофазными и малой мощности. Материалом сердечников служат пластины специальной электротехнической (трансформаторной) листовой стали марок Э-41, 42 и т.д. Толщина листов зависит от частоты трансформатора. Для трансформаторов, работающих на частоте $f=50$ Гц, используются листы стали толщиной 0,5 или 0,35 мм, а для трансформаторов, работающих на более высоких частотах, используются листы стали толщиной от 0,2 до 0,08 мм. Так как трансформаторы работают на переменном токе, то в стальных сердечниках наводятся вихревые токи (токи Фуко), которые ведут к потерям энергии в стали трансформатора. Чтобы уменьшить эти потери сердечники делают не цельнометаллическими, а набирают из тонких пластин, причём эти пластины с одной стороны покрывают слоем лака (или наклеивают тонкую бумагу), чтобы изолировать их друг от друга.

Стержневые сердечники собираются из отдельных пластин прямоугольной формы.

Броневого сердечники набирают из штампованных Ш-образных пластин. Торреодальные сердечники делают для маломощных трансформаторов (десятки Вт) повышенной частоты. Ленточные разрезные по форме подобны броневого.

По коэффициенту трансформации напряжения трансформаторы делят на понижающие и повышающие.

2. Принцип действия и режимы работы трансформаторов

Рассмотрим его на примере двухобмоточного стержневого трансформатора (рис. 3).

Принцип действия трансформатора основан на электромагнитном взаимодействии двух или нескольких электрически не связанных между собой и неподвижных обмоток. Обмотки характеризуются числом витков W_1 и W_2 .

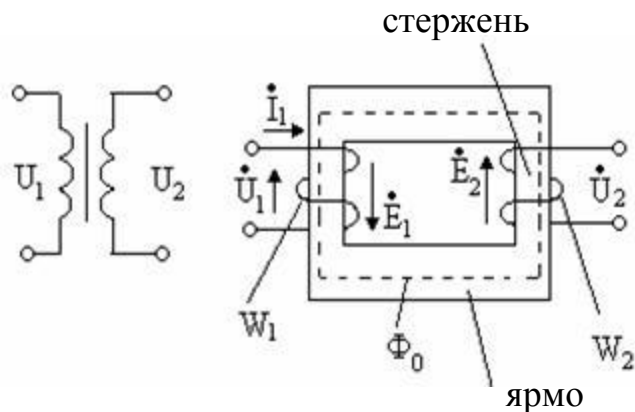


Рис.3. Принцип действия трансформатора

Для трансформатора существуют три режима работы: *холостой ход*, *рабочий режим* и *короткое замыкание*. Рассмотрим последовательно – эти режимы.

2.1. Холостой ход трансформатора

Холостой ход - такой режим работы трансформатора, когда первичная обмотка подключена к источнику переменного тока, а вторичная - разомкнута, т.е. ток вторичной обмотки равен нулю. Предположим, что напряжение U_1 изменяется по синусоидальному закону. Под его действием по первичной обмотке (с числом витков W_1) протекает синусоидальный ток $I_1 = I_0$, равный току холостого хода. Величина тока I_0 зависит от мощности трансформатора; в трансформаторах малой мощности (десятки ВА) он достигает 25-30% от номинального значения тока I_1 , а в трансформаторах большой мощности – от 3 до 10% от него. Под действием I_1 возникает намагничивающая сила $F_0 = I_0 W_1$, которая создаёт в трансформаторе магнитный поток Φ . Большая часть его замыкается по сердечнику трансформатора и образует основной магнитный поток Φ_0 , пронизывающий все витки первичной обмотки (с числом витков W_1) и вторичной обмотки (с числом витков W_2). Небольшая часть потока Φ замыкается по воздуху вокруг первичной обмотки и образует поток рассеяния Φ_{1s} сцеплённый только с первичной обмоткой W_1 .

Этот поток Φ_{1s} индуцирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния

$$e_{1s} = -W_1 \frac{d\Phi_{1s}}{dt}.$$

А основной магнитный поток Φ_0 индуцирует в первичной и вторичной обмотках ЭДС

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

Если считать поток Φ_0 синусоидальным, т.е. $\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$, то индуцируемые ЭДС согласно (1) и (2) запишутся следующим образом:

$$e_1 = -W_1 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t = \omega W_1 \Phi_{0m} \sin (\omega t - \pi/2)$$

$$e_2 = -W_2 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t = \omega W_2 \Phi_{0m} \sin (\omega t - \pi/2),$$

где $\omega W_1 \Phi_{0m} = E_{1m}$, $\omega W_2 \Phi_{0m} = E_{2m}$.

То есть e_1 и e_2 тоже меняются по синусоидальному закону, но отстают по фазе от Φ_0 на угол $\pi/2$. На практике принято оперировать не мгновенными, а действующими значениями ЭДС, они определяются по формулам:

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_1 \cdot \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \cdot W_1 \cdot \Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = 4.44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_{0m}, \quad E_2 = 4.44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_{0m}$$

Из выше указанных формул видно, что ЭДС первичной и вторичной обмоток прямо пропорциональны числу витков этих обмоток, т.е. чем больше будет число витков, тем больше будет ЭДС обмотки. Трансформатор принято характеризовать отношениями $W_1/W_2 = E_1/E_2 = n$, которое называется *коэффициентом трансформации*. Он показывает, во сколько раз

различаются между собой ЭДС первичной и вторичной обмоток. Обмотка, имеющая большее число витков, называется обмоткой высшего напряжения, а обмотка, имеющая меньшее число витков, называется обмоткой низшего напряжения. Если $W_1 > W_2$, то трансформатор называется понижающим, если $W_1 \leq W_2$ - повышающим. Так как трансформатор потребляет из сети электрическую мощность, а не создаёт её, то электрическая мощность, взятая из сети $S_1 = U_1 I_1$ всегда больше, либо равна электрической мощности на вторичной стороне трансформатора $S_2 = U_2 I_2$, т.е. $S_2 \leq S_1$. Поэтому, чем больше напряжение на обмотке трансформатора, тем меньше в ней может быть ток, т.е.

$$n = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

2.2. Рабочий режим трансформатора

Если к вторичной обмотке трансформатора подключить нагрузку, то трансформатор будет работать в рабочем режиме). В этом режиме физические процессы в трансформаторе зависят от характера нагрузки. Будем рассматривать два основных случая активно-индуктивной и активно - ёмкостной нагрузки.

Если к первичной обмотке подвести напряжение $\bar{U}_1$, а вторичную замкнуть на нагрузку, то по обеим обмоткам потекут токи $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$ соответственно. Они наведут в трансформаторе магнитные потоки Φ_{1s} и Φ_{2s} , которые большей частью замкнутся по сердечнику трансформатора, а небольшая их часть замыкается по воздуху вокруг обмоток, образуя потоки рассеяния Φ_1 и Φ_2 . Эти потоки наведут в обмотках трансформатора ЭДС рассеяния $\dot{E}_{1s}$ и $\dot{E}_{2s}$, которые тратятся на индуктивные сопротивления рассеяния x_1 и x_2 , первичной и вторичной обмоток, то есть

$$\dot{E}_{1s} = -j\bar{I}_1 x_1, \quad \dot{E}_{2s} = -j\bar{I}_2 x_2$$

В этом случае уравнения равновесия для нагруженного трансформатора будут иметь вид

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1s} + \bar{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + j\bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1 \\ \bar{U}_2 &= \dot{E}_2 + \dot{E}_{2s} - \bar{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - j\bar{I}_2 x_2 - \bar{I}_2 r_2 \end{aligned}$$

2.3. Короткое замыкание трансформатора

Короткое замыкание трансформатора имеет место, если вторичную обмотку замкнуть накоротко, а первичная будет включена в сеть. В эксплуатационных условиях короткое замыкание является аварийным режимом и сопровождается очень большими бросками тока. При этом сильно нагреваются обмотки, и на них действуют большие механические усилия, деформирующие обмотки.

Но для трансформаторов делается опыт короткого замыкания. Он делается для определения параметров трансформатора при любой нагрузке. В этом опыте вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной подводят пониженное напряжение U_k , при котором в обмотках

трансформатора появляются номинальные токи. Это номинальное напряжение называется напряжением короткого замыкания и измеряется в % от номинального, то есть

$$U_k = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100 \%$$

Согласно действующему стандарту, $U_k = (5.5 + 10.5)\%$. Так как значение U_k очень мало, то намагничивающий ток I_0 и соответственно магнитный поток Φ_0 незначительны, то есть $I_{0k} \approx 0$, при этом намагничивающая сила первичной обмотки тратится на компенсацию намагничивающей силы вторичной обмотки. Если пренебречь намагнивающим током (то есть $I_{0k} = 0$), то уравнение магнитного равновесия примет вид $\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = 0$, и если считать трансформатор приведённым, то $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$.

Уравнение равновесия вторичной обмотки примет вид

$$\bar{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2 = 0$$

Автотрансформаторы. Измерительные трансформаторы. Трансформаторы тока и напряжения. Трёхфазные цепи. Трёхфазные трансформаторы

1. Автотрансформаторы

У обычного трансформатора обязательно есть не менее двух обмоток, имеющих только электромагнитную связь. А *автотрансформатор* - это электростатический аппарат, имеющий одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит и первичной и вторичной сетям. Автотрансформатор бывает повышающим и понижающим. Покажем его на схеме (рис. 1.):

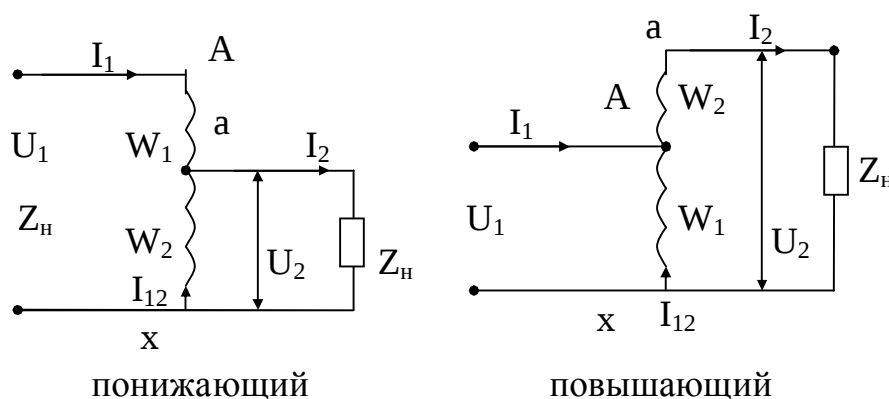


Рис.1. Электрические схемы автотрансформаторов

Кроме электромагнитной связи первичная и вторичная обмотки автотрансформатора имеют и электрическую связь. У понижающего автотрансформатора первичной обмоткой служит вся обмотка (A+X) с числом витков W_1 , вторичной - только её часть (a+X) с W_2 ($W_1 > W_2$). У повышающего автотрансформатора, наоборот, первичной обмоткой является часть всей обмотки (A-X) с W_1 , а вторичной служит вся обмотка (a - X) с W_2 ($W_1 < W_2$). Назовём начала обмоток – А, а конец - Х.

Рассмотрим для примера понижающий автотрансформатор. Первичное напряжение U_1 подключено к зажимам А-Х первичной обмотки. При холостом ходе ($I_2=0$, $Z_H=\infty$). Пренебрегая потерями в первичной обмотке, уравнения равновесия ЭДС можно записать в виде:

для первичной обмотки: $U_1 = E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_m$

для вторичной обмотки: $U_2 = E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_m$

Автотрансформаторы имеют ряд преимуществ и недостатков. *Преимуществом* перед трансформатором является то, что при одинаковой полезной мощности у автотрансформатора меньший расход стали и обмоточного провода (так как по части обмотки a-X всегда течёт разность токов, то её можно делать из более тонкого провода), меньшие потери мощности, более высокий КПД, меньшее изменение напряжения при

изменениях нагрузки. Эти преимущества тем больше, чем ближе к 1 коэффициент трансформации, поэтому обычно автотрансформатор применяют при коэффициенте трансформации не более 2.

В автотрансформаторе мощность передаётся от первичной обмотки к вторичной не только электромагнитным, но и чисто энергетическим путем за счёт непосредственной электрической связи между обмотками. Это создаёт и ряд *недостатков* автотрансформатора, к которым относятся:

1) возможность перехода высшего напряжения в сеть низшего, так как между обмотками есть непосредственная электрическая связь; из-за этой связи нельзя применять автотрансформатор, если приёмник энергии имеет заземлённый полюс (в выпрямительных устройствах);

3) автотрансформатор имеет малое сопротивление короткого замыкания, то есть токи короткого замыкания будут намного больше, чем у трансформаторов.

2. Измерительные трансформаторы

Часто бывает неудобно измерять очень большие токи и напряжения, так как при этом сложно сделать измерительные приборы и сложно их обслуживать. Для расширения пределов измерения переменных токов и напряжений и для изоляции измерительных приборов от высокого напряжения существуют измерительные трансформаторы тока и напряжения.

2.1. Трансформаторы тока

Они преобразуют переменный ток большой величины (до 40 кА) в ток малой и рассчитываются так, чтобы при любом токе первичной обмотки ток во вторичной обмотке не превышал 5 А (рис. 1.23). По величине первичного тока предусматривается 40 градаций: от 1 А до 40 кА. Номинальный ток вторичной обмотки может быть 1 А, 2 А, 2.5 А, 5 А. Причём вторичных обмоток может быть несколько. На схеме трансформатор тока обозначается как показано на рис.2.

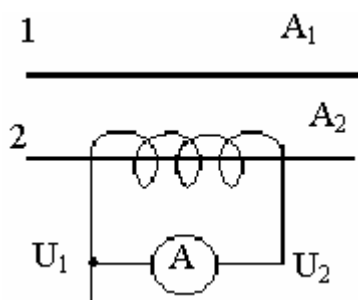


Рис.2. Схема измерительного трансформатора

Первичная обмотка ($L_1 - L_2$) состоит из одного или нескольких витков провода очень большого сечения и включаются последовательно в цепь нагрузки. Вторичная обмотка ($U_1 - U_2$), в которой измеряется ток, делается с большим числом витков из проводов малого сечения и замыкается на амперметр или последовательную катушку другого прибора (счётчика,

ваттметра и т.д.), имеющую малое сопротивление. То есть трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию. Его магнитная система неуравновешена. Если при изменении тока ($I_1 - I_2$) разорвётся цепь вторичной обмотки, то есть $I_2=0$, а I_1 не уменьшается, то в магнитной цепи возникнет огромный поток, который вызовет недопустимый перегрев сердечника и опасную для жизни и целостности изоляции ЭДС во вторичной обмотке. Чтобы обезопасить обслуживание, вторичные обмотки трансформатора тока заземляют. Нельзя размыкать вторичные обмотки работающего трансформатора. Приборы в цепь U_1-U_2 включаются так, чтобы положительное направление тока в приборе совпадало с положительным направлением тока в контролируемой цепи.

2.2. Трансформаторы напряжения

Это обычные трансформаторы малой мощности, первичная обмотка которых (А-Х) с большим числом витков подключаются к двум линейным проводам измеряемой сети, а вторичная обмотка (а-х) подключается к вольтметру или другому прибору, имеющему большое сопротивление (рис.3).

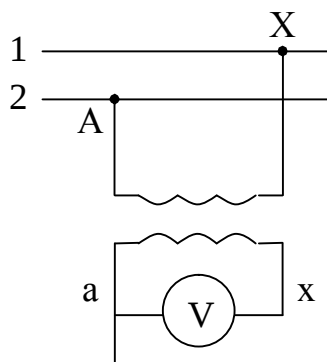


Рис.3. Схема трансформатора напряжения

Коэффициент трансформации выбирается таким, чтобы при номинальном напряжении сети напряжение вторичной обмотки было не более 100 В или 200 В. Трансформаторы напряжения должны включаться таким образом, чтобы на прибор подавалось вторичное напряжение, совпадающее по фазе с первичным напряжением. Так как сопротивление в цепи вторичной обмотки достаточно велико, можно считать, что трансформатор напряжения работает в режиме, близком к холостому ходу, то есть ток вторичной обмотки близок к 0. Таким образом, напряжения первичной и вторичной обмоток численно равны ЭДС этих обмоток различаются в коэффициент трансформации раз. Зная коэффициент трансформации, можно по показаниям вольтметра определить U_1 . Если ток во вторичной цепи увеличится, то изменится U_2 , и уменьшится точность измерения, за счёт падения напряжения во вторичной цепи. Так как первичная обмотка этого трансформатора включена в высоковольтную цепь, и возможен пробой в сеть низкого напряжения, то вторичную обмотку трансформатора напряжения при работе заземляют.

3. Трехфазные цепи.

В системах электрического питания устройств связи многофазные системы нашли широкое применение, то есть 2-х фазные, 3-х фазные, 6-тифазные и др. Рассмотрим эти системы на примере наиболее распространенной 3-х фазной системы (рис. 4 и 5).

Угол сдвига между отдельными фазами многофазной системы всегда делают симметричными, то угол сдвига фаз в них определяется выражением

$$\alpha = 2\pi / m$$

где 2π - период питающего напряжения (360°), а m – число фаз в системе.

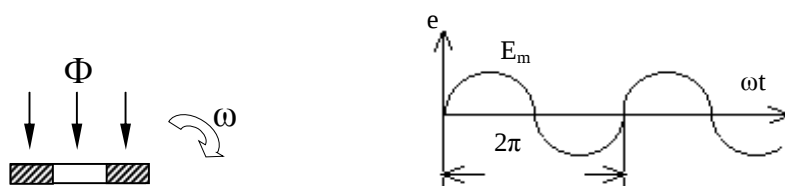


Рис. 4. Получение однофазной ЭДС при расположении катушки в постоянное магнитное поле

Теперь представим себе, что в это же магнитное поле поместили систему из 3-х одинаковых катушек, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 120° .

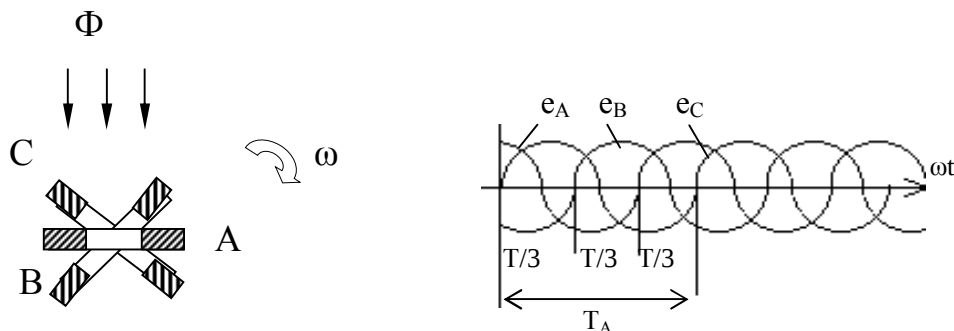


Рис. 5. Получение трехфазной ЭДС при расположении 3-х катушек в постоянное магнитное поле

Если заставить ее вращаться с той же угловой скоростью ω , то в них возникнет 3-х фазная система ЭДС. Если взять отдельно взятую катушку А, то в ней, как и в однофазной системе возникнет ЭДС $e_A = E_m \cdot \sin \omega t$.

Катушка В отличается от А тем, что она повернута относительно ее на 120° в пространстве. Следовательно, в ней индуцируется точно такая же ЭДС, что в А, но все явления в ней будут запаздывать на время, которое необходимо, чтобы В заняла в пространстве место А. Т.к. полному обороту катушки соответствует 1-й период Т синусоидальной ЭДС, то повороту на 120° соответствует время $T/3$, тогда $e_B = E_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$. А т.к. угол между катушками А и С $= 240^\circ$, то $e_C = E_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$.

3. Трехфазные трансформаторы

Часто бывает нужно передать в нагрузку энергию трехфазного тока. Это можно сделать, включив соответствующим образом 3 одинаковых однофазных трансформатора, или одним трехфазным трансформатором. Обычно трехфазные трансформаторы делаются стержневыми, т.е. состоят из 3-х стержней соединенных ярмом (рис.6, 7).

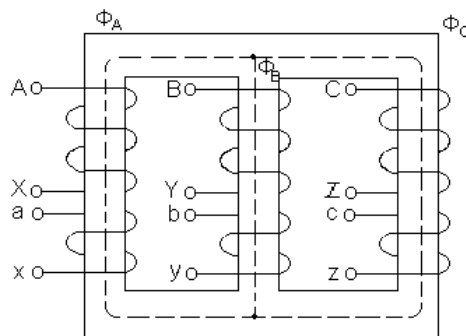


Рис.6. Трехфазный трансформатор

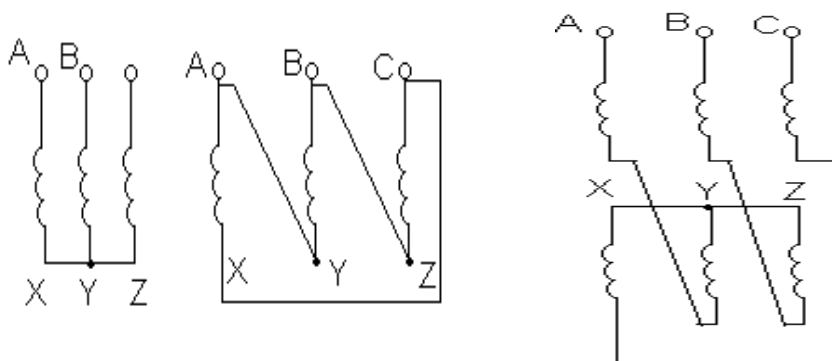


Рис.7. Соединение обмоток Y, Δ и зигзаг

На каждый стержень наматываются 2 обмотки- первичная и вторичная обмотки одной фазы. Первичные обмотки принято обозначать: А-Х, В-У, С-З, а вторичные, соответственно, а-х, b-y, c-z. Первичные и вторичные обмотки чаще всего соединяются звездой или треугольником. При соединении звездой начало каждой фазы подключаются к трехфазной сети источника или нагрузки, а концы (х, у, z) соединяются в общую точку (нейтральную), из которой всегда выходит нулевой провод. При соединении Δ ,конец первой фазы соединяется с началом 2-й, конец 2ой – с началом 3-й, конец 3-й – с началом первой.

Точки соединения начала одной фазы и конца другой включаются в 3-фазную сеть. Иногда вторичные обмотки включают в зигзаг. В этом случае обмотка каждой фазы состоит из 2-х катушек с одинаковым числом витков, но намотанных на разные стержни и соединенных встречно. ЭДС, наводимые в катушках одной фазы, сдвинуты между собой на 1/3 периода, поэтому ЭДС всей фазы равна геометрической разности ЭДС 2-х катушек, т.е. $E_{\phi 3} = \sqrt{3} E_{\kappa}$, где E_{κ} - ЭДС одной катушки. При соединении в зигзаг $E_{\phi 3}$ меньше E_{ϕ} при

соединении в Y или Δ , если при Y или Δ фазная обмотка состоит из 2-х катушек, то $E_{\phi} = 2E_k$, т.е. больше, чем при зигзаге. Соединение в зигзаг применяют иногда в выпрямителях для устранения явления вынужденного намагничивания. Для 3-х фазных 2-х обмоточных трансформаторов приняты следующие соединения обмоток: $Y/Y-$, Y/Δ , Y/Δ , $\Delta/Y-$. Обозначение над чертой относится к первичной обмотке, а под чертой – к вторичной. Если обмотка имеет выведенную 0-ю точку, то в обозначении указано $Y-$. Для включения на параллельную работу трансформаторы объединяются в группы от 0 до 11, их обозначают $Y/Y-0$ (12), $Y/\Delta-11$ (или 3 или 7). Группа 3-х фазного трансформатора зависит от схемы соединения первичной и вторичной обмоток, направления их намотки и обозначения зажимов. Между векторами линейных ЭДС первичной и вторичной обмоток есть угловое смещение, за единицу которого принимается угол 30° . Это смещение зависит от направления намотки и способа включения обмоток. На каждый стержень наматываются 2 обмотки – первичная и вторичная обмотки одной фазы. Первичные обмотки принято обозначать: А-Х, В-У, С-З, а вторичные, соответственно, а-х, b-y, c-z. Первичные и вторичные обмотки чаще всего соединяются звездой или треугольником. При соединении звездой начало каждой фазы подключаются к трехфазной сети источника или нагрузки, а концы (х, у, z) соединяются в общую точку (нейтральную), из которой всегда выходит нулевой провод (рис. 8). При соединении Δ , конец первой фазы соединяется с началом 2-й, конец 2ой – с началом 3-й, конец 3-й – с началом первой (рис. 9).

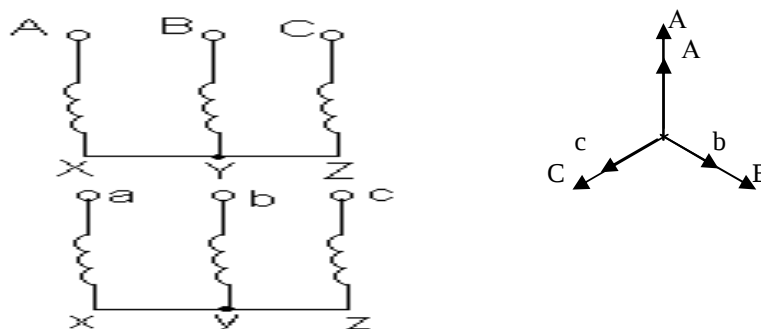


Рис. 8. Определение группы трансформатора при соединении Y/Y

Для определения углового смещения можно воспользоваться циферблатом часов, на котором каждая цифра сдвинута по отношению к другой на 30° , а стрелки часов условно принято считать: минутную за вектор линейного напряжения первичной обмотки, мысленно всегда остановленную на цифре 12, а часовую – за вектор линейного напряжения вторичной обмотки. Если трансформатор $Y/Y-$, причем одноименные первичная и вторичная обмотки находятся на одном стержне и намотаны в одинаковом направлении, то вектора линейных напряжений первичной и вторичной обмоток совпадают по направлению, т.е. их угловое смещение = 0 (или 12), тогда запишем группу $Y/Y-0$.

При соединении обмоток 3-х фазного трансформатора по схеме Y/Y - можно получить любую четную группу. Если соединить обмотки трансформатора по схеме Y/Δ , Δ/Y можно показать, что получается трансформатор любой нечетной группы, т.е. 1, 3, ..., 11. Стандартными группами являются $Y/Y - 0$, $Y/\Delta - 11$, $Y/\Delta - 11$. Фаза А- желтая, В-зеленая, С - красная.

Электрические машины

Электрические машины предназначены для преобразования механической энергии в электрическую или электрической в механическую. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется генератором. Машина, преобразующая электрическую энергию в механическую, называется двигателем. Принципиально любая электрическая машина является обратимой, то есть может работать и генератором и двигателем. В зависимости от рода тока, в цепи которого работает электрическая машина, они делятся на машины постоянного и переменного тока. Машины переменного тока бывают синхронные и асинхронные, оба вида могут быть однофазными или трёхфазными. В практике чаще всего синхронные машины применяются, как генераторы, а асинхронные как двигатели. И чаще используются трёхфазные машины. Машины постоянного тока используются и как генераторы и как двигатели.

Действие всех электрических машин основано на законах электродинамики, то есть законах электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если между полюсами постоянного магнита или электромагнита (N-S) вращать рамку (внешним источником вращения) со скоростью n (по часовой стрелке), то по закону электромагнитной индукции в активных проводниках рамки a-b и c-d, (которые перемещаются перпендикулярно линиям магнитного потока) возникнут ЭДС, направление которых определяются правилом правой руки (рис. 1.).

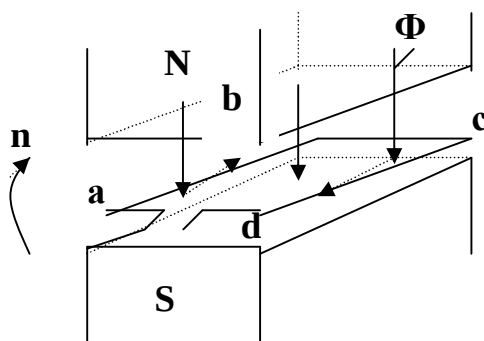


Рис.1. Пояснение принципа работы простейшей электрической машины.

Так как эти проводники одновременно перемещаются относительно потока в противоположных направлениях, то и ЭДС в них будут противоположного направления. По закону электромагнитной индукции ЭДС витка, равная сумме ЭДС двух проводников находится из условия $e = -d\Phi/dt$, так как $\Phi = BS$, а $B = \text{const}$, то $e = -Bds/dt$, то есть раз меняется площадь витка, перпендикулярная направлению магнитного потока, то ЭДС будет переменной- синусоидальной. Если замкнуть рамку на внешнее сопротивление то под воздействием ЭДС в замкнутой цепи потечёт ток i .

Таким образом механическая энергия, затрачиваемая на вращение рамки преобразуется в электрическую энергию, отдаваемую в сопротивление внешнего приёмника энергии, то есть получили простейший генератор. Если в эту же неподвижную рамку, находящуюся в магнитном поле (N-S) подать ток i , то при взаимодействии тока i и потока Φ образуется электромагнитный момент $M_{эм} \sim i\Phi$, который начнёт вращать рамку, значит электрическая энергия преобразуется в механическую энергию, то есть машина работает двигателем. За один оборот рамки между N-S ЭДС в ней опишет полную синусоиду. Частота этой синусоидальной ЭДС за один оборот рамки зависит от количества полюсов. Так как у электрических машин есть не менее двух полюсов (их всегда чётное количество), то их принято считать парами (пара полюсов) и обозначать p - число пар полюсов. В нашем случае $p=1$, но у машины может быть и больше пар полюсов, тогда за один оборот рамки в ней возникнет несколько периодов синусоидальной ЭДС, а частота ЭДС $f \sim p$, но так как скорость вращения рамки не 1 об/мин, а n об/мин, то в реальной машине частота индуцированной ЭДС $f = np/60$ (60 сек. В 1 мин.). То есть в любой электрической машине существует жёсткая связь между числом пар полюсов, скоростью вращения и частотой индуцированной ЭДС. В реальной машине используется не один виток, а многовитковые катушки. Любая электрическая машина состоит из двух частей: неподвижной – статора, и подвижной – вращающегося ротора. Чтобы ротор мог свободно вращаться внутри статора, между ними есть воздушный зазор, которого стремятся сделать наибольшим (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Статор машин собирается из пластин электротехнической стали (как и трансформатор) толщиной 0,35 или 0,5 мм. В зависимости от вида машины (для постоянного или переменного тока) эти пластины штампуются либо с явно выраженными полюсами (постоянного тока), на которые одеваются обмотки электромагнита магнита, либо с полужакрытыми пазами (для переменного тока), расположенными равномерно по внутренней окружности кольца, в которые закладываются обмотки. Пластины собираются в пакеты и крепятся к станине машины, которая отливается из чугуна или стали. На щиток станины выводятся концы всех обмоток, расположенных на статоре. Сбоку станина закрывается боковыми щитами, через которые пропущен вал ротора. Ротеры машин тоже набираются из пластин электротехнической стали, в которых сделаны пазы для обмоток. Обмотки машин делаются медным проводом и состоят из многовитковых катушек, уложенных определённым образом на статоре и на роторе в зависимости от типа машины.

1. Асинхронные машины

Асинхронная машина, как и любая, может работать и генератором и двигателем. Но как генератор она обладает рядом существенных недостатков и практически используется, как двигатель. Асинхронные двигатели бывают однофазными, двухфазными и трёхфазными. Статор машины собирается из

пластин электротехнической стали, в которых делаются полузакрытые пазы. В эти пазы укладывают обмотку. Рассмотрим сначала трёхфазный асинхронный двигателя. У них обмотка статора собрана из соответствующим образом соединённых трёх катушек, сдвинутых в пространстве на 120° и образующих трёх фазную систему. На щиток станины выводятся 6 концов-начала и концы каждой фазы, то есть обмотки можно включить и звездой и треугольником. Роторы асинхронных машин бывают двух типов: фазный и короткозамкнутый.

Короткозамкнутый ротор собирается из листов стали с полностью закрытыми пазами, в которые укладываются массивные стержни, соединённые по торцам металлическими кольцами. Часто такая обмотка делается из алюминия, который под давлением заливается в пазы ротора. Такой ротор не имеет выводов во внешнюю цепь. Двигатели с короткозамкнутым ротором дешевле, проще и надёжней в эксплуатации, чем при фазном роторе, но их регулировочные свойства хуже. Фазная обмотка ротора делается аналогично статорной трёхфазной. Концы трёх фаз соединены в звезду, а начала их выведены на контактные кольца, укреплённые на валу ротора (каждая фаза к своему кольцу) и изолированные друг от друга и от вала машины. На станине укреплены угольные или медные щётки, которые при вращении вала скользят по кольцам. С помощью щёток обмотки ротора могут замыкаться накоротко или подключаться к внешним сопротивлениям. Фазные роторы используются реже короткозамкнутых и только в асинхронных двигателях большой мощности.

Представим трёхфазную обмотку статора в виде трёх катушек, сдвинутых в пространстве 120° , в которые подаётся трёхфазный ток (рис. 2).

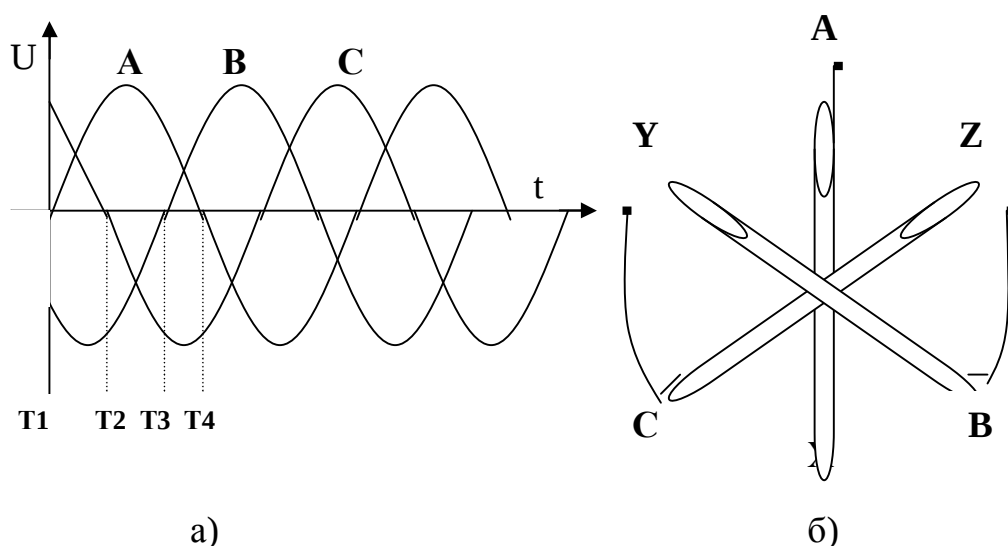


Рис. 2. Диаграмма сдвига фаз (а) и схема вращения обмоток А, В, С (б)

Условимся, что направление тока от начала к концу рамки принимаем за положительное, а от конца к началу — за отрицательное. В момент T1 в А-

Х тока нет, а в В-У и С-Z- есть. Эти витки образуют магнитное поле указанного направления (по правилу буравчика).

Таким образом за полпериода питающего напряжения поля статора повернулось на 180° , то есть за один период оно делает полный оборот на 360° . Если в трёхфазную обмотку статора подать трёхфазный ток, то возникнет вращающееся со скоростью $n = 60$ об/мин. (рис. 3)

f_1 / p магнитное поле, где f_1 - частота (так как f_1 и p - const , то и n - const).

Это поле пересекая проводники замкнутой накоротко или на внешнее сопротивление обмотки неподвижного ротора, наводит в них ЭДС E_2 :

$$E_2 = 4,44 f I k_{об} W_2 \Phi$$

(при $S=1$, то есть в момент когда ротор неподвижен); $k_{об}$ - обмоточный коэффициент, зависящий от способа укладки обмотки ротора, W_2 - число витков обмотки ротора.

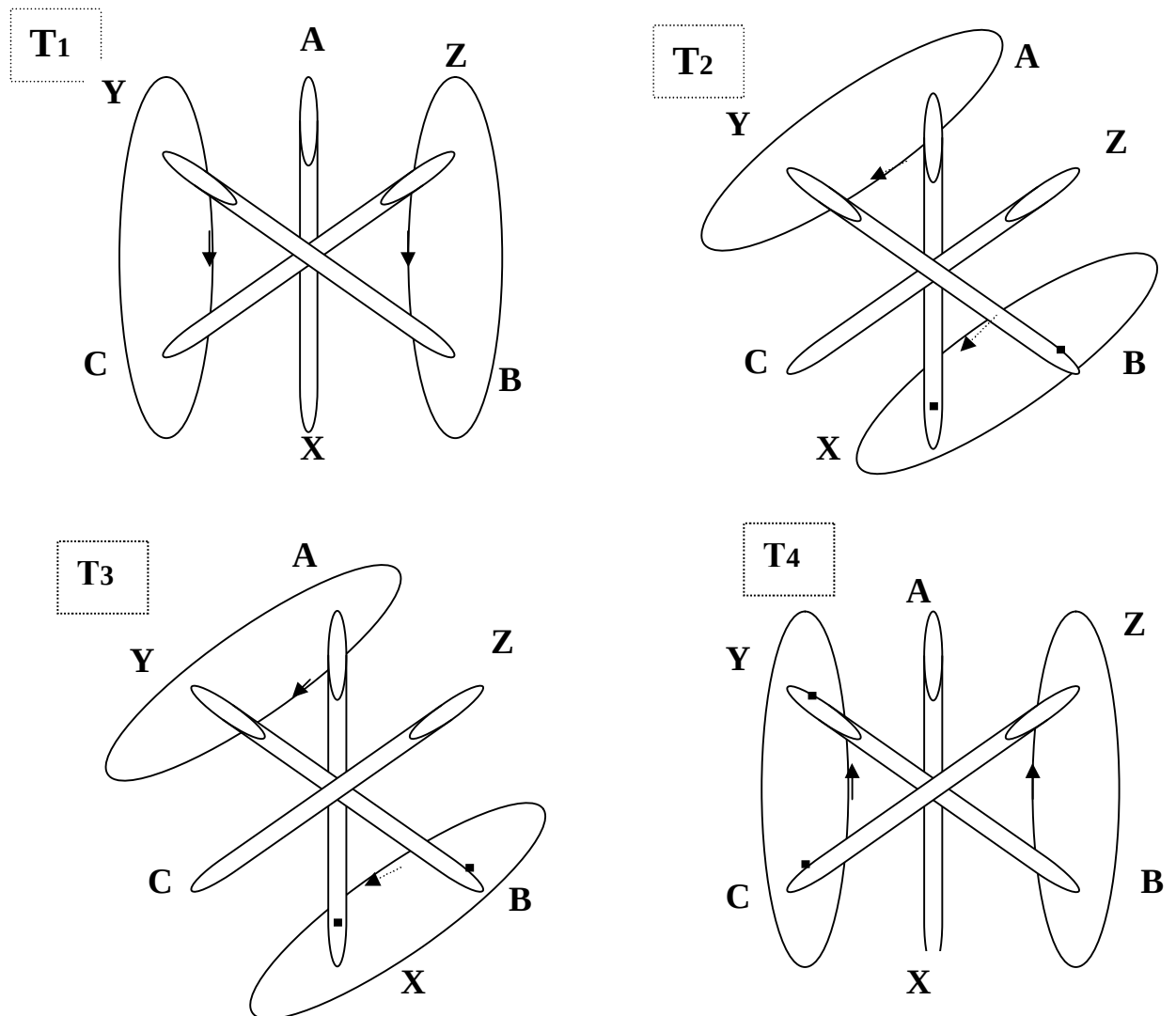


Рис. 3. Схема вращения обмоток А, В, С для T_1 - T_4 моментов времени

А так как обмотки ротора замкнутые, то по ним течёт ток I_2 . Этот ток, взаимодействуя с потоком статора создаёт силу F_ψ , которая тянет проводники ротора за полем статора, она создаёт вращающий момент $M_{вр}$, направленный в сторону вращения поля статора. Под его действием ротор начинает вращаться со скоростью n_2 . (Так как проводников в роторе много то вращающий момент машины равен сумме вращающих моментов всех проводников). В двигательном режиме $n_2 < n_1$, то есть поле ротора отстаёт от поля статора, то есть ротор и поле статора вращаются несинхронно, отсюда и название двигателя. Если $n_2 = n_1$, то ротор неподвижен относительно поля статора, значит в его витках не наводится ЭДС и токи, то есть не будет вращающегося момента, и вращение ротора прекратится. n_1 называется синхронной скоростью, в асинхронных двигателях ротор её не достигает.

Магнитное поле статора вращается относительно ротора со скоростью $n_s = n_1 - n_2$ об/мин. Отставание ротора от поля статора в асинхронных двигателях принято характеризовать величиной скольжения $S = n_s / n_1$, её принято определять либо в относительных единицах $_S = (n_1 - n_2) / n_1$, либо в процентах:

$$S\% = (n_1 - n_2) 100\% / n_1.$$

Если ротор неподвижен $S = 1$ или 100%, если машина достигла синхронной скорости $S = 0$, то есть в двигательном режиме S меняется от 0 до 1.

Если посторонним источником вращения вращать ротор в направлении противоположном направлению вращения поля, то

$$S = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > 1,$$

такой режим называется режимом электромагнитного тормоза. Если же вращать ротор по направлению поля статора, но со скоростью $n_2 > n_1$,

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0,$$

это будет генераторный режим, но в таком режиме асинхронный двигатель обычно не работает.

При работе двигателя частота ЭДС и тока в обмотках равна:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \cdot S = f_1 S$$

А величина ЭДС равна

$$E = 4,44 f_2 W_2 k_{об} \Phi = 4,44 f_1 S W_2 k_{об} \Phi = E_2 S$$

Сопротивление обмотки ротора Z_2 имеет активную и индуктивную составляющие, а так как индуктивная составляющая зависит от частоты, то сопротивление обмотки ротора

$$Z_2 = \sqrt{r^2 + (x_2 S)^2},$$

тогда ток в цепи ротора при работе асинхронного двигателя

$$I_{2s} = \frac{E_2 S}{\sqrt{r^2 + (x_2 S)^2}}$$

Вращающий момент двигателя зависит от магнитного потока, тока ротора и определяется, как

$$M_{вр} = C \Phi_m I_{2s} \cos \Psi_{2s},$$

где, Ψ_{2s} -угол между током I_{2s} и ЭДС E_{2s} в роторе, так как сопротивление ротора зависит от величины S , то и Ψ_2 тоже зависит от S ; Φ_m - магнитный поток статора; C -конструктивный коэффициент, учитывающий число фаз, число пар полюсов, витков обмотки и её конструктивного выполнения; для данной машины C - постоянная величина.

Таким образом $M_{вр}$ является сложной функцией от величины S . Для асинхронного двигателя важно знать $M_{вр}=f(S)$ (рис. 4). Графически она имеет вид: величины S_{max} и определяются из условия $dM/dS=0$. При $S=1$, $M_{вр}=M_{пуска}$. Асинхронный двигатель работает устойчиво с постоянной скоростью, если вращающий момент равно ($M_{вр}= M_T$) тормозному моменту $M_{п}$ нагрузки.

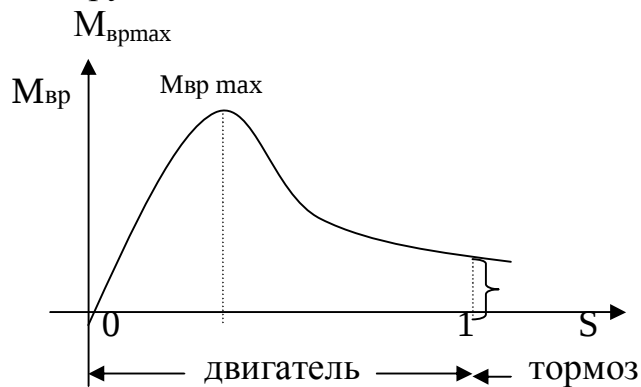


Рис. 4. Зависимость вращающего момента от скольжения S

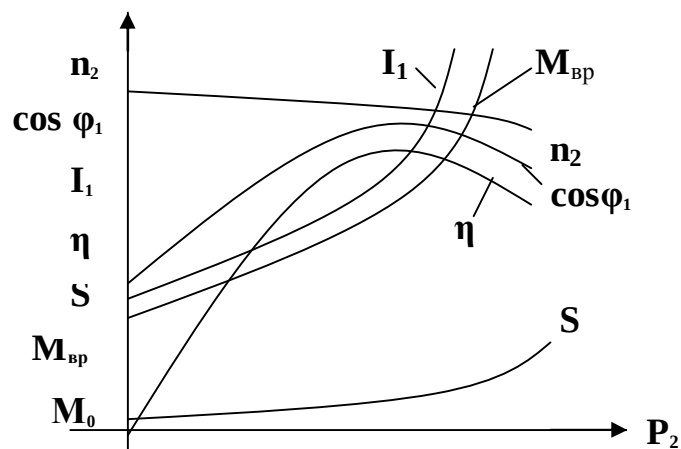


Рис. 5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя (M_0 – момент механических потерь)

Чем больше нагрузка, тем меньше n_2 и больше $M_{вр}$. Областью устойчивой работы асинхронного двигателя является участок $(0-S_{max})$. При номинальной нагрузке $S=0,03-0,05$, то есть 3-5%, с ростом нагрузки S увеличивается, а при холостом ходе близко к 0. Участок $(S_{max}-1)$ -область неустойчивой работы двигателя, то есть при малейшем уменьшении момента $M_{вр}$ скольжение сильно увеличивается и двигатель останавливается.

Рабочие характеристики (рис. 5) асинхронного двигателя определяют зависимость тока I_1 , числа оборотов ротора n_2 , скольжения S , вращающего момента $M_{вр}$, коэффициента мощности $\cos\phi_1$, КПД η от полезной нагрузки на валу двигателя P_2 .

2. Синхронные машины

Синхронная электромашина может быть и двигателем и генератором. Особенностью этих машин является то, что в них все процессы происходят при синхронной скорости, то есть число оборотов ротора равно числу оборотов поля статора, то есть выполняется зависимость $n_1=n_2=60 f / p$ -для двигателя (f -частота питающей сети), а для генератора, который приводят во вращение посторонним источником вращения, выходной величиной служит частота вырабатываемой ЭДС- $f= np / 60$ (n - скорость вращения ротора).

Отсюда машины и называются синхронными. Он состоит как и любая электрическая машина из статора и ротора. Существует несколько конструкций синхронных машин: явнополюсные машины с полюсами, расположенными на статоре, а трёхфазная обмотка укладывается в пазах ротора. Тогда статор набирается в пакет из пластин электротехнической стали, а на полюса одевается обмотка возбуждения, она питается постоянным током и создаёт постоянное магнитное поле в машине (рис. 6).

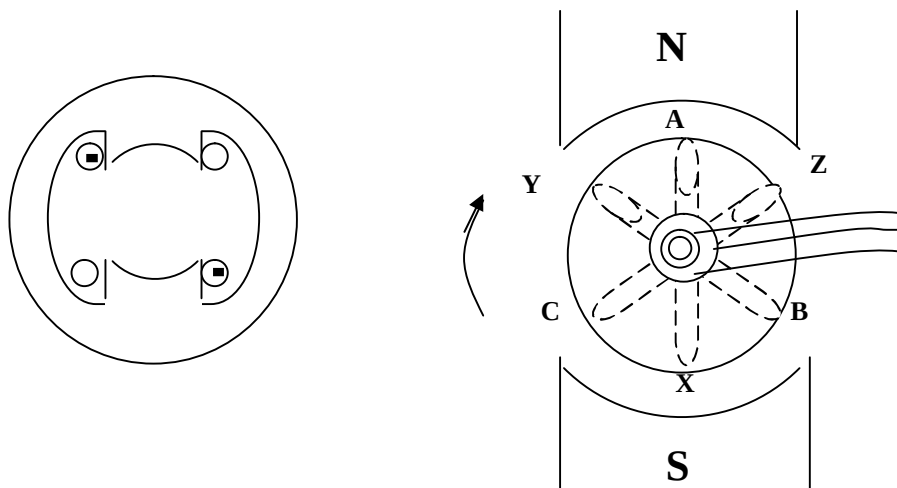


Рис. 6. Пояснение к принципу работы синхронного генератора

Ротор делается так же, как у асинхронных машин с фазным ротором, то есть в нём сделаны пазы, в которые укладывается трёхфазная обмотка,

состоящая из трёх катушек, сдвинутых в пространстве на 120° и соединённых чаще всего звездой. Концы соединяются в общую точку, а начала фаз выведены на три изолированных друг от друга кольца, укреплённые на валу ротора. К каждому кольцу прижимается неподвижная щётка, укреплённая на статоре. Через неё ЭДС снимается с обмотки ротора в нагрузку. В электрических машинах принято часть машины в которой образуется ЭДС, называть якорем. В данном случае якорем будет ротор. Принцип действия генератора. Между полюсами постоянного магнита (или электромагнита, созданного обмоткой возбуждения) помещают трёхфазную систему катушек и приводят её во вращение посторонним источником вращения. При вращении катушек в постоянном магнитном поле в них наводится ЭДС со сдвигом фаз на $2\pi/3$, то есть на $1/3$ периода. Частота этой ЭДС $f = np/60$, где n - скорость, с которой вращается якорь генератора. Частота будет постоянной $f = \text{const}$, когда будет $n = \text{const}$. Чтобы получить промышленную частоту $f = 50 \text{ Гц}$, надо выдерживать постоянное соотношение $n = 3000 \text{ об/мин}$.

Если сделать машину с $p = 1$, то надо обеспечить $n = 3000 \text{ об/мин}$, если $p > 1$, то $n < 3000 \text{ об/мин}$. Но такую конструкцию машины можно делать только при небольших мощностях (до 15 кВа) и на небольшое напряжение, (380/220В), так как большие напряжения и токи трудно снимать с подвижных контактов.

Принципиально безразлично, вращать ли трёхфазную обмотку в неподвижном постоянном магнитном поле или вращать это поле относительно неподвижной трёхфазной обмотки. Поэтому есть вторая конструкция синхронной машины, когда трёхфазная якорная обмотка укладывается в пазы статора, то есть статор такой, как у асинхронной машины, а ротор делается явно полюсным, и на его полюсах собирается обмотка возбуждения, питаемая от постороннего источника постоянного тока (рис. 7).

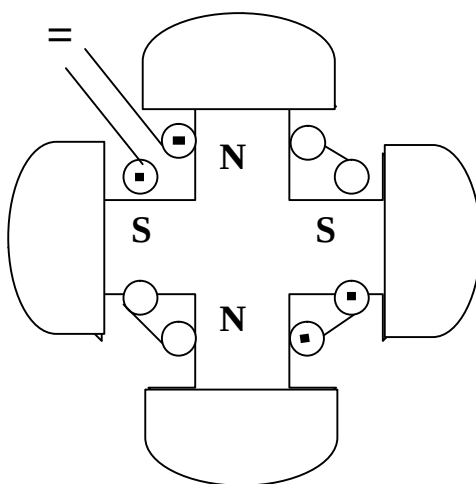


Рис. 7. Ротор синхронного генератора

На валу ротора укрепляются два изолированных кольца, к которым через щётки подаётся постоянный ток от постороннего источника питания. Вращается ротор и соответственно вращается магнитное поле статора. Магнитное поле вращается со скоростью n относительно трёхфазных обмоток, и в них наводится ЭДС с $f = p n / 60$. Но теперь большие токи и напряжения снимаются с неподвижных обмоток. Обычно такие роторы делаются с $p > 3$, тогда скорость машины можно делать небольшой ($n < 1000$ об \ мин). Если надо обеспечить большие скорости, то есть $n > 1000$ об \ мин, то есть $p < 3$, то для увеличения механической прочности ротора делают тройную конструкцию - неявнополюсный ротор. Он выполнен в виде цилиндра, у которого на части поверхности имеются пазы. В них укладывается обмотка возбуждения по которой пропускают $I =$ и создают постоянное вращающееся поле. Обычно неявнополюсные роторы делают с $p=1$, то есть высокоскоростными. Принцип действия у синхронных машин любой конструкции одинаков.

1

3. Машины постоянного тока (МПТ)

Если между двумя полюсами постоянных магнитов поместить виток из проводящего материала и вращать его в этом постоянном поле полюсов, то в этом витке при пересечении им магнитных силовых линий наведётся ЭДС (переменная), которую можно снять с контактных колец 1 и 2, неподвижными щётками (рис. 8). Направление ЭДС в каждом активном проводнике витка зависит от того, под каким полюсом он находится, и в какую сторону вращается виток, и определяется правилом правой руки. Если щётки подключить к сопротивлению, то по нему потечёт переменный ток. Таким образом, мы получили простейший генератор переменного тока, а именно однофазный синхронный генератор. Если теперь концы витка присоединить не каждый к своему кольцу, а к двум изолированным друг от друга полукольцам, а щётки расположить так, чтобы одна (А) всё время касалась того полукольца, которое соединено с проводником витка, находящимся под северным полюсом, а другая (Б) в это время касалась другого полукольца, соединённого с проводником, находящимся под S-полюсом, то, независимо от положения витка, со щёток будет сниматься ЭДС одной и той же полярности, т.е. неизменная по направлению и переменная по величине.

Таким образом, получили выпрямленную ЭДС. Щётка А всегда имеет отрицательный потенциал (–), а Б-положительный (+), то есть через нагрузку ток течёт в одном направлении, то есть, происходит выпрямление наведённого в витке $abcsd$ напряжения и тока в пульсирующий. Полукольца А и Б, позволяющие выпрямить переменную ЭДС, являются механическим выпрямителем и называются коллекторными пластинами, а их совокупность - коллектором. Так получили простейший генератор постоянного тока. При двух полукольцах и одном витке выпрямленное напряжение на щётках имеет

большую пульсацию. Чтобы её уменьшить, в постоянное поле полюсов можно добавить ещё одну рамку перпендикулярно первой, а коллектор будет иметь уже 4 пластины, тогда с одного витка снимается e_1 , а с другого - e_2 , сдвинутая относительно e_1 на $\Pi/2$, а суммарная ЭДС витков будет равна их огибающей, то есть пульсация сильно уменьшится (рис. 9).

Реальный генератор постоянного тока состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора (якоря). Между ними есть воздушный зазор. Статор машины постоянного тока делается двухполюсным (основные полюса и дополнительные полюса). Дополнительные полюса укрепляются между основными и станиной. На основных полюсах размещается обмотка возбуждения, которая служит для создания магнитного потока вместо постоянных магнитов. Чаще всего машины постоянного тока делаются с числом пар полюсов $p > 1$. Дополнительные полюса ставятся для улучшения условий коммутации между щётками и коллектором, на них одевается специальная обмотка, по которой тоже течёт постоянный ток. Основные полюса набираются из листов электротехнической стали, толщиной 0,5-1 мм в виде сердечника (1) на который одевается катушка обмотки возбуждения (2) и болтом (3) крепится к станине (4).

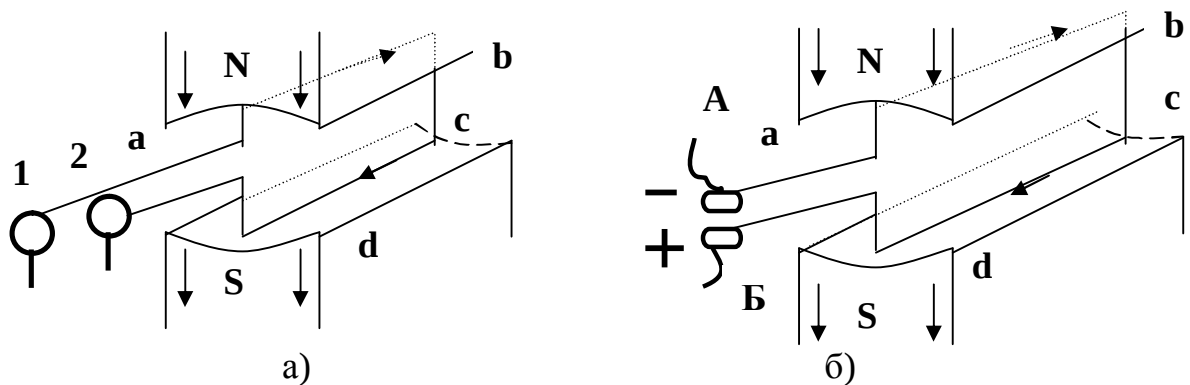


Рис. 8. Пояснение принципа работы простейшей машины (а) переменного тока и (б) постоянного тока

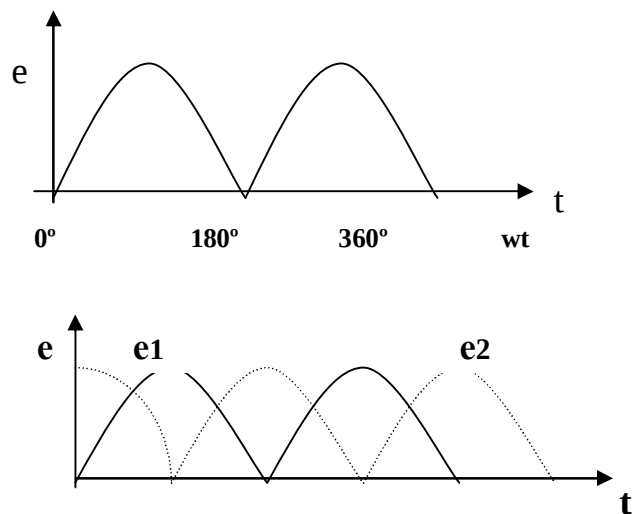


Рис. 9. Временные диаграммы работы простейшего генератора постоянного тока

При вращении якоря машины постоянного тока со скоростью n в проводниках его обмотки индуцируется ЭДС $E = n \Phi$, направление которой определяется правилом правой руки. Для вращения якоря используется какой-либо первичный двигатель с вращающим моментом M_1 .

Если обмотку якоря через щётки замкнуть на какое-либо сопротивление нагрузки (приёмник энергии), то по нему потечёт ток I_a , который в обмотках якоря совпадает по направлению с ЭДС (рис. 10).

Этот ток взаимодействует с потоком полюсов Φ и создаёт электромагнитный момент M_{ψ} , направление его определяется правилом левой руки и встречно по отношению к M_1 , то есть вращающий момент приводного двигателя должен быть остаточным для преодоления тормозного момента M_{ψ} , чтобы якорь генератора вращался со скоростью n , необходимой для получения заданной ЭДС.

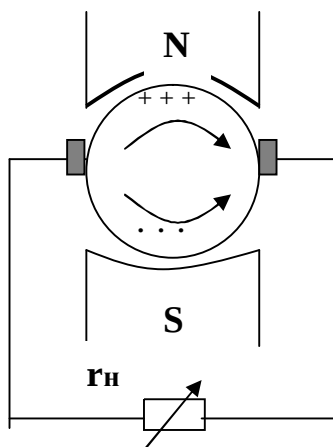


Рис. 10. Работа генератора постоянного тока

Ток якоря генератора встречает на своём пути сопротивление нагрузки r_n , сопротивление обмотки якоря $r_{об}$ и сопротивление переходных контактов между щётками и коллектором $r_{щ}$. $r_{об}$ и $r_{щ}$ составляют внутреннее сопротивление генератора $r_a = r_{об} + r_{щ}$. Тогда ток якоря $I_a = E / (r_a + r_n)$, но произведение $I_a r_n = U$ — напряжению на зажимах генератора (нагруженного). Таким образом уравнение равновесия ЭДС для генератора $U = E - I_a r_a$. Из него видно, что при увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины. Кроме того за счёт поперечной реакции якоря уменьшается результирующий поток в машине, то есть уменьшается ЭДС E . Значит напряжение на зажимах генератора уменьшается при увеличении нагрузки.

Генераторах постоянного тока чаще всего используется электромагнитное возбуждение. В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока бывают с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока, она имеет большое число витков,

поэтому даже при малом I_B (несколько % от I_A) можно создать большую намагничивающую силу $F_B = I_B W_B$, то есть большой магнитный поток. При независимом возбуждении любые изменения тока якоря равные току нагрузки не влияют на величину I_B , то есть менять I_B можно только меняя сопротивление цепи возбуждения R_B . При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от якорной обмотки этой же машины, то есть любые изменения I_A приводят к изменению тока I_B . В зависимости от способа соединения между собой обмоток якоря и возбуждения бывают машины параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 11).

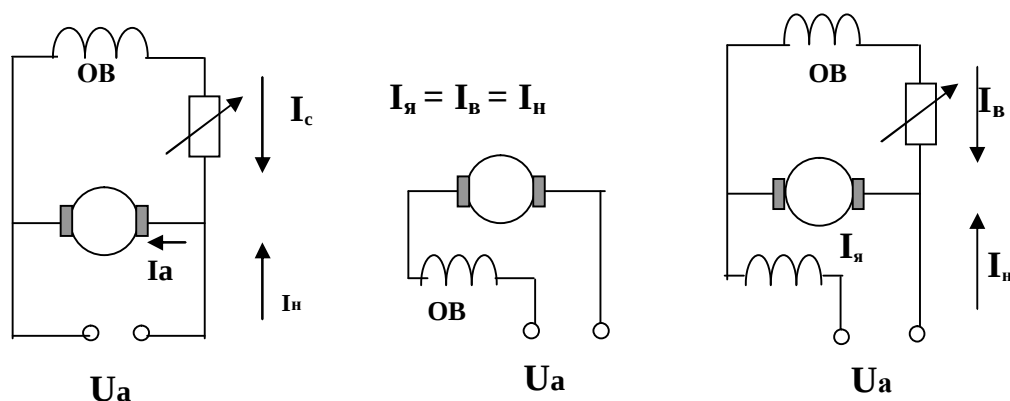


Рис. 1.11. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

При параллельном возбуждении обмотка возбуждения включается параллельно якорной обмотке и имеет большое число витков (как при независимом возбуждении), а I_B мал (несколько % от I_A). Обмотка последовательного возбуждения имеет малое число витков и включается последовательно с якорной обмоткой, а $I_A = I_B$. При смешанном возбуждении на полюсах размещаются две обмотки возбуждения: последовательная и параллельная. Процесс самовозбуждения идёт одинаково при любой схеме возбуждения.

Лекция №5

Выпрямители. Однофазные схемы выпрямления

1. Структурная схема выпрямителя

Распределение электрической энергии в нашей Республике производится на переменном токе с частотой $f=50$ Гц. Вместе с тем аппаратура проводной связи большей частью питается постоянным током различных напряжений. Поэтому возникает необходимость преобразовать переменный ток в постоянный. Для этого используются выпрямители. *Выпрямителем* называется статическое устройство, преобразующее переменный ток в постоянный.

В общем виде выпрямитель состоит из 4-х основных звеньев (рис. 1).

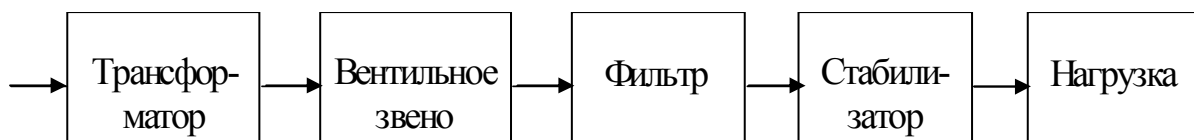


Рис.1. Структурная схема одноканального выпрямителя

Трансформатор преобразует напряжение сети переменного тока в такое, которое необходимо для получения заданного напряжения постоянного тока на выходе выпрямителя.

Вентили обладают односторонней проводимостью и осуществляют преобразование переменного тока в постоянный ток. Их количество в выпрямителе зависит от схемы выпрямления. Каждая фаза выпрямителя имеет, по крайней мере, одно вентильное звено. Но есть схемы, которые имеют по два и более вентильных звена на фазу. Каждое вентильное звено должно иметь, по крайней мере, один вентиль. Но во многих случаях для получения заданной величины тока или напряжения приходится каждое вентильное звено составлять из нескольких вентилях, включаемых последовательно, параллельно или более сложными группами.

Выпрямленное напряжение или ток после вентилях получается пульсирующим. Такой ток можно представить, как состоящий из двух токов: постоянного тока и наложенного на него переменного. При питании аппаратуры телекоммуникации пульсирующим постоянным током могут возникнуть серьезные помехи передаче сигналов связи. Т.к. это недопустимо, то обычно принимают меры к снижению этой пульсации. Для этого между вентилями и питаемой аппаратурой ставится *сглаживающий фильтр*. Выходное напряжение выпрямителя зависит от величины питающего переменного напряжения, а оно может меняться в пределах (-10...15%). Аппаратура связи чаще всего не допускает такого значительного колебания напряжения, поэтому в современных выпрямителях после фильтра ставят

стабилизаторы напряжения, и если надо тока. Помимо этих звеньев у всякого выпрямительного устройства есть аппаратура коммутации, защиты и т.д.

2. Вентили и их параметры

Выпрямление переменного тока в постоянный ток осуществляется нелинейным элементом – *вентилем*.

Вентиль – прибор, проводящий электрический ток преимущественно в одном направлении. Он обладает большой проводимостью (т.е. малым сопротивлением) для тока одного направления, и малой проводимостью (т.е. большим сопротивлением) для тока другого направления. Направление, в котором вентиль обладает малым сопротивлением, называется *прямым*, оно характеризуется величинами $R_{пр}$, $I_{пр}$, $U_{пр}$. А направление, в котором вентиль обладает большим сопротивлением, называется *обратным* и характеризуется величинами $R_{обр}$, $I_{обр}$, $U_{обр}$. Обозначение вентиль в схеме приведена на рис. 2:

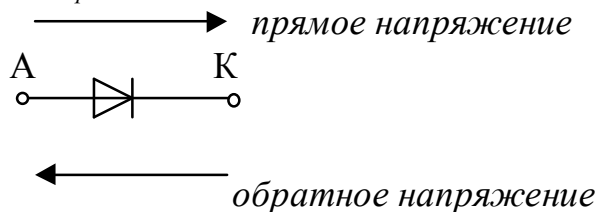
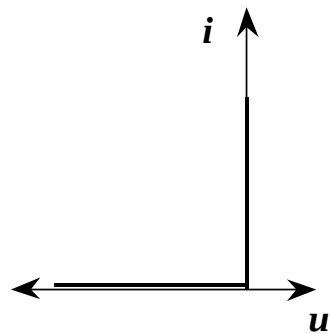
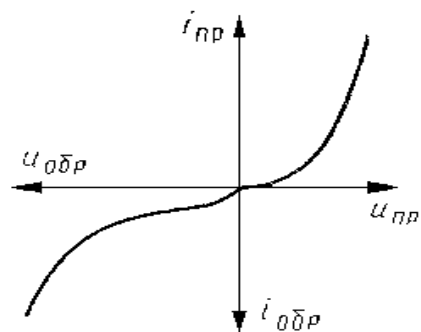


Рис. 2. Обозначение вентиль в схеме.

Напряжение от анода к катоду называется *прямым*, а от катода к аноду – *обратным*. Различают *идеальный* и *реальный* вентили. Направление тока через вентиль и его основные электрические свойства выражаются вольт-амперной характеристикой (ВАХ) – $I = f(U)$.



ВАХ идеального вентиля



ВАХ реального вентиля

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики полупроводникового диода

У идеального вентиля $R_{пр}=0$, соответственно $U_{пр}=0$, а ток $I_{пр}$ ничем не ограничен, а $R_{обр}=\infty$, т.е. при любом $U_{обр}$ величина $I_{обр}=0$.

Реальный вентиль обладает некоторым сопротивлением $R_{пр}$, поэтому для создания заданной величины прямого тока $I_{пр}$ к нему надо подвести определенную величину $U_{пр}$. А в обратном направлении он обладает конечным $R_{обр}$, поэтому пропускает некоторый обратный ток $I_{обр}$ (рис. 3).

Вентили бывают *управляемыми* и *неуправляемыми*. В настоящее время в основном применяются электронные полупроводниковые вентили – селеновые, кремниевые, германиевые (неуправляемые) и кремниевые управляемые (тиристоры).

3. Однофазная одноконтная схема выпрямления

Когда на аноде вентилля будет положительный потенциал, ток потечет через вентиль, R_H и замкнется на вторичную обмотку трансформатора (рис. 2.6). Если $U_2 = \sin \omega t$, то ток в нагрузке будет в виде полусинусоиды, такую же форму импульсов будет иметь напряжение на нагрузке. Этот выпрямленный ток имеет постоянную составляющую I_0 , представляющую собой среднее значение выпрямленного тока, протекающего за период через нагрузку.

В одноконтной схеме выпрямления имеют место следующие соотношения:

$$U_0 = (\sqrt{2}/\pi)U_2 = 0,45U_2;$$

$$I_0 = (2/\pi)I_2 = I_2/1,57 = 0,637 I_2.$$

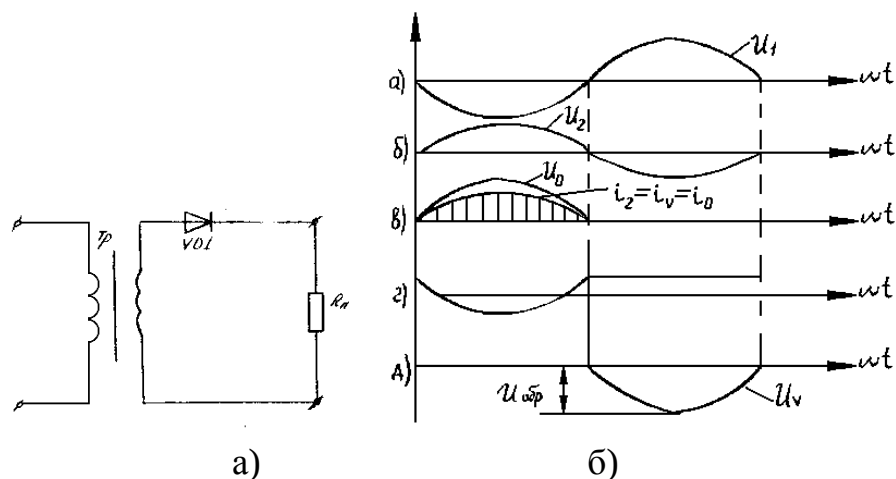


Рис. 4.Однофазная одноконтная схема выпрямления (а) и временные диаграммы (б)

Обратное напряжение, которое прикладывается к закрытому вентиллю, равно амплитуде приложенного 2-ного напряжения трансформатора, т.е.

$$U_{OBR} = U_m = \pi U_0 = 3,14U_0 = U_2 \sqrt{2},$$

то есть в 3 раза больше выпрямленного напряжения. Частота пульсаций выпрямленного напряжения и тока в такой схеме $f_n = f_c$ (т.к. $m=1$).

4. Мостовая схема выпрямления

Иначе ее называют однофазной мостовой схемой Герца. В ней в течение одного полу периода выпрямленный ток течет через B_1 , R_H , B_3 и замыкается на вторичной обмотке трансформатора (рис. 5).

При обратной полярности ток замкнется через B_2 , R_H , B_4 и вторичную обмотку. То есть ток через нагрузку и вторичную обмотку трансформатора течет в течение всего периода. Постоянная составляющая тока через R_H равна (при условии, что $I_m = U_m/R_H$):

$$I_0 = \left(\frac{m}{\pi}\right) I_m \cdot \sin \frac{\pi}{m} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{R_H \cdot \pi} = 0.9 \frac{U_2}{R_H};$$

$$U_0 = 2\sqrt{2} \frac{U_2}{\pi},$$

то есть в 2 раза больше, чем в однофазной одноконтурной схеме. Так как ток по вторичной обмотке трансформатора течет весь период, то действующее его значение определится, как

$$I_2 = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int (I_m)^2 \sin^2 \omega t d\omega t = I_m \frac{1}{\sqrt{2}}$$

тогда, сравнивая I_0 и I_2 , получим

$$I_0 = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sqrt{2} I_2 = 0.9 \cdot I_2.$$

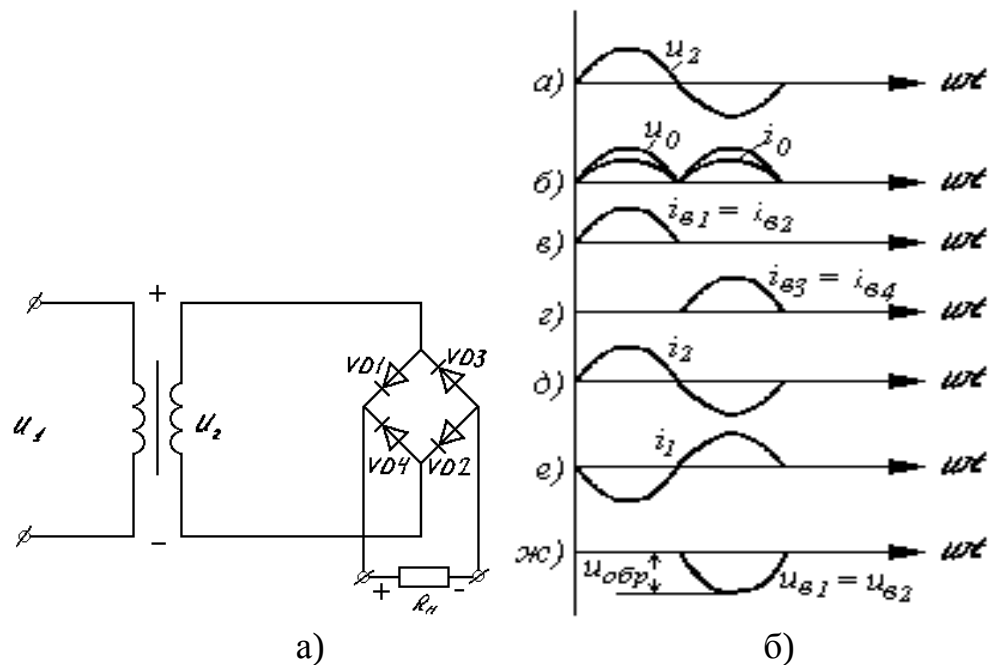


Рис. 5. Мостовая схема выпрямления (а) и временные диаграммы (б)

Так как за каждый полупериод работают попарно два вентиля, то действующее значение тока через каждую пару последовательно соединенных вентиля равен: $I_B = I_2/2$.

Для этой схемы $m=2$, $f_{\Pi} = 2 f_C$, обратное напряжение на запертых вентилях определится как $U_{OBR} = U_m = \sqrt{2} U_2$, т.к. вентили подключены к U_2 параллельно.

5. Двухтактная схема выпрямления с нулевым выводом вторичной цепи трансформатора

Эту схему иначе называют двухфазной одноконтурной, т.к. за период выпрямленного тока в каждой половине вторичной обмотки трансформатора

протекает один импульс тока, но как обычно в технике переменного тока не применяется двух фазный ток из-за трудностей его генерирования и отсутствия сетей двух фазного тока, то чаще применяется первое название (рис. 6).

В этой схеме обе половины вторичной обмотки участвуют в работе выпрямителя поочередно. В первый полу период цепь выпрямленного тока замыкается через V_1 , R_H и полу обмотку трансформатора, во второй полу период – через V_2 , R_H и другую полу обмотку трансформатора. По нагрузке ток протекает в течение всего периода с одинаковой полярностью.

В этой схеме постоянная составляющая напряжения на нагрузке:

$$U_0 = \frac{m}{\pi} U_m \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) = 2\sqrt{2} \frac{U_2}{\pi}$$

так как $m=2$, $U_2=U'_2=U''_2$, то

$$I_0 = U_0 / R_H = 0,9 U_2 / R_H$$

Действующее значение тока каждой половины вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{I_m}{2} \frac{2}{m} + \sin\left(\frac{2\pi}{m}\right) = \frac{I_m}{2} = 1,28 I_0$$

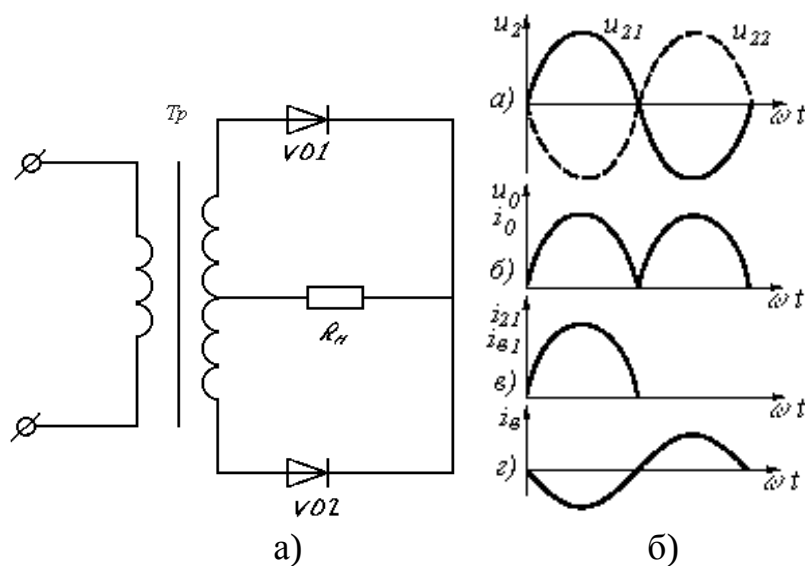


Рис. 6. Двухтактная схема выпрямления с нулевым выводом вторичной цепи трансформатора (а) и временные диаграммы работы

Частота пульсаций на нагрузке $f_n = 2 f_c$. Закрытый вентиль находится под обратным напряжением, равным разности потенциалов между концами вторичной обмотки трансформатора. Максимальное значение этой разности потенциалов равно удвоенному амплитудному значению напряжения на одной половине вторичной обмотки, т.е.

$$U_{OBR} = 2U_m = 2\sqrt{2} U_2,$$

значит в этой схеме U_{OBR} на запертом вентиле в 2 раза больше, чем в мостовой.

Лекция №6

Трехфазные схемы выпрямления. Тиристорные управляемые выпрямители

1. Трехфазная однотактная схема выпрямления (схема Миткевича)

Она состоит из трехфазного трансформатора, вторичная обмотка которого соединена “звездой”. Концы вторичных обмоток соединены в одну нулевую точку, а начала подключены к анодам вентилей. Катоды всех вентилей соединены в общую точку и образуют положительный полюс на выходе выпрямителя (рис. 1).

А нулевая точка трансформатора является отрицательным полюсом. Напряжения разных фаз вторичной обмотки U_2 сдвинуты по фазе на $2\pi/3$.

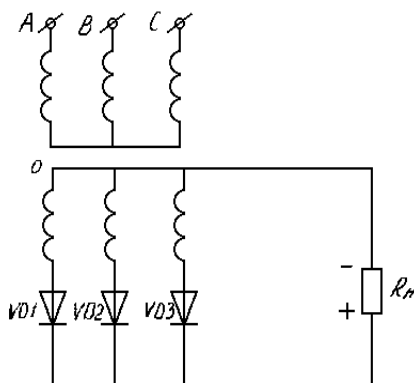


Рис. 1. Трехфазная однотактная схема выпрямления

В любой момент времени откроется тот вентиль, на аноде которого окажется наибольший положительный потенциал относительно других фаз (рис. 2).

Возьмем произвольный момент времени t_0 , тогда на аноде первого вентиля оказывается наиболее высокий потенциал и он открывается. Под действием U_{2I} ток будет протекать через первую фазу, второй вентиль, сопротивление нагрузки R_n к нулевой точке.

Напряжение на нагрузке равно мгновенному значению U_{2I} . До момента t_1 напряжение во второй фазе тоже положительно, но меньше чем в первой, поэтому потенциал анода второго вентиля оказался ниже потенциала его катода и второй вентиль закрыт.

Начиная с момента t_2 , начинает работать третья фаза и т.д. Каждая фаза работает в течение части периода $2\pi/3$. Напряжение на выходе выпрямителя U_0 в любой момент времени равно мгновенному значению напряжения фазы вторичной обмотки, в которой открыт вентиль, т.е. выпрямленное напряжение U_0 представляет собой огибающую напряжения U_2 вторичных обмоток, а так как $I_0 = U_0/R_0$, то эта же кривая в другом

масштабе является кривой тока. Причем ток по каждой фазе протекает в течение трети периода.

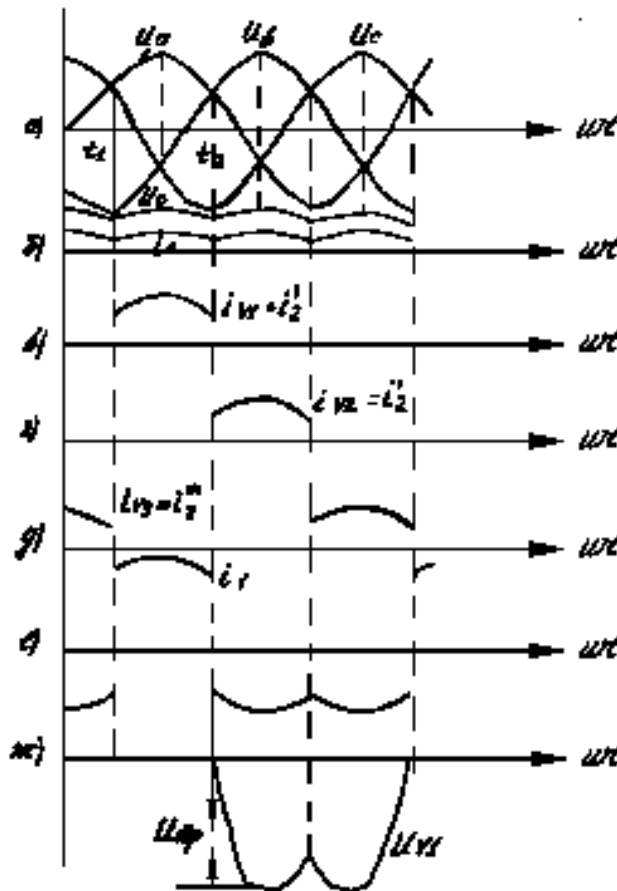


Рис.2. Временные диаграммы работы трехфазного однопulse выпрямителя

Возьмем за начало отсчета времени момент, когда напряжение U_2 в фазе двойной обмотки равно U_m и рассмотрим интервал времени $\omega t = \pi/m$ (здесь $m=3$). Тогда постоянная составляющая выпрямленного напряжения определится из выражения

$$U_0 = \left(\frac{m}{2\pi}\right) \int U_m \cdot \cos \omega t \, d\omega t = \left(\frac{m}{\pi}\right) U_m \sin \frac{\pi}{m} = \frac{3}{\pi} U_m \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

или, переходя к действующему значению U_2 , имеем:

$$U_0 = (3 \sqrt{3} \sqrt{2} U_2) / 2 \pi = 1,17 U_2,$$

соответственно,

$$I_0 = \left(\frac{m}{\pi}\right) \int (I_m)^2 \cdot \cos^2 \omega t \, d\omega t = \left(\frac{3}{\pi}\right) I_m \sin \frac{\pi}{3}$$

Действующее значение тока двойной обмотки трансформатора и вентилля определяется из выражения:

$$I_2 = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int (I_m \cos \omega t)^2 \, d\omega t = I_m \sqrt{\frac{1}{2m}} + \left(\frac{1}{4\pi}\right) \sin \frac{2\pi}{m}$$

Если сравнивать между собой I_0 и I_2 , то проделав соответствующие преобразования, получим $I_0 = I_2 / 0,58 = 1,752 I_2$. Обратное напряжение на вентиль в этой схеме описывается кривой, определяемой разностью двух синусоидальных фазных напряжений. Так как разность двух фазных напряжений равна линейному напряжению, то максимальная величина обратного напряжения равна амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора, т.е. $U_{обр} = \sqrt{3} U_m = U_L = \sqrt{3} \sqrt{2} U_2$. Частота пульсаций выпрямленного напряжения $f_n = m f_c = 3 f_c$.

2. Трехфазная двухтактная схема (схема Ларионова)

При этом вторичную обмотку трансформатора можно включать и звездой и треугольником, но чаще она включается в звезду, так как при этом есть возможность использовать нулевую точку для снятия половинного выпрямленного напряжения (рис. 3).

Каждая фаза обмотки трансформатора подключается к аноду одного и к катоду другого вентиля. 3 вентиля соединяются между собой в общую точку анодами (1, 3, 5) и образуют анодную группу вентиля, создающую (-) полюс на выходе, а 3 других вентиля образуют катодную группу вентиля и (+) полюс на выходе.

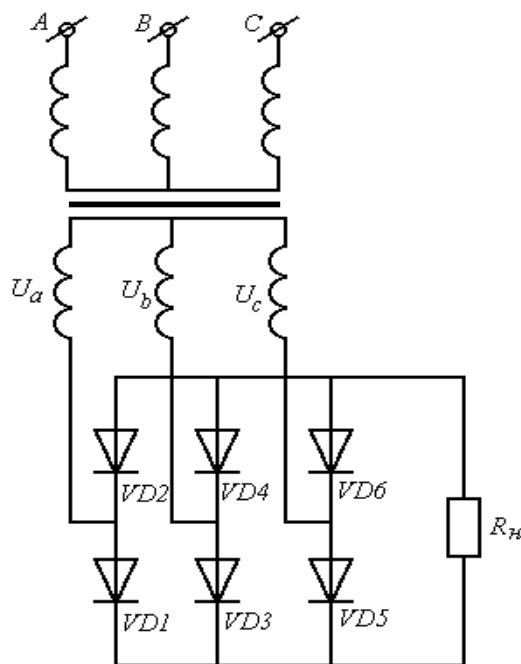


Рис. 3. Трехфазная двухтактная схема (схема Ларионова)

В анодной группе проводящим будет тот вентиль, на катоде которого наибольший отрицательный потенциал, а в катодной группе – тот, на аноде которого будет наибольший положительный потенциал. В любой момент времени ток протекает через 2 последовательно соединенных вентиля, сопротивление нагрузки и обмотки двух фаз.

Работа каждой пары вентиля происходит в течение $1/6$ периода. Порядок следования фаз определяет, через какие пары вентиля протекает ток. Если изменить этот порядок, то изменится сочетание последовательно соединенных вентиля. В течение каждого периода выпрямляемого тока через каждую фазу трансформатора протекает 2 импульса тока положительной полярности в течение $1/3T$ (каждый импульс длится $T/6$) и 2 импульса тока отрицательной полярности с той же длительностью (рис. 4). Таким образом, каждая фаза трансформатора работает в течение $2T/3$, а каждый вентиль работает $T/3$. Напряжение на выходе выпрямителя равно огибающей, полученной при выпрямлении 6-ти тактов напряжения ($m=6$ для этой схемы), а величина его равна мгновенному значению линейного напряжения между двумя фазами в период открывания вентиля в этих фазах.

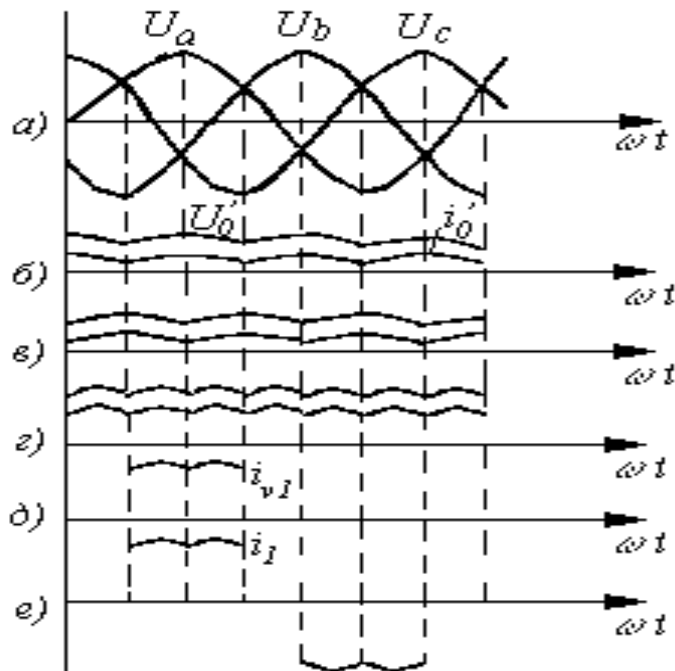


Рис. 4. Временные диаграммы работы трехфазной двухтактной схемы выпрямления

Величина постоянной составляющей выпрямленного напряжения определяется, как

$$U_0 = (m/\pi) \sqrt{2} U_2 \sin(\pi/m) = (6/\pi) U_2 \sqrt{2} \sin(\pi/6) = 2,34 U_2$$

аналогично можно получить:

$$I_0 = 1,22 I_2,$$

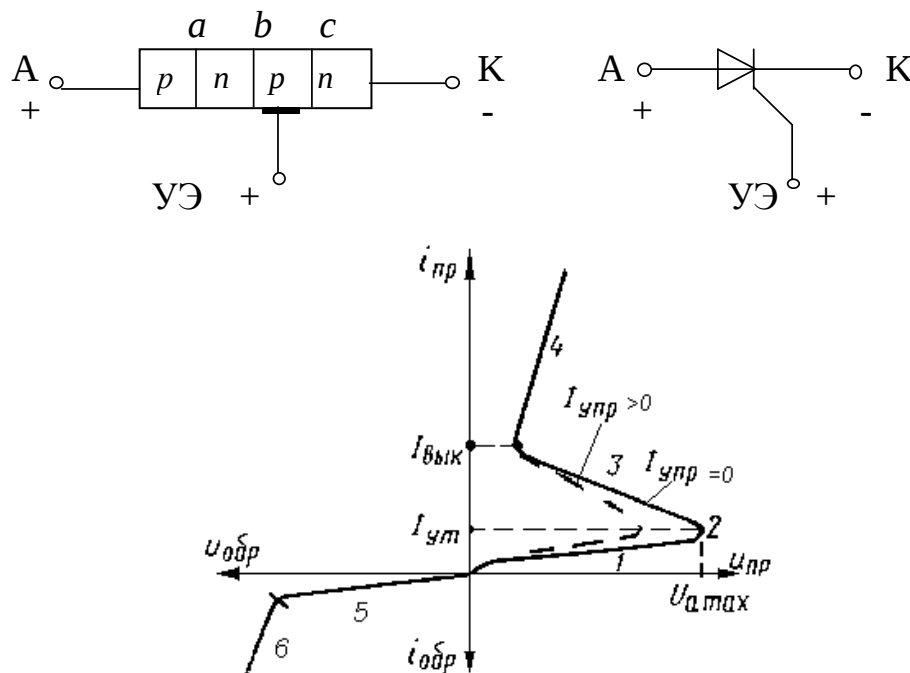
где I_2 - действующее значение тока вторичной обмотки каждой фазы трансформатора. Частота пульсаций выпрямленного напряжения и тока $f_n = 6f_c$. Обратное напряжение на каждом вентиле

$$U_{OBR} = 2,457 U_2.$$

3. Тиристорные управляемые выпрямители

Широкое применение тиристоров объясняется не только возможностью преобразовывать большие мощности (от десятков Вт до сотен кВт), но и в совмещении в одном устройстве нескольких функций: выпрямление и регулирование, выпрямление и стабилизация, преобразование и стабилизация и др.

Если цепь управляющего электрода УЭ не подключена к источнику электрической энергии, а напряжение и приложенное в прямом направлении между анодом А и катодом К тиристора, не превышает допустимого значения $U_{пр.д.}$, то тиристор заперт, и ток через него не протекает. При достаточно высоком анодном напряжении, равном $U_{пр.д.}$, в среднем р-п переходе тиристора происходит лавинообразное умножение числа свободных носителей заряда, что вызывает резкое возрастание анодного тока, протекающего через прибор (рис. 5). В результате чего, происходит почти мгновенное (15-20 мкс) уменьшение падения напряжения на тиристоре. Переход тиристора в низкоомное состояние (т. е. состояние высокой проводимости) называется включением (отпиранием) прибора. При этом прямой ток, протекающий через тиристор (область 4), ограничивается практически только сопротивлением нагрузки.



- 1 – область непроводящего состояния в прямом направлении;
- 2 – область пробоя;
- 3 – область отрицательного сопротивления;
- 4 – область высокой проводимости;
- 5 – область непроводящего состояния в обратном направлении;
- 6 – область необратимого лавинного пробоя.

Рис. 5. Условное обозначение и вольт-амперная характеристика тиристора

Следует указать, что до того, как рабочая точка тиристора попадает в низкоомную область, она пройдет участок отрицательного сопротивления (участок 3 рис.5), который характеризуется нарастанием анодного тока при уменьшении падения напряжения на приборе. В области высокой проводимости вольт-амперной характеристики рабочая точка тиристора будет находиться до тех пор, пока величина анодного тока, протекающего через прибор, больше некоторой минимальной величины, называемой удерживающим током $I_{уд}$.

При отрицательном напряжении, приложенном к тиристор, оба крайние р-п перехода, включенные последовательно, оказываются смещенными в обратном направлении и только средний – в прямом. В этом случае работа тиристора аналогична работе р-п перехода, смещенного в непроводящем направлении и, следовательно, обратная характеристика (участок 5 рис.5) тиристора подобна обратной характеристике кремниевого диода. В непроводящем состоянии сопротивление тиристора может достигать значения порядка нескольких десятков мегаом. Возвращение тиристора в непроводящее состояние называется включением (запиранием) прибора.

Участок 6 на рис. 5 представляет характерную картину необратимого пробоя р-п перехода.

Наличие управляющего сигнала на управляющем электроде снижает прямое напряжение включения $U_{вкл}$ тиристора (рис. 1. $I_{упр} > 0$). Следовательно, для включения тиристора в этом случае требуется меньшее анодное напряжение.

Изменяя величину управляющего сигнала, можно регулировать значение напряжения включения тиристора.

Если управляющий сигнал обеспечил отпирание тиристора, то после этого прибор уже не управляется; для его запирания следует уменьшить анодный ток до такой величины, чтобы он был меньше значения удерживающего тока $I_{уд}$.

Поскольку после открывания тиристора цепь управления не влияет на его состояние, поэтому управление осуществляется импульсами небольшой длительности (десятки или сотни микросекунд) с достаточно крутым передним фронтом.

Существует несколько методов управления тиристорами, из которых следует отметить амплитудный, фазовый и фазо – импульсный.

Амплитудный метод управления заключается в том, что на управляющий электрод тиристора подают положительное напряжение, изменяющееся по величине. Тем самым обеспечивается изменение момента открывания тиристора.

В выпрямительных устройствах, которых используется фазовый метод управления тиристорами, с помощью фазовращающего моста изменяют

фазу управляющего напряжения относительно напряжения на аноде тиристора. Частота следования управляющих сигналов в таких схемах должна быть синхронизирована с частотой сети. Схемы управления (СУ) просты.

Они содержат резистор и конденсатор. Недостатки фазового метода управления – малая крутизна управляющего напряжения и как результат – невысокая стабильность момента открывания тиристора. Фазо-импульсный метод управления тиристорами отличается от предыдущего тем, что с целью

Повышения точности и стабильности момента открывания тиристора на его управляющий электрод подают импульс напряжения с крутым фронтом. Этот метод получил в настоящее время наибольшее распространение. Схемы, реализующие этот метод, отличаются большим разнообразием и сложнее, чем при просто фазовом методе регулирования.

На рис. 6 показана схема однофазного однополупериодного выпрямителя при работе на активную нагрузку, а на рис. 7 представлены осциллограммы токов и напряжений схемы.

Если положительное напряжения подается на вентиль одновременно с управляющим импульсом, то ток в рабочей цепи будет протекать в течение половины периода. Такой режим (осциллограммы рис. 3б, в) называется неуправляемым. Если же управляющий импульс воздействует на тиристор с некоторым запаздыванием относительно начала действия прямого напряжения, то время протекания тока через вентиль уменьшается, и среднее значение выпрямленного тока за период $I_{0\alpha}$ окажется меньше значения I_0 в неуправляемом режиме работы выпрямителя.

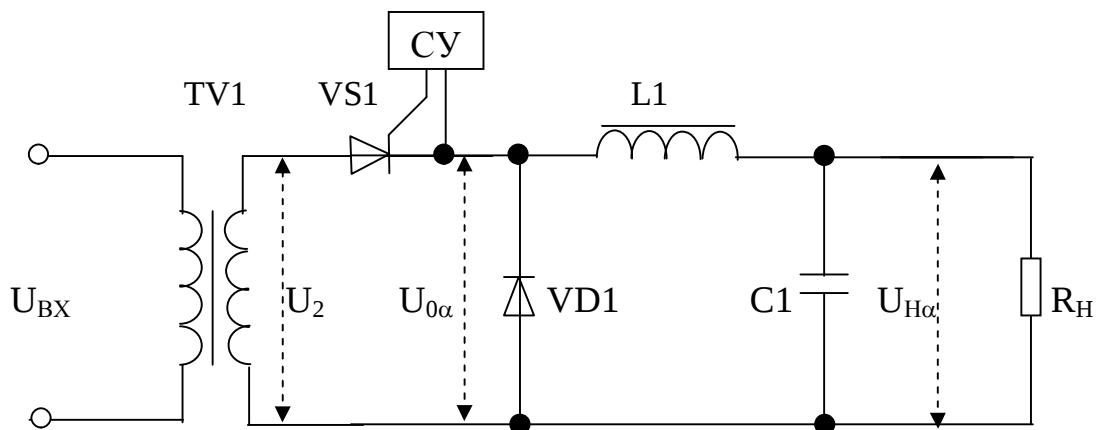


Рис. 6. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

Напряжение на нагрузке в регулируемом режиме $U_{0\alpha} = I_{0\alpha} R_N$ также будет меньше среднего напряжения на нагрузке $U_{0\alpha}$ в неуправляемом режиме. Угол задержки открывания тиристора, отсчитываемый от фазы, которая соответствует открыванию неуправляемого вентиля, обозначается α и называется углом управления (запаздывания). Ток и напряжение в управляемом режиме зависят от угла α и для однофазной однополупериодной схемы равны:

$$I_{O\alpha} = (I_{2m}/2\pi) \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t d\omega t = (I_{2m}/2\pi)(1 + \cos \alpha) = I_0 (1 + \cos \alpha)/2$$

$$U_{O\alpha} = I_{O\alpha} R_H = I_0 R_H (1 + \cos \alpha)/2 = U_0 (1 + \cos \alpha)/2$$

где $I_0 = I_{2m}/\pi$ - постоянная составляющая выпрямленного тока;

$U_0 = U_{2m}/\pi$ - постоянная составляющая выпрямленного напряжения;

I_{2m}, U_{2m} - амплитуды напряжения и тока на вторичной обмотке;

$I_{O\alpha}, U_{O\alpha}$ - постоянные составляющие (средние значения) выпрямленного тока и напряжения в управляемом режиме.

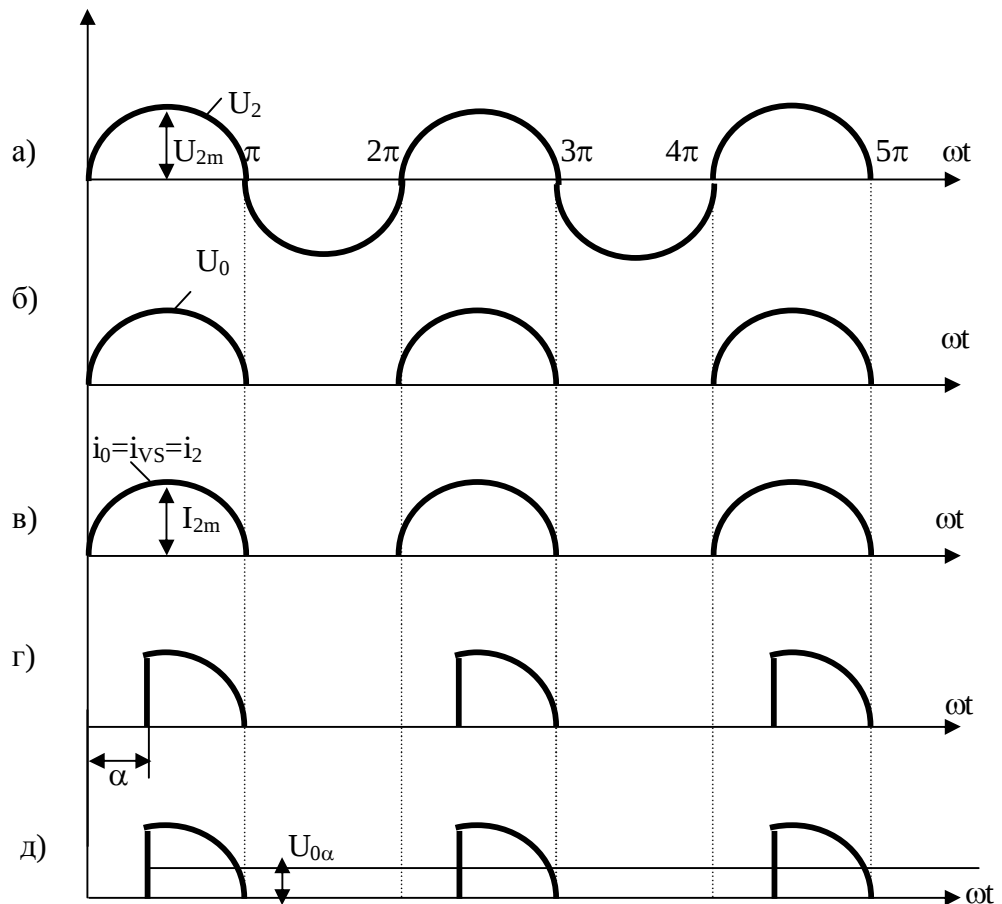


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений однополупериодного выпрямителя

С учетом того, что в двухфазной схеме выпрямления со средней точкой число фаз выпрямления $m=2$ постоянные составляющие тока и напряжения в неуправляемом режиме в два раза больше

$$I_{O\alpha} = (mI_{2m}/2\pi), \quad U_0 = U_{2m}/\pi$$

В управляемом режиме получим:

$$I_{O\alpha} = (mI_{2m}/2\pi) \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t d\omega t = (2I_{2m}/2\pi)(1 + \cos \alpha) = I_0(1 + \cos \alpha)$$

$$U_{O\alpha} = I_{O\alpha} R_H = I_0 R_H (1 + \cos \alpha) = U_0 (1 + \cos \alpha)$$

Зависимости $(I_{O\alpha}/I_0) = \varphi(\alpha)$ и $(U_{O\alpha}/U_0) = \varphi(\alpha)$ называются регулировочными характеристиками. На рис. 8 показана регулировочная характеристика описываемого выпрямителя.

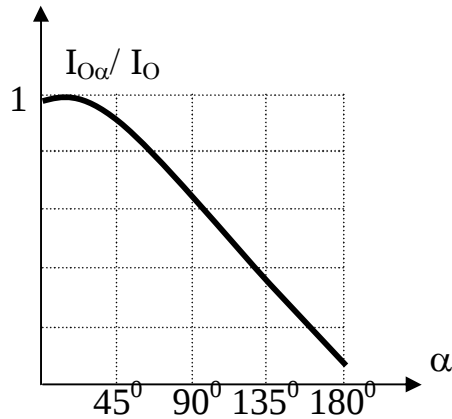


Рис. 4. Регулировочная характеристика выпрямителя

Двухполупериодные схемы выпрямления рассмотрим на примере двухфазной схемы со средней точкой (рис. 9).

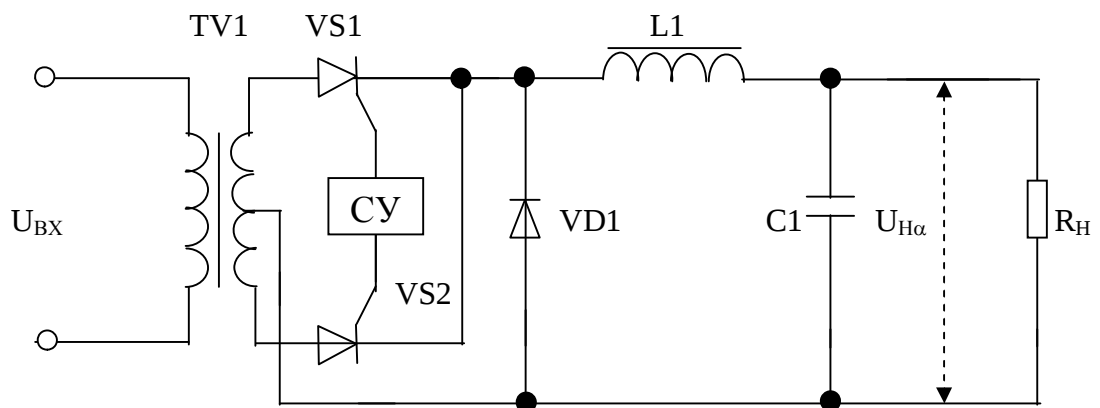


Рис. 9. Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

Если $\alpha > 0$ т.е. импульс тока $I_{УПР}$ протекает по цепи управляющего электрода с запаздыванием относительно начала работы неуправляемого вентиля, то в интервале от $\omega t = 0$ до $\omega t = \alpha$ ток через тиристор VS1 не протекает, прямое напряжение на нем возрастает, напряжение на нагрузке равно нулю (рис. 10).

В момент $t_1 = \alpha/\omega$ тиристор VS1 с помощью импульса тока $I_{УПР}$ открывается, и напряжение на R_H скачкообразно возрастает до значения, которое соответствует величине фазного напряжения $U_{21}(t)$ в момент времени t_1 . В момент времени $t_2 = \pi/\omega$ напряжение $U_{21}(t)$ меняет знак и под действием обратного тока тиристор VS1 закрывается. В момент $t_3 = (\pi + \alpha)/\omega$ на управляющий электрод тиристора VS2 подается положительный потенциал, и под действием импульса тока $I_{УПР}$ он открывается, напряжение на нем U_{VS2}

резко уменьшается, а напряжение на нагрузке U_0 скачкообразно возрастает до значения $U_{21}(t)$. В интервале углов от ωt_2 до ωt_3 напряжение на нагрузке равно нулю, так как $VS1$ и $VS2$ закрыты. Затем процесс повторяется.

Нужно отметить, в управляемых выпрямителях вместе с увеличением угла управления α увеличивается разность фаз между током и напряжением, то есть возрастает потребление из сети реактивного тока и снижается коэффициент мощности выпрямителя.

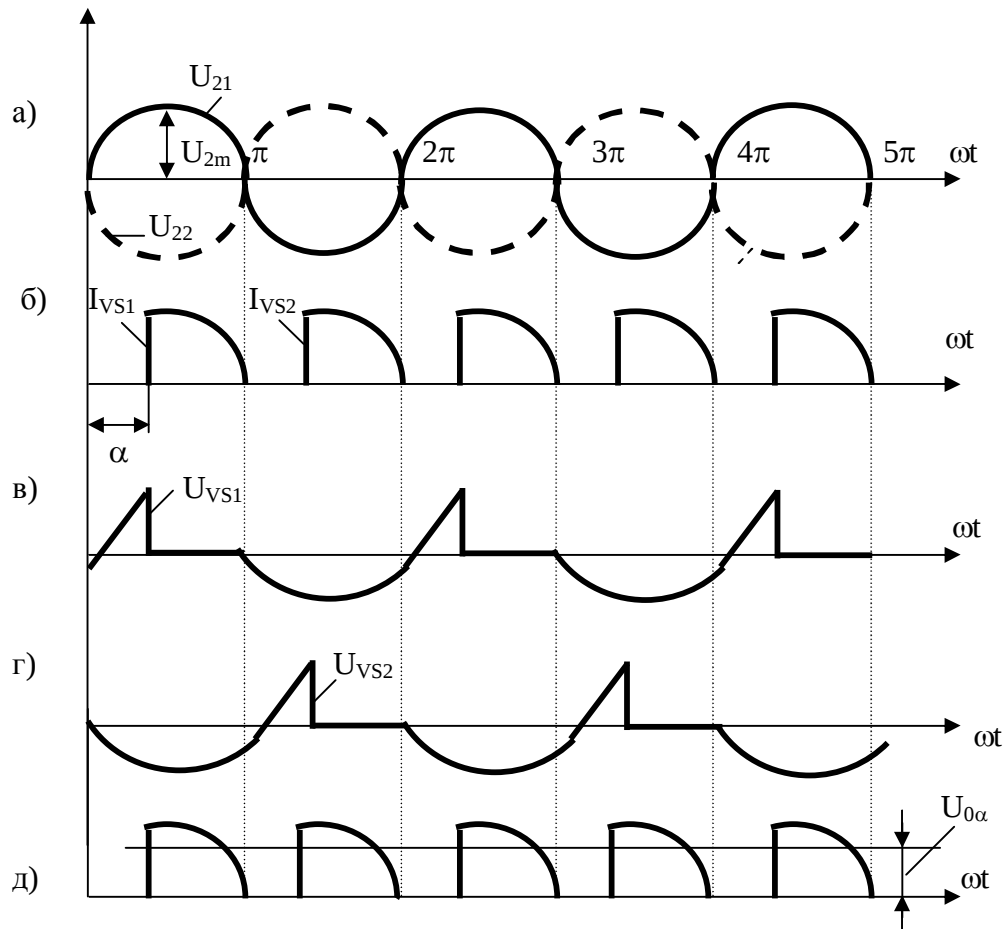


Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений выпрямителя со средней точкой

Для уменьшения пульсаций и потребления трансформатором выпрямителя реактивной мощности на выходе выпрямителя включается обратный диод $VD1$ (рис.9). В интервалах времени, когда открыт один из тиристоров, диод $VD1$ закрыт, так как к нему прикладывается обратное напряжение. При запираии тиристоров ток через дроссель начинает уменьшаться, в его обмотке наводится ЭДС самоиндукции, и под действием этой ЭДС отпирается диод $VD1$. Таким образом, в течение запертого состояния тиристоров ток нагрузки I_0 замыкается через диод $VD3$.

Из приведенных на рис. 7 и 10 осциллограмм для активного характера нагрузки видно, что ток (напряжение) в ней имеет прерывистый пульсирующий вид, т. е. Необходима установка фильтра. Фильтр, как правило, начинается с индуктивности. При этом выпрямитель может работать как в режиме прерывистого тока (рис.7 и 10), когда накопленная в

индуктивности энергия недостаточна для поддержания тока в цепи нагрузки до момента включения второй фазы выпрямителя, так и в режиме непрерывного тока. Режим непрерывного тока является основным режимом. При этом ток в нагрузке не прерывается потому, что энергия, накапливаемая в индуктивном сопротивлении нагрузки, достаточна для поддержания ток. Для обеспечения непрерывности тока необходимо, чтобы индуктивность фильтра была больше критической индуктивности

$$L > L_{кр} = (R_H / \omega) \operatorname{tg} \alpha$$

Это условие трудно выполнимо при больших сопротивлениях нагрузки и при холостом ходе выпрямителя.

Лекция №7

Сглаживающие фильтры. Умножители напряжения

При изучении различных схем выпрямления переменного тока мы убедились, что мгновенное значение выпрямленного напряжения не является постоянным, а представляется рядом Фурье, содержащим постоянную составляющую и сумму гармоник переменных составляющих, из которых наибольшую величину имеет первая гармоника, частота которой $f_{II} = mf_c$. Тогда мы определяем коэффициент пульсации выпрямленного напряжения

$$K_{IIk} = \frac{2}{(km)^2 - 1} = \frac{U_{\sim}}{U_0},$$

где k - номер гармоники.

Коэффициент пульсации можно определять и для тока $K_{II} = I_{\sim}/I_0$. При чисто активной нагрузке $K_{IIU} = K_{II}$, а при комплексной – $K_{IIU} \neq K_{II}$. Чаще всего нагрузка позволяет иметь коэффициент пульсации питающего напряжения значительно меньше, чем получается на выходе выпрямителя. Тогда для уменьшения пульсации на выходе выпрямителя включают сглаживающие фильтры.

Способность сглаживающего фильтра уменьшать пульсацию оценивается *коэффициентом сглаживания*, равным отношению коэффициента пульсации на входе фильтра (на выходе выпрямителя) к коэффициенту пульсации на его выходе (на нагрузке)

$$K_c = \frac{K_{Пвх}}{K_{Пвых}} = \frac{\frac{U_{01m}}{U_0}}{\frac{U_{H1m}}{U_n}},$$

где U_{01m} , U_{H1m} – амплитуды основной (первой) гармоники переменной составляющей на входе и на выходе фильтра;

U_0 , U_H – постоянные составляющие напряжения на входе и выходе фильтра.

Кроме обеспечения необходимого коэффициента сглаживания к фильтрам предъявляются еще ряд требований. Так как через фильтр идет весь ток нагрузки, то на нем падает часть постоянной составляющей тока и напряжения. Чтобы уменьшить это падение фильтр обычно содержит различные комбинации реактивных элементов L и C , имеющих малые активные потери. Только при очень малых мощностях нагрузки фильтр вместо L содержит резисторы.

Требования, предъявляемые к фильтрам:

- 1) минимальное падение постоянной составляющей напряжения;
- 2) не должен искажать форму тока в нагрузке при быстром изменении сопротивления нагрузки R_H (за счёт того, что реактивные элементы фильтра препятствуют быстрым изменениям тока и напряжения);

- 3) отсутствие перенапряжения и бросков тока в переходных процессах;
- 4) малая стоимость, габариты и вес;
- 5) высокая надёжность;
- 6) частота собственных колебаний фильтра должна быть меньше низшей частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения и тока (иначе может быть резонанс в отдельных звеньях фильтра, и амплитуда переменной составляющей не уменьшится, а увеличится).

Существуют различные схемы фильтров: C , L , LC (Г-образные), CLC (П-образные), многозвенные LC и RC , резонансные, электронные фильтры на транзисторах и микросхемах.

1. Пассивные фильтры

Методы построения сглаживающих фильтров на реактивных элементах заключаются в следующем: последовательно в цепь тока нагрузки включают элемент, имеющий большое сопротивление для изменений тока и малое сопротивление для постоянной составляющей тока (например, реактивная катушка с сердечником, обладающая индуктивностью L , параллельный резонансный контур), а параллельно нагрузке включают элемент, обладающий малым сопротивлением для изменений тока и большим сопротивлением для постоянной составляющей тока (например, конденсатор, последовательный резонансный контур). Принцип действия этих фильтров основан на способности реактивных элементов накапливать и отдавать электрическую энергию.

Индуктивный фильтр состоит из дросселя L , включённого последовательно с нагрузкой R_H (рис. 2). Сглаживающее действие дросселя основано на возникновении в нём ЭДС самоиндукции, препятствующей изменениям переменной составляющей выпрямленного тока.

Сопротивление дросселя $X_L = \omega_L L$ для постоянной составляющей тока равно 0 (здесь $\omega_L = 2\pi f_L = 2\pi m f_C = m \omega_C$), а переменной составляющей тока не равна 0, и на нём получается падение переменной составляющей напряжения. Для лучшего сглаживания пульсаций необходимо, чтобы индуктивное сопротивление дросселя было во много больше сопротивления нагрузки R_H (то есть $X_L = \omega_L L \gg R_H$), тогда коэффициент сглаживания такого фильтра

$$K_c = \frac{K_{\text{Пвх}}}{K_{\text{Пвых}}} \approx \frac{\sqrt{R_H^2 + (m \omega_c L)^2}}{R_H}.$$

L – фильтры можно применять в многофазных схемах выпрямления при большой мощности и, при небольшом сопротивлении нагрузки R_H , тогда индуктивность фильтра получится небольшой, имеет малые габариты, и можно пренебречь активными потерями в нём. Но он имеет недостатки:

- 1) при резком изменении тока нагрузки на дросселе возникает большая ЭДС самоиндукции, что создаёт перенапряжение на его обмотке, что опасно для изоляции;
- 2) сглаживающее действие этого фильтра меняется при изменении тока нагрузки, так как согласно (3) индуктивность дросселя зависит от R_H .

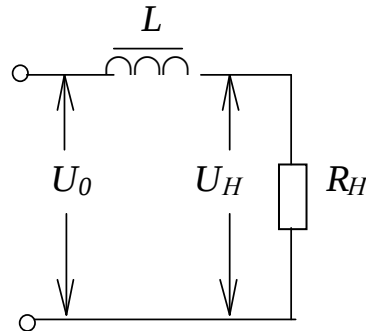


Рис. 2. Индуктивный фильтр

Достоинства: простота, малые потери мощности, малое изменение U выхода.

Действие емкостного фильтра заключается в том, что при повышении напряжения на выпрямителе он накапливает электрическую энергию, а при снижении напряжения на выпрямителе, накопленная энергия на конденсаторе разряжается на нагрузку (рис. 3). Для обеспечения сглаживания пульсаций необходимо чтобы ёмкостное сопротивление конденсатора было значительно меньше, чем сопротивление нагрузки

$$X_C = 1 / (\omega C) \ll R_H,$$

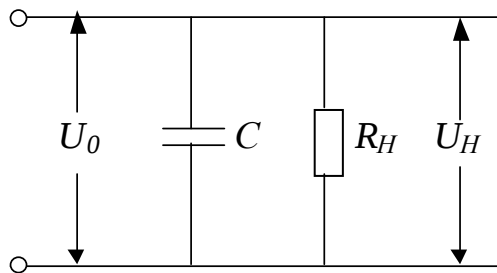


Рис. 3. Емкостной фильтр

При отсутствии ёмкости коэффициент пульсации на выходе выпрямителя

$$K_{П\text{ex}} = 2 / (m^2 - 1)$$

Тогда коэффициент сглаживания C -фильтра

$$K_c = \frac{2 / (m^2 - 1)}{H / (r_\phi C)}$$

Достоинством его является простота и малые потери мощности. Но он обладает и рядом недостатков:

- 1) наличие ёмкостного фильтра приводит к увеличению обратного напряжения на вентиль;
- 2) при большом токе нагрузки нужна большая ёмкость фильтра, иначе напряжение на нагрузке резко падает с увеличением тока нагрузки из-за быстрого разряда конденсатора;
- 3) в многофазных схемах выпрямления из-за этого фильтра резко уменьшается угол отсечки, и может возникнуть пропуск фазы, то есть один из вентилях выпрямителя не будет проводить ток;
- 4) так как ток заряда конденсатора велик, и он проходит по выпрямителю, то угол отсечки тока вентиля сильно уменьшается по сравнению со случаем активной нагрузки выпрямителя;
- 5) через вентили выпрямителя проходит большая амплитуда тока, которая ограничивается только небольшим внутренним сопротивлением выпрямителя.

1.1. Однозвенный Г-образный LC-фильтр

Обычно начинается с индуктивности и состоит из дросселя и конденсатора и обеспечивает значительно больший коэффициент сглаживания (рис. 3). При этом должно соблюдаться условие, что для первой гармоники

$$X_{C1} = 1 / (m \omega_C C) \ll R_H \ll \omega_C L = X_{L1},$$

тогда совместно они используются намного лучше, чем каждый из элементов фильтра отдельно.

При соблюдении этого условия общее сопротивление цепи для переменной составляющей выпрямленного напряжения сильно уменьшается, поэтому переменная составляющая выпрямленного тока через дроссель увеличится, падение напряжения на нём растёт, значит, переменная составляющая напряжения на зажимах нагрузки значительно уменьшается (по сравнению с её величиной при раздельном включении L и C). В этом случае, пренебрегая активным сопротивлением дросселя, можно считать, что $U_0 = U_H$, тогда коэффициент сглаживания Г-образного фильтра равен

$$K_C = U_{01m} / U_{H1m} = (m \omega_C)^2 LC - 1.$$

если учесть, что $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота фильтра, то

$$K_C = (m \omega_C / \omega_0)^2 - 1.$$

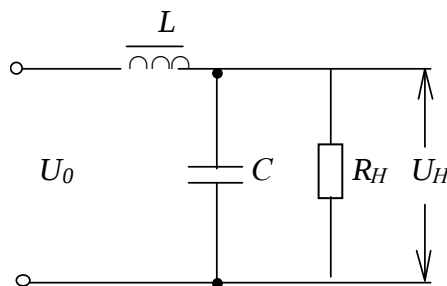


Рис. 3. Однозвенный Г-образный LC-фильтр

1.2. Однозвенный П-образный LC фильтр

П-образный LC фильтр можно представить в виде двухзвенного, состоящего из ёмкостного фильтра C_0 и Г-образного, состоящего из L и C_1 (рис. 4).

Сглаживающее действие такого фильтра можно представить как совместное действие обоих звеньев, и его коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов сглаживания обоих звеньев, то есть

$$K_{СП} = K_{СС0} K_{СГ},$$

или, подставив сюда значения $K_{СС0}$ и $K_{СГ}$ получим:

$$K_{СП} = \frac{2 r_{\phi} C_0}{H (m^2 - 1)} \cdot (L_1 C_1 m^2 \omega_c^2 - 1)$$

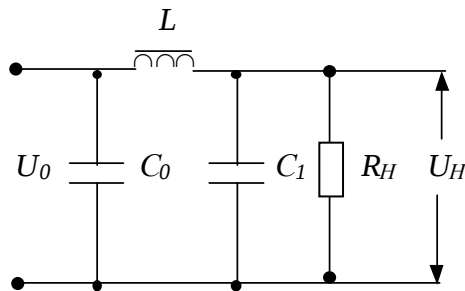


Рис. 4. Однозвенный П-образный LC фильтр

2. Активные фильтры

Сглаживающие LC и RC-фильтры имеют ряд недостатков, основные из них:

- 1) громоздкость и дороговизна дросселя фильтра;
- 2) зависимость коэффициента сглаживания от тока нагрузки;
- 3) создание дросселем электромагнитных помех;
- 4) возникновение переходных процессов в фильтрах;
- 5) то, что медленные колебания и изменения напряжения беспрепятственно передаются в нагрузку;
- 6) у RC-фильтров большое падение напряжения, малая сглаживающая способность и т.д.

Чтобы исключить эти недостатки, сделаны активные фильтры. Они бывают на транзисторах и микросхемах. Принцип действия их основан на свойстве транзистора создавать в определённых режимах работы различные сопротивления для постоянного и переменного токов. Это видно из характеристики транзистора $I_K = f(U_{KЭ})$. Сопротивление транзистора для постоянного тока $R_0 = U_{KЭ} / I_K$, где I_K – велик, а сопротивление для переменного тока $R_{\sim} = \Delta U_{KЭ} / \Delta I_K$, причём $\Delta U_{KЭ}$ – велико, ΔI_K – мало, поэтому $R_{\sim} \gg R_0$.

Для обеспечения сглаживающего действия транзистора надо правильно выбрать его рабочую точку A так, чтобы переменная составляющая напряжения, приложенная к коллектору, не смещала рабочую

точку A за пределы пологого участка характеристики, то есть I_K остаётся почти неизменным. В простейших транзисторных фильтрах нагрузка включается либо в цепь эмиттера, либо в цепь коллектора (рис. 5).

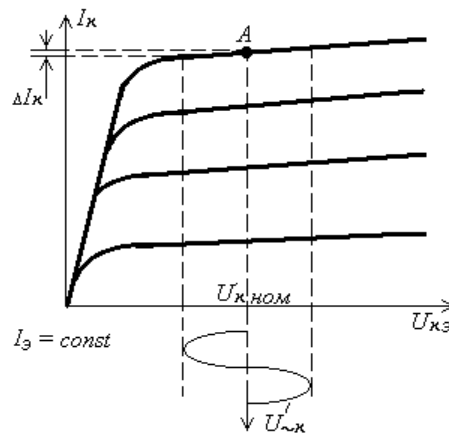


Рис. 5. Пояснение сглаживающего действия электронных фильтров.

В фильтре, где нагрузка включена в цепь коллектора, режим его работы определяется постоянной времени R_1C_1 – цепочки (рис. 6). Эта цепочка стабилизирует ток эмиттера, если её постоянная времени много больше периода пульсации входного напряжения.

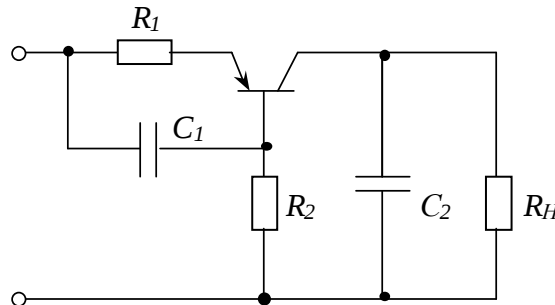


Рис. 6. Схема электронного фильтра

Тогда рабочая точка A под воздействием пульсации входного напряжения будет перемещаться по пологому участку коллекторной характеристики (так как ток коллектора I_K почти не зависит от потенциала коллектора, а в основном определяется током эмиттера $I_Э$, поэтому при поддержании $I_Э = const$ любое изменение входного напряжения только перемещает точку A вправо или влево, почти не меняя величину тока I_K). Тогда ток I_K меняется мало, а напряжение на нагрузке $U_H = I_K R_H$ останется почти неизменным. Незначительная пульсация на выходе транзистора будет сглаживаться конденсатором C_2 . Сопротивление R_2 служит для установки заданного режима.

- 1) заданное значение U_H определяется величиной эталонного напряжения $U_{эт}$, которое вырабатывается в измерительном элементе (ИЭ) или подаётся извне;
- 2) независимо от числа и характера дестабилизирующих факторов, влияющих на U_H , стабилизация осуществляется только в зависимости от значения самой величины U_H ;
- 3) компенсационный стабилизатор представляет собой замкнутую цепь прохождения сигналов.

Изменение выходного напряжения ΔU_H поступает на вход ИЭ, отсюда сигнал идёт на усилительный элемент (УЭ), и с выхода УЭ сигнал ΔU_y идёт на вход регулирующей элемент (РЭ); сюда же поступает приведённое дестабилизирующее напряжение, возникающее от любого дестабилизирующего фактора. Цепь, состоящая из измерительных ИЭ и УЭ, называется *главной обратной связью* (ОС) в отличие от цепей обратной связи, которые могут быть в каждом функциональном элементе.

3. Умножители напряжения

Умножители напряжения позволяют получить на выходе устройства напряжение, в любое число раз большее напряжения на его входе.

Эти устройства в последнее время находят все большее применение, так как они заменяют высоковольтные трансформаторы. При такой замене получается заметный выигрыш в габаритах и массе, использованием трансформатора значения этих параметров получаются довольно большими, что диктуется необходимостью обеспечения требуемой электрической прочности.

На рис. 1 представлена схема *параллельного удвоителя напряжения*.

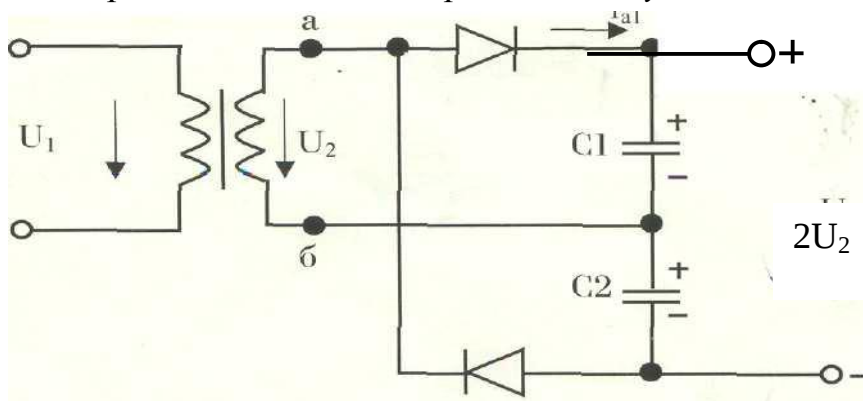


Рис. 7. Схема параллельного удвоителя напряжения

Он представляет собой два однополупериодных выпрямителя, подключенных к одной вторичной обмотке трансформатора. В один из полупериодов входного напряжения, когда точка а имеет положительный потенциал, а точка b – отрицательный, диод D_1 открыт, а диод D_2 закрыт. В этот момент времени конденсатор C_1 через открытый диод D_1 заряжается до

амплитудного значения напряжения U_{2m} . В следующий полупериод входного напряжения потенциал точки b становится положительным, а потенциал точки a – отрицательным, диод D_1 будет закрыт, а диод D_2 – открыт. В этот полупериод через открытый диод D_2 заряжается конденсатор C_2 до амплитудного значения входного напряжения. Конденсаторы C_1 и C_2 по отношению к выходным зажимам включены последовательно. Полярность напряжений на конденсаторах такова, что выходное напряжение устройства практически равно удвоенному амплитудному значению напряжения вторичной обмотки трансформатора, если постоянная времени разрядки $\tau_{разр} = CR_H \gg T/2$ (где $C=C_1=C_2$, T – период входного напряжения). В противном случае конденсаторы будут разряжаться в следующие за их зарядкой полупериоды и выходное напряжение будет меньше $2U_{2m}$.

На рис. 8 изображена схема последовательного удвоителя напряжения.

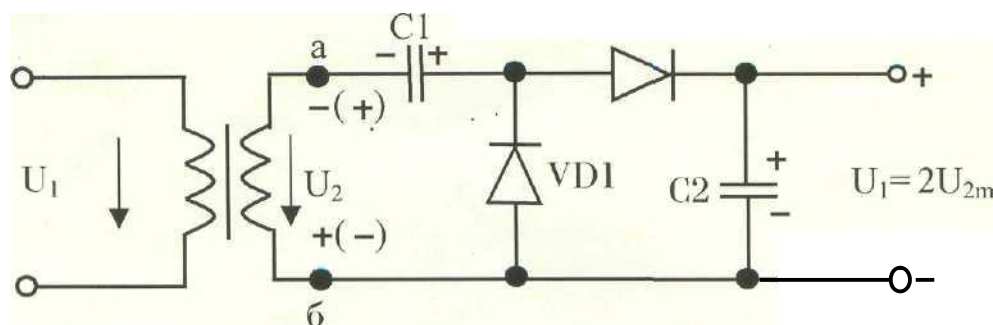


Рис. 8. Схема последовательного удвоителя напряжения.

В один из полупериодов входного напряжения, когда потенциал точки b положительный, а потенциал точки a отрицательный, диод D_1 открыт, а диод D_2 закрыт. В этот момент времени конденсатор C_1 заряжается через диод D_1 до амплитудного значения напряжения U_{2m} . В следующий полупериод потенциал точки a становится положительным а потенциал точки b – отрицательный, диод D_1 будет закрыт, а диод D_2 – открыт. Конденсатор C_2 при этом начинает заряжаться через диод D_2 , но от напряжения, равного сумме напряжений вторичной обмотки трансформатора U_2 и напряжения ранее заряженного конденсатора C_1 . Следовательно, напряжение на резисторе R_H будет равно удвоенному значению напряжения U_{2m} .

Последовательный удвоитель напряжения имеет ряд преимуществ по сравнению с параллельным удвоителем: пульсации выходного напряжения меньше, а стабильность работы выше. Кроме того, из нескольких последовательных удвоителей нетрудно собрать учетвертители напряжения (рис. 9), а соединив последовательно два учетверителя, можно получить выходное напряжение, в восемь раз превышающее напряжение, подаваемое на вход умножителя. По этой причине последовательные удвоители применяют чаще параллельных.

С помощью умножителей напряжения можно получить на выходе напряжение в несколько десятков киловольт, используя при этом

малогабаритные и недорогие приборы (конденсаторы и диоды) с низкими номинальными напряжениями. Общими недостатками всех умножителей напряжения являются их невысокая мощность и низкий к.п.д.

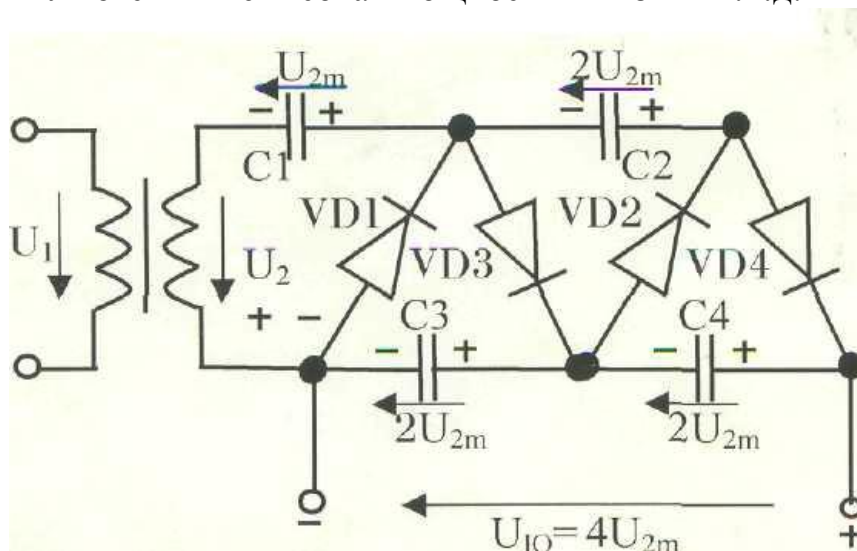


Рис. 9. Схема учетвертвителя умножителя напряжения

В настоящее время микроэлектронная технология коснулась и изготовления умножителей напряжения. Выпускаются и широко применяются интегральные микросхемы серии К299, позволяющие получать выходное напряжение 2000-2400 В при токе $I_H \leq 200 \mu A$. Например, ИМС К299ЕВ1 этой серии является учетверителем напряжения и собрана по схеме рис. 3.

Лекция №8

Стабилизаторы. Параметрические стабилизаторы. Тиристорные стабилизаторы.

Стабилизатором напряжения или тока называется устройство поддерживающее неизменным по величине напряжение или ток на нагрузке при изменении питающего напряжения, частоты сети, температуры окружающей среды и т.д.

По принципу действия стабилизаторы подразделяются на параметрические и компенсационные.

Стабилизаторы оцениваются по нестабильности выходного напряжения, по коэффициенту стабилизации, по диапазону стабилизации, по температурному коэффициенту.

Нестабильность на входе

$$N_{1(вх)} = \frac{\Delta U_{вв}}{U_{вв}}.$$

Нестабильность на выходе

$$N_{2(вых)} = \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}.$$

Нестабильность тока нагрузки

$$N_i = \frac{\Delta I_H}{I_H}.$$

$\Delta U_{вх}$ - изменение напряжения на входе стабилизации.

$\Delta U_{вых}$ - изменение напряжения на выходе стабилизации, или на нагрузки.

ΔI_H - изменение тока нагрузки ток нагрузки

Коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения

$$K_{ст.н} = K_{ст.т} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\Delta U_{вв}}{U_{вв}} : \frac{\Delta U_H}{U_H} \quad \text{при } I_H = \text{const.}$$

Чем выше коэффициент стабилизации, тем лучше качество стабилизации напряжения.

1. Параметрические стабилизаторы

Параметрическим называется такой стабилизатор, в котором стабилизация напряжения (тока) осуществляется за счет использования свойств нелинейных элементов, входящих в его состав. В параметрических стабилизаторах дестабилизирующий фактор (изменение входного напряжения или тока нагрузки) воздействует непосредственно на нелинейный элемент, а изменение выходного напряжения (или тока) относительно заданного значения определяется только степенью нелинейности вольтамперной характеристики нелинейного элемента.

Параметрический стабилизатор переменного тока напряжения на

дросселе с насыщенным сердечником (рис. 1а).

Параметрическая стабилизация переменного напряжения осуществляется с помощью элементов, обладающих нелинейной вольтамперной характеристикой для переменного тока. Такой характеристикой (рис. 1б) обладает дроссель, работающий в режиме насыщения магнитопровода.

Рабочий участок характеристики дросселя - нелинейный участок *аб* соответствующий насыщенному состоянию магнитопровода.

В схеме стабилизатора насыщенный дроссель *L2* включается параллельно нагрузке Z_H (рис. 1а). В качестве балластного сопротивления применяется дроссель *L1*, работающий в режиме насыщения магнитопровода и имеющий линейную вольтамперную характеристику.

Принцип действия схемы состоит в следующем. При увеличении переменного напряжения на входе стабилизатора $U_{\text{вых.пер}}$ на нагрузке и балластном линейном дросселе *L1*. Ток через насыщенный дроссель резко возрастет. Но при этом падение напряжения на дросселе *L1* возрастет, а на дросселе *L2* и нагрузке Z_H увеличится незначительно. При уменьшении входного напряжения процессы стабилизации происходят аналогично.

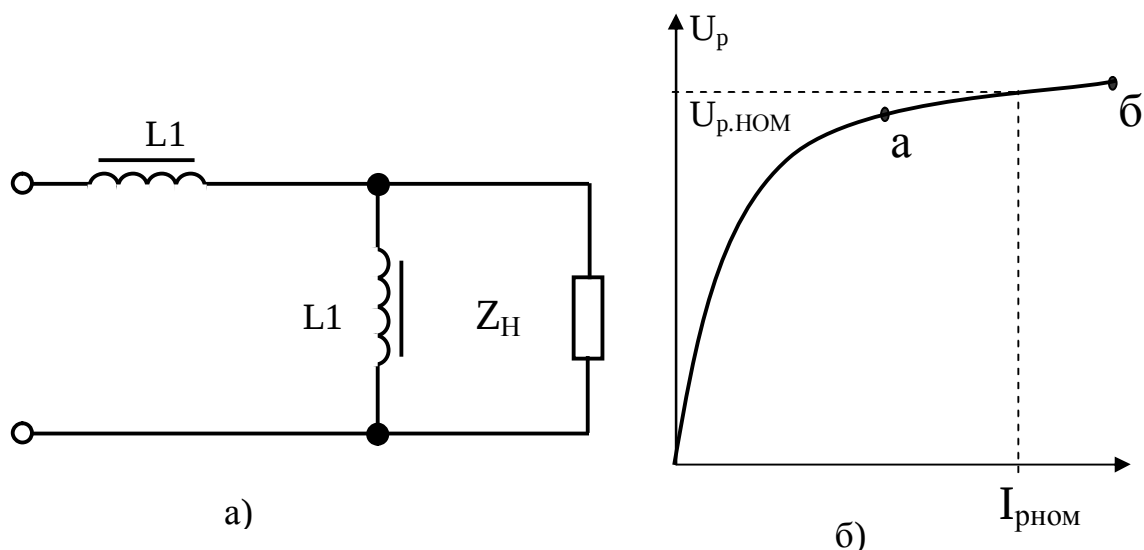


Рис. 1. Схема параметрического стабилизатора переменного напряжения с насыщенным дросселем а) и вольт-амперная характеристика дросселя б)

Д о с т и н с т в а такого стабилизатора:

- Простота устройства.

Н е д о с т а т к и:

- Низкий КПД (0,4...0,6), так как стабилизаторы работают при больших токах;
- Малый коэффициент мощности — 0,6;

- Малый коэффициент стабилизации из-за большого динамического сопротивления R_d ($K_{ст} < 10$); искажения формы кривой переменного напряжения на нагрузке;
- Большая масса и габариты.

В феррорезонансном стабилизаторе параллельно насыщенному дросселю включается конденсатор C (рис. 2а). Резонансная частота контура L_2C близка к частоте стабилизируемого переменного напряжения, но не равна ей.

Принцип работы феррорезонансного стабилизатора переменного напряжения можно пояснить, воспользовавшись вольт-амперными характеристиками дросселя L_2 и конденсатора C , приведенными на рис. 2б. Путем геометрического сложения напряжений U_{L_2} и U_C получим кривую напряжения на контуре L_2C . При малом входном напряжении дроссель ненасыщен, индуктивность его большая и результирующий ток имеет емкостной характер (0 в рис. 2б). При резонансе токов в контуре L_2C (точка в) результирующий ток через контур L_2C будет равен нулю. При дальнейшем увеличении входного напряжения ток через контур имеет индуктивный характер (участок вб). На этом участке характеристики при резком увеличении тока напряжение на контуре, а следовательно, и на нагрузке изменяется незначительно.

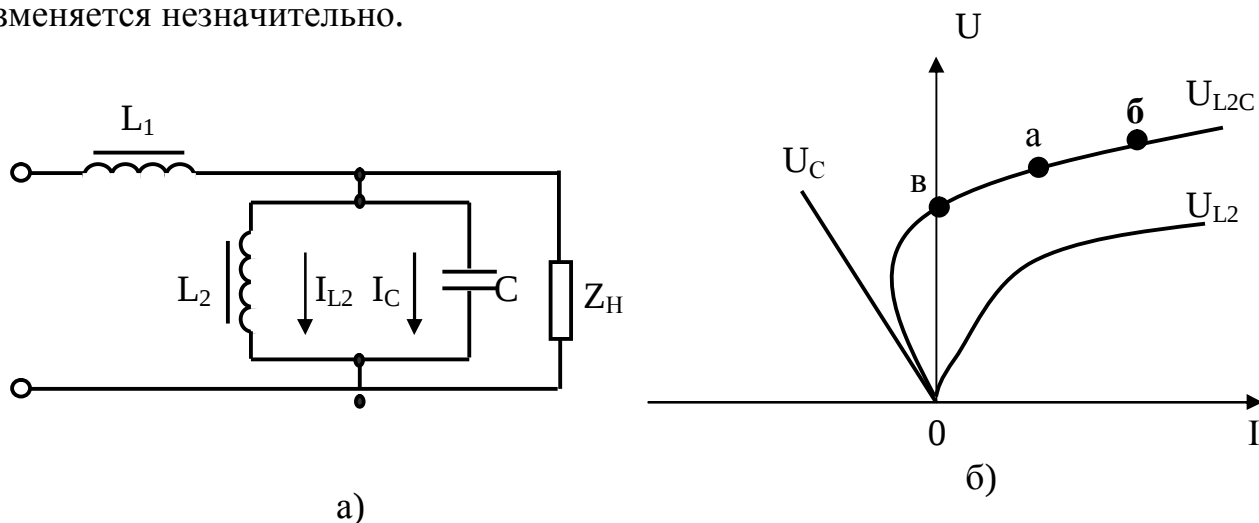


Рис.2. Схема феррорезонансного стабилизатора (а) и вольт-амперные характеристики дросселя и конденсатора в феррорезонансном стабилизаторе

Достоинства феррорезонансных стабилизаторов:

- Высокий КПД (0.85...0.9) и коэффициент мощности (до 0.9);
- Высокий коэффициент стабилизации по напряжению (до 40);
- Широкий диапазон мощностей;
- Большой срок эксплуатации;
- Простота устройства и надежность работы;
- Устойчивость к механическим воздействиям.

Недостатки:

- Значительное изменение выходного напряжения от изменения входного напряжения в результате зависимости реактивных сопротивлений от частоты;
- Наличие электромагнитных помех (большие поля рассеяния индуктивностей) ;
- Большие габариты и масса ;
- Искажение формы стабилизированного напряжения на нагрузке.

В параметрических стабилизаторах постоянного напряжения в качестве линейных элементов применяют резисторы, а в качестве нелинейных – полупроводниковых (кремниевые) стабилитроны и полупроводниковые стабилитроны.

Принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне VD приведена на рис. 3а. Сопротивление балластного резистора R_B подбирается так, чтобы падение напряжения на нем составляло (0,5...3) В

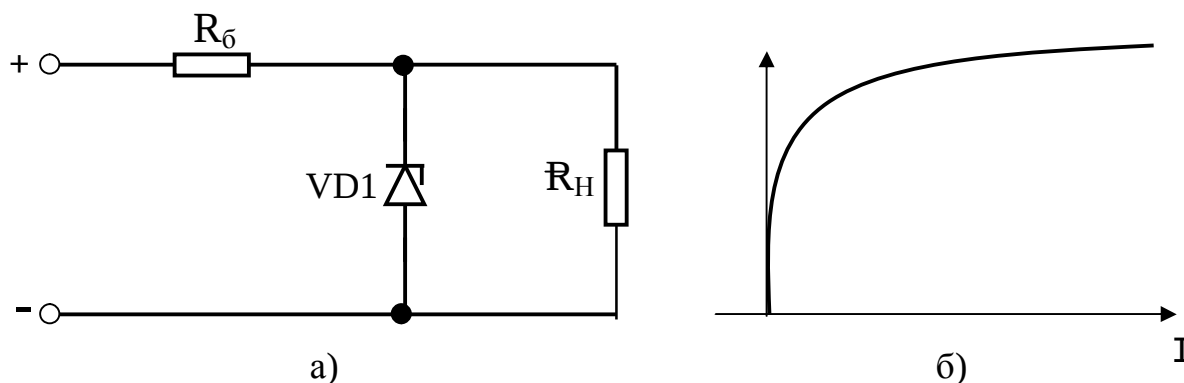


Рис. 3. Схема параметрического стабилизатора постоянного напряжения на стабилитроне (а) и вольтамперная характеристика стабилитрона (б)

При увеличении напряжения на входе стабилизатора $U_{вх}$ напряжение на его выходе $U_{вых}$, т.е. на нагрузке R_H , стремится к увеличению. Но небольшое увеличение напряжения $\Delta U_{ст}$ на стабилитроне VD вызывает резкое увеличение тока через него. При этом увеличивается падение напряжения на балластном резисторе R_B , а напряжение на нагрузке R_H изменяется незначительно. Приращение напряжения на входе стабилизатора $\Delta U_{вх}$ распределяется между изменением напряжения на балластном резисторе ΔU_{R_B} и стабилитроне $\Delta U_{ст}$:

$$\Delta U_{вх} = \Delta U_{R_B} + \Delta U_{ст}.$$

Так как сопротивление балластного резистора R_B много больше сопротивления стабилитрона R_d ($R_B \gg R_d$), то почти все изменение входного напряжения выделяется на сопротивлении стабилитрона R_d и напряжение на нагрузке остается стабильным.

Параметрические стабилизаторы постоянного напряжения на кремниевых стабилитронах имеют следующие недостатки:

Небольшая допустимая мощность в нагрузке (0,5 ... 3 Вт); невысокий коэффициент стабилизации (до 30); большое выходное сопротивление стабилизатора (6 ... 20 Ом); зависимость параметров стабилитрона от температуры; низкий КПД - (до 30 %).

Из-за этих недостатков параметрические стабилизаторы на кремниевых стабилитронах применяются для стабилизации напряжения питания вспомогательных узлов аппаратуры связи, где не требуются высокие показатели их качества.

Достоинства: простота схемы; малые габариты и масса. Параметрические стабилизаторы на кремниевых стабилитронах широко используются в компенсационных стабилизаторах напряжения в качестве источников опорного напряжения.

Параметрические стабилизаторы на кремниевых стабилитронах широко используются в компенсационных стабилизаторах напряжения в качестве источников опорного напряжения.

Параметрические стабилизаторы постоянного тока выполняются на нелинейных элементах, ток которых мало зависит от приложенного к ним напряжения. В качестве такого элемента используется полевой транзистор или МОП-транзистор обедненного типа (рис. 4).

Из характеристик этих транзисторов, приведенных на рис. 3а, видно что при постоянном напряжении затвор-исток ток стока изменяется незначительно при изменении напряжения сток-исток.

На рис. 4б приведена схема параметрического стабилизатора тока на полевом транзисторе с закороченным участком затвор-исток. Транзистор включен последовательно с сопротивлением нагрузки R_H .

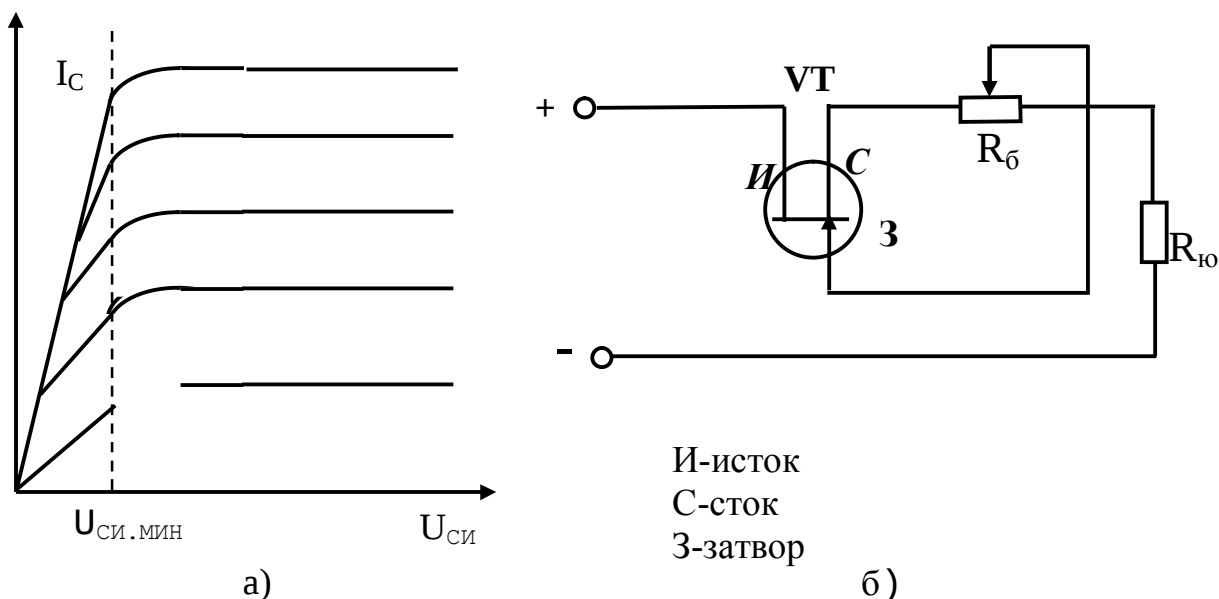


Рис. 3. Выходные характеристики полевого транзистора (а) и схема параметрического стабилизатора тока на полевом транзисторе (б)

Лекция №9

Компенсационные стабилизаторы с непрерывным регулированием.

Компенсационные стабилизаторы напряжения применяются в основном на постоянном токе, могут выполняться на транзисторах и тиристорах.

Компенсационный стабилизатор имеет в своей схеме измерительное устройство и регулирующий элемент.

Структурная схема компенсационного стабилизатора: РЭ - регулирующий элемент, ИУ - измерительное устройство, УУ - усильтельное устройство (рис. 1).

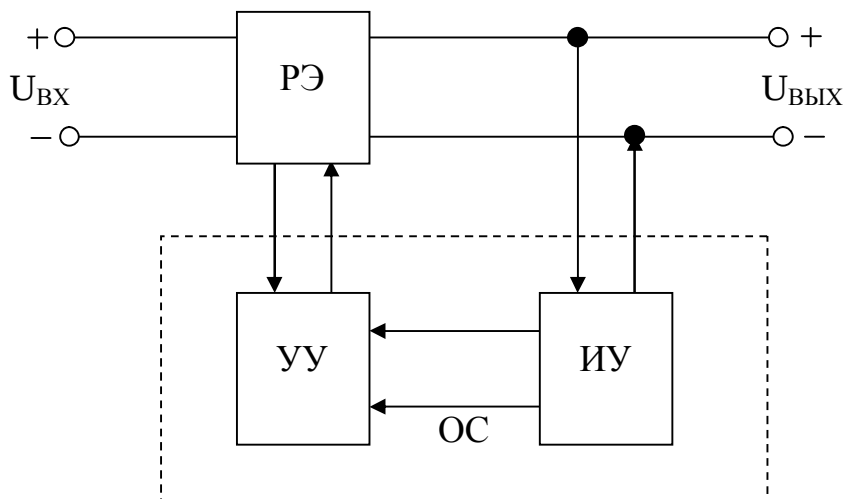


Рис. 1. Структурная схема компенсационного стабилизатора

С выхода напряжение подается на ИУ, там происходит сравнение с эталоном, если напряжение отличается от эталона, появляется сигнал рассогласования, он усиливается в УУ и передается на РЭ. При увеличении выходного напряжения сопротивление РЭ увеличивается, увеличивается падение напряжения на нем и выходное напряжение стабилизируется. Схема компенсационного стабилизатора осуществляется автоматическим регулируемым напряжением за счет отрицательной обратной связи.

1. Транзисторные компенсационные стабилизаторы

Простейшая схема компенсационного транзисторного стабилизатора приведена на рис. 2.

В этой схеме транзистор является регулирующим элементом. При

увеличении выходного напряжения на нагрузке возрастает потенциал базы транзистора относительно эмиттера. Сопротивление транзистора увеличивается, растет на нем падение напряжения и выходное напряжение остается неизменным.

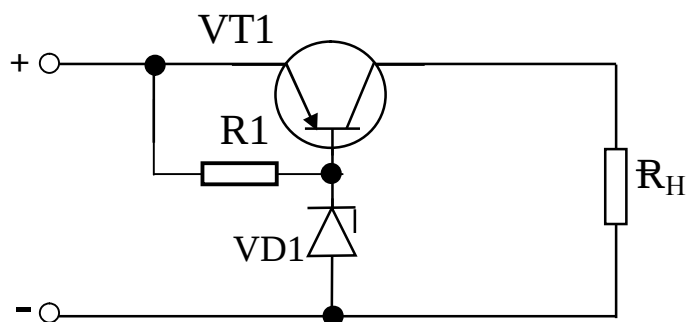
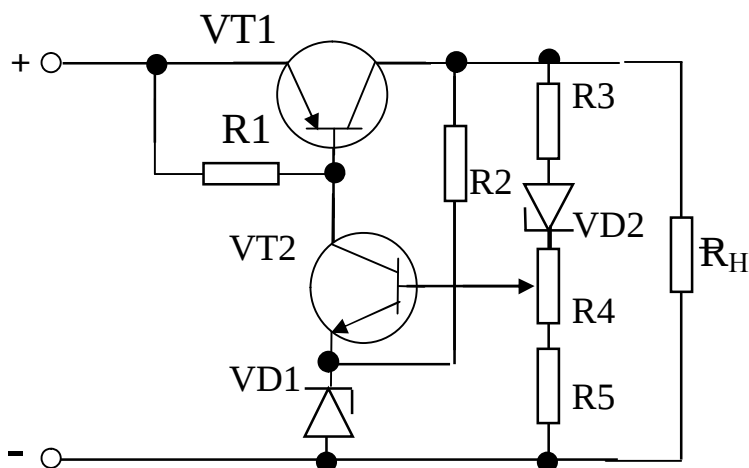


Рис. 2. Простейшая схема компенсационного транзисторного стабилизатора

Схема компенсационного транзисторного стабилизатора с усилительным транзистором приведена на рис. 3.



VT1 - регулирующий элемент VT2 - усилительный элемент

Рис. 3. Схема компенсационного транзисторного стабилизатора с усилительным транзистором.

Напряжение между базой и эмиттером транзистора VT1 определяется разностью напряжений опорного стабилитрона VD1 и напряжением, которое снимается с делителя R3R4. Опорное напряжение больше напряжения делителя, поэтому транзистор VT2 открыт. Если входное напряжение неизменно, то ток коллектора через транзистор VT2 будет постоянным и напряжение поступает с коллекторной нагрузки на VT1.

Если входное напряжение меняется, меняется напряжение на коллекторной нагрузке транзистора VT2, изменится внутреннее сопротивление транзистора VT1, изменится на нем падение напряжения.

Из любого стабилизатора напряжения можно получить стабилизатор тока, если поменять местами датчик отклонения контролируемого тока

(рис. 4). Условие стабилизации тока выдерживается только в том случае, если $R_{\text{транз}} \gg R_{\text{н}}$.

Транзистор работает в активном режиме. Сопротивление перехода эмиттер - коллектор меняется пропорционально изменению тока нагрузки, путем изменения потенциала базы.

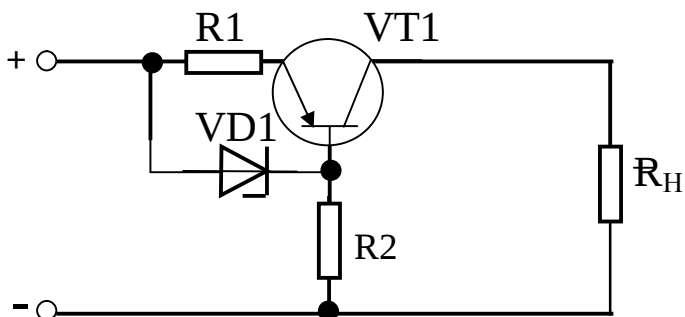


Рис. 4. Схема компенсационного стабилизатора тока

Достоинства:

- Малые габариты и вес.
- Высокая надежность.

Недостатки:

- Низкий КПД.
- Зависимость от температуры окружающей среды.
- Чувствительность к перегрузкам и перенапряжению.
- Долговечность.

В настоящее время выпускаются интегральные стабилизаторы напряжения компенсационного типа в виде микросхем. Рассчитанные на токи до 3 А и напряжение от 1 В до 30 В.

Интегральные стабилизаторы типа К142ЕН1, 2 обеспечивает на выходе напряжение от 3 до 30 В (при токе нагрузки до 0,15 А). При этом на микросхему соединяются ряд дискретные элементы (рис. 5).

Интегральные стабилизаторы типа К142ЕН 3, 4 обеспечивает на выходе напряжение от 3 до 30 В. При этом максимальный допустимый ток нагрузки составляет до 1 А, а максимальная мощность 1,4 Вт (без радиатора).

Интегральные стабилизаторы типа К142ЕН5 обеспечивает на выходе фиксированные напряжения 5 или 6 В. При этом максимальный допустимый ток нагрузки составляет до 3 А, а максимальная мощность 1,2 Вт (без радиатора).

Интегральные стабилизаторы типа К142ЕН6 обеспечивает на выходе двуполярные напряжения $\pm 5 \dots \pm 25$. При этом максимальный допустимый ток нагрузки составляет до 0,2 А.

Интегральные стабилизаторы типа КР142ЕН8,9 обеспечивает на выходе фиксированные напряжения номиналов 9,12,15,20,24,27 В при токе нагрузки до 1,5 А.

Если интегральные микросхемы не могут обеспечивать требуемый ток нагрузки, тогда микросхему можно соединить с дополнительным транзистором (рис. 5).

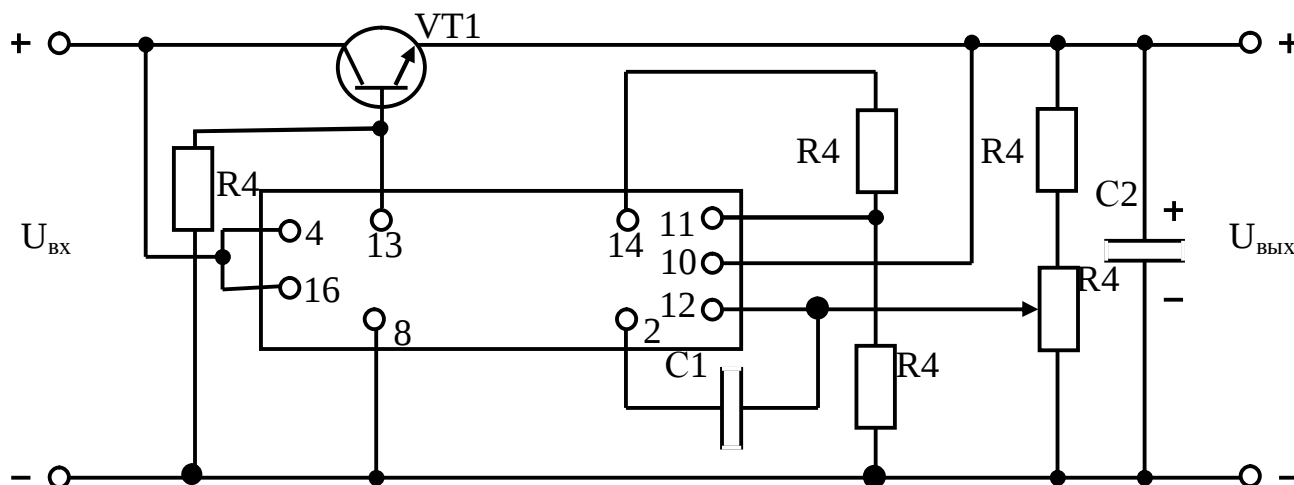


Рис. 5. Схема стабилизатора на ИМС К142ЕН1 с дополнительным транзистором.

Достоинства:

- малые габариты и масса;
- высокая надежность;
- большой срок службы;

Недостатки:

- малый КПД;
- зависимость от окружающей температуры;
- чувствительность к перегрузкам и перенапряжениям.

2. Тиристорные компенсационные стабилизаторы

В этом стабилизаторе совмещены функции выпрямления и регулирования стабилизации. Тиристорные стабилизаторы напряжения могут работать на постоянном и переменном токе. В качестве регулирующего элемента используются тиристоры.

Схема компенсационного тиристорного стабилизатора напряжения приведена на рис. 6.

Регулирующий элемент включается в цепь первичной обмотки трансформатора, т.е. на стороне переменного тока.

Регулирующий элемент состоит из двух встречно и последовательно включенных тиристоров VS1 и VS2 и двух диодов VD1 и VD2, которые шунтируют тиристоры и включаются для прохождения переменного тока при запертом тиристоре. Во вторичную обмотку трансформатора включена мостовая схема выпрямления с Г-образным LC-фильтром. Обратная связь образует измерительно-усилительный блок (ИУ) и схема управления

тиристорами (СУ).

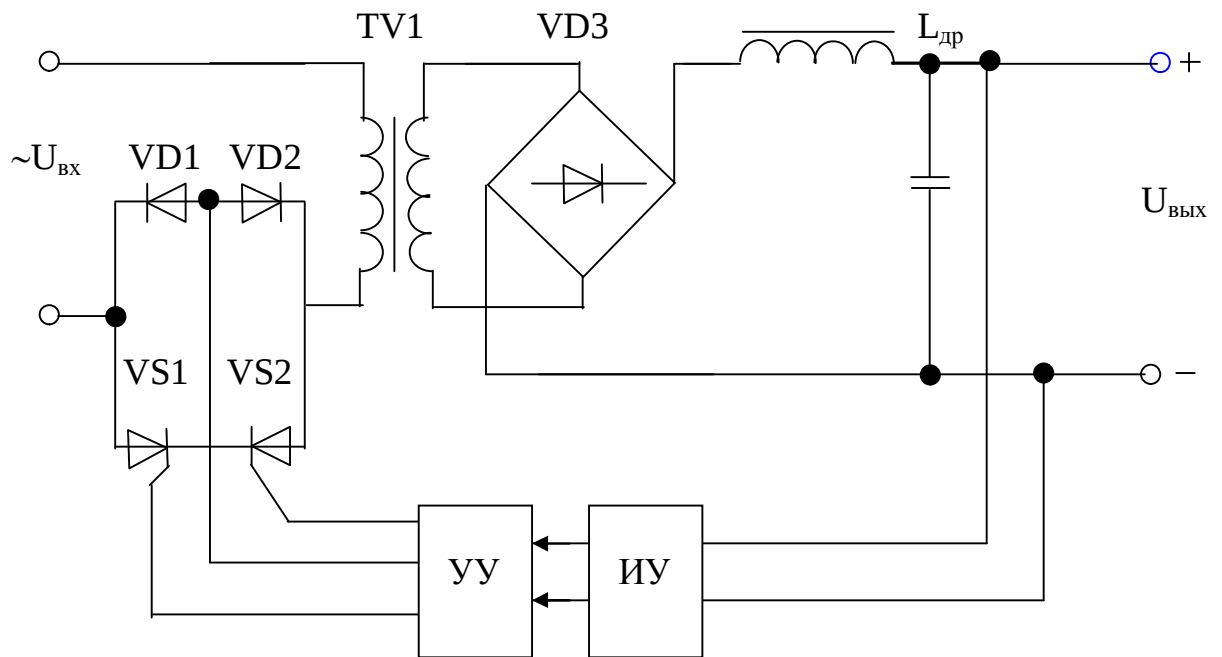


Рис. 6. Схема тиристорного стабилизатора напряжения

При изменении $U_{\text{ВЫХ}}$ ИУ блок вырабатывает сигнал рассогласования. Этот сигнал поступает на схему управления тиристорами СУ, где он управляет углом регулирования α . В результате действия обратной связи при увеличении выходного напряжения, угол регулирования α увеличивается, что приводит к уменьшению напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Импульсные стабилизаторы напряжения

Импульсные стабилизаторы напряжения носят еще название ключевых стабилизаторов. Отличаются они от стабилизатора непрерывного действия тем, что регулирующий элемент (транзистор) работает в режиме переключения. Этот режим характеризуется быстрым переходом рабочей точки из области отсечки в область насыщения. В этом случае мощность, которая рассеивается на транзисторе на много меньше, чем при работе в линейном режиме. Это приводит к увеличению КПД стабилизатора и уменьшению габаритов.

Работу импульсного стабилизатора можно рассмотреть на электрической схеме с ключом (рис. 1).

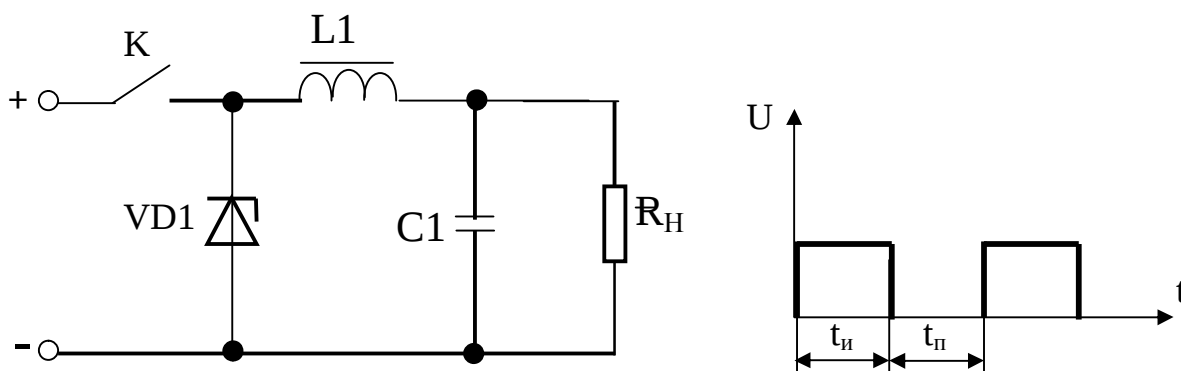


Рис. 1. Схема простейшего импульсного стабилизатора

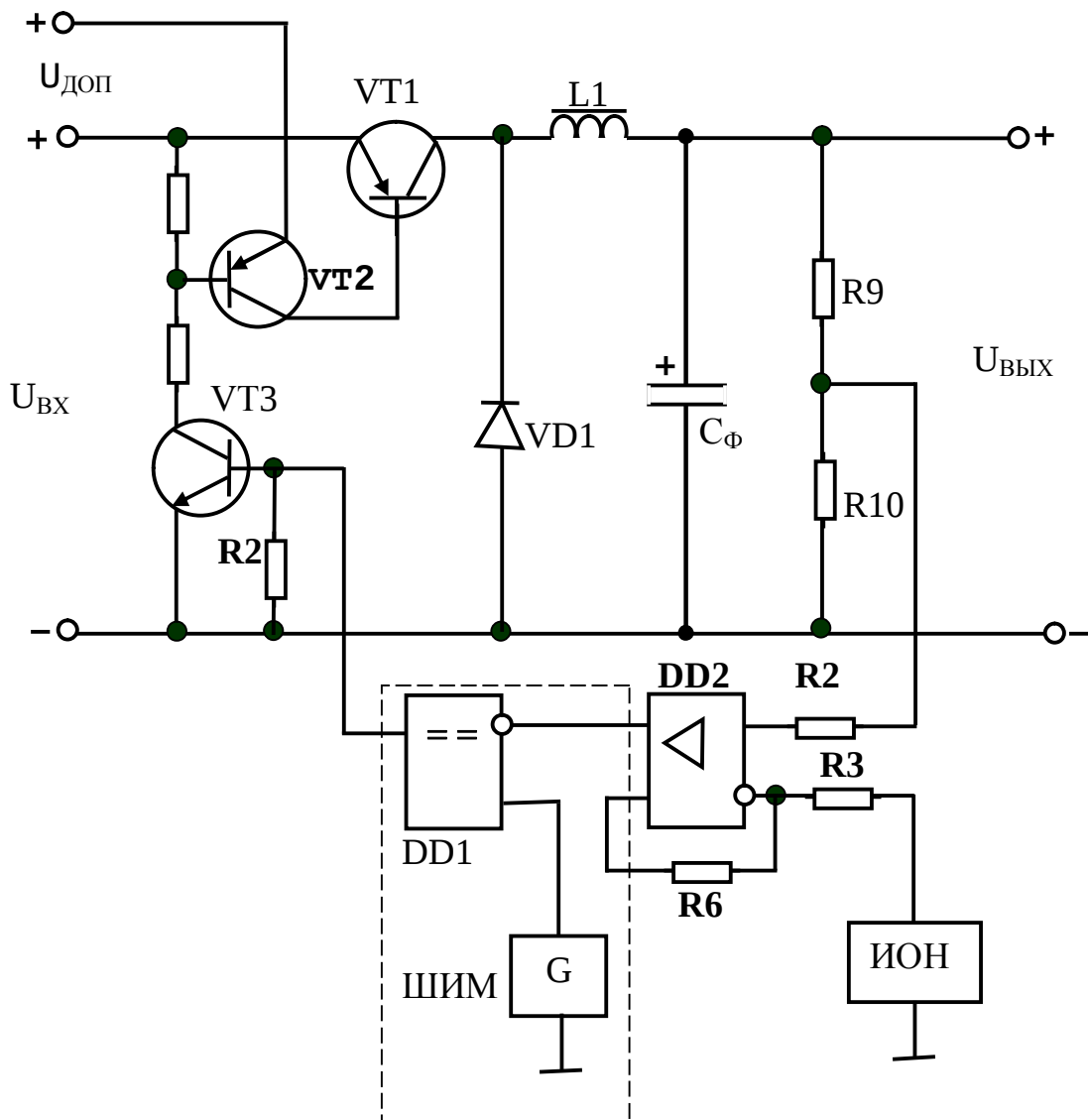
Ключ периодически включается и отключается. На выходе получаются прямоугольные импульсы.

Период $t_{п}$ равен периоду замкнутого ключа, а $t_{и}$ - периоду разомкнутого ключа.

Напряжение выхода пропорционально периоду замкнутого ключа. Если вывести цепь обратной связи, то напряжение выхода будет меняться с изменением входного напряжения.

Схема импульсного стабилизатора, выполненного на основе преобразователя напряжения понижающего типа (выходное напряжение меньше входного), показан на рис. 2 а, силовой контур стабилизатора включает силовой ключ (транзистор $VT1$) и LCD-фильтр. Схема управления (на рис. 2 она обведена пунктиром) формирует импульсы управления силовым ключом и регулирует их длительность. Вспомогательные транзисторы $VT2$, $VT3$ обеспечивают трансляцию управляющего сигнала, поступающего из схемы управления, в цепь базомиттерного перехода регулирующего транзистора, не имеющего с управляющей схемой общего провода. Открывание транзистора $VT3$ сигналом U_T вызовет появление тока через резисторы в его коллекторной цепи и открывание транзистора $VT2$. Последний соединяет базу регулирующего транзистора с положительным

положком источника U_1 или с дополнительным источником $U_{\text{доп}}$ (показан штриховой линией), вызывая появление базового тока I_B и отпирание VT1. При нулевом уровне сигнала U_T транзисторы VT3, VT2, а затем и VT1 выключаются.



Управляющая схема стабилизатора содержит делитель напряжения R1, R2 в цепи; источник эталонного напряжения; усилитель сигнала ошибки $U_p = U_{\text{ос}} - U_{\text{эт}}$ с резисторами, определяющими его коэффициент усиления ($K_y = R_{\text{ос}}/R_{\text{вх}}$) и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), обеспечивающий преобразование аналогового сигнала U_y с выхода усилителя сигнала ошибки в дискретный сигнал управления силового ключа.

В рассматриваемом примере ШИМ образуется из компаратора напряжения DA2 и генератора пилообразного сигнала G. Работу стабилизатора

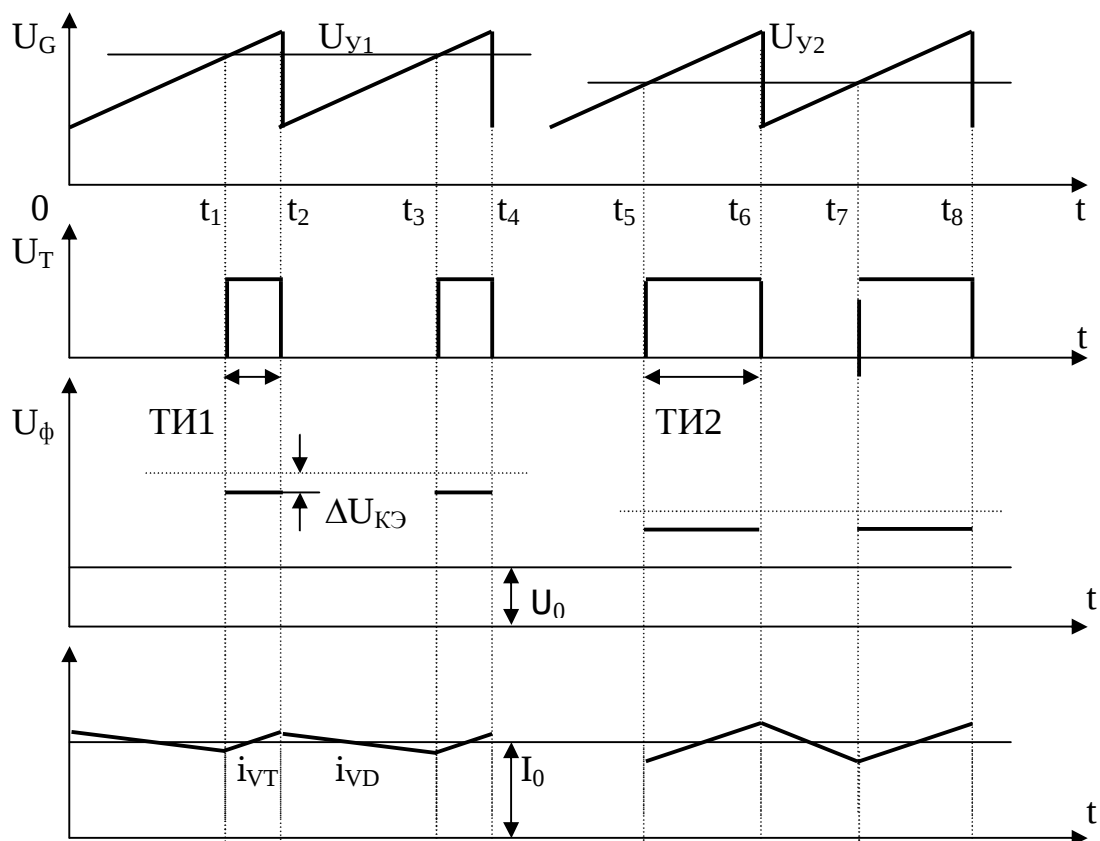


Рис. 2. Временные диаграммы работы импульсного стабилизатора с ШИМ

Преобразователи напряжения

Для питания аппаратуры связи требуются различные значения постоянных и переменных напряжений. Если есть источник электрического питания, вырабатывающий энергию постоянного тока одного напряжения (аккумуляторная батарея, выпрямитель и т.д.), то для питания аппаратуры связи разными номиналами напряжения применяются специальные устройства, преобразующие напряжение постоянного тока одной величины в напряжение переменного и постоянного тока другой величины. Эти устройства называются преобразователями постоянного напряжения (ППН). Они преобразуют энергию постоянного тока в энергию переменного тока, который можно опять выпрямлять. Преобразователи, преобразующие энергию постоянного тока в энергию переменного тока, называются инверторами. Если на выходе инвертора поставить выпрямитель, то получим, преобразователь с выходом на постоянном токе, он называется конвертором.

В настоящее время в основном используются полупроводниковые преобразователи, которые делаются на транзисторах или на тиристорах. Их основной частью являются инверторы. Они бывают однотактные и двухтактные, с самовозбуждением или с независимым возбуждением (с усилением мощности). Существуют инверторы тока и напряжения.

Тиристорные инверторы классифицируются по принципу коммутации тиристоров: автономные или ведомые сетью, по включению коммутируемой емкости относительно нагрузки - параллельные, последовательные и последовательно-параллельные.

Транзисторные инверторы классифицируются: по способу включения транзисторов - с общим эмиттером или с общим коллектором, по типу обратной связи - с ОС по напряжению, с ОС по току, с ОС по напряжению и току.

Одной из составных частей инвертора является трансформатор, который создает переменное напряжение и преобразует его величину. Так как на вход трансформатора подается постоянное напряжение, то для его нормального функционирования в его первичной цепи нужно устройство, периодически размыкающее и замыкающее цепь постоянного тока - ключ, прерыватель тока. Прерывание тока или изменение направления этого тока вызывает появление в магнитопроводе трансформатора изменяющегося во времени магнитного потока $\Phi(t)$, который по закону электромагнитной индукции индуцирует в обмотках трансформатора ЭДС, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока и числу витков обмоток.

1. Структурная схема однотактного преобразователя с самовозбуждением

Структурная схема однотактного преобразователя приведена на рис.1.

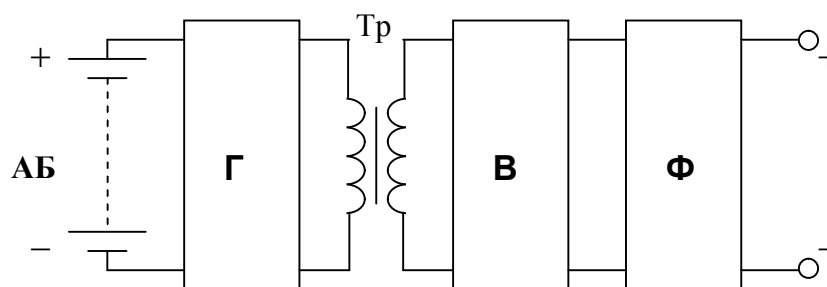


Рис. 1. Структурная схема однотактного преобразователя с самовозбуждением

Источником постоянного тока служит аккумуляторная батарея Б, имеющая небольшое напряжение $U_{ВХ}$, которое подается на вход трансформатора Тр предназначенного для формирования переменного напряжения и преобразования его значения. Поскольку напряжение аккумулятора постоянно, то для нормального функционирования трансформатора в его первичной обмотке необходимо включить прерыватель тока, периодически с частотой 350...400 Гц замыкающий и размыкающий

Прерывателем является ключ K , который периодически замыкается и размыкается, соответственно в сердечнике трансформатора магнитный поток то увеличивается, то уменьшается, создавая на вторичной обмотке переменную ЭДС. В качестве ключа K можно использовать любые электронные и электромагнитные устройства. Такие преобразователи на современном этапе позволяют получить на выходе переменное напряжение частотой $30 \div 50$ Гц. Поэтому они используются редко.

Лекция №12

Двухтактные преобразователи с независимым возбуждением.

Рассмотрим пример двухтактного преобразователя на транзисторах с самовозбуждением и трансформаторной обратной связью. Для этого используем транзисторы, включенные по схеме с общим эмиттером, схема которого приведена на рис. 1.

Этот ППН представляет собой релаксационный генератор напряжения прямоугольной формы с отрицательной обратной связью по напряжению. В нем сердечник трансформатора делается из материала с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), а транзисторы T_1 и T_2 работают в ключевом режиме. За счет разброса параметров транзисторов T_1 и T_2 в момент включения питания U_0 , один из них окажется более открытым, чем другой. Пусть более открытым окажется T_1 , тогда через него пойдет больший коллекторный ток, чем через T_2 . Первичная обмотка трансформатора имеет среднюю точку O , соединенную с эмиттерами обоих транзисторов. Входное напряжение U_0 подается между общей точкой эмиттеров и средней точкой первичной обмотки трансформатора. Токи по полу обмоткам ao и ob всегда протекают в противоположных направлениях. Если $I_{K1} > I_{K2}$, то ток через ao будет больше, чем по полу обмотке ob . В сердечнике трансформатора появляется магнитный поток, направление которого определяется током I_{K1} , этот поток создает во вторичной обмотке и в обмотке обратной связи трансформатора ЭДС.

При подаче на вход инвертора напряжения U_0 через делитель напряжения R_6, R_n подается отрицательное напряжение смещения на базы транзисторов, за счет чего они открываются. Полярность ЭДС в U_{OC} за счет тока I_{K1} выбрана так, чтобы в обмотке bg был плюс на точке b и минус на точке $г$, тогда T_1 еще больше откроется, а T_2 закроется, т.е. I_{K1} растет, а I_{K2} уменьшается, следовательно растет магнитный поток в сердечнике трансформатора. Когда сердечник насытился, $d\Phi/dt=0$, т.е. ЭДС в обмотке W_{OC} и W_2 перестанут наводиться. В W_{OC} за счет ЭДС самоиндукции (+) на точке b начнет уменьшаться, и (-) на точке $г$ тоже уменьшится, т.е. T_1 закроется, а T_2 откроется, тогда I_{K2} будет больше I_{K1} , и сердечник трансформатора начнет переманчиваться, т.е. появится $d\Phi/dt$, в результате I_{OC} и W_2 изменят знак, и T_2 еще больше откроется, а T_1 еще больше закроется. Это будет продолжаться опять до насыщения сердечника. В результате на выходе W_2 образуется переменное напряжение почти прямоугольной формы. В этой схеме ключевой режим транзисторов задается с помощью прямоугольной петли гистерезиса. Конденсатор C нужен для повышения крутизны нарастания полуволн коллекторных токов I_{K1} и I_{K2} .

Такие инверторы используются на небольших мощностях (до 50 Вт).

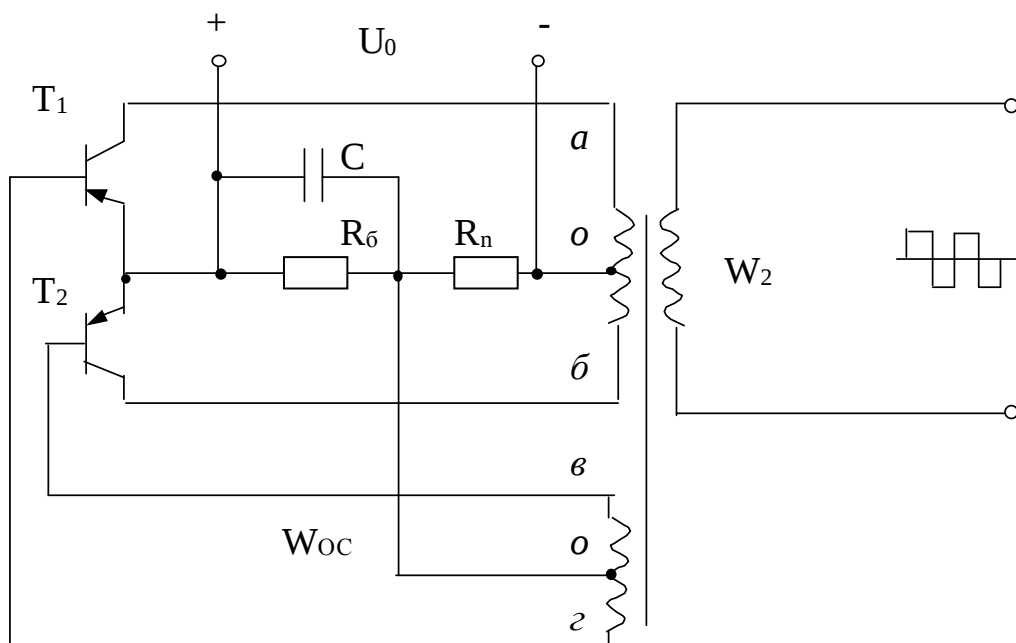


Рис. 1. Схема двухтактного преобразователя на транзисторах с самовозбуждением и трансформаторной обратной связью.

На большие мощности используются инверторы с независимым возбуждением (с усилением мощности), схема которого приведена на рис. 2.

В этой схеме через Tr_2 управляющий сигнал подается на переход эмиттер-база транзисторов T_1 и T_2 , с заданной частотой. T_1 и T_2 попеременно открываются, создавая в первичных обмотках трансформатора Tr_1 токи разного направления I_{K1} и I_{K2} . В результате на выходе W_2 создается переменное напряжение, форма которого задается формой петли гистерезиса сердечника Tr_1 .

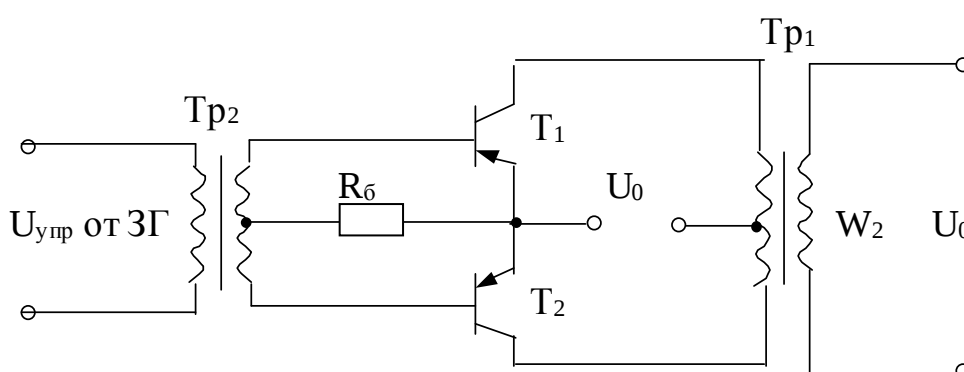


Рис. 2. Схема инвертора с независимым возбуждением (с усилением мощности)

Тиристорные преобразователи

Преобразователи на тиристорах делаются при большой мощности нагрузки. Тиристоры обладают двумя устойчивыми состояниями и выпускаются на напряжения до нескольких киловольт и токи до сотен ампер. В инверторах, ведомых сетью, коммутация тиристоров обеспечивается сетью переменного напряжения, на которую работает инвертор. В автономных инверторах частота коммутации тиристоров обеспечивается частотой работы системы управления тиристорами. Рассмотрим для примера двухтактный автономный преобразователь на тиристорах со средней точкой (рис. 3).

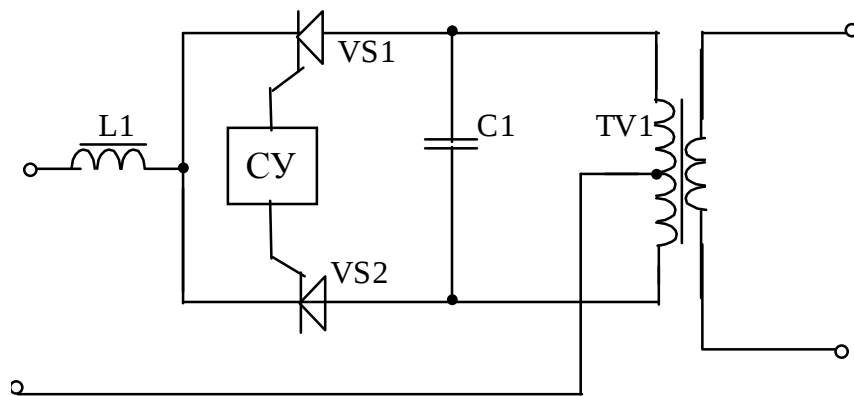


Рис. 3. Схема преобразователя напряжения на тиристорах.

Для открывания тиристора необходим сигнал со схемы управления (СУ), которая представляет генератор импульсов, подаваемых со сдвигом на 180° на управляющие электроды тиристоров T_1 и T_2 , обеспечивая поочередно их открывание. Для запираания тиристоров служит коммутирующий конденсатор C_K , подключенный параллельно по отношению к нагрузке. Трансформатор Tr в тиристорном инверторе должен работать в линейной области кривой намагничивания сердечника. Допустим вначале пришел со СУ сигнал на открывания T_1 , тогда через открытый T_1 входное напряжение U_0 прикладывается к первичной обмотке ao трансформатора Tr (-) в точке a и (+) в точке o , в сердечнике трансформатора создается магнитный поток, индуцирующий в первичной полу обмотке ov ЭДС взаимной индукции, равную по величине U_0 и с полярностью (+) в точке o и (-) в точке v . В результате коммутирующий конденсатор C_K заряжается до напряжения $2U_0$. Во вторичной обмотке Tr тоже индуцируется ЭДС E_2 .

В следующий момент со схемы СУ приходит сигнал на открывание T_2 , в результате оба тиристора оказываются открытыми, и конденсатор C_K разряжается через открытый T_2 на T_1 и закрывает его. В это время все U_0 приложено к полу обмотке ov с полярностью (+) на o и (-) на v . В полу обмотке ao индуцируется ЭДС с полярностью (+) на a , (-) на o , конденсатор перезаряжается до $U_C = 2U_0$ с обратной полярностью. На выходе

трансформатора в это время образуется импульс ЭДС противоположной полярности. В начале третьего полу периода опять открывается T_1 и конденсатор C_K оказывается включенным через него параллельно T_2 и закрывает T_2 . В дальнейшем процесс повторяется. В этой схеме напряжение U_2 изменяется по экспоненте (рис. 4).

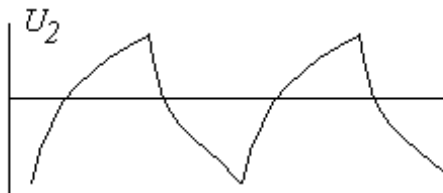


Рис. 4. Форма напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора

Условием устойчивой работы тиристорного инвертора является надежное запираение ранее работающего тиристора. Для надежного выключения надо, чтобы уменьшения тока через тиристор уменьшается от I_{max} до 0 было достаточно для полного восстановления запирающих свойств тиристора. Это время называется временем восстановления тиристора. Для этого емкость конденсатора должна быть достаточной, чтобы выполнялось условие $t_e > 2t_{выкл. доп.}$, где $t_{выкл. доп.}$ — допустимое время выключения тиристора (дано в справочниках). Недостатком таких инверторов является то, что напряжение на его выходе сильно зависит от тока нагрузки из-за того, что при уменьшении Z_H сильно меняется постоянная времени перезаряда конденсатора.

Электромагнитная совместимость источников электропитания с системой электроснабжения

Качество электрической энергии является одним из основных факторов, определяющих показатели надежной работы радиоэлектронных средств. Источники электропитания в составе радиоэлектронной аппаратуры являются согласующим звеном между нагрузкой и системой электроснабжения. Технические требования к показателям источников определяются требованиями к данной радиоэлектронной аппаратуре в целом. Источники электропитания имеют существенные отличия по принципу построения, компонентной базе, конструкции и технологии изготовления. Эти отличия определяются особенностями радиоэлектронных устройств, в состав которых они входят. В свою очередь, радиоэлектронные устройства различаются функциональными задачами и условиями эксплуатации. Требования, предъявляемые к источникам электропитания со стороны системы электроснабжения, определяются соотношением их мощностей, родом тока (переменного или постоянного), значением напряжения и допустимыми отклонениями тока и напряжения в рабочих и переходных режимах.

Системы электроснабжения постоянного тока применяются, как правило, в тех случаях, когда требуемая мощность не превышает 1,5 кВт. Достоинством таких систем является простота их резервирования с помощью аккумуляторов. К недостаткам систем электроснабжения постоянного тока можно отнести необходимость применения двойного преобразования электроэнергии (импульсного и непрерывного) при электропитании аналоговой нагрузки. В настоящее время ведется разработка систем электроснабжения постоянного тока с выходным напряжением 270В.

Электромагнитная совместимость источников электропитания с системой электроснабжения переменного тока обеспечивается выполнением следующих основных требований: снижением уровня высокочастотных электромагнитных помех, генерируемых в сеть, и улучшением формы кривой тока, потребляемого источником электропитания. Воздействие высших гармоник на систему электроснабжения проявляется следующим образом:

- а) увеличением токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- б) снижением эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии;

в) старением изоляции аппаратуры и сокращением вследствие этого срока ее службы;

г) ложной работой аппаратуры.

Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе и потерь в обмотках. На мощные трансформаторы воздействует циркуляция утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник, что приводит к перегрузке обмоток.

Дополнительные потери, вызванные гармониками, в конденсаторах определяются выражением:

$$\delta P = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta p_0 \cdot \omega \cdot C \cdot n \cdot U_n^2$$

где Δp_0 - удельные потери на основной частоте, Вт/В Ар;

C - емкость конденсатора;

U_n - напряжение n-й гармоники;

n- номер гармоники.

Дополнительные потери вызывают дополнительный нагрев конденсаторов. Конденсаторы проектируются с учетом допустимой токовой перегрузки, составляющей в Великобритании 15%, в Европе и Австралии 30%, в США 80%, в России 30%.

Для улучшения электромагнитной совместимости используют корректирующие устройства, обеспечивающие запас реактивной мощности для уменьшения несимметрии напряжений и улучшения формы кривой потребляемого тока.

При переходных процессах в системе электроснабжения возможны броски напряжения во входных цепях источников электропитания, существенно превышающие приведенные выше отклонения. Эти броски обычно вызываются коммутациями токовых цепей с нагрузкой индуктивного характера. По зарубежным данным на промышленных предприятиях в сети электроснабжения с напряжением 240 В имеют место перегрузки по напряжению до 500 В (два раза в день) и до 300 В (500 раз в день). Возможны также импульсы напряжения до 1 кВ.

Для защиты входных цепей источников электропитания от перегрузок по напряжению используются ограничители напряжения, разрядники, биполярные тетроды, варисторы, диоды и стабилитроны. При больших уровнях энергии импульсов напряжений применяют комбинированные схемы защиты с несколькими ограничителями напряжения, выполненными на различных физических принципах.

Защита цепей постоянного тока от перенапряжений осуществляется при помощи несимметричных ограничителей напряжения или стабилитронов. Эти приборы выбираются с такими пороговыми

напряжениями, чтобы обеспечивалось автоматическое отключение их от цепи постоянного тока после окончания импульса перенапряжения.

Защита в цепях переменного тока может осуществляться встречным включением несимметричных ограничителей напряжения, например VD1-VD4 на рис. 1 и RU1, VD1, VD2 на рис. 2. Включение компонентов защиты на входе и на выходе трансформатора позволяет снизить уровень перенапряжений на его выходе.

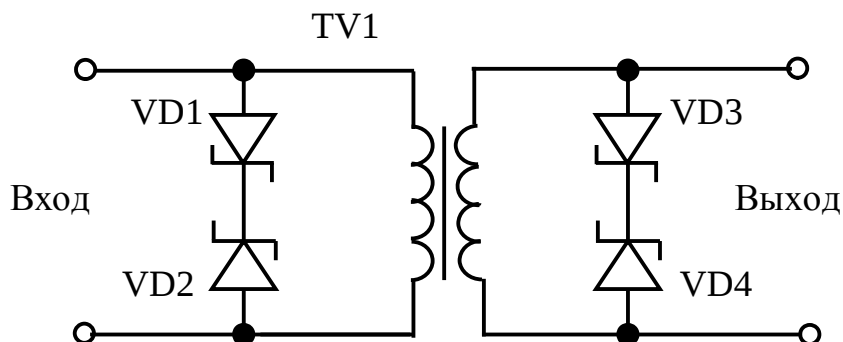


Рис. 1. Схема включения несимметричных ограничителей напряжения

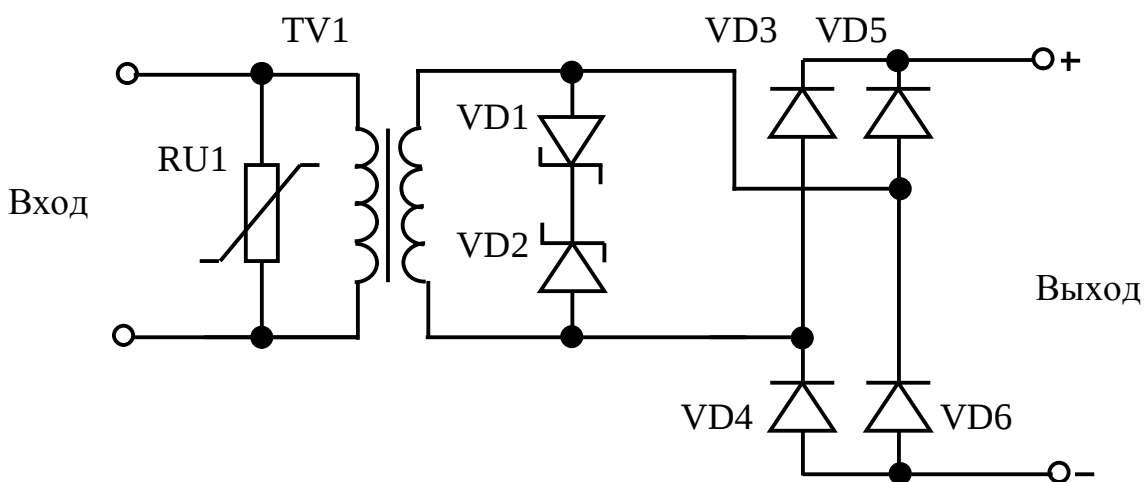


Рис. 2. Схема включения варистора и несимметричных ограничителей напряжения

На выходе электронных средств может использоваться устройство, выполняющее несколько защитных функций. Структурная схема одного таких устройств показана на рис. 4. Оно предназначено для подавления радиопомех, ограничения импульсных перенапряжений и обеспечения защиты нагрузки при отклонениях сетевого напряжения.

Схема работает следующим образом. Напряжение вторичных обмоток трансформатора TV1 выпрямляются диодами VD1 - VD4 и VD5 - VD8. Напряжения выпрямителя VD5 - VD8 стабилизируется интегральным стабилизатором напряжения STU (SM 781.12.ACZ). выпрямленное напряжение фильтруется ёмкостями C2 и C4 и подаются на узел управления УУ и обмотку реле КУ1 (125MB).

Узел управления выполнен на базе микросхемы IC1 (LM393N, 1401СА3). Микросхема представляет собой двухканальный компаратор напряжения, осуществляющий контроль за превышением и понижением сетевого напряжения. Если напряжение сети опускается ниже 190 В или поднимается выше 250В, то узел управления через усилительный транзистор VT1 выключает реле КУ. При этом контакты реле отключают нагрузку от сети.

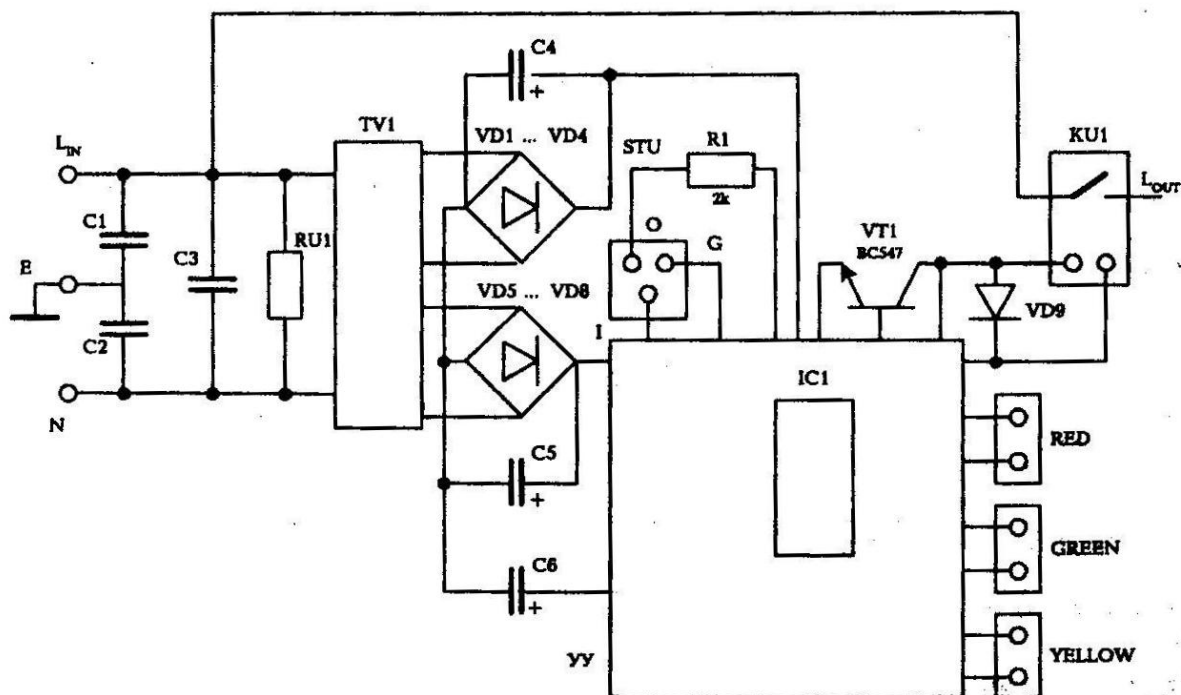


Рис. 3. Структурная схема защитного устройства

Индикация состояния устройства защиты осуществляется при помощи светодиодов (“RED”, “GREEN”, “YELLOW”). Конденсаторы C1...C3 на входе устройства образуют фильтр радиопомех (конденсаторы C1, C2 ограничивают помехи несимметричные, конденсатор C3 – помехи симметричные). Кратковременные перенапряжения ограничиваются при помощи варистора RU1. Диод VD9 шунтирует обмотку реле КУ1 для снижения перенапряжений при отключении этой обмотки.

Агрегаты бесперебойного электропитания

Некоторые электронные средства должны обеспечиваться электроэнергией без перерыва в течение заданного времени. В зависимости от продолжительности этого времени и требуемой мощности применяются различные агрегаты бесперебойного электроснабжения (АБП). За рубежом для обозначения АБП используется аббревиатура UPS (Uninterruptable

Power Supply). В зависимости от рода выходного тока различают АБП переменного или постоянного тока.

Требования по согласованию АБП с нагрузкой регламентируют параметры качества электроэнергии на выходе агрегата. К этим требованиям относятся: значение, нестабильность и пульсации выходного напряжения; диапазон изменения выходного тока; значение и нестабильность частоты выходного тока. Нагрузкой АБП являются радиоэлектронные средства, на входе которых устанавливаются источники электропитания. В случае сети переменного тока источники в большинстве случаев содержат во входной цепи нерегулируемый выпрямитель с емкостным фильтром, поэтому форма потребляемого ими тока значительно отличается от синусоидальной. Особенность нагрузки требует от АБП сохранения заданного значения коэффициента гармоник выходного напряжения для линейной и нелинейной нагрузок.

Влияние АБП на сеть определяет требования к качеству электроэнергии на его входе. Эти требования регламентируют коэффициент мощности на входе АБП и коэффициент гармоник потребляемого им тока.

По принятой терминологии различают два класса АБП: "офф-лайн" и "он-лайн". У агрегата "офф-лайн" осуществляется прямая подача электроэнергии сети потребителю в нормальном режиме и подключение генератора синусоидального напряжения при авариях в электросети за время (2...10) мс. У агрегатов "он-лайн" при любых режимах функционирования сети электроэнергия поступает на нагрузку от генератора синусоидального напряжения со стабильными значениями напряжения, частоты, синусоидальности.

Оба класса АБП содержат инвертор, преобразующий выпрямленное сетевое напряжение в синусоидальное выходное. К сетевому выпрямителю подключается аккумуляторная батарея. Но если в АБП класса "офф-лайн" инвертор подключается только при снижении напряжения сети ниже заданного уровня, то в АБП класса "он-лайн" инвертор работает постоянно, благодаря чему обеспечивается гальваническая развязка от сети, защита от перенапряжений и провалов сетевого напряжения, ограничивается утечка информации по цепям электроснабжения.

На рис. 4,а резервная цепь содержит аккумуляторную батарею АБ и инвертор И. Если напряжение сети находится в заданных пределах, то нагрузка Н получает электроэнергию через коммутатор К от сети переменного тока. Инвертор в данном случае работает в режиме выпрямителя, подзаряжая аккумуляторную батарею. При снижении напряжения сети ниже заданного уровня коммутатор К отключает сеть от нагрузки. Последняя обеспечивается напряжением переменного тока инвертора И, получающего электроэнергию от аккумуляторной батареи.

В агрегате на рис. 4,б при нормальном электроснабжении нагрузка Н получает электроэнергию от сети через последовательно соединенные управляемый выпрямитель УВ и инвертор И.

В агрегате на рис. 4,б при нормальном электроснабжении нагрузка Н получает электроэнергию от сети через последовательно соединенные управляемый выпрямитель УВ и инвертор И.

В этом случае коммутатор К находится в отключенном состоянии и аккумуляторная батарея АБ подзаряжается от сети через выпрямитель В. При снижении напряжения сети ниже заданного уровня коммутатор К подключает батарею АБ к инвертору И.

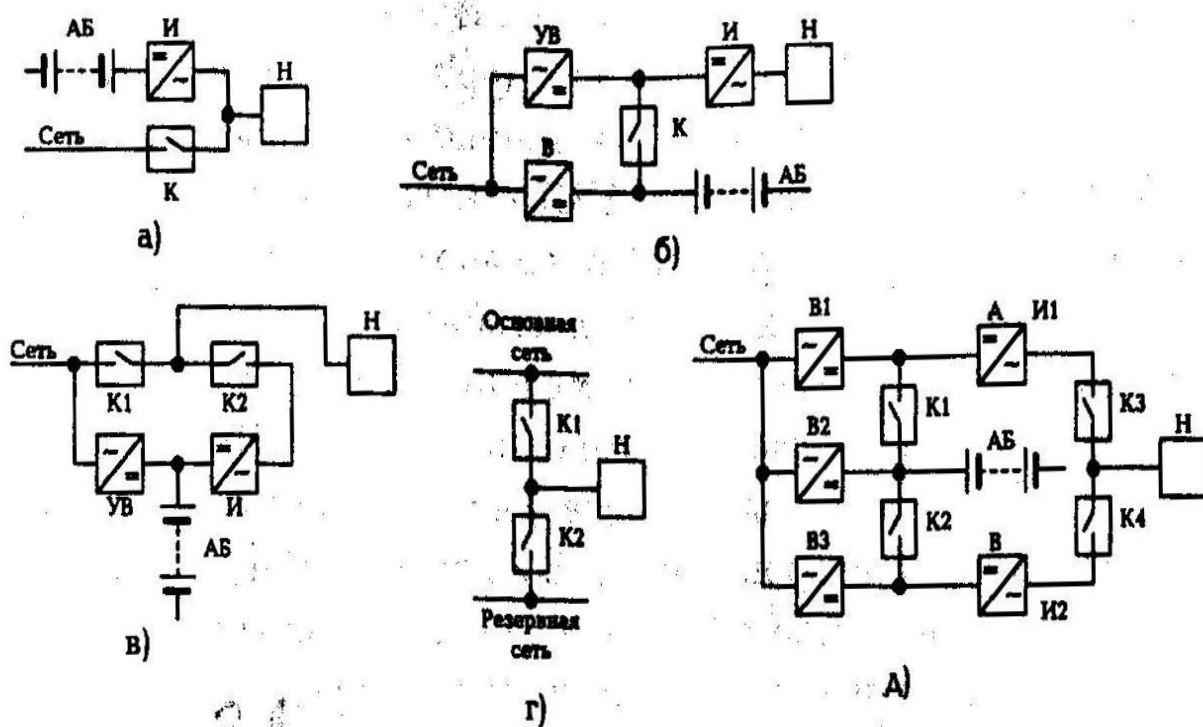


Рис. 4. Агрегаты бесперебойного электроснабжения с выходным напряжением переменного тока

В схеме на рис. 4,в подзаряд аккумуляторной батареи АБ осуществляется от управляемого выпрямителя УВ. При электроснабжении нагрузки от сети коммутатор К1 включен, а коммутатор К2 выключен. При переходе на электроснабжение от аккумуляторной батареи коммутатор К1 выключается, а коммутатор К2 включается.

На рис. 4,г показана схема АБП с двумя входными сетями: основной и резервной. При нормальном электроснабжении коммутатор К1 включен, коммутатор К2 выключен и напряжение на нагрузку Н поступает от основной сети. При снижении напряжения основной сети ниже заданного уровня происходит переключение коммутаторов и соединение нагрузки с резервной сетью.

Схема АБП на рис. 4,д применяется при повышенной мощности нагрузки. Инверторы И1 и И2 имеют одинаковые параметры выходных синфазных напряжений и включаются на параллельную работу коммутаторами К3 и К4. При нормальном электроснабжении коммутаторы К1 и К2 находятся в выключенном состоянии, аккумуляторная батарея АБ

подзаряжается от сети через выпрямитель В2, а нагрузка Н получает электроэнергию от выпрямителей В1 и В3 через инверторы И1 и И2. При снижении напряжения сети ниже установленного уровня включаются коммутаторы К1 и К2 и электроснабжение нагрузки осуществляется от аккумуляторной батареи АБ, которая подключается ко входам инверторов И1 и И2. Если выходит из строя один из инверторов, например И1, то коммутатор К3 отключает аварийную цепь и напряжение поступает на нагрузку от другого инвертора И2.

В схеме АБП с выходным напряжением постоянного тока (рис. 5,а) при нормальном электроснабжении нагрузка Н отключена от аккумуляторной батареи АБ (коммутатор К выключен) и получает электроэнергию от сети через выпрямитель В1. Аккумуляторная батарея в это время подзаряжается от сети через выпрямитель В2.

При аварийном режиме в сети коммутатор подключает нагрузку к аккумуляторной батарее.

При наличии двух независимых сетей переменного тока (рис. 5,б) АБП содержит два выпрямителя В1 и В2 и коммутатор К. Последний выполняет защитные функции при аварийной ситуации. В составе АБП аккумуляторная батарея может выполняться секционированной, т. е. состоящей из основных элементов ОЭ и дополнительных ДЭ (рис. 5,в). В нормальном режиме работы основные элементы подзаряжаются от сети через выпрямитель В1, дополнительные элементы - через выпрямитель В2. При этом коммутатор К1 выключен, а коммутатор К2 включен. Нагрузка получает электроэнергию от сети через выпрямитель В1. В случае снижения напряжения сети ниже заданного уровня коммутатор К2 выключается, коммутатор К1 включается и нагрузка получает напряжение от последовательно включенных основных и дополнительных элементов.

Для стабилизации выходного напряжения АБП в переходных режимах используется регулирующее вольтодобавочное устройство РВДУ (рис. 5,г). Регулирующее вольтодобавочное устройство преобразует напряжение аккумуляторной батареи в регулируемое напряжение постоянного тока. В нормальном режиме выпрямитель В через включенный коммутатор К подает напряжение на нагрузку Н и одновременно подзаряжает аккумуляторную батарею АБ. При отключении внешнего электроснабжения коммутатор выключается и одновременно включается РВДУ. Последнее обеспечивает стабильность напряжения на нагрузке при работе от аккумуляторной батареи, напряжение которой снижается в процессе разряда. Диод VD, который служит для безразрывной коммутации, закрывается напряжением РВДУ. При появлении внешнего электроснабжения выпрямитель В включается в режиме стабилизации тока и обеспечивает электроэнергией нагрузку и аккумуляторную батарею. После окончания заряда аккумуляторной батареи выпрямитель переходит в режим стабилизации напряжения, и АБП возвращается в исходное состояние.

Применение РВДУ позволяет плавно компенсировать изменения выходного напряжения аккумуляторной батареи.

Время работы АБП после перехода от сети на аккумуляторную батарею существенно зависит от его загрузки.

В качестве примера рассмотрим работу агрегата бесперебойного электроснабжения типа УГПИ 66/18, предназначенного для обеспечения электроэнергией аналого-цифровых устройств. Агрегат работает в буфере с аккумуляторной батареей, содержащей 30 кислотных аккумуляторов (рис. 6).

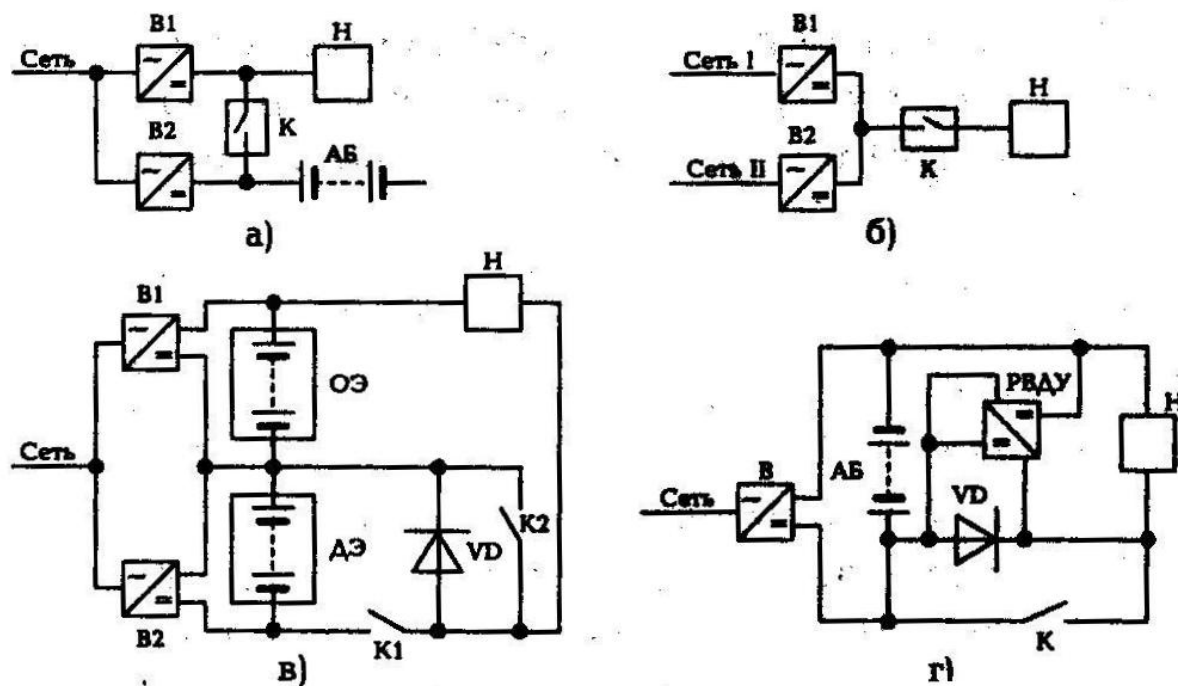


Рис. 5. Агрегаты бесперебойного электроснабжения с выходным напряжением постоянного тока

В качестве примера рассмотрим работу агрегата бесперебойного электроснабжения типа УГПИ 66/18, предназначенного для обеспечения электроэнергией аналого-цифровых устройств. Агрегат работает в буфере с аккумуляторной батареей, содержащей 30 кислотных аккумуляторов.

Агрегат рассчитан на входное напряжение 220 В однофазного тока частоты 50 Гц или напряжение двух фаз сети 380/220 В переменного тока частоты 50 Гц и имеет следующие выходные параметры: номинальное выходное напряжение 66 В; максимальный ток в режиме заряда батареи и работы на нагрузку 37 А, в режиме содержания батареи и работы на нагрузку 18,5 А; пульсация выходного напряжения не более 2 мВ. Агрегат предназначен для эксплуатации при температуре окружающей среды от 5 до 40 °С и относительной влажности воздуха до 80% при температуре 25 °С.

Электрическая структурная схема агрегата УГПИ 66/18 приведена на рис. 6, где ВО - выпрямитель основной, ВР - выпрямитель резервный, УКНС - устройство контроля напряжения сети, УКНВ - устройство контроля напряжения выпрямителя, УКТБ - устройство контроля тока батареи, УКНБ - устройство контроля напряжения батареи, Ф - фильтр

емкостный. Работает агрегат следующим образом. Когда входное напряжение находится в допустимых пределах, то выходное напряжение 69 В подается одновременно на нагрузку и на заряд батареи аккумуляторов. Зарядный ток регулируется в пределах (0,5...2) А с точностью $\pm 0,5$ А.

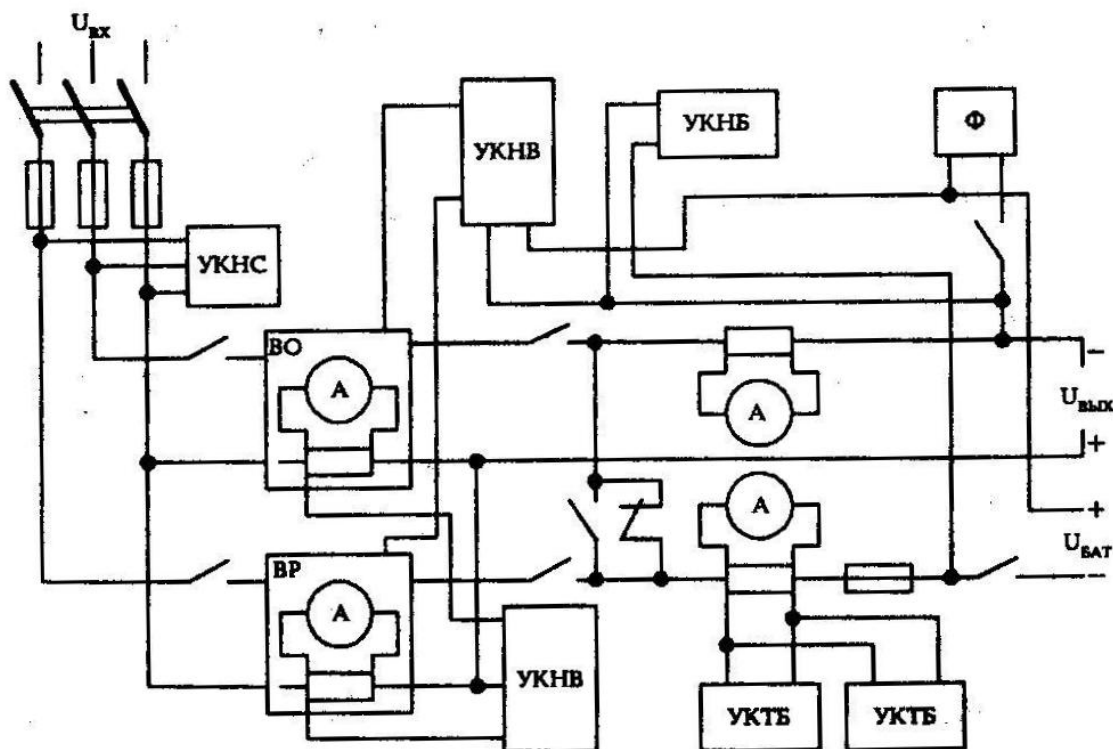


Рис. 7. Структурная схема агрегата УГПИ 66/18

При выходе из строя рабочего выпрямителя ВО резервный выпрямитель ВР автоматически становится рабочим. Выходное напряжение агрегата при отсутствии батареи может снизиться до 48 В на время не более 0,4 с. Уменьшение входного напряжения ниже 176 В приводит к выключению выпрямителей ВО и ВР. При пропадании входного напряжения нагрузка обеспечивается электроэнергией от батареи аккумуляторов. В случае длительного отсутствия входного напряжения и снижения выходного напряжения до (53...58) В батарея аккумуляторов отключается от нагрузки. При восстановлении входного напряжения агрегат переходит в нормальный режим работы.

Для проведения профилактических работ устройства коммутации, защиты, контроля и сигнализации обеспечивают возможность выключения вручную выпрямителей из схемы агрегата (со стороны сети и со стороны нагрузки). Предусмотрена также возможность включения вручную в схему агрегата внешних резисторов для контрольного разряда батареи и включения ее вручную на заряд до интенсивного газообразования от резервного выпрямителя ВР.

В составе агрегата имеется защита от превышения выходного напряжения, местная и дистанционная сигнализация состояний выпрямителей, батареи аккумуляторов и агрегата в целом.

Источники электропитания персональных компьютеров

Источники электропитания (ИЭП) персональных компьютеров (ПК) питаются напряжением 220/110 В от однофазного переменного тока с напряжениями 220/110 В. Выходные каналы обычно имеют напряжения +5, +12, -5, -12 В постоянного тока. Источники выполняются с выходной мощностью всех каналов от 65 до 350 Вт.

Рассмотрим структурную схему ИЭП ПК. Она состоит из следующих основных блоков (рис. 1):

- входная цепь;
- преобразователь;
- выходной цепь;
- устройства управления преобразователя;
- схема защиты;
- дополнительный источник питания;
- схема вентилятора.

В состав входной цепи входят следующие компоненты:

- входной трехштыревой разъем;
- сетевой выключатель;
- выходной трехгнездовой разъем (для подключения кабеля электропитания дисплея);
- плавкий предохранитель;
- ограничивающий терморезистор;
- помехоподавляющий фильтр;
- выпрямитель сетевого напряжения;
- сглаживающий фильтр;
- разрядный резистор.

Типовая схема входной цепи ИЭП ПК показана на рис. 2. Плавкий предохранитель FU1 служит для отключения источника от сети при неисправности (коротком замыкании или перегрузке) во входных цепях источника.

Терморезистор RT1 предназначен для ограничения броска зарядного тока через конденсаторы.

Помехоподавляющий фильтр (ППФ) предназначен для снижения уровня высокочастотных импульсных помех из сети в источник и из источника в сеть.

Выпрямитель сетевого напряжения (ВСН) служит для выпрямления сетевого переменного напряжения. На выходе выпрямителя установлен низкочастотный сглаживающий фильтр, который уменьшает пульсации выпрямленного напряжения..

Разрядный резистор R1 предназначен для разряда конденсаторов сетевого фильтра после отключения ИЭП от сети.

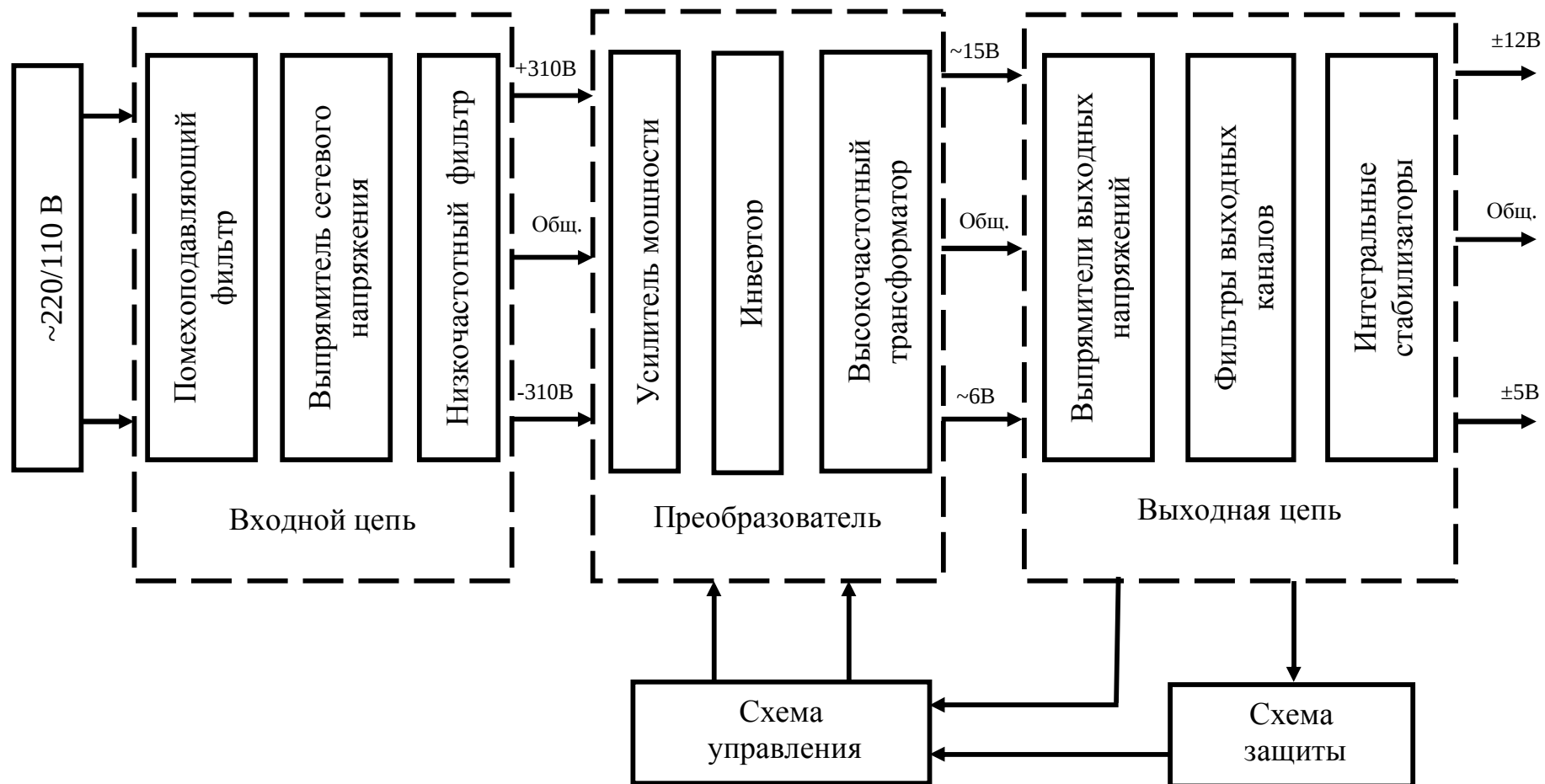


Рис. 1. Структурная схема источника электропитания персонального компьютера

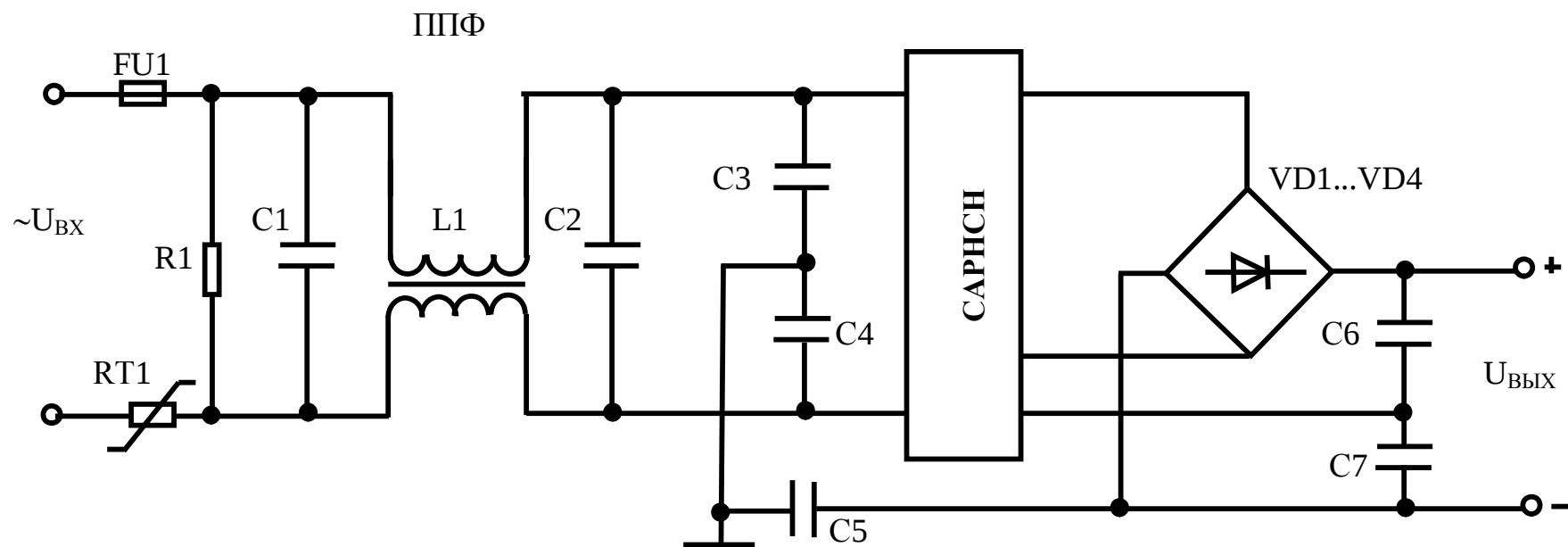


Рис. 2. Схема входного цепи

ИЭП ПК производится на различные входные напряжения сети (как правило, 220 или 110 В). Это вызвано различием номиналов напряжений в разных странах, например:

120 В, 60 Гц – США, 220 В, 50 Гц – большинство стран Европы, СНГ и Среднего Востока;

Для согласования напряжения сети и ИЭП используется схема автоматического распознавания номинала сетевого напряжения (САРНСН), которая включается между ППФ и ВСН. Она автоматически согласует ИЭП соответствующим напряжением сети. При напряжении сети 220 В выпрямление осуществляется мостовой схемой, которая подзаряжает оба конденсатора инвертора С6 и С7 одновременно. При напряжении сети 110 В выпрямление осуществляется по схеме удвоения напряжения и конденсаторы С6 и С7 подзаряжаются по очереди в разные полупериоды сетевого напряжения.

Преобразователь состоит из следующих блоков (рис.3.):

- усилитель мощности;
- инвертор;
- высокочастотный трансформатор.

Он преобразует энергию постоянного тока поступающего с выхода ВСН напряжение порядка ± 310 В на энергию переменного тока с напряжениями 12...15 В и 5...7 В форме прямоугольных импульсов, в зависимости сигналов поступающих от схемы управления (СУ). Работа преобразователя в любой момент времени зависит сигналов поступающих от СУ.

Усилитель мощности обеспечивает управление коммутацией силовых транзисторов инвертора, т. е. формирует заданные открывающий и закрывающий токи базы, а также обеспечивает гальваническую развязку цепей база–эмиттер и база–коллектор транзисторов инвертора от СУ. Инвертор основном выполняется по двухтактным мостовым или полумостовым схемам. Транзисторы инвертора поочередно открывается и закрываются. Со вторичных обмоток силового трансформатора получается прямоугольные импульсы напряжения с пониженными значениями и подаются на выпрямители выходных напряжений.

Выходной цепь ИЭП ПК состоит из следующих блоков (рис.3.):

- выпрямители выходных напряжений;
- фильтры выходных каналов;
- интегральные стабилизаторы.

Выходной цепь имеет на своем выходе четыре канала. Из них каналы +12 В и +5 В являются сильноточными, а каналы –12 В и –5 В – слаботочными. В сильноточных каналах, для стабилизации выходного напряжения, кроме с помощью широтно–импульсной модуляции применяются линейная стабилизация напряжения. При этом на выходах этих каналов устанавливается линейные интегральные стабилизаторы (LM7912, LM7905 или КР142ЕН8, КР142ЕН5).

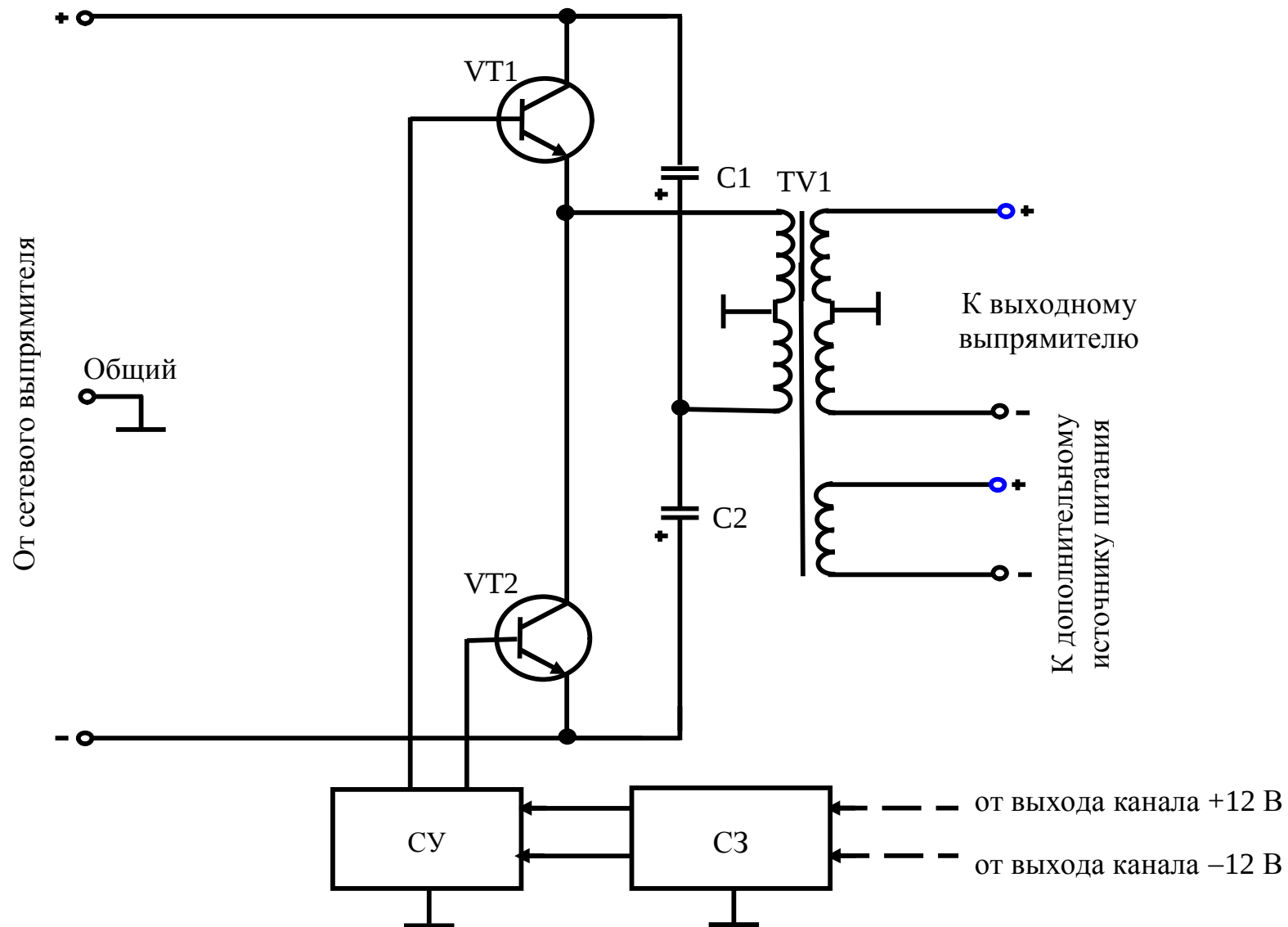


Рис. 3. Схема преобразователя

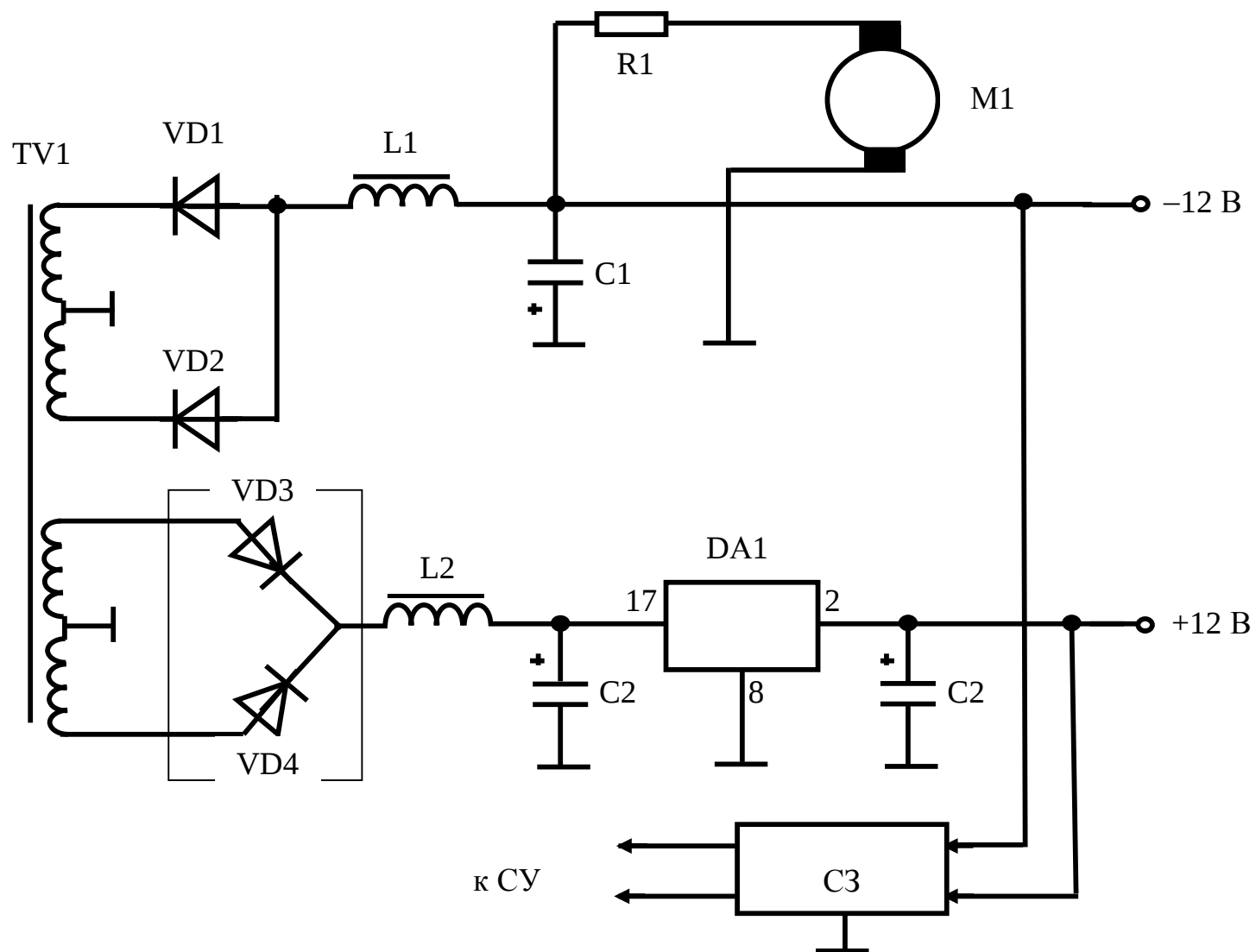


Рис. 4. Схема выходного цепи

Для уменьшения динамических потерь в выпрямителях силовоточных каналах используются диоды Шоттки, обладающих сравнительно малым временем восстановления обратного сопротивления.

ИЭП ПК обычно выполняет несколько защитных функций, т.е. имеет несколько схем защиты. Срабатывание любой из этих схем защиты вызывает отключение всех выходных каналов путем воздействия на СУ.

Схема управления обеспечивает стабилизацию или регулированию выходного напряжения в зависимости от изменения входного напряжения, тока нагрузки и температурной нестабильности параметров компонентов ИЭП. Напряжение обратной связи с выхода ИЭП поступает в СУ.

В состав ИЭП ПК входит вентилятор для принудительного охлаждения самого ИЭП и электронных средств системного блока. Часто для питания двигателя используется напряжение +12 В, некоторых случаях питание на двигатель подается от шины -12В (рис. 4). Потребляемый вентилятором ток равен примерно 0,12 А.

Дополнительный источник питания обеспечивает вспомогательными напряжениями схему управления и усилитель мощности.

Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры

Габариты и масса источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры определяются параметрами сетевого трансформатора, низкочастотного фильтра и потерями тепла на регулирующих элементах линейных стабилизаторов. Значительно меньше габариты и масса источников электропитания, работающих на повышенной частоте и с импульсным режимом регуляторов постоянного напряжения. Но для построения малогабаритных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры на интегральных микросхемах параметры этих источников не удовлетворяют требованиям. Лучшие показатели имеют источники электропитания с бестрансформаторным входом. В них напряжение сети сначала выпрямляется входным выпрямителем, затем пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются емкостным фильтром, после чего постоянное напряжение преобразуется инвертором в высокочастотное прямоугольной формы, которое трансформируется до заданного значения, снова выпрямляется, фильтруется и подается в нагрузку. Структурные схемы сетевых источников электропитания с бестрансформаторным входом приведены на рис. 1. В таких схемах гальваническая развязка выходной цепи источника электропитания от выходной питающей сети осуществляется в трансформаторе инвертора. Стабилизация выходного напряжения осуществляется в инверторе методом широтно-импульсной модуляции, а также включением стабилизатора перед инвертором или после него.

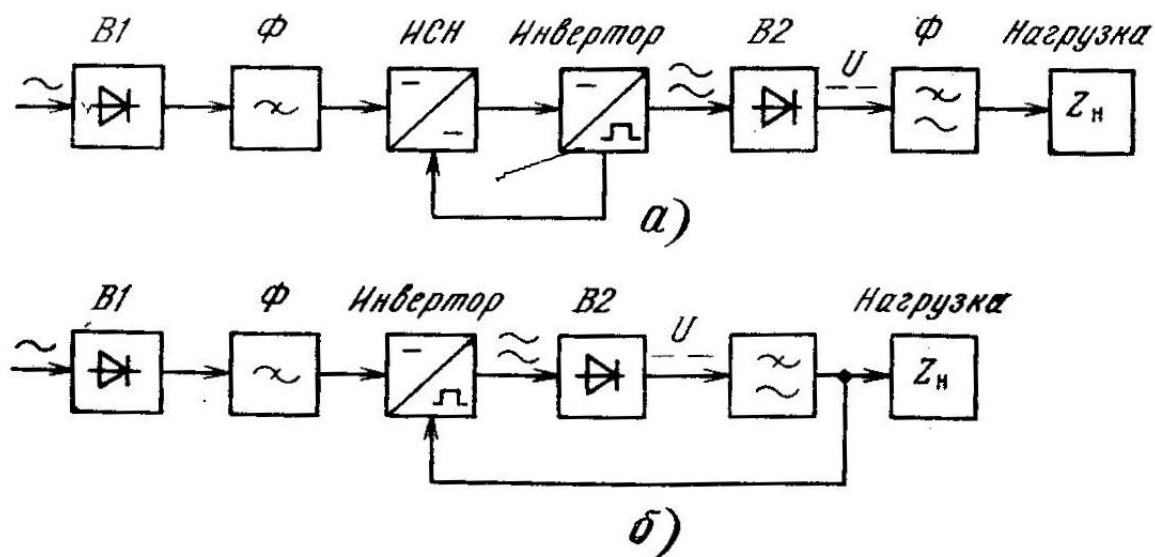


Рис. 1. Структурные схемы сетевых источников электропитания с бестрансформаторным входом

На рис. 2 приведена принципиальная схема источника электропитания с бестрансформаторным входом на основе полумостового регулируемого инвертора. Напряжение от сети поступает на вход бестрансформаторного мостового выпрямителя, с выхода которого подается на инвертор. Транзисторы инвертора поочередно отпираются широтно-модулированным сигналом. На выходе инвертора получается двуполярный широтно-импульсный модулированный сигнал повышенной частоты примерно 20 кГц. Затем это напряжение выпрямляется и фильтруется с помощью LC-фильтра.

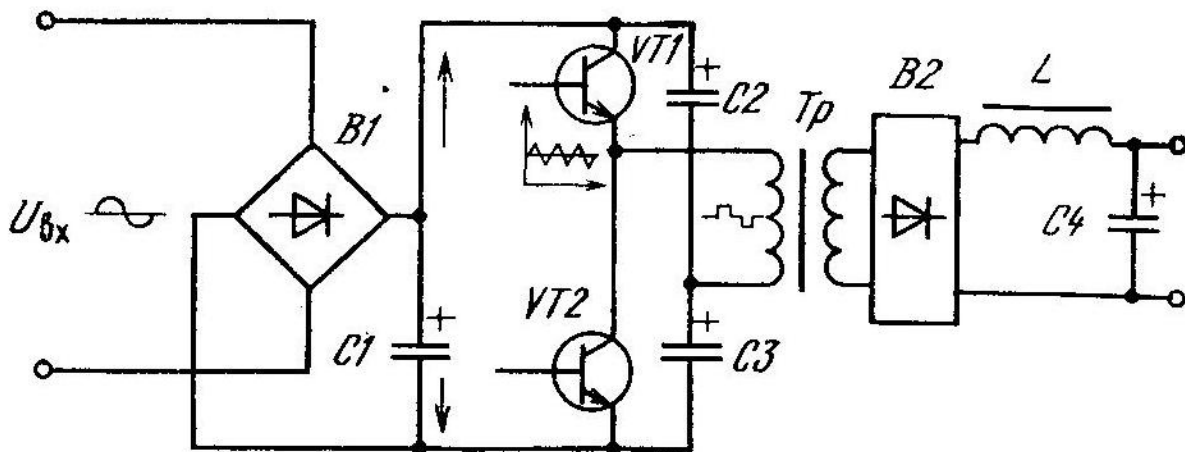


Рис. 2. Принципиальная схема источника электропитания с бестрансформаторным входом на основе полумостового регулируемого инвертора

Для построения малогабаритных источников электропитания силовые транзисторы должны быть высоковольтными ($U_{КЭ.макс.доп} > 350...400$ В), пропускать ток коллектора $I_K = 5...10$ А, иметь малые напряжения насыщения: $U_{КЭ.нас} = 1...2$ В, обеспечивать работу инвертора на частотах 50...100 кГц и больше. Выпрямительные диоды должны быть высокочастотными ($f > 50...100$ кГц), и с малым временем переключения.

Для нормальной работы радиоэлектронной аппаратуры необходимы стабильные токи и напряжения. А на выходе преобразователей источников электропитания напряжение изменяется при изменении входного питающего напряжения. Этим вызывается необходимость применения стабилизаторов в преобразователях источников электропитания.

Стабилизирующими преобразователями называются устройства, создающие на выходе постоянное напряжение $U_{вых}$ с заданной точностью при изменении входного напряжения питания и тока нагрузки выходной цепи.

Стабилизация напряжения в преобразователях осуществляется различными способами. На рис. 3 приведены структурные схемы стабилизирующих преобразователей напряжения.

Обычно один тот же преобразователь создает на выходе несколько напряжений-несколько каналов питания (рис. 3,а).

Преобразователи с централизованным вольтодобавочным стабилизатором (рис. 3,б) обеспечивают на выходе мощность около 100 Вт.

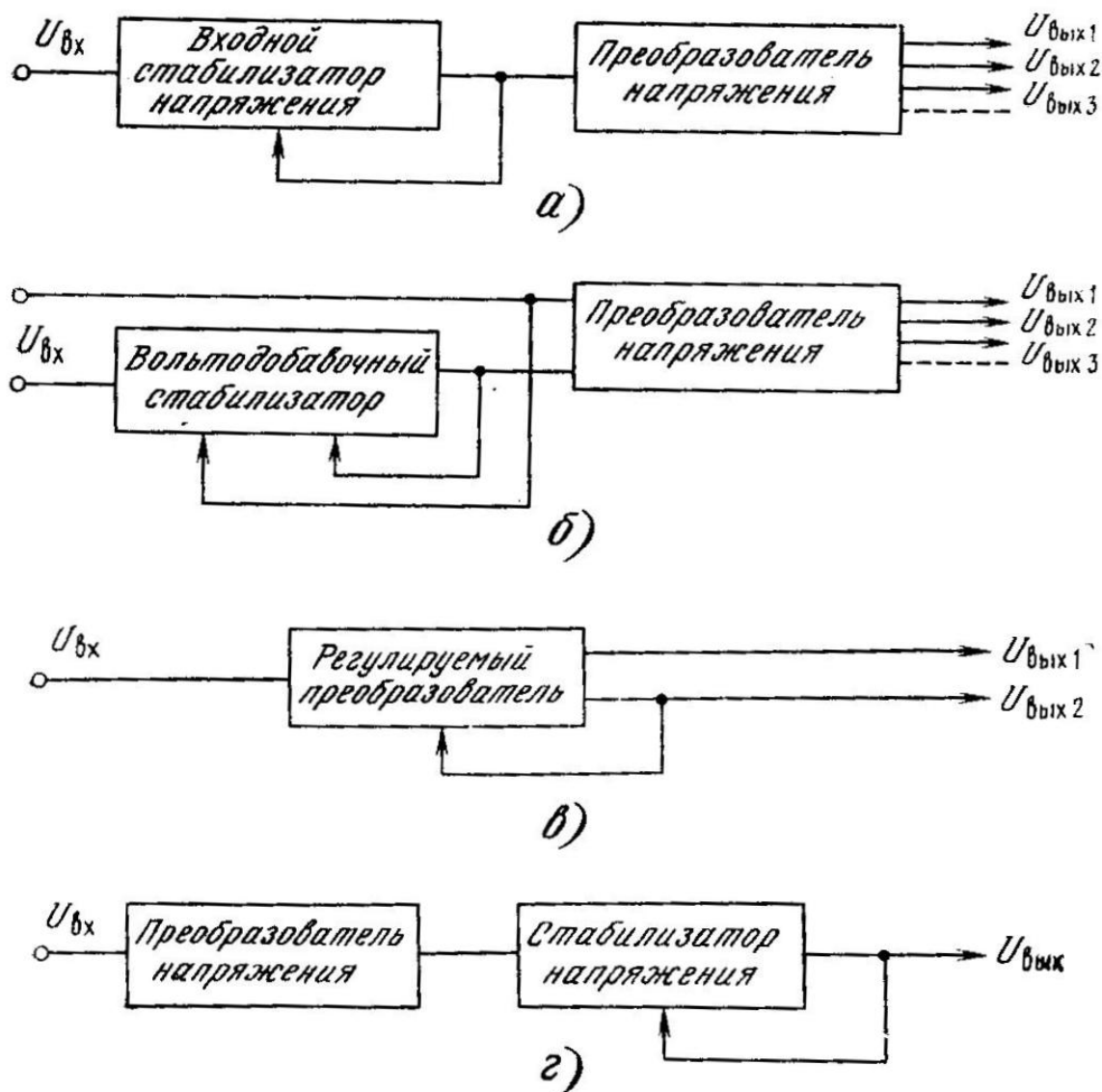


Рис. 3. Структурные схемы стабилизирующих преобразователей напряжения

Более экономичными являются преобразователи с централизованной стабилизацией нескольких выходных напряжений, осуществляемой с помощью регулируемого преобразователя (рис. 3,в). В этом преобразователе совмещены функции преобразования и стабилизации, за счет чего повышается КПД. Он работает в режиме широтно-импульсной модуляции.

При децентрализованном способе стабилизации входное напряжение подается непосредственно на преобразователь, а на выходе в каждый канал включается индивидуальный стабилизатор – непрерывный или импульсный (рис. 3,г). Выходные напряжения в этой схеме имеют высокую стабильность, но низкий КПД.

Стабилизированное постоянное напряжение подается на преобразователь и поддерживает неизменным напряжение на его выходе. На выходе

преобразователя получается стабильное переменное напряжение. Этот способ стабилизации применяется в многоканальных источниках электропитания при необходимости получить от преобразователя несколько выходных стабилизированных напряжений с одинаковой стабильностью (3...5 %).

Стабилизация напряжения по этой схеме может осуществляться как непрерывным, так и импульсным методом.

Схемы, построенному по первому методу, применяются в источниках электропитания мощностью до 2 Вт из-за низкого КПД.

Централизованные импульсные преобразователи более экономичны. Такие преобразователи применяют в многоканальных источниках электропитания с выходной мощностью до десятков ватт.

Но наиболее экономичными являются преобразователи с импульсным методом стабилизации выходного напряжения преобразователя: импульсный режим работы силовых транзисторов повышает КПД устройства, а повышение частоты коммутации до 300 кГц уменьшает его габариты и массу.

Схема преобразователя с входным импульсным стабилизатором приведена на рис. 4. Она составлена в соответствии структурной схемой, приведенной на рис. 3,а, и содержит следующие элементы: импульсный стабилизатор на транзисторе VT1, демодулирующий фильтр, образованный диодом VD, дросселем L и конденсатором C, схему управления СУ, управляющую режимом переключений регулирующего транзистора VT1 и двухтактный усилитель на VT2 и VT3.

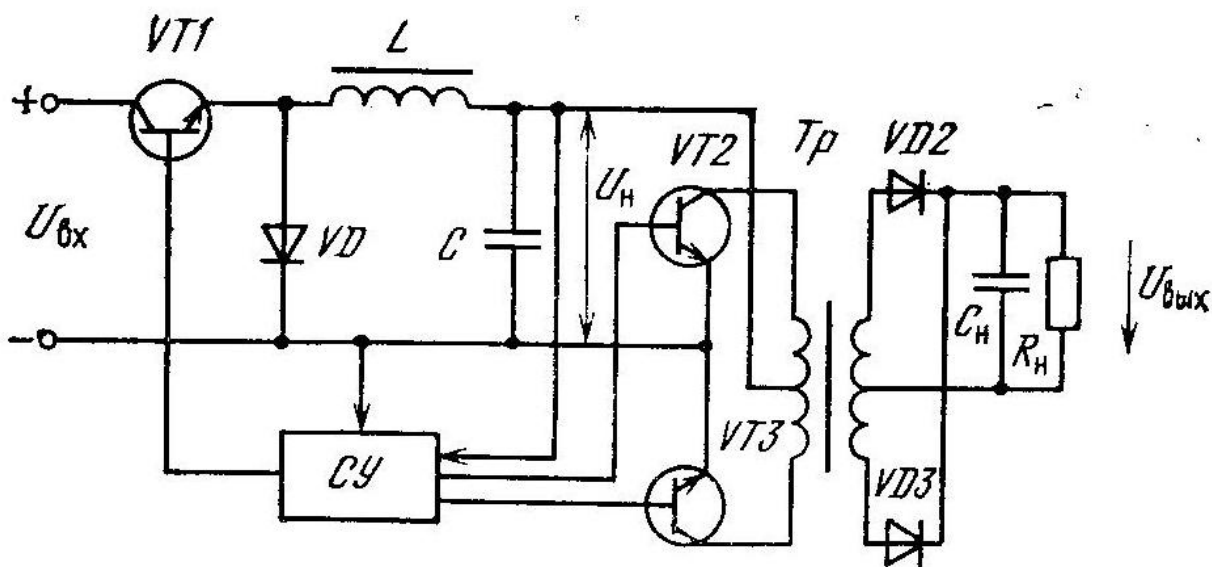


Рис. 4.Схема преобразователя с входным импульсным стабилизатором

Принцип действия схемы состоит в следующем. Постоянное напряжение $U_{вх}$ подается на вход импульсного стабилизатора на транзисторе VT1 и с выхода его через фильтр LC поступает на вход усилителя мощности на транзисторах VT2 и VT3, который выполняет функцию преобразователя

напряжения с независимым возбуждением. Постоянное напряжение в нем преобразуется в прямоугольнике без паузы на нуле. С выходной обмотки трансформатора Tr это напряжение подается на двухполупериодный выпрямитель на диодах $VD2$ и $VD3$, выпрямляется и сглаживается емкостным фильтром C_H .

На рис. 5 приведена схема двухтактного регулируемого преобразователя, составленная в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 3, в. Постоянное входное напряжение U_{BX} сначала подается на преобразователь, выполненный на транзисторах $VT1$, $VT2$. Управление работой преобразователя осуществляется со схемы управления широтно-модулированными импульсами, которая следит за выходным напряжением на нагрузке R_H и изменяет длительность импульсов таким образом, что среднее выходное напряжение поддерживается неизменным с определенной точностью при изменении входного напряжения U_{BX} или тока нагрузки.

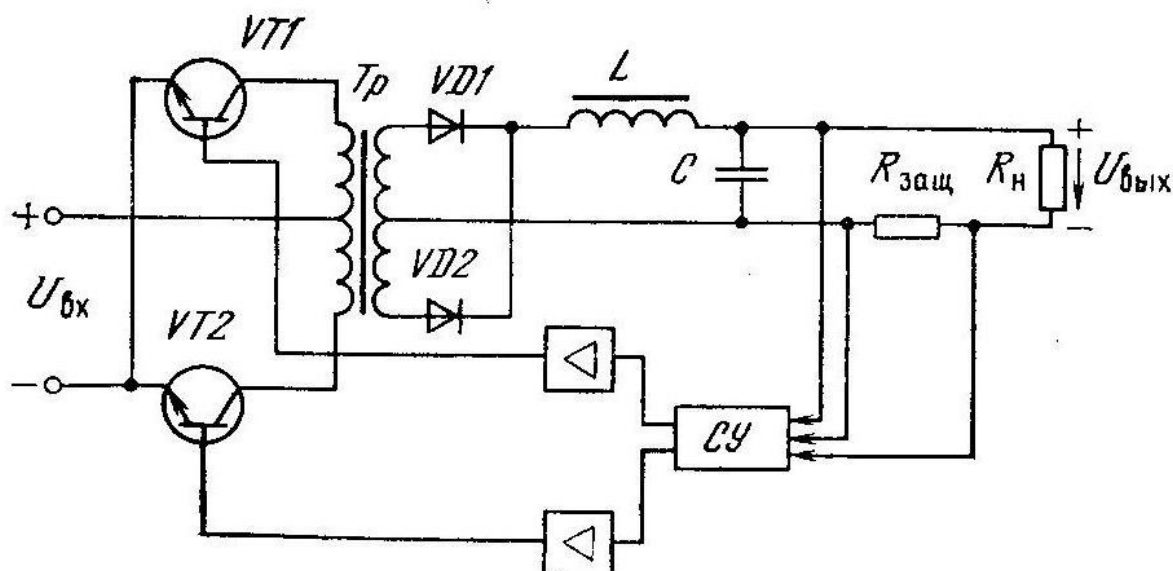


Рис. 5. Принципиальная схема двухтактного регулируемого преобразователя,

Интегральные схемы могут быть использованы в регулируемом преобразователе в качестве схем управления. Но выходной ток интегральных микросхем оказывается недостаточным для управления мощными силовыми транзисторами. Поэтому сигнал после схемы управления усиливают дополнительными усилителями после чего усиленный сигнал рассогласования подается на вход мощных силовых транзисторов. Защита мощных силовых транзисторов от перегрузки по току или короткого замыкания а преобразователе осуществляется схемой управления, которая получает сигнал о перегрузке с резистора защиты $R_{заш}$.

Литература

1. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. - М.: «Три Л», 2000г.-400с.
2. Электропитания устройств связи. Учебное пособие./ Б.М.Махкамджанов, М.Э.Яскова, У.Т.Алиев; Под ред. Х.Соатова.-Ташкент: ТУИТ, 2005й.-129с.
3. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. Учебное пособие. :М.:СОЛОН-ПРЕСС, 2008г.-448 с.
4. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: -М.: Высш.шк.,1991г.-272с.
5. Источники электропитания РЭА: Справочник/Под ред. Г.С.Найвельта.- М.: Радио и связь. 1985г.-272с.
6. Костиков В.Г., Парфёнов Е.М. Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для вузов.- М.: Радио и связь, 1998г.
7. Мкртчян Ж.А. Основы построения устройств электропитания ЭВМ. М.: Радио и связь, 1990г.
8. Mulder S.A. Loss formulas for power ferrites and their in transformer design. Philips Components. 1994г.
9. Телекоммуникация ускуналари электр таъминотида оид терминларнинг русча-ўзбекча изохли луғати. т.ф.д. М.Мухиддиновнинг тахрири остида. <<Фан>> нашриёти, 2009й.
10. Хиленко В.И., Хиленко А.В. Электропитание устройств связи. Учебное пособие. М. Радио и связь, 1998г.-224с.
11. Электропитание устройств связи. Учебник для вузов/ А.А.Бокуняев, Б.В.Горбачев, В.Е. Китаев и др.; Под ред. В.Е.Китаева.-М.: Радио и связь, 1988г.-280с.
12. Электропитание устройств связи / под ред. Ю.Д.Козляевва.-М.: Радио и связь. 1998г.-328с.