**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**
**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
**(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)**

**АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ - ФИЛИАЛ**
**ФГБОУ ВО «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
**В Г. ЗЕРНОГРАДЕ**

Энергетический факультет
Кафедра эксплуатации энергетического
оборудования и электрических машин

М.М. Украинцев, П.Т. Корчагин, П.В. Гуляев, А.Е. Чуркин

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Часть 1.
## МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие
для выполнения лабораторных работ

г. Зерноград - 2023

© Украинцев М.М., Корчагин П.Т.,
Гуляев П.В., Чуркин А.Е.
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»
в г. Зернограде, 2023

*Об издании – 1, 2*
*Содержание*

УДК 621.313(075.8)

Издается по решению методической комиссии по направлению подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» в г. Зернограде

**Рецензент:**

канд. техн. наук, доцент каф ЭЭ И ЭТ ***Мартынов А.П.***

**Украинцев М.М.** Электрические машины: учебное пособие для выполнения лабораторных работ: в 2 ч. Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы [Электронный ресурс] /М.М. Украинцев, П.Т. Корчагин, П.В. Гуляев, А.Е. Чуркин. – Электрон. дан. - Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» в г. Зернограде, 2023. 167 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия очной и заочной форм обучения.

Пособие содержит теоретическую часть и методические материалы для выполнения лабораторных работ по курсам машины постоянного тока и трансформаторы.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры
эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин
Протокол №2 от 21.09.2023 г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией по направлению подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия энергетического факультета
Протокол №1 от 22.09.2023 г.

© Украинцев М.М., Корчагин П.Т.,
Гуляев П.В., Чуркин А.Е.
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»
в г. Зернограде, 2023

СОДЕРЖАНИЕ


| | стр. |
|---|---|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| **ТЕМА 1** | |
| **МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА** | 5 |
| *1.1 Общие сведения* | 5 |
| *1.2 Принцип действия машин постоянного тока* | 7 |
| *1.3 Конструкция машин постоянного тока* | 12 |
| ***Лабораторная работа №1*** | |
| ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОСТОЙ ПЕТЛЕВОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 28 |
| ***Лабораторная работа №2*** | |
| ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОСТОЙ ВОЛНОВОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 35 |
| ***Лабораторная работа №3*** | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА | 42 |
| ***Лабораторная работа №4*** | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ | 54 |
| **ТЕМА 2** | |
| **ТРАНСФОРМАТОРЫ** | 64 |
| *2.1 Общие сведения* | 64 |
| *2.2 Принцип действия трансформаторов* | 65 |
| *2.3 Конструкция трансформаторов* | 67 |
| ***Лабораторная работа №5*** | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ | 90 |
| ***Лабораторная работа №6*** | |
| МАРКИРОВКА ВЫВОДОВ, СБОРКА СХЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА | 101 |
| ***Лабораторная работа №7*** | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ | 113 |
| ***Лабораторная работа №8*** | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ | 123 |
| ЛИТЕРАТУРА | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 138 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 139 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | 152 |

# ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения дисциплины «Электрические машины», часть 1. «Машины постоянного тока. Трансформаторы», которая, согласно федеральному государственному образовательному стандарту входит в систему подготовки специалистов по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия (профиль «Электрооборудование и электртехнологии»).

В процессе изучения дисциплины студенты должны получить достаточные знания по устройству, принципу действия, характеристикам электрических машин. Пособие предназначено для закрепления теоретических знаний, усвоения методик расчета характеристик и определения параметров электрических машин.

Лабораторные занятия проводятся в лаборатории, оснащенной действующими электрическими машинами и стендами, позволяющими их практически исследовать.

Пособие включает в себя две темы, излагаемых по мере повышения их сложности. Изучение электрических машин в Азово-Черноморском инженерном институте ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» в г. Зернограде традиционно начинается с наиболее простых в понимании их принципа действия и характеристик машин постоянного тока, после чего, изучаются машины переменного тока, не имеющие вращающихся частей – трансформаторы.

# ТЕМА 1

# МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## *1.1 Общие сведения*

На сегодняшний день преимущественное распространение имеют сети переменного тока, поэтому в промышленности и сельском хозяйстве большее применение находят машины переменного тока. Вместе с тем широко используются и машины постоянного тока (МПТ), несмотря на то, что стоимость их выше в 2…3 раза, чем машин переменного тока. Это объясняется тем, что они обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования частоты вращения, пуска, реверса и допускают более высокие перегрузки по сравнению с машинами переменного тока.

В настоящее время машины постоянного тока изготовляются на мощности от долей Вт до 12 МВт. Номинальное напряжение их не превышает 1500 В и только иногда для крупных машин доходит до 3000 В. Напряжение серийных машин (двигатель/генератор) составляет 110/115, 220/230, 340/355, 440/460 В. Частота вращений машин колеблется в широких пределах – от нескольких оборотов до нескольких тысяч оборотов в минуту.

Наиболее широкое применение получили машины постоянного тока с механическим коммутатором, выполненным в виде коллектора с системой щеток. Машины с таким коммутатором получили название *коллекторных*. Наряду с механическим коммутатором в настоящее время все большее распространение получают коммутаторы с управляемыми и неуправляемыми вентилями. Такие машины постоянного тока называются *вентильными*. В последние годы данные коммутаторы выполняются почти исключительно на полупроводниковых приборах (диодах, тиристорах, транзисторах).

*Двигатели постоянного тока (ДПТ)* обладают большой глубиной регулирования частоты вращения, сохраняют во всем диапазоне регулирования высокий КПД и могут иметь механические характеристики, отвечающие специальным требованиям, обладают высокими перегрузочными, пусковыми и тормозными моментами. Поэтому они находят применение во всех тех случаях, когда их особые свойства имеют решающее значение.

Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге (магистральные электровозы, рабочие двигатели на тепловозах, трамваях, троллейбусах и др.), где требуются мягкие механические характеристики и широкие пределы регулирования частоты вращения. Так называемые крановые двигатели постоянного тока часто применяются в приводе различных подъемных устройств, где требуются такие же свойства. С помощью мощных двигателей постоянного тока (до 12000 кВт) приводятся в действие прокатные станы (слябинги и блюминги), многие другие ДПТ используются в регулируемом металлургическом электроприводе. Крупные двигатели постоянного тока приводят во вращение гребные винты на судах с электрической передачей энергии. Выпускаемые массовыми сериями двигатели постоянного тока общепромышленного применения используются в приводах, требующих регулирования частоты вращения. В подавляющем большинстве автомобилей, тракторов, самолетов и других летательных аппаратов, имеющих систему электропитания на постоянном токе, все вспомогательные устройства приводятся в действие двигателями постоянного тока. ДПТ широко применяются в электроприводе ручной электрифицированного инструмента (дрели, шлифовальные машины и др.). Двигатели постоянного тока небольшой мощности (от долей Вт до нескольких десятков Вт) используются в различных автоматических устройствах.

Основные преимущества двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока – хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а недостатки – относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении и пониженная надежность. Все эти недостатки машин постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности. Эти недостатки ограничивают применение машин постоянного тока.

Постоянный ток для питания двигателей получается с помощью генераторов постоянного тока или полупроводниковых выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

*Генераторы постоянного тока (ГПТ)* являются источником питания для промышленных и сельскохозяйственных установок, потребляющих постоянный ток низкого напряжения (электролизные и гальванические установки). Питание обмоток возбуждения синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (возбудителей). Широко также распространены генераторы постоянного тока специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, электромашинные усилители постоянного тока и пр.).

### *1.2 Принцип действия машин постоянного тока*

Машина постоянного тока представляет собой электрическую машину, обмотка якоря которой соединяется с электрической сетью постоянного тока с помощью механического преобразователя частоты. Для упрощения конструкции преобразователя частоты машина должна иметь обращенное исполнение: обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, располагается на индукторе; обмотка якоря, в которой при вращении

индуктируется переменная ЭДС, – на якоре. Это дает возможность выполнить преобразователь частоты в виде вращающегося коллектора, к пластинам которого присоединены выводы от секций обмотки якоря, и системы неподвижных щеток, контактирующих с пластинами коллектора.

Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рисунке 1.1 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами $N$ и $S$ постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора – якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии.

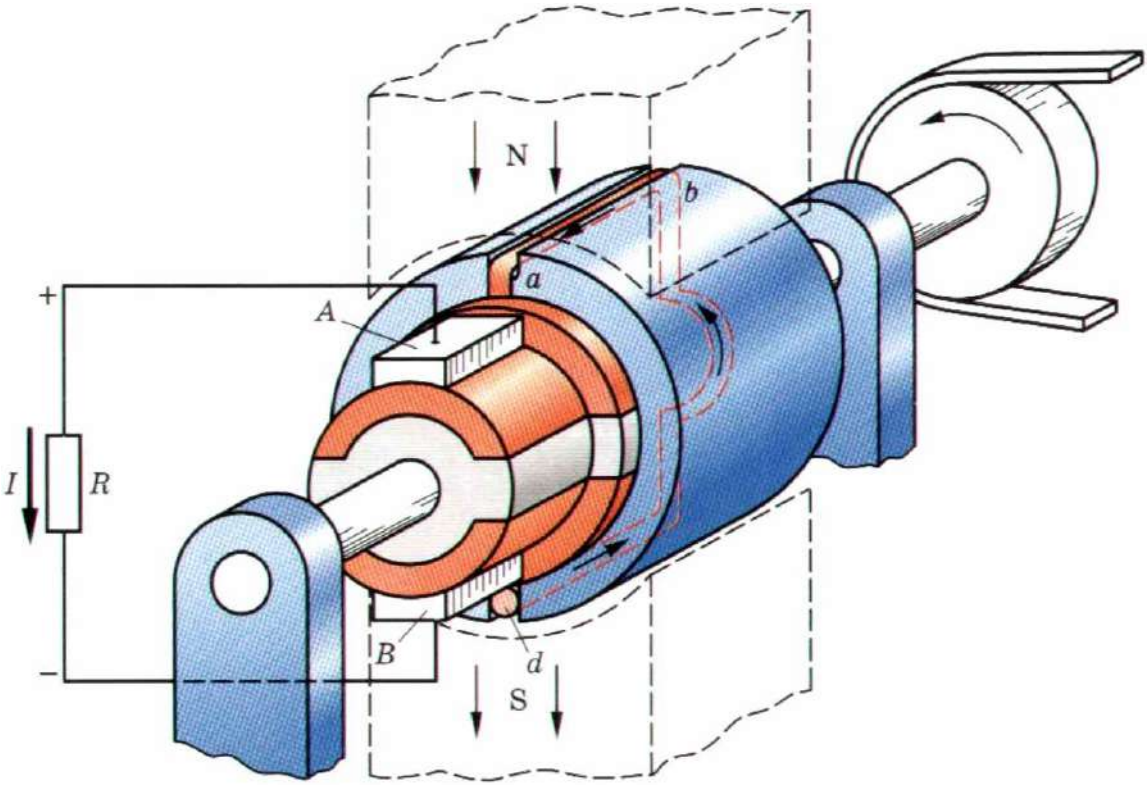



Рисунок 1.1 – Упрощенная модель генератора постоянного тока

В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка *abcd*, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки *A* и *B*, осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением *R*.

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой равно $e = 2Bvl$, а направление для положения якоря, изображенного на рисунке, указано стрелками.

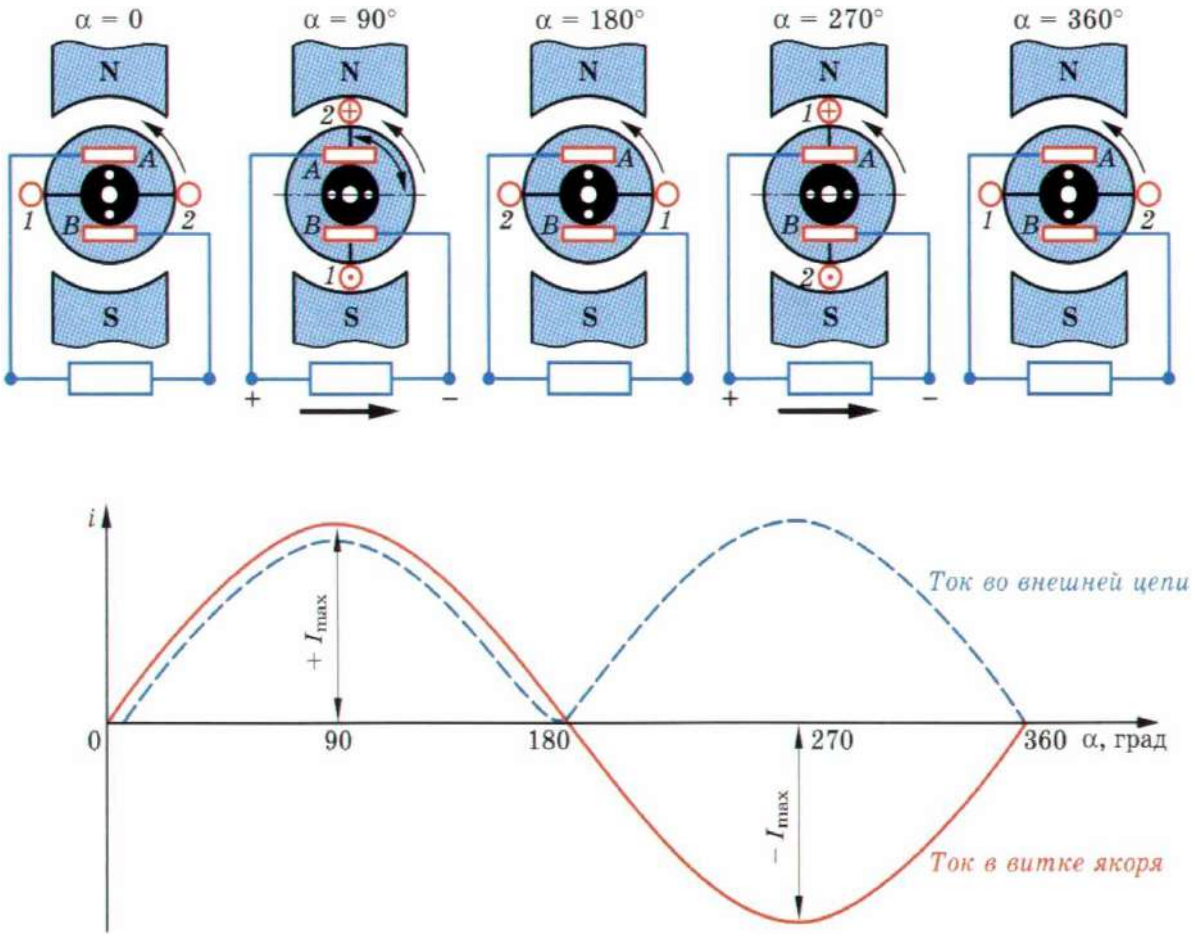



Рисунок 1.2 – Выпрямление тока коллектором

В процессе работы генератора якорь вращается и виток *abcd* занимает разное пространственное положение, поэтому в обмотке якоря наводится *переменная ЭДС*. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке *R*) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в *пульсирующий ток* во внешней цепи генератора, т.е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рисунке 1.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки *A* к щетке *B*; следовательно, щетка *A* является положительной, а щетка *B* – отрицательной. После поворота якоря на 180° (рисунок 1.2) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а, следовательно, и направление не тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рисунок 1.2). Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой *A* всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой *B* – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря.

*Снижение пульсаций тока* во внешней цепи достигается увеличением числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе. Так уже при коллекторе из 8 пластин на полюс пульсация ЭДС составляют менее 1%.

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока (рисунок 1.3). Для этого необходимо отключить нагрузку генератора *R* и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке *A* подключить зажим

"плюс", а к щетке *B* "минус", то в обмотке якоря появится ток *I*, направление которого показано на рисунке 1.3.

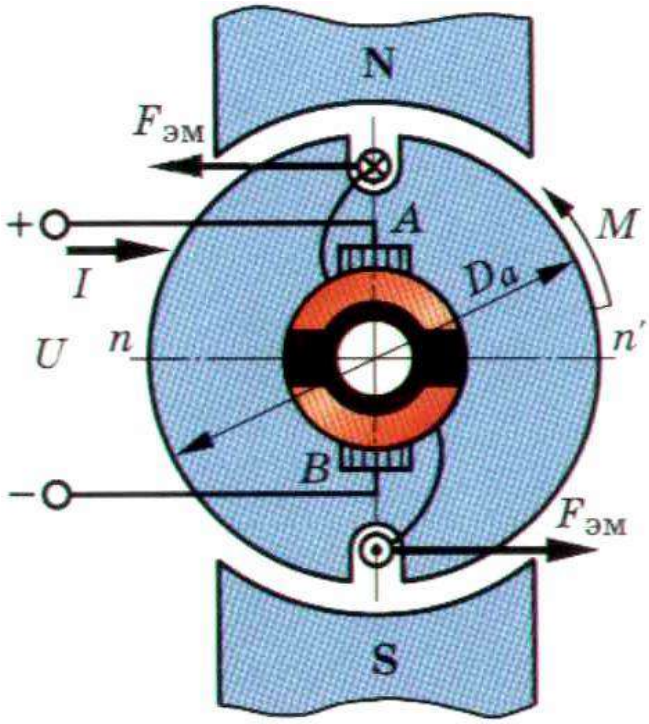



Рисунок 1.3 – Упрощенная модель двигателя постоянного тока

В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{ЭМ}$, создающие на якоре электромагнитный момент $M_{ЭМ}$ и вращающие его против часовой стрелки. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

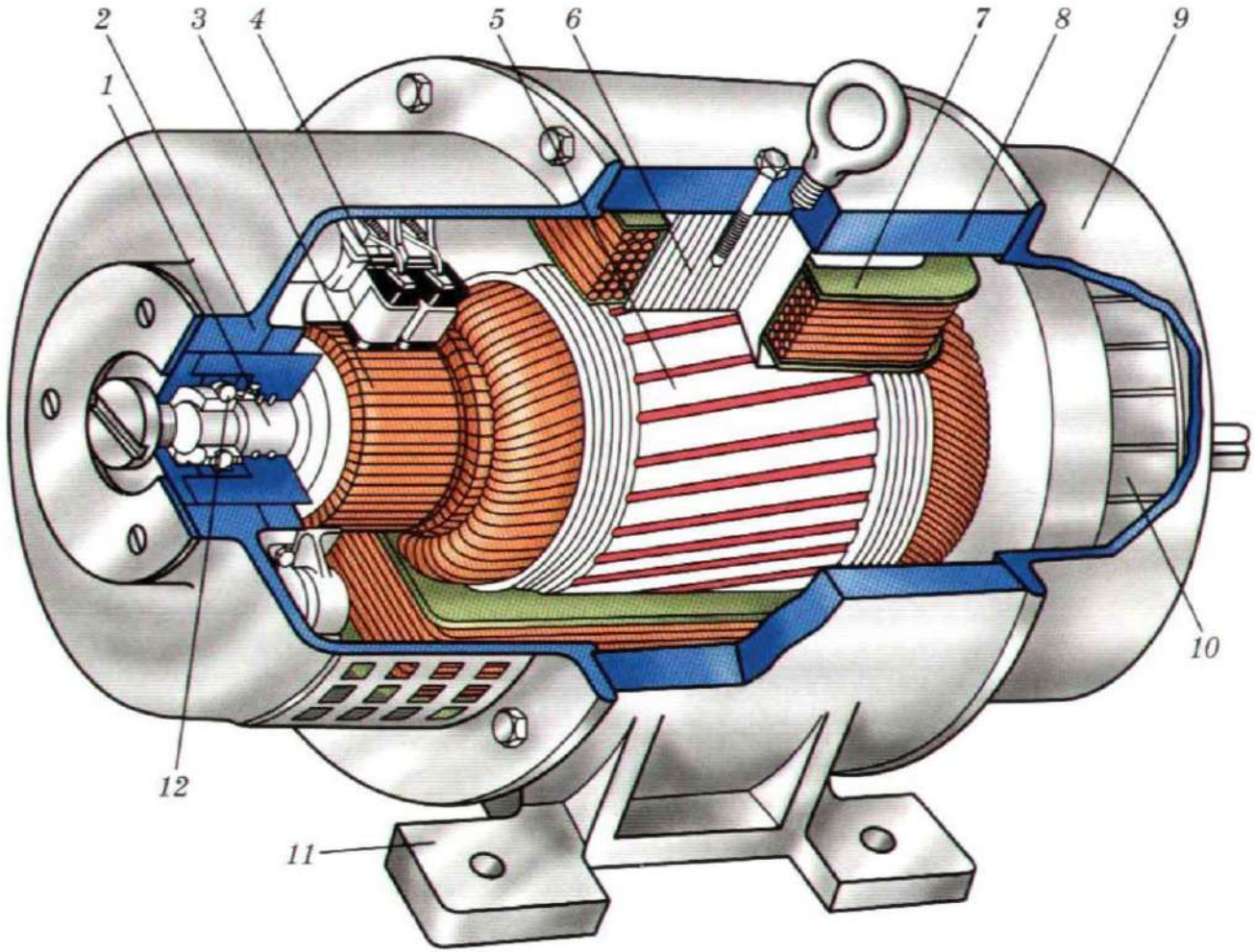
Таким образом, *назначение коллектора и щеток* в двигателе постоянного тока – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности. Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при

прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтрали *nn'* (рисунок 1.3) электромагнитные силы $F_{ЭМ} = 0$ (магнитная индукция в середине межполосного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

### *1.3 Конструкция машин постоянного тока*

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготовляют электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. Неподвижная часть машины постоянного тока называется *индуктор*, вращающаяся часть – *якорь* (рисунок 1.4).

Индуктор состоит из станины *8* и главных полюсов *6*. Станина *8* служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготовляют из электротехнической стали – материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы *11* для крепления машины к фундаментной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов *6*. Обычно станину делают цельной из стальной трубы, либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

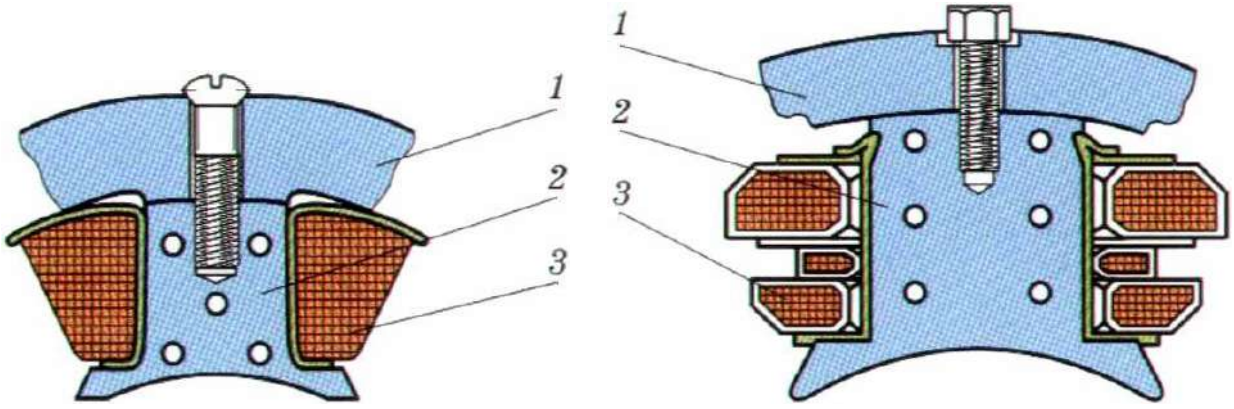



*1 – вал; 2 – передний подшипниковый щит; 3 – коллектор; 4 – щеткодержатели со щетками; 5 – якорь; 6 – главный полюс; 7 – обмотка возбуждения; 8 – станина; 9 – задний подшипниковый щит; 10 – вентилятор; 11 – лапы; 12 – подшипник*

Рисунок 1.4 – Устройство машины постоянного тока

*Главные полюсы* предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника *6* и полюсной катушки *7*. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1…2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411.

Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.




а б

*1 – станина; 2 – сердечник; 3 – полюсная катушка*

Рисунок 1.5 – Главные полюсы с бескаркасной (а) и каркасной полюсной катушкой (б)

В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными – намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку (рисунок 1.5 а). В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса (рисунок 1.5 б). В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

Помимо полюсных катушек на главных полюсах могут располагаться *катушки компенсационной обмотки*, которая служит для подавления реакции якоря, неблагоприятно влияющей (для "обычных" МПТ) на рабочие свойства машины постоянного тока. Компенсационную обмотку делают распределенной по поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов машины.

Компенсационные обмотки применяют лишь в машинах средней и большой мощности – более 150…500 кВт при напряжениях более 440 В, работающих с резкими колебаниями нагрузки, например в двигателях для прокатных станов. Объясняется это тем, что компенсационная обмотка удорожает и усложняет конструкцию машины и ее применение в некоторых случаях экономически не оправдывается.

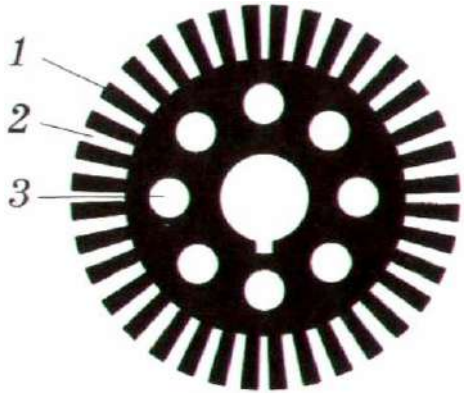
Для создания условий безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшения коммутации) применяют *добавочные (дополнительные) полюсы*. Добавочные полюсы выполняются обычно из кованой стали или собираются из листов. Они, так же как главные полюсы, прикрепляются к станине при помощи болтов. Добавочные полюсы располагают между главными. При этом щетки устанавливают на геометрической нейтрали. Обмотка добавочных полюсов соединяется последовательно с обмоткой якоря.

Все машины постоянного тока мощностью свыше 1 кВт снабжаются добавочными полюсами, число которых принимают равным числу главных полюсов или же вдвое меньшим. Наличие добавочных полюсов позволяет увеличить линейную нагрузку машины и при заданной мощности получить машину меньшего веса и габаритов.

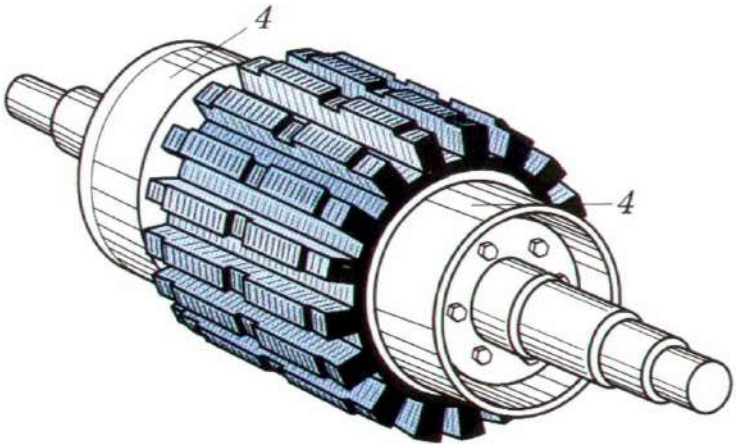
*Якорь* машины постоянного тока (рисунок 1.4) состоит из вала *1*, сердечника *5* с обмоткой и коллектора *3*. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали (рисунок 1.6 а). Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря (рисунок 1.6 б). Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря (рисунок 1.6 в).

Обмотку *5* выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения (рисунок 1.6 в). Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями, текстолитовыми или гетинаксовыми (рисунок 1.7). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части *3* обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом (рисунок 1.8).

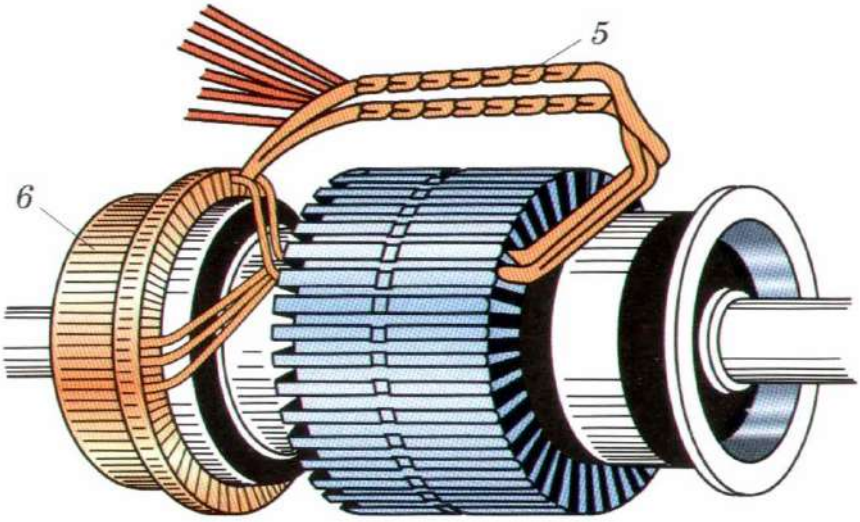
*Коллектор* является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди, собранные таким образом, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами (рисунок 1.9 а) и на пластмассовой втулке (рисунок 1.9 б).




а



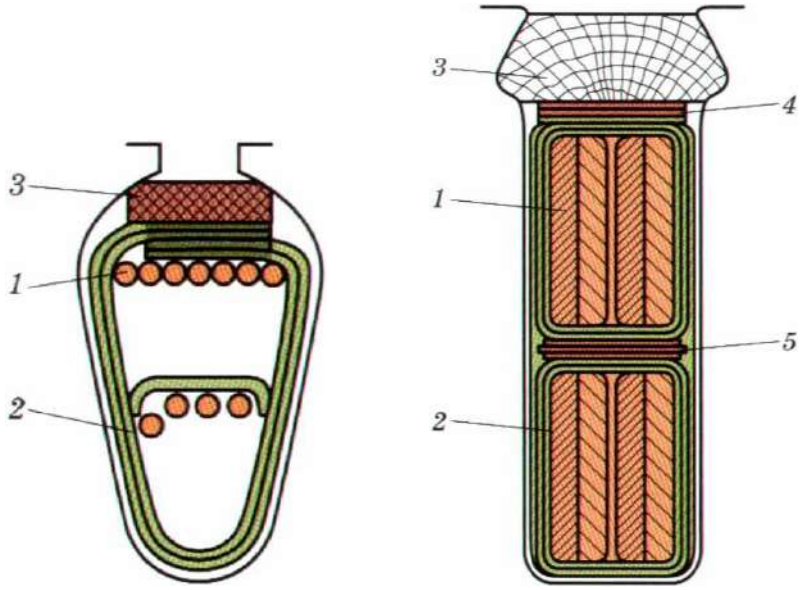

б




в

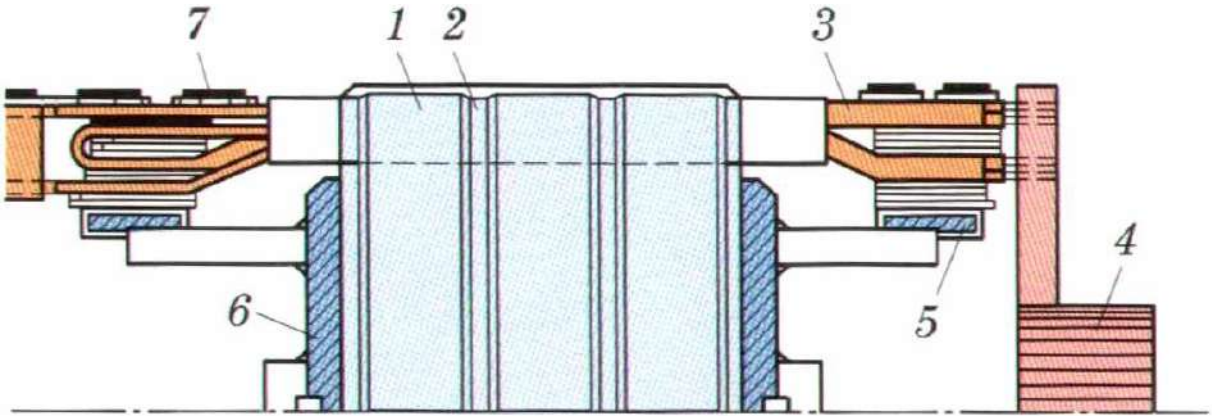
*1 – зубец; 2 – паз; 3 – вентиляционное отверстие; 4 – нажимные шайбы; 5 – обмотка якоря; 6 – коллектор*

Рисунок 1.6 – Конструкция якоря машины постоянного тока




*1 – медные проводники; 2 – изоляция; 3 – клин; 4, 5 – подкладка*

Рисунок 1.7 – Полуоткрытый (а) и открытый (б) пазы якоря

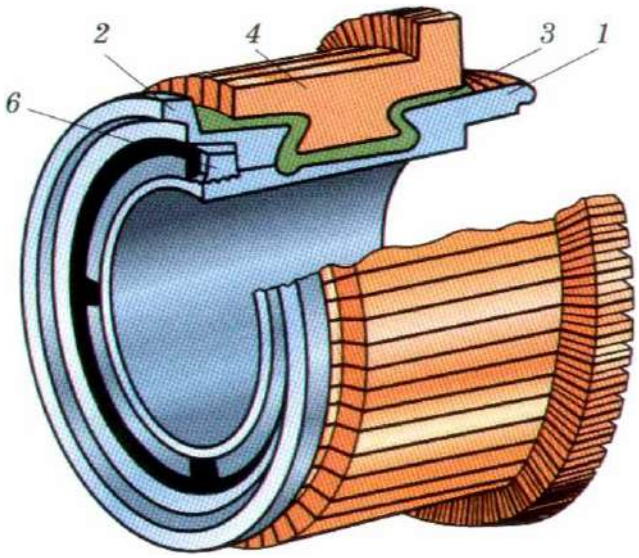



*1 – пакеты; 2 – каналы; 3 – лобовые части обмотки; 4 – коллектор;*
*5 – обмоткодержатель; 6 – нажимные шайбы (фланцы); 7 – бандаж*

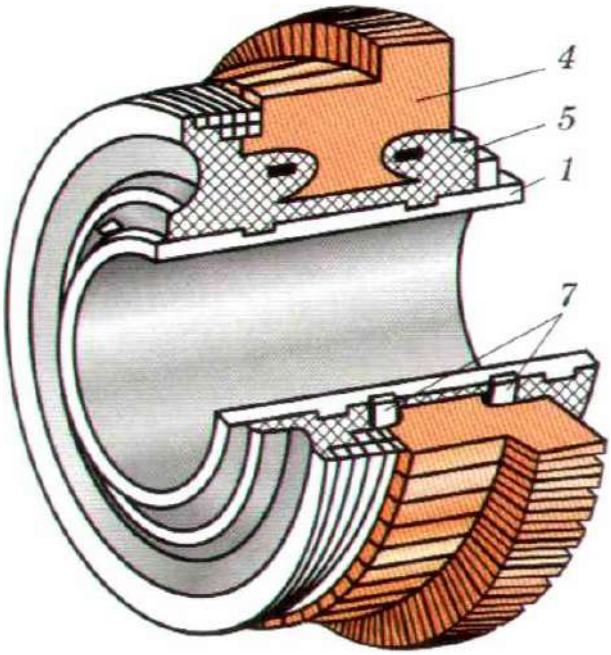
Рисунок 1.8 – Сердечник якоря с обмоткой

На рисунке 1.9 а показано устройство коллектора со стальными конусными шайбами. Нижняя часть коллекторных пластин *4* имеет форму "ласточкина хвоста". После сборки коллектора эти части пластин оказываются зажатыми между стальными шайбами *7*, изолированными от

медных пластин миканитовыми манжетами *3*. Конусные шайбы стянуты стопорным кольцом *6*. Между медными пластинами расположены миканитовые изоляционные прокладки.




а




б

*1, 2 – втулки с клиновидными выступами; 3 – миканитовая манжета; 4 – коллекторная пластина; 5 – пластмасса; 6 – стопорное кольцо; 7 – стальное кольцо*

Рисунок 1.9 – Коллекторы разборный (а) и неразборный (б)

В процессе работы машины рабочая поверхность коллектора постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью коллектора, что вызвало бы вибрацию щеток и нарушение работы машины, между коллекторными пластинами фрезеруют пазы (дорожки) на глубину 0,8…1,5 мм.

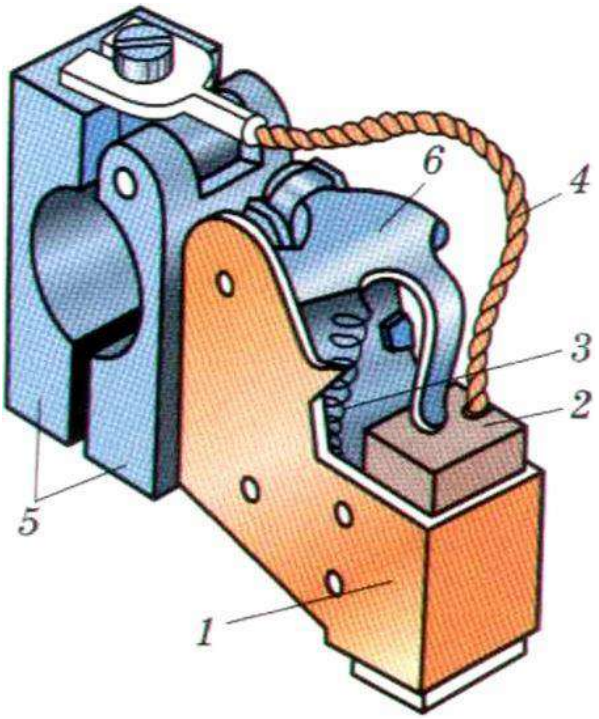
Верхняя часть коллекторных пластин *4* (рисунок 1.9), называемая петушком, имеет узкий продольный паз, в который закладывают проводники обмотки якоря и тщательно припаивают.

В машинах постоянного тока малой мощности часто применяют коллекторы на пластмассовой втулке (рисунок 1.9 б), отличающиеся простотой в изготовлении. Набор медных и миканитовых пластин в таком коллекторе удерживается пластмассой, запрессованной в пространство между набором пластин и стальной втулкой *1* и образующей корпус коллектора. Иногда с целью увеличения прочности коллектора эту пластмассу *5* армируют стальными кольцами *7* (рисунок 1.9 б).

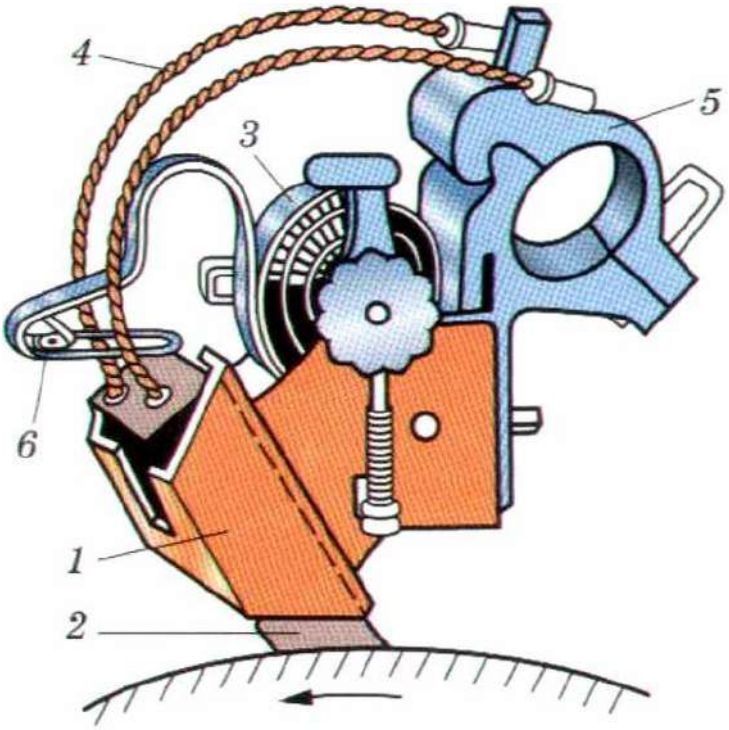
Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством *щеток*, располагаемых в щеткодержателях *4* (рисунок 1.4).

*Щеткодержатель* (рисунок 1.10) состоит из обоймы *1*, в которую помещают щетку *2*, нажимной планки (курка) *6*, представляющую собой откидную деталь, передающую давление пружины *3* на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом *5*. Щетка снабжается гибким тросиком *4* для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины.

Одной из основных условий бесперебойной работы машины – плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим – искрение на коллекторе.




а




б

*1 – обойма; 2 – щетка; 3 – пружина; 4 – медный гибкий шунт; 5 – зажим; 6 – нажимная планка*

Рисунок 1.10 – Щеткодержатели радиальный (а) и реактивный (б)

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита: передний *2* (со стороны коллектора) и задний *9* (рисунок 1.4). В центральной части щита имеется расточка под подшипник *12*. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки, не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор *10* служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что непременным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел – механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость.

*Обмотка якоря* машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.

Обмотка якоря – важнейший элемент машины постоянного тока, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальной мощности, и иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочности, обеспечивающие достаточно продолжительный срок службы машины (до 20 лет);

- конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токосъема с коллектора без вредного искрения;

- расход материала при заданных эксплуатационных показателях (КПД и др.) должен быть минимальным;

- технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

В настоящее время машины постоянного тока выполняют только с барабанными якорями, в которых проводники обмотки укладывают в пазы, расположенные на наружной поверхности сердечника якоря, что упрощает технологию изготовления обмотки, повышает использование провода и делает обмотку более надежной.

Элементом обмотки якоря является *секция*, состоящая из нескольких витков, присоединенная к двум коллекторным пластинам. Число секций равно числу коллекторных пластин. Каждая секция имеет две активные стороны, уложенные в пазы якоря, которые соединяются между собой лобовыми соединениями. Стороны секции располагают так, чтобы одна из них лежала под северным полюсом, а другая под южным, т.е. на расстоянии полюсного деления друг от друга, тогда ЭДС, индуктируемые в проводах секции, складываются. *Полюсным делением* называют расстояние между серединами полюсов по окружности якоря. Расстояние между пазовыми частями секции должно быть равно или мало отличаться от полюсного деления.

Обмотка якоря обычно выполняются двухслойными. Они характеризуются следующими параметрами:

- числом секций;

- числом пазов;

- числом секций, приходящихся на один паз;

- числом витков секции;

- числом пазовых сторон в обмотке;

- числом пазовых сторон в одном пазу.

Секции в обмотке соединяются между собой в определенной последовательности. В зависимости от этого обмотки машин постоянного тока подразделяются на три основных типа: петлевые, волновые и комбинированные. Петлевые и волновые обмотки в свою очередь подразделяются на простые и сложные (многоходовые). По условиям безыскровой работы щеточного контакта (коммутации) и технологичности, ток параллельной ветви не должен превышать 300...350 А. Поэтому с повышением мощности машины и ее тока приходится увеличивать число параллельных ветвей обмотки.

В простой петлевой обмотке якоря (рисунок 1.11) каждая секция присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам.

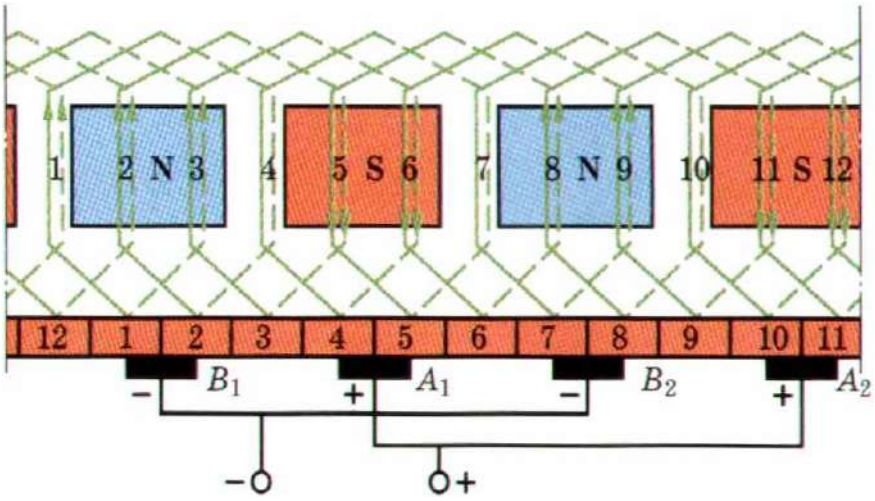
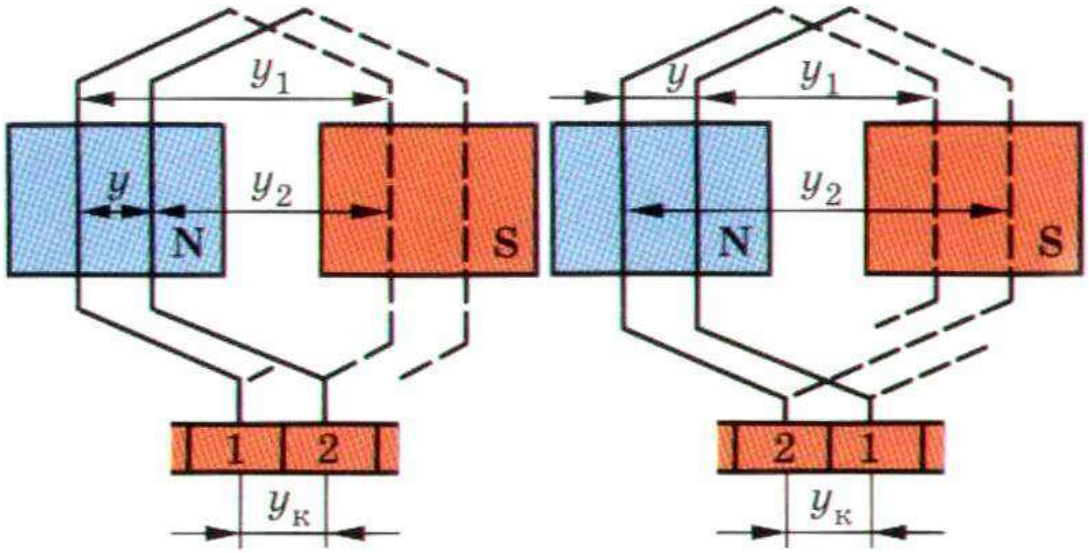



Рисунок 1.11 – Развернутая схема простой петлевой обмотки

При укладке секций на сердечнике якоря начало каждой последующей секции соединяется с концом предыдущей, постепенно перемещаясь при этом по поверхности якоря (и коллектора) так, что за один обход якоря укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции оказывается присоединенным к началу первой секции, т.е. обмотка якоря замыкается. Если укладка секций обмотки ведется слева направо по якорю,

то обмотка называется правоходовой (рисунок 1.12 а), при укладке секций справа налево обмотка называется левоходовой (рисунок 1.12 б).




*а* *б*

*а – неперекрещенное (правоходовая обмотка) соединение секций,*
*б – перекрещенное (левоходовая обмотка) соединение секций*

Рисунок 1.12 – Последовательное соединение секций петлевой обмотки якоря

При необходимости получить петлевую обмотку с большим числом параллельных ветвей (например, для большей силы тока в низковольтных машинах постоянного тока) применяют сложную петлевую обмотку. Такая обмотка представляет собой несколько простых петлевых обмоток, уложенных на одном якоре и присоединенных к одному коллектору. Ширина щеток при сложной петлевой обмотке принимается такой, чтобы каждая щетка одновременно перекрывала столько пластин, сколько простых обмоток входит в состав сложной. При этом простые обмотки оказываются присоединенными параллельно друг другу.

Простую волновую обмотку получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов (рисунок 1.13).

Концы секции простой волновой обмотки присоединены к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстояние шага обмотки по коллектору. За один обход по якорю укладывают столько секций, сколько пар полюсов имеет машина, при этом конец последней по обходу секции присоединяют к пластине, расположенной рядом с исходной.

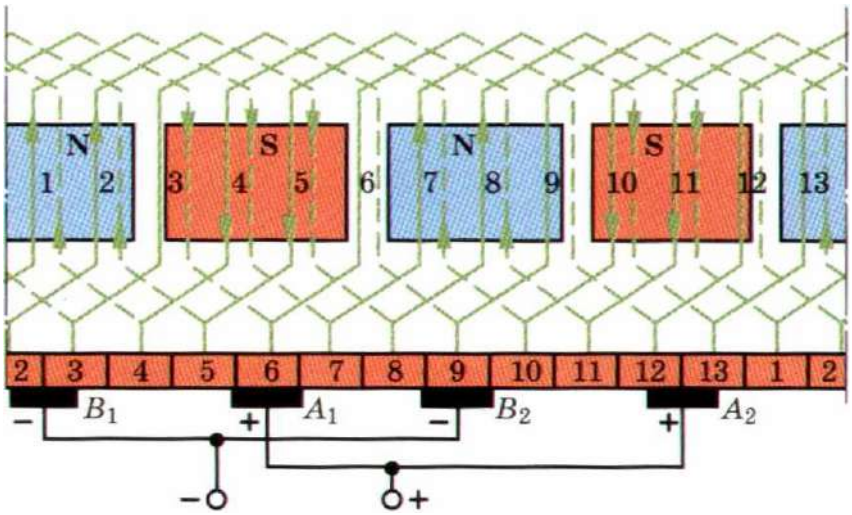
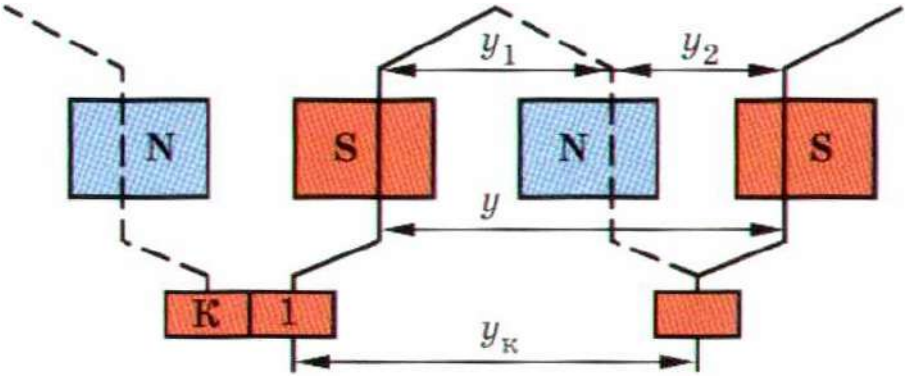



Рисунок 1.13 – Развернутая схема простой волновой обмотки якоря

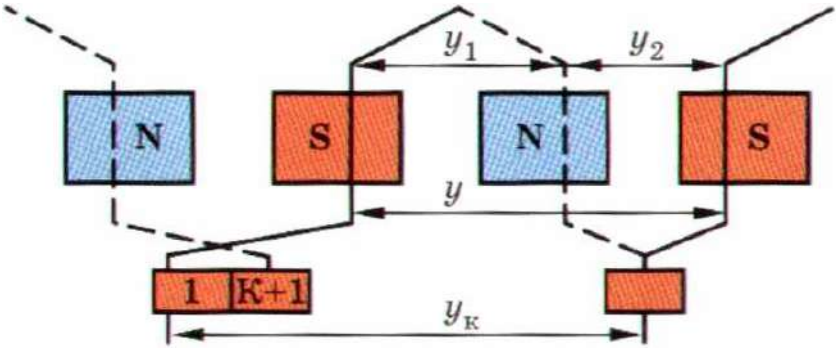
Простую волновую обмотку называют левоходовой, если конец последней по обходу секций присоединяется к пластине, находящейся слева от исходной (рисунок 1.14 а), если же эта пластина находится справа от исходной, то обмотку называют правоходовой (рисунок 1.15 б).

Правоходовая обмотка не получила практического применения, так как ее выполнение связано с дополнительным расходом меди на перекрещивание лобовых частей обмотки.

С целью получения повышенного напряжения в машинах большой мощности применяют сложную волновую обмотку, которую образуют несколько простых волновых обмоток (обычно две), уложенных на одном якоре. Простые обмотки, входящие в состав сложной, соединяют параллельно посредством щеток.




*а*




*б*

*а – левоходовая обмотка, б – правоходовая обмотка*

Рисунок 1.15 – Последовательное соединение секций волновой обмотки якоря

Комбинированная обмотка представляет собой сочетание петлевой и волновой обмоток, расположенных в одних пазах и присоединенных к общему коллектору. Так как каждая из составляющих обмоток двухслойная, то комбинированную обмотку укладывают в пазах якоря в четыре слоя, а к каждой пластине коллектора припаивают по четыре проводника.

Достоинство комбинированной обмотки – большое число параллельных ветвей при отсутствии уравнительных соединений. Однако некоторая технологическая трудность в выполнении комбинированных обмоток ограничивает их применение машинами постоянного тока большой мощности, а также быстроходными машинами, в которых выполнение уравнителей затруднено.

*(назад)*

*Лабораторная работа №1*

# ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОСТОЙ ПЕТЛЕВОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Обмотка якоря состоит из секций, определенным образом уложенных и соединенных с коллектором. Секция представляет собой часть обмотки, присоединенную к двум коллекторным пластинам, и может быть одно- и многовитковой. Каждая секция содержит две активные стороны и лобовые части. При вращении якоря в магнитном поле полюсов в активных сторонах индуктируются электродвижущие силы (ЭДС). Лобовые части служат только для соединения активных сторон. Чтобы ЭДС складывались, активные стороны располагают под полюсами разной полярности. Наибольшая по величине ЭДС секции будет в том случае, когда активные стороны находятся под серединами разноименных полюсов, то есть, на расстоянии полюсного деления.

Якорные обмотки выполняют двухслойными. При укладке обмотки одну сторону секции располагают в нижней части паза, а другую – в верхней части другого паза. Паз, в котором находятся две активные стороны разных секций, называется элементарным ($Z_{эл}$). В реальном пазу может содержаться один или несколько элементарных пазов (рисунок 1).

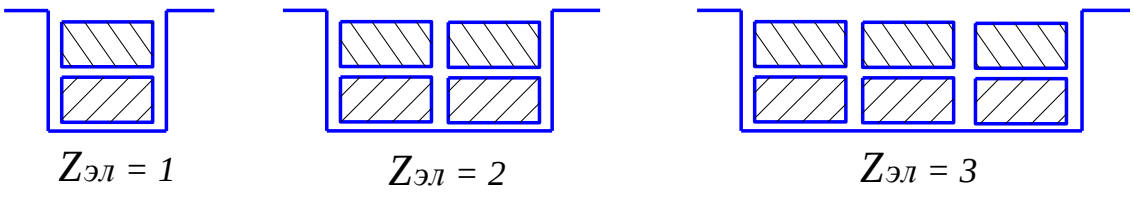



Рисунок 1 – Расположение элементарных пазов в реальных пазах

К каждой коллекторной пластине присоединяются две активные стороны (начало одной секции и конец другой). Поэтому в простых петлевых

обмотках число секций обмотки якоря S равно числу элементарных пазов $Z_{эл}$ и числу коллекторных пластин К.

Существуют следующие типы обмоток: простая петлевая, простая волновая, сложная петлевая, сложная волновая, комбинированная.

Выбор того или иного типа обмотки определяется следующими факторами:

- величиной тока параллельной ветви, который не должен превышать 200…300А;
- номинальным напряжением машины;
- размерами коллектора.

Например, простые волновые обмотки применяются в машинах мощностью до 50 кВт и напряжении 110 В. Простая петлевая обмотка применяется в малых двухполюсных машинах и многополюсных машинах при мощности 300…500 кВт и выше.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* изучить конструкцию простой петлевой обмотки и получить начальные навыки расчета и намотки на сердечнике якоря.

*Программа работы:*

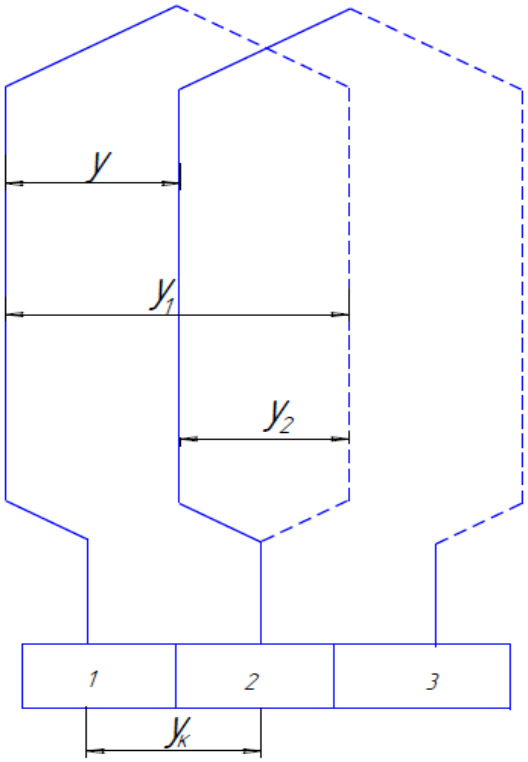
- ✓ рассчитать шаги обмотки;
- ✓ составить таблицу соединений секций;
- ✓ начертить схему обмотки;
- ✓ выполнить укладку в пазы сердечника якоря одновитковых секций.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Расчет шагов*

Простая петлевая обмотка состоит из секций, которые присоединяются к коллекторным пластинам.

Обмотка называется простой, потому что начало секции (сплошная линия) присоединяется к одной коллекторной пластине, а конец (пунктирная линия) - к другой, рядом расположенной пластине (рисунок 2), кроме того, число реальных пазов Z равно числу элементарных.




*$y_1$ – первый шаг, $y_2$ – второй шаг, y – результирующий шаг, $y_К$ – шаг по коллектору*

Рисунок 2 – Расположение шагов секций обмотки

Для расчета обмотки необходимо задать числа пазов якоря и полюсов машины. Первый шаг обмотки – это расстояние между активными сторонами одной секции, выраженное в пазах якоря:

$$y_1 = \frac{Z_{эл} \pm \varepsilon}{2p}, \qquad (1)$$

где $Z_{эл}$ – число элементарных пазов якоря;

$\varepsilon$ – число, позволяющее округлить шаг до целого числа;

$p$ – число пар полюсов обмотки.

Второй шаг обмотки – это расстояние, выраженное в пазах якоря, между концом одной секции и началом следующей секции:

$$y_2 = y_1 - y. \qquad (2)$$

Результирующий шаг обмотки – это расстояние между началами соседних секций. Для простой петлевой обмотки $y$ =1. Шаг по коллектору – это расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединяются начало и конец одной секции.

Для простой петлевой обмотки $y_к = y$ =1.

### *2 Таблица соединений секций и развернутая схема обмотки*

Для построения развернутой схемы обмотки целесообразно составить таблицу соединений (рисунок 3). Рассмотрим ее на конкретном примере:

$$Z = Z_{эл} = K = 16;$$

$$2p = 4;$$

Расчет шагов обмотки выполняется по формулам (1), (2):

$$y_1 = \frac{Z_{эл} \pm \varepsilon}{2p} = \frac{16 + 0}{4} = 4;$$

$$y_2 = y_1 - y;$$

$$y_2 = 4 - 1 = 3.$$

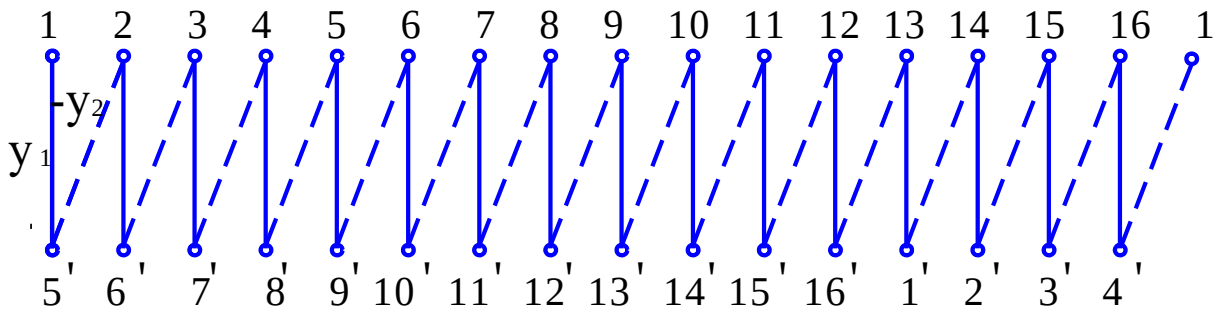



Рисунок 3 – Таблица соединений простой петлевой обмотки

Верхний ряд чисел обозначает номер паза (и номер коллекторной пластины), в котором находится начало секции. Нижний ряд чисел (обозначенных штрихом) – это номер паза, в котором находится конец секции. По таблице соединений вычерчивается развернутая схема обмотки (рисунок 4).

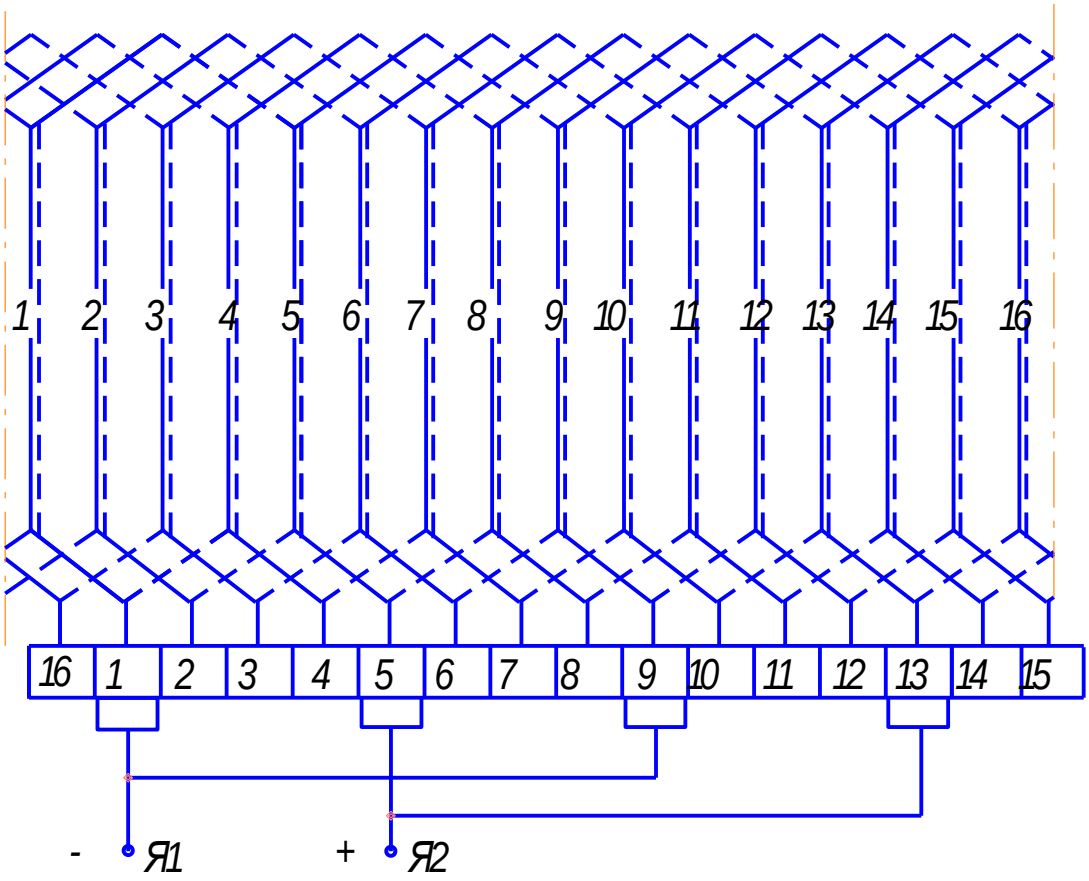



Рисунок 4 – Развернутая схема простой петлевой обмотки

*3 Соединение щеток с параллельными ветвями*

В машинах постоянного тока щетки устанавливаются на геометрических нейтралях и располагаются симметрично по окружности коллектора (рисунок 4).

Параллельной ветвью обмотки якоря называется группа последовательно соединенных секций, в которых индуктируются ЭДС одинакового направления. Параллельная ветвь – это часть обмотки между разнополярными щетками (рисунок 5).

Первая щетка устанавливается на первую коллекторную пластину – по центру первой секции, вторая – через шаг $y_1$, включая первую коллекторную пластину (1+4) = 5 , то есть, на пятую пластину и т. д. Число щеток в машине постоянного тока равно числу полюсов. Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки равно числу полюсов.

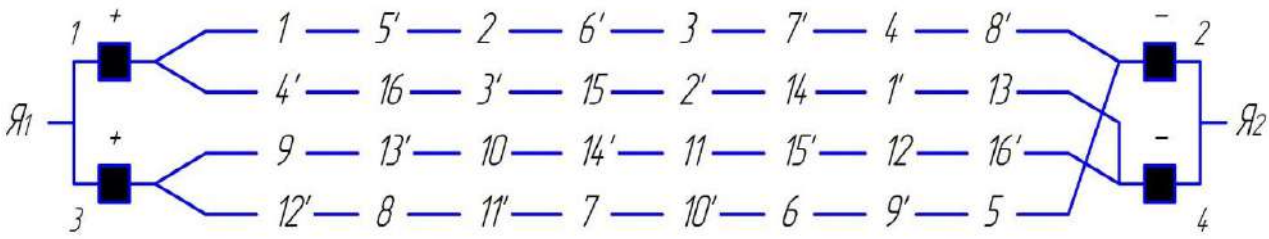



Рисунок 5 – Распределение секций в параллельных ветвях

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Выполнить расчет шагов обмотки по формулам (1), (2).
2. Составить таблицу соединений (рисунок 3).
3. После проверки преподавателем таблицы соединений начертить развернутую схему обмотки и расставить щетки (рисунок 4).
4. Выполнить укладку одновитковых секций в пазы сердечника якоря.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчет шагов обмотки.
2. Таблица соединений.
3. Схема обмотки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется первым шагом обмотки?
2. Как рассчитать первый шаг обмотки?
3. Что называется вторым шагом обмотки?

4. Как рассчитать второй шаг обмотки?

5. Что называется результирующим шагом обмотки?

6. Чему равен результирующий шаг простой петлевой обмотки?

7. Что называется шагом по коллектору?

8. Что называется параллельной ветвью?

9. Чему равно число параллельных ветвей в простой петлевой обмотке?

10. Назовите число щеток в машине постоянного тока с числом $p = 2$.

*(назад)*

*Лабораторная работа №2*

# ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОСТОЙ ВОЛНОВОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Обмотка якоря состоит из секций, определенным образом уложенных и соединенных с коллектором. Секция представляет собой часть обмотки, присоединенную к двум коллекторным пластинам, и может быть одно- и многовитковой. Каждая секция содержит две активные стороны и лобовые части. При вращении якоря в магнитном поле полюсов в активных сторонах индуктируются электродвижущие силы (ЭДС). Лобовые части служат только для соединения активных сторон. Чтобы ЭДС складывались, активные стороны располагают под полюсами разной полярности. Наибольшая по величине ЭДС секции будет в том случае, когда активные стороны находятся под серединами разноименных полюсов, то есть, на расстоянии полюсного деления.

Якорные обмотки выполняют двухслойными. При укладке обмотки одну сторону секции располагают в нижней части паза, а другую – в верхней части другого паза. Паз, в котором находятся две активные стороны разных секций, называется элементарным ($Z_{эл}$). В реальном пазу может содержаться один или несколько элементарных пазов.

К каждой коллекторной пластине присоединяются две активные стороны (начало одной секции и конец другой). Поэтому в простых волновых обмотках число секций обмотки якоря S равно числу элементарных пазов $Z_{эл}$ и числу коллекторных пластин К.

Существуют следующие типы обмоток: простая петлевая, простая волновая, сложная петлевая, сложная волновая, комбинированная.

Выбор того или иного типа обмотки определяется следующими факторами:

- величиной тока параллельной ветви, который не должен превышать 200…300А;

- номинальным напряжением машины;

- размерами коллектора.

Например, простые волновые обмотки применяются в машинах мощностью до 50 кВт и напряжении 110 В.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* изучить конструкцию простой волновой обмотки и получить начальные навыки расчета и намотки на сердечнике якоря.

*Программа работы:*

- ✓ рассчитать шаги обмотки;
- ✓ составить таблицу соединений секций;
- ✓ начертить схему обмотки;
- ✓ выполнить укладку в пазы сердечника якоря одновитковых секций.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

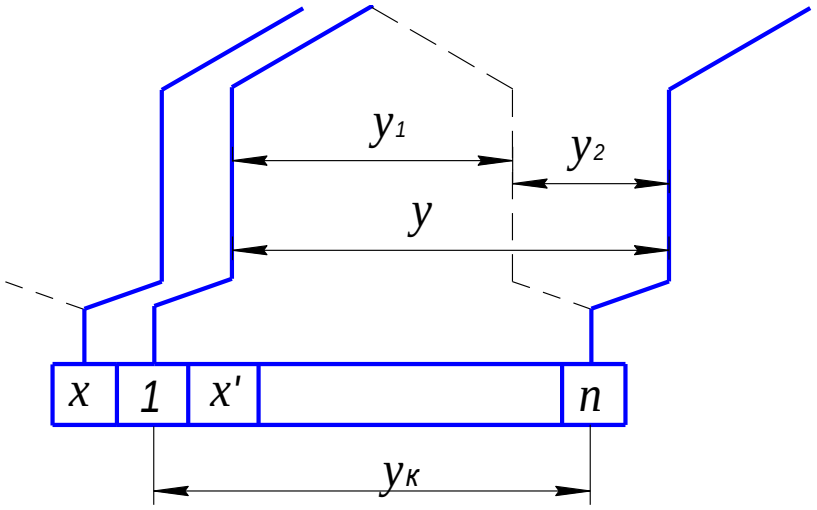
### *1 Расчет шагов*

Простая волновая обмотка состоит из секций, которые присоединяются к коллекторным пластинам (рисунок 1).

Обмотка называется простой потому, что число реальных пазов Z равно числу элементарных.

Если второй обход якоря начинается с номера коллекторной пластины $x$, то обмотка называется левоходовой, а если с номера $x'$, обмотка называется правоходовой. На рисунке 1 изображена секция левоходовой неперекрещивающейся обмотки. Она является более предпочтительной, так как пересечение витков в лобовых соединениях отрицательно сказывается на витковой изоляции.

Для выполнения обмотки необходимо задать числа пазов якоря и полюсов машины.




*$y_1$ - первый шаг; $y_2$ - второй шаг; y - результирующий шаг; $y_k$ - шаг по коллектору; X или X' - номер коллекторной пластины, с которой начинается второй обход якоря при укладке обмотки*

Рисунок 1 – Расположение шагов секций обмотки

Первый шаг обмотки – это расстояние между активными сторонами одной секции, выраженное в пазах якоря:

$$y_1 = \frac{Z_{эл} \pm \varepsilon}{2p}, \quad (1)$$

где $Z_{эл}$ – число элементарных пазов якоря;

$\varepsilon$ – число, позволяющее округлить шаг до целого числа;

$p$ – число пар полюсов обмотки.

Второй шаг обмотки – это расстояние, выраженное в пазах якоря, между концом одной секции и началом соседней секции:

$$y_2 = y - y_1 \quad (2)$$

Результирующий шаг обмотки – это расстояние между началами соседних секций. Для простой волновой обмотки $y = y_k$. Шаг по коллектору –

это расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединяются начало и конец одной секции.

Шаг по коллектору рассчитывается по формуле:

$$y_к = \frac{к \pm 1}{p} \qquad (3)$$

*2 Таблица соединений секций и развернутая схема обмотки*

Для построения развернутой схемы обмотки целесообразно составить таблицу соединений (рисунок 2).

Её составление рассмотрим на примере:

$$Z = Z_{эл} = К = 15;$$

$$2p = 2.$$

Расчет шагов обмотки выполняется по формулам (1)…(3):

$$y_1 = \frac{Z_{эл} - 1}{2p} = \frac{15 - 1}{2} = 7;$$

$$y = y_к = \frac{К - 1}{p} = \frac{15 - 1}{1} = 14;$$

$$y_2 = y - y_1 = 14 - 7 = 7.$$

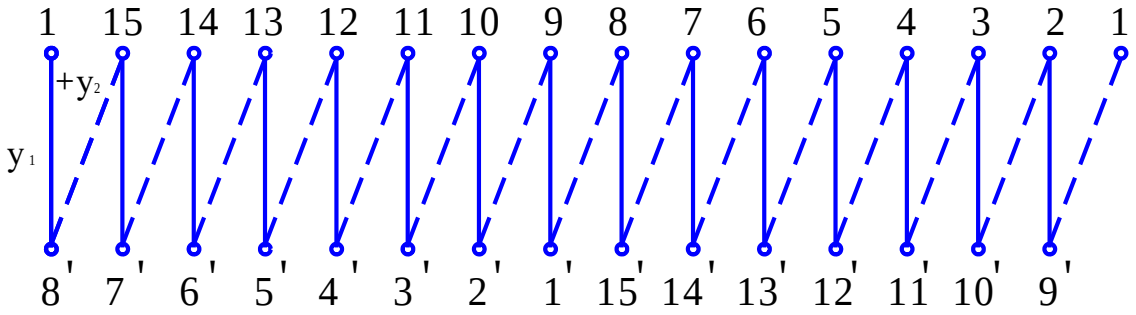



Рисунок 2 – Таблица соединений простой волновой обмотки

Верхний ряд чисел обозначает номер паза (и номер коллекторной пластины), в котором находится начало секции. Нижний ряд чисел (обозначенных штрихом) – это номер паза, в котором находится конец

секции. По таблице соединений вычерчивается развернутая схема обмотки (рисунок 3).

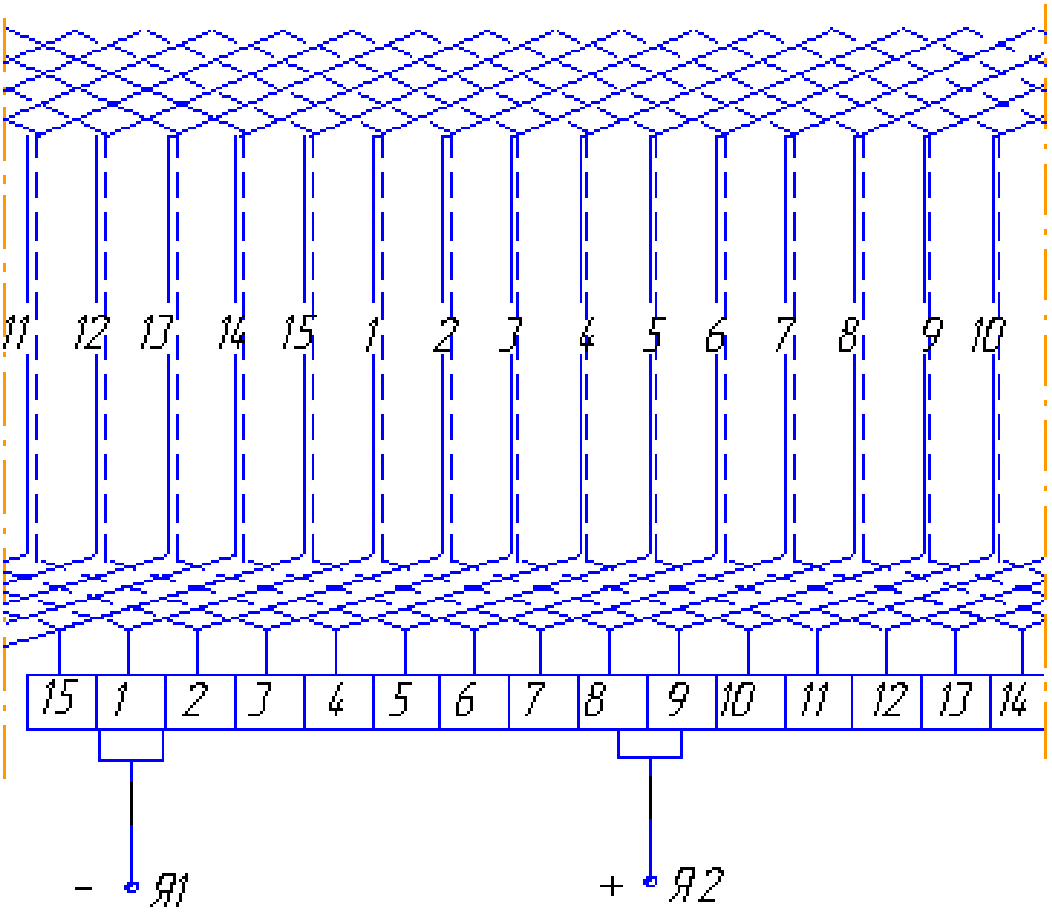



Рисунок 3 – Развернутая схема простой волновой обмотки

*3 Соединение щеток с параллельными ветвями*

Параллельной ветвью обмотки якоря называется группа последовательно соединенных секций, в которых индуктируются ЭДС одинакового направления. Параллельная ветвь – это часть обмотки между разнополярными щетками (рисунок 4).

Первая щетка устанавливается на первую коллекторную пластину, вторая – через шаг $y_1$, включая первую коллекторную пластину (1+7) = 8, то есть, на восьмую пластину и т. д.

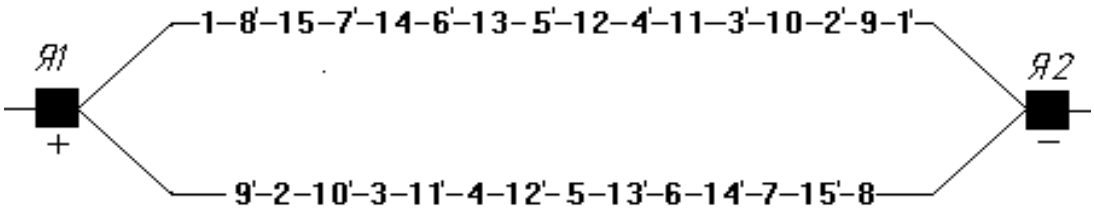



Рисунок 4 – Распределение секций в параллельных ветвях

Число щеток в машине постоянного тока равно числу полюсов. Число параллельных ветвей простой волновой обмотки всегда равно двум.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Выполнить расчет шагов обмотки по формулам (1)… (3).
2. Составить таблицу соединений (рисунок 3).
3. После проверки преподавателем таблицы соединений начертить развернутую схему обмотки и расставить щетки (рисунок 3).
4. Выполнить укладку одновитковых секций в пазы сердечника якоря.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчет шагов обмотки.
2. Таблица соединений.
3. Схема обмотки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется первым шагом обмотки?
2. Как рассчитать первый шаг обмотки?
3. Что называется вторым шагом обмотки?
4. Как рассчитать второй шаг обмотки?
5. Что называется результирующим шагом обмотки?
6. Как рассчитать результирующий шаг простой волновой обмотки?

7. Что называется шагом по коллектору?

8. Что называется параллельной ветвью?

9. Чему равно число параллельных ветвей в простой волновой обмотке?

10. Назовите число щеток в машине постоянного тока с числом $p = 3$.

*(назад)*

*Лабораторная работа №3*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Машина постоянного тока может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. В данной работе исследуется генераторный режим. Свойства генераторов постоянного тока определяются, в основном, способом питания обмотки возбуждения.

Существуют следующие типы генераторов:

- с независимым возбуждением – обмотка возбуждения подключена к внешнему источнику постоянного тока;

- с параллельным возбуждением - обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря и нагрузке;

- с последовательным возбуждением - обмотка возбуждения подключена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;

- со смешанным возбуждением – одна обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно с ней и нагрузкой.

Генераторы со вторым, третьим и четвертым способами возбуждения относятся к генераторам с самовозбуждением. Параллельная обмотка возбуждения обозначается буквами Ш1 и Ш2. Она имеет большое число витков из провода малого сечения. При независимом возбуждении ее подключают к внешнему источнику постоянного тока.

Последовательная обмотка возбуждения обозначается буквами С1 и С2. Она состоит из меньшего числа витков большего сечения, чем параллельная обмотка возбуждения.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* исследовать характеристики генератора постоянного тока. Рассчитать критическое сопротивление цепи возбуждения.

*Программа работы:*

- ✓ ознакомиться с лабораторным стендом и записать технические данные генератора постоянного тока;
- ✓ измерить параметры для построения внешней и регулировочной характеристик, а также характеристики холостого хода при самовозбуждении генератора;
- ✓ измерить параметры для построения внешней характеристики при независимом возбуждении генератора;
- ✓ построить характеристику холостого хода и определить критическое значение сопротивления цепи возбуждения;
- ✓ по заданным исходным данным построить вольт-амперную характеристику цепи возбуждения и определить величину сопротивления реостата, введённого в цепь обмотки возбуждения;
- ✓ построить регулировочную характеристику;
- ✓ в одной системе координат построить внешние характеристики для независимого и самовозбуждения генератора.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1.

Генератор постоянного тока G приводится во вращение синхронным двигателем М, частота вращения которого определяется частотой питающего напряжения и не зависит от нагрузки на валу.

Синхронный двигатель запускается в следующей последовательности:

1. Устанавливают переключатель SA2 в положение **"пуск"** (возбудитель отключен) и выключателем QF2 подают трехфазное переменное напряжение.

2. Через 5…10 секунд, когда двигатель разгонится, переключатель SA2 переводят в положение **"работа"** (подключают возбудитель синхронного двигателя).

3. Реостатом RP3 регулируют возбуждение синхронного двигателя таким образом, чтобы ток, измеряемый амперметром PA3, был наименьшим (1…2А).

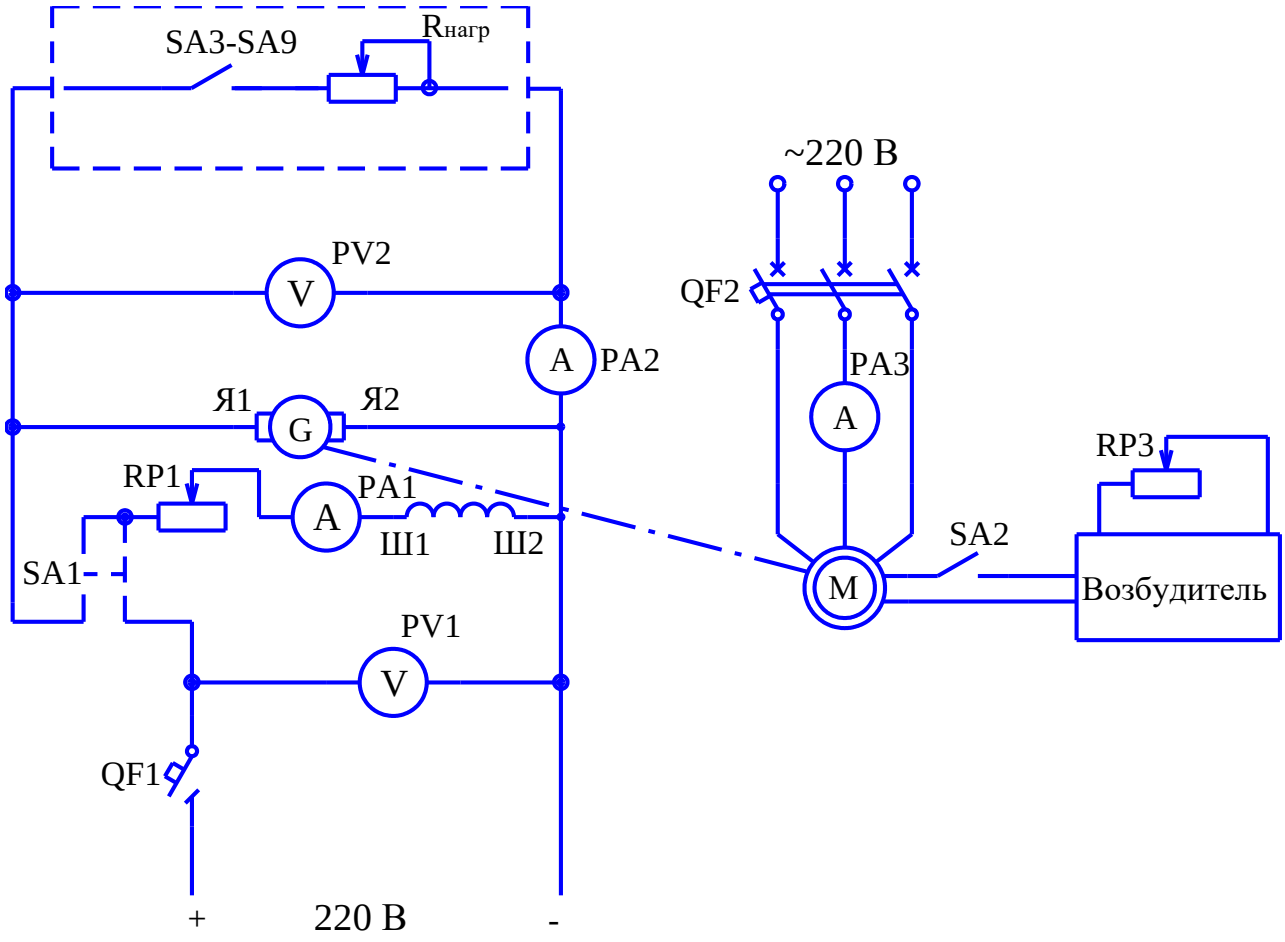



Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

В схеме установки предусмотрено изменение способа возбуждения генератора переключателем SA1. Независимое постоянное напряжение подается автоматическим выключателем QF1. Ток в обмотке возбуждения регулируется последовательно соединенным с ней реостатом RP1. Величина нагрузки, подключенной к генератору, регулируется выключателями SA3…SA9.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Характеристика холостого хода*

Характеристикой холостого хода (х.х.) генератора постоянного тока называется зависимость электродвижущей силы (ЭДС) обмотки якоря от тока возбуждения $E_0 = f(I_B)$ при условиях: ток нагрузки равен нулю, частота вращения якоря – постоянная и номинальная.

Примерный вид характеристики х.х. показан на рисунке 2. Она имеет две ветви: восходящую и нисходящую. Нисходящая ветвь, вследствие остаточного магнетизма, проходит несколько выше восходящей. Расчетной характеристикой х.х. является средняя линия между ветвями.

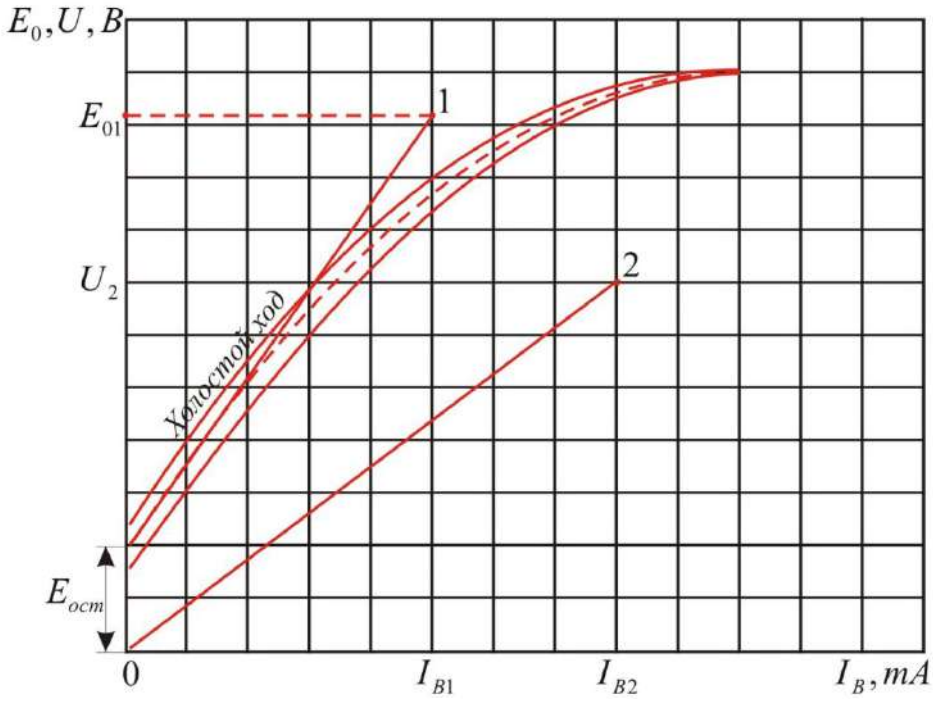



Рисунок 2 – Характеристика холостого хода

Характеристика х.х. имеет важное значение при исследовании генератора, так как она подобна магнитной характеристике – зависимости магнитного потока от магнитодвижущей силы (тока возбуждения) $\Phi = f(I_B)$ и позволяет судить о магнитных свойствах машины.

По характеристике х.х. можно определить критическое значение сопротивления цепи возбуждения при самовозбуждении генератора. Для этого необходимо на прямолинейном участке расчетной характеристики (или его продолжении) произвольно взять точку 1 с координатами $E_{01}$, $I_{B1}$ и произвести расчет по формуле:

$$R_{кр} = \frac{E_{01} - E_{ост}}{I_{B1}} \quad , \tag{1}$$

где $R_{кр}$ – критическое сопротивление, Ом;

$E_{01}$ – величина ЭДС, соответствующая точке 1, В;

$E_{ост}$ – остаточная ЭДС, В;

$I_{B1}$ – величина тока возбуждения, соответствующая точке 1, А.

Общее сопротивление цепи возбуждения генератора определяется из выражения:

$$R_{в} = R_{р} + R_{ш}, \tag{2}$$

где $R_{р}$ – сопротивление регулировочного реостата, введенное в цепь, Ом;

$R_{ш}$ – сопротивление обмотки параллельного возбуждения, Ом.

Процесс самовозбуждения генератора начинается только при сопротивлении цепи возбуждения меньшем его критического значения, то есть, $R_{в} < R_{кр}$. Это значит, что вольт-амперная характеристика цепи возбуждения (отрезок 0-2 на рисунке 2) должна проходить ниже характеристики х.х.

Зная величину напряжения $U_2$ и тока возбуждения $I_{B2}$ , для произвольно выбранной точки 2 вольт-амперной характеристики цепи возбуждения, легко определить введенное сопротивление регулировочного реостата по формуле:

$$R_{р} = \frac{U_2}{I_{B2}} - R_{ш} . \tag{3}$$

*2 Внешняя характеристика генератора с самовозбуждением*

Внешней характеристикой генератора с самовозбуждением называется зависимость напряжения от тока нагрузки $U = f(I_н)$ при условиях: постоянной и номинальной частоте вращения; постоянном сопротивлении цепи возбуждения. При этом напряжение и ЭДС генератора связаны выражением:

$$U = E - I_Я \cdot \Sigma R, \tag{4}$$

где $I_Я$ – ток якоря, А;

$\Sigma R$ – суммарное сопротивление включенных последовательно обмоток якоря, компенсационной и добавочных полюсов, Ом.

Примерный вид внешних характеристик генератора приведен на рисунке 3. С увеличением тока нагрузки напряжение постепенно снижается. Для генератора с самовозбуждением это объясняется следующим:

- падением напряжения на внутреннем сопротивлении генератора, которое в данной работе состоит только из сопротивления обмотки якоря $R_Я$;
- размагничивающим действием поперечной реакции якоря;
- уменьшением тока обмотки возбуждения, которая питается напряжением генератора.

Для номинального режима работы изменение напряжения генератора рассчитывается по формуле:

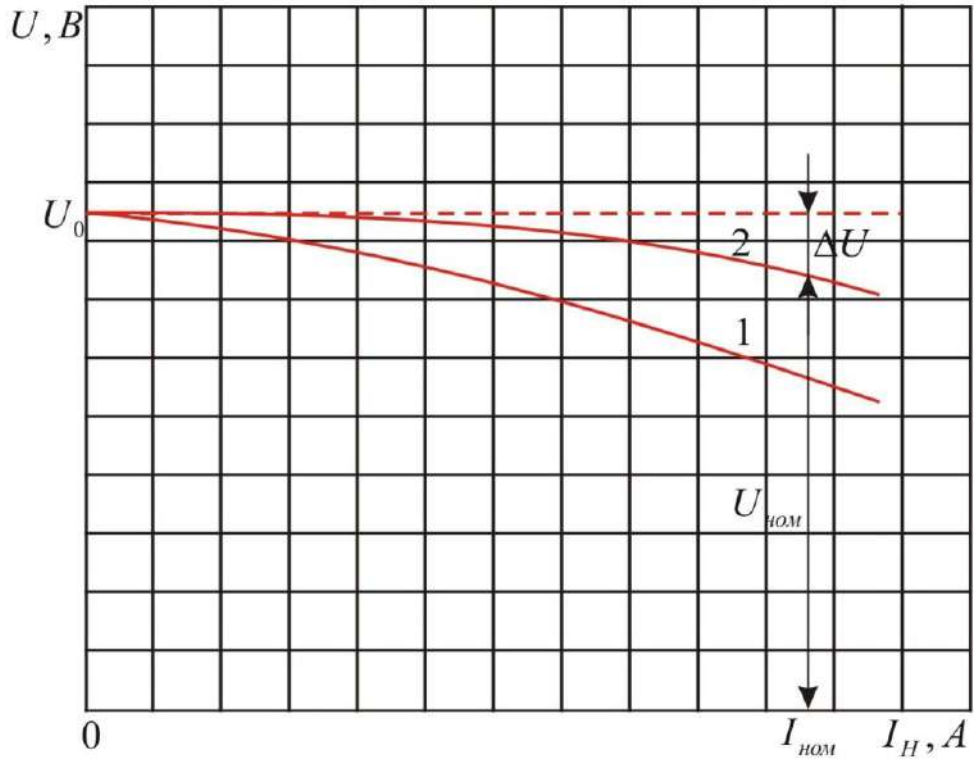
$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \tag{5}$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение генератора под нагрузкой, В;

$U_0$ – напряжение холостого хода, В.

*3 Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением*

При независимом возбуждении внешняя характеристика снимается при условиях: постоянной и номинальной частоте вращения; постоянном токе возбуждения. Она представлена на рисунке 3. Эта характеристика проходит выше, чем при самовозбуждении, так как напряжение уменьшается только под действием первых двух причин, указанных в п.2.




1 – *для генератора с самовозбуждением;*

2 – *для генератора с независимым возбуждением*

Рисунок 3 – Внешние характеристики генератора

*4 Регулировочная характеристика*

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_B = f(I_H)$ при условиях: постоянных и номинальных частоте вращения и напряжении. Эта характеристика позволяет определить, какую величину тока возбуждения нужно установить при

изменении нагрузки генератора. Примерный вид регулировочной характеристики приведен на рисунке 4.

Степень регулирования тока возбуждения рассчитывается по формуле:

$$\Delta I_B = \frac{I_{B.ном} - I_{B0}}{I_{B0}} \cdot 100\%, \qquad (6)$$

где $I_{B.ном}$ – ток возбуждения при номинальном токе нагрузки, А;

$I_{B0}$ – ток возбуждения при холостом ходе.

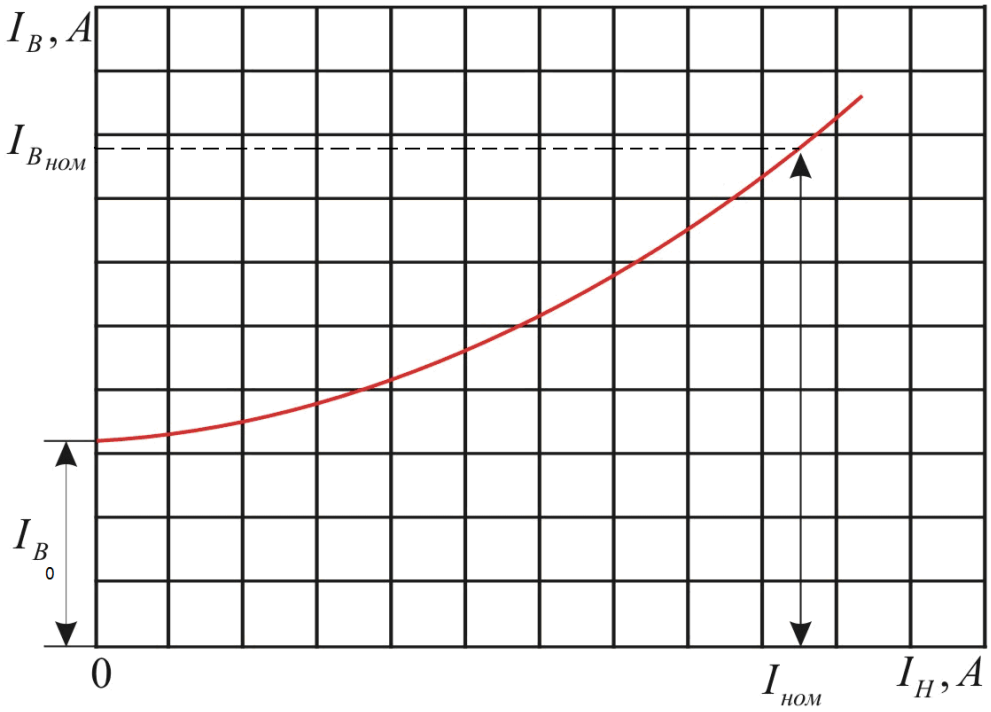



Рисунок 4 – Регулировочная характеристика генератора

## ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА

*Характеристика холостого хода*

1. Установить переключатель SA1 в положение **"независимое"**, а тумблеры SA3…SA9 в нижнее положение (нагрузка отключена), запустить синхронный двигатель (см. п. 3) и записать в таблицу 1 величину остаточной ЭДС.

2. Установить переключатель SA1 в положение **"самовозбуждение"** и, постепенно увеличивая реостатом RP1 ток возбуждения, записать значения ЭДС и тока возбуждения для восходящей ветви характеристики.

3. Постепенно уменьшая ток возбуждения, записать значения ЭДС и тока возбуждения для нисходящей ветви характеристики. Для измерения остаточной ЭДС сделать переключения, указанные в пункте 1.

Таблица 1 – Характеристика холостого хода

| $E_0, B$ | | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 200 | 150 | 100 | 75 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_в, mA$ | 0 | | | | | | | | | | 0 |

4. Построив характеристику х.х., определить критическое сопротивление цепи возбуждения генератора по формуле 1.

5. Приняв значения параметров вольт-амперной характеристики цепи возбуждения для точки 2, соответственно: $U_2$ = 146 В, $I_{B2}$ = 0,2 А, а также $R_ш$ = 530 Ом, построить в одних координатах с характеристикой х.х. вольт-амперную характеристику цепи возбуждения и по формулам 2 и 3 рассчитать величину введенного сопротивления регулировочного реостата и общее сопротивление цепи возбуждения.

*Внешняя характеристика (режим самовозбуждения)*

1. Реостатом RP1 установить ток возбуждения, при котором генератор вырабатывает напряжение 230 В.

2. Поочередно подключая ступени нагрузки выключателями SA3…SA9, записать значения напряжения и тока нагрузки (приборы PV2 и PA2) в таблицу 2.

Таблица 2 – Внешняя характеристика генератора с самовозбуждением

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U, B$ | 230 | | | | | | | |
| $I_H, A$ | 0 | | | | | | | |

*Внешняя характеристика (режим независимого возбуждения)*

1. Установить переключатель SA1 в положение **"независимое"** и выключателем QF1 подать в цепь возбуждения независимое постоянное напряжение.

2. Реостатом RP1 установить ток возбуждения, при котором генератор вырабатывает напряжение 230 В.

3. Поочередно подключая ступени нагрузки выключателями SA3…SA9, записать значения напряжения и тока нагрузки (приборы PV2 и PA2) в таблицу 3.

4. Рассчитать изменение напряжения генератора по формуле 5.

Таблица 3 – Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U, B$ | 230 | | | | | | | |
| $I_H, A$ | 0 | | | | | | | |

*Регулировочная характеристика*

1. При отключенной нагрузке установить реостатом RP1 ток возбуждения, при котором генератор вырабатывает напряжение 200В.

2. Поочередно подключая ступени нагрузки выключателями SA3…SA9 и поддерживая постоянным напряжение (регулируя ток возбуждения), записать значения токов возбуждения и нагрузки (приборы PA1 и PA2) в таблицу 4.

3. Рассчитать степень регулирования тока возбуждения по формуле 6.

Таблица 4 – Регулировочная характеристика

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_в, mA$ | | | | | | | | |
| $I_н, A$ | | | | | | | | |

При снятии внешней и регулировочной характеристик не следует перегружать генератор. **Величина тока, измеряемая амперметром PA2, не должна превышать 10 А!**

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Паспортные данные генератора.

2. Принципиальная схема установки.

3. Таблицы с измеренными параметрами характеристик.

4. Характеристика холостого хода и вольт-амперная характеристика цепи возбуждения в одной системе координат.

5. Внешние характеристики при независимом и самовозбуждении в одной системе координат.

6. Регулировочная характеристика.

7. Расчет параметров $R_{кр,}$ $R_{р,}$ $R_в$, $\Delta U$ , $\Delta I_в$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется характеристикой холостого хода генератора постоянного тока, и при каких условиях она снимается?

2. Что называется внешней характеристикой генератора, и какие условия необходимо выполнять при независимом и самовозбуждении генератора?

3. Почему с увеличением тока нагрузки уменьшается напряжение генератора?

4. Что называется регулировочной характеристикой генератора, и при каких условиях она снимается?

5. Почему сопротивление цепи возбуждения генератора должно быть меньше критического значения?

6. В каких режимах может работать машина постоянного тока?

7. Конструктивно, чем отличается двигатель постоянного тока от генератора постоянного тока?

8. Какие бывают схемы, подключения обмоток возбуждения генератора постоянного тока?

9. Какими буквами обозначаются выводы обмотки возбуждения?

10. По какой характеристике генератора, можно определить критическое значение сопротивления цепи возбуждения?

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед подачей напряжения на схему стенда предупредить об этом своих товарищей.

2. Перед включением генератора в режиме "**САМОВОЗБУЖДЕНИЕ"** независимое постоянное напряжение, подаваемое в цепь возбуждения, должно быть отключено.

3. В случае выхода из синхронизма синхронного двигателя и его остановки немедленно разомкнуть выключателем QF2 цепь питания двигателя.

*(назад)*

*Лабораторная работа №4*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Машина постоянного тока может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. В данной работе исследуется двигательный режим.

В двигателе смешанного возбуждения магнитный поток создается в результате совместного действия двух обмоток возбуждения: параллельной и последовательной. Возможно согласное или встречное соединение обмоток возбуждения, однако встречное включение применяется реже.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* исследовать характеристики двигателя постоянного тока при согласном и встречном включении обмоток возбуждения.

*Программа работы:*

- ✓ ознакомиться со схемой установки, записать технические данные двигателя постоянного тока;
- ✓ снять, рассчитать и построить рабочие характеристики двигателя при встречном соединении обмоток возбуждения;
- ✓ снять и построить в одной системе координат скоростные характеристики при встречном и согласном соединении обмоток возбуждения;
- ✓ построить механическую характеристику двигателя при встречном соединении обмоток возбуждения.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1. Постоянное напряжение подается к стенду выключателем QF1. Двигатель постоянного тока (ДПТ) запускается пусковым реостатом ПП1124, который

автоматически переключает ступени пускового сопротивления ($R_n$). Реостат RP1 предназначен для регулировки тока возбуждения параллельной обмотки возбуждения двигателя. Переключателем SA1 последовательная и параллельная обмотки возбуждения соединяются согласно или встречно.

Нагрузка на валу двигателя создается генератором постоянного тока.

Выключатель QF2 соединяет генератор с нагрузкой ($R_H$). Регулируя реостатом RP2 ток возбуждения параллельной обмотки возбуждения генератора, плавно загружают двигатель.

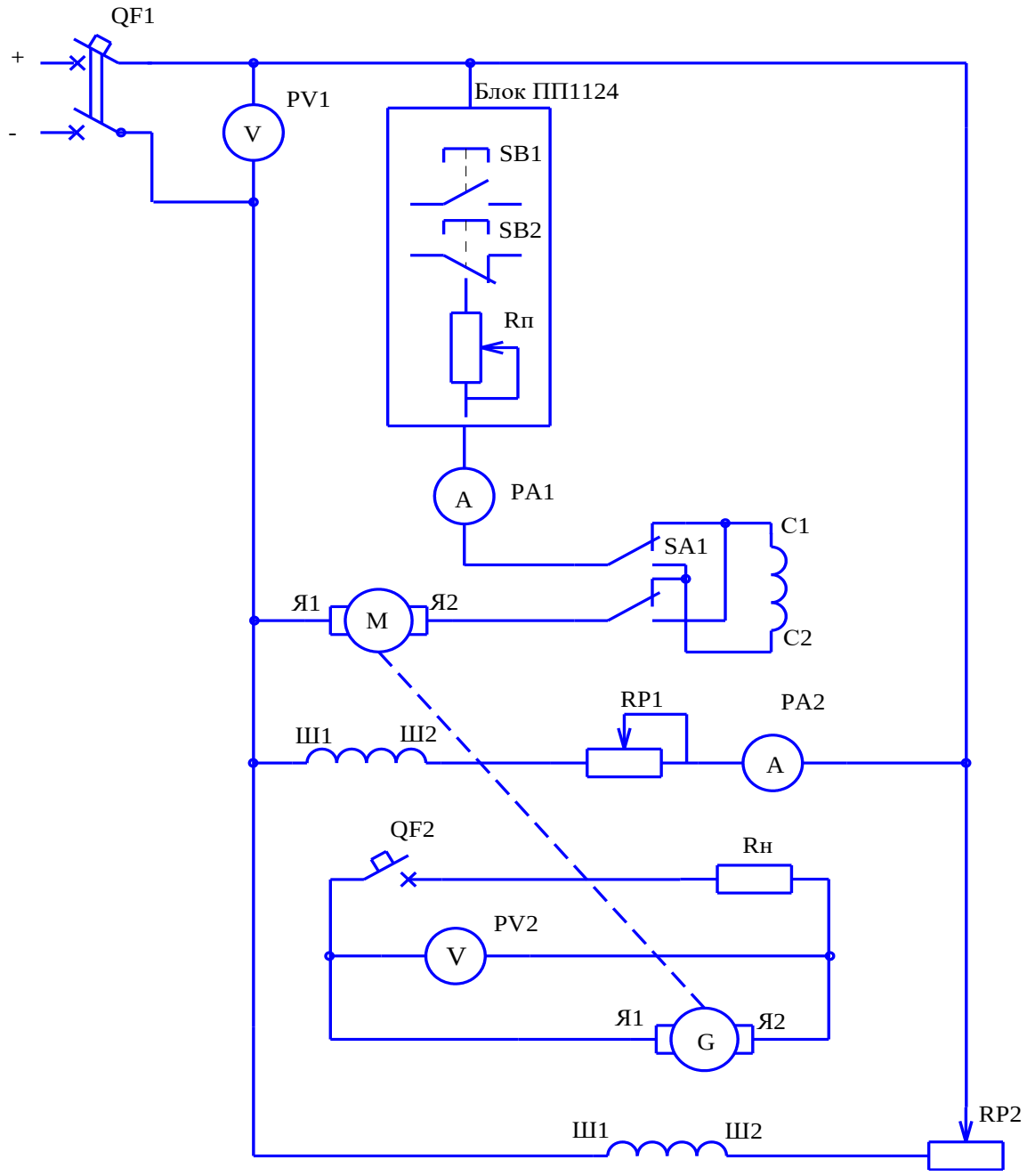



Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## *1 Определение величины номинального тока возбуждения электродвигателя*

Величину номинального тока возбуждения электродвигателя определяют следующим образом:

- установить переключатель SA1 в положение **"встречно"**, подать постоянное напряжение автоматическим выключателем QF1 и, нажав кнопку SB1, запустить электродвигатель;

- выключателем QF2 подключить нагрузку к генератору постоянного тока и реостатом RP1 установить ток возбуждения двигателя, при котором его частота вращения будет равна 1500 мин$^{-1}$;

- реостатами RP2 и RP1 отрегулировать загрузку двигателя и частоту вращения, добиваясь соответствия величин тока якоря и частоты вращения их номинальным (паспортным) значениям.

Ток возбуждения, при котором достигнуто это соответствие, и есть номинальный ток возбуждения двигателя. Его величину записывают и поддерживают постоянной в процессе снятия рабочих характеристик.

## *2 Рабочие характеристики двигателя постоянного тока*

Рабочими характеристиками ДПТ называются зависимости частоты вращения вала двигателя $n$, тока якоря $I_я$, вращающего момента *M*, коэффициента полезного действия $\eta$ и подводимой к двигателю мощности $P_1$ от полезной мощности на валу $P_2$. Эти характеристики снимаются при постоянных и номинальных питающем напряжении и токе возбуждения электродвигателя. Примерный вид характеристик представлен на рисунке 2.

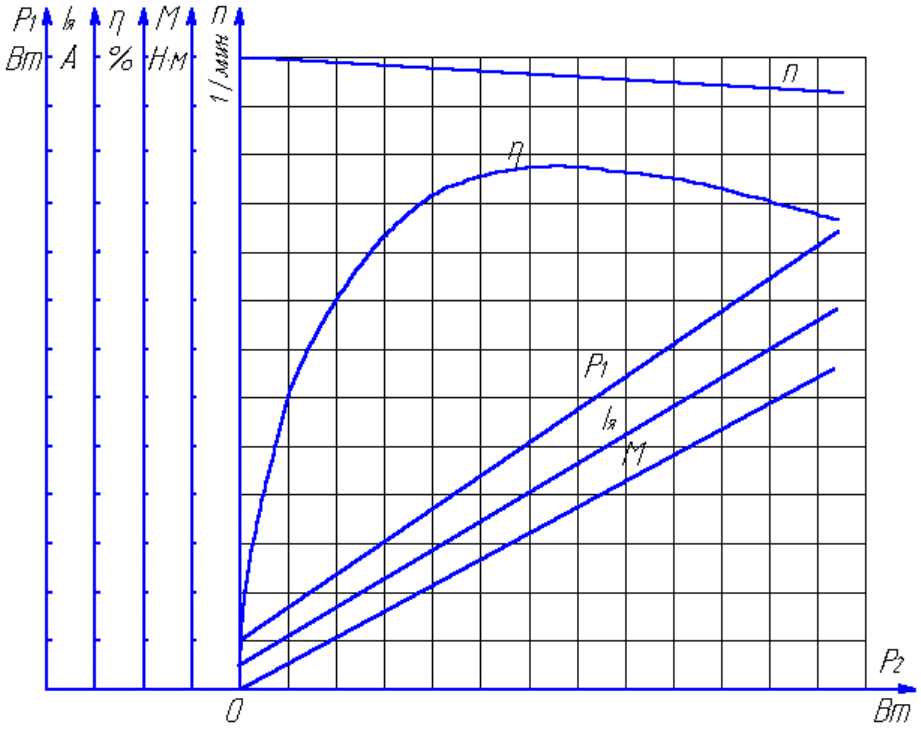



Рисунок 2 – Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Порядок снятия рабочих характеристик следующий:

- выключателем QF2 отключить нагрузку от генератора и установив реостатом RP1 номинальный ток возбуждения ДПТ, записать в таблицу 1 напряжение *U*, ток якоря $I_я$ , частоту вращения *n*. Это параметры холостого хода двигателя;

- подключив нагрузку к генератору и регулируя его ток возбуждения, постепенно загружают двигатель, устанавливая значения тока якоря, указанные в таблице. Максимальный ток якоря не должен превышать 10А. Данные записывают в таблицу 1.

Таблица 1 – Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

| $U$ | $I_я$ | $n$ | $P_1$ | $P_{ст} + P_{мех}$ | $P_{эл.а}$ | $P_{эл.в}$ | $P_д$ | $P_2$ | $\eta$ | $M$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *В* | *А* | *мин*$^{-1}$ | *Вт* | *Вт* | *Вт* | *Вт* | *Вт* | *Вт* | *%* | *Нм* |
| | 1 | | | | | | | | | |
| | 5 | | | | | | | | | |
| | 7 | | | | | | | | | |
| | 8,6 | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | |

*3 Скоростные характеристики*

Скоростные характеристики – это зависимость частоты вращения вала двигателя от тока якоря $n = f(I_Я)$ при постоянных и номинальных напряжении и токе возбуждения. Данные для построения скоростной характеристики при встречном соединении обмоток возбуждения получают в процессе снятия рабочих характеристик.

При отключенной нагрузке генератора переводят переключатель SA1 в положение **"согласно"**. Поддерживая номинальный ток возбуждения, постепенно загружают ДПТ, измеряя частоту вращения и ток якоря. Обе скоростные характеристики строятся в одной системе координат. Их примерный вид приведен на рисунке 3.

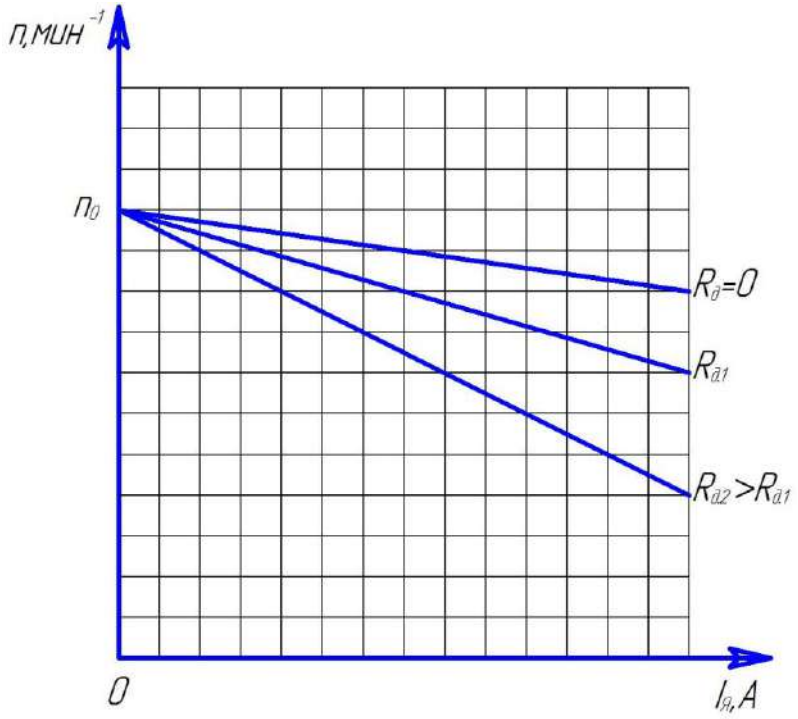



Рисунок 3 – Скоростные характеристики двигателя постоянного тока

Так как результирующий магнитный поток при согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения с увеличением нагрузки (тока якоря) возрастает, то скоростная характеристика в этом случае

более "мягкая" (падающая), чем при встречном соединении обмоток возбуждения. Это поясняется выражением скоростной характеристики:

$$n = \frac{U - I_Я R_Я}{C_e \Phi} \quad , \tag{1}$$

где $U$ – питающее напряжение, В;

$I_Я$ – ток якоря, А;

$R_Я$ – сопротивление цепи якоря, Ом;

$\Phi$ – результирующий магнитный поток, Вб;

$C_e$ – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины и не зависящий от режима ее работы.

## *4 Механические характеристики*

Механической характеристикой двигателя постоянного тока называется зависимость частоты вращения от вращающего момента $n = f(M)$.

Примерный вид механических характеристик при различных добавочных сопротивлениях в цепи якоря $R_д$ представлен на рисунке 4.

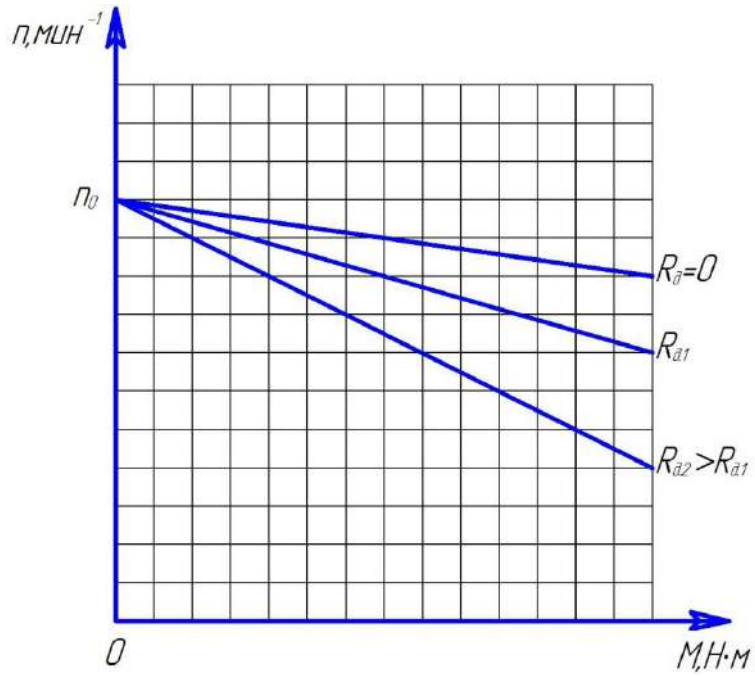


Рисунок 4 – Механические характеристики двигателя постоянного тока

Чаще всего для двигателя смешанного возбуждения применяют согласное включение обмоток возбуждения. Механические характеристики такого электродвигателя занимают промежуточное положение между характеристиками двигателей последовательного и параллельного возбуждения.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### *Потери мощности электрические в цепи якоря*

Потери мощности электрические в цепи якоря определяются по формуле:

$$P_{ЭЛ.Я} = I_Я^2 \cdot \left(R_{Я20} + R_{С20}\right) \cdot 1{,}22, \qquad (2)$$

где $P_{ЭЛ.Я}$ – электрические потери мощности, Вт;

$R_{Я20}$ = 2,830 Ом – сопротивление цепи якоря с учетом сопротивления щеточного контакта при температуре $20^\circ C$;

$R_{С20}$=0,964 Ом – сопротивление последовательной обмотки возбуждения при температуре $20^\circ C$.

### *Сумма потерь мощности механических и в стали*

Для данной установки сумма потерь мощности механических и в стали приближенно определяется по формуле:

$$P_{ст} + P_{мех} = \frac{U_0 \cdot I_{Я0} - I_{Я0}^2 \cdot \left(R_Я + R_С\right) \cdot 1{,}22}{2}, \qquad (3)$$

где $P_{ст}$ – потери в стали, Вт;

$P_{мех}$ – потери механические, Вт;

$U_0$ – напряжение холостого хода двигателя, В;

$I_{Я0}$ – ток якоря при холостом ходе двигателя, А.

Эта сумма потерь рассчитывается по данным холостого хода и принимается постоянной для всех нагрузок на валу ДПТ.

*Потери мощности электрические в параллельной обмотке возбуждения*

Потери мощности электрические в параллельной обмотке возбуждения определяются по формуле:

$$P_{ЭЛ.В} = I_В^2 \cdot R_{ш.20} \cdot 1{,}22\ , \qquad (4)$$

где $R_{ш.20} = 323$ Ом – сопротивление параллельной обмотки возбуждения при 20 ºС.

$I_В$ – ток возбуждения, А.

Коэффициент 1,22 в выражениях (2)…(4) позволяет привести сопротивления медных проводников обмоток, измеренные при температуре окружающей среды (20 ºС), к сопротивлению при расчетной рабочей температуре 75 ºС.

*Потребляемая мощность электродвигателем*

Потребляемая мощность рассчитывается по формуле:

$$P_1 = U \cdot \left(I_Я + I_В\right). \qquad (5)$$

*Полезная мощность на валу двигателя*

Полезная мощность на валу определяется из выражения:

$$P_2 = P_1 - \left(P_{ст} + P_{мех}\right) - P_{ЭЛ.Я} - P_В - P_д\,, \qquad (6)$$

где $P_д$ – добавочные потери мощности, Вт;

$P_д = 0{,}005 \cdot P_1$.

*Коэффициент полезного действия*

Коэффициент полезного действия рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (7)$$

*Вращающий момент*

Вращающий момент на валу ДПТ рассчитывается по формуле:

$$M = 9{,}55 \cdot \frac{P_2}{n}. \quad (8)$$

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Паспортные данные двигателя.

2. Принципиальная схема установки.

3. Таблицы с измеренными величинами.

4. Расчет параметров рабочих характеристик при встречном соединении обмоток возбуждения.

5. Рабочие характеристики.

6. Скоростные характеристики, полученные при согласном и встречном соединении обмоток возбуждения, построенные в одной системе координат.

7. Механическая характеристика при встречном соединении обмоток возбуждения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики двигателя относятся к рабочим?

2. Что такое скоростная характеристика ДПТ?

3. При каком соединении обмоток возбуждения ДПТ скоростная характеристика более "мягкая"?

4. Что такое механическая характеристика ДПТ?

5. При каких условиях ток возбуждения электродвигателя является номинальным?

6. Запишите формулу для определения потребляемой мощности двигателем постоянного тока.

7. Запишите формулу для определения электрических потерь в цепи якоря.

8. Запишите формулу для определения полезной мощности на валу двигателя постоянного тока.

9. Запишите формулу для определения коэффициента полезного действия двигателя постоянного тока.

10. Запишите формулу для определения электрических потерь в обмотке возбуждения.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед включением напряжения и пуском электродвигателя предупредить об этом своих товарищей.

2. Переключение соединения обмоток возбуждения (**"ВСТРЕЧНО"** или **"СОГЛАСНО"**) разрешается выполнять только при отключенной нагрузке генератора.

*(назад)*

# ТЕМА 2

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

## *2.1 Общие сведения*

*Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться любыми параметрами: величиной напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой.

В зависимости от назначения трансформаторы можно разделить на: *силовые* (применяются в системах передачи и распределения электроэнергии, для установок со статическими преобразователями, в цепях управления электроприводами и т.д.), *силовые специального назначения* (печные, сварочные и т.д.), *измерительные* (предназначены для подключения измерительных приборов в сети с высокой величиной напряжения или тока), *испытательные* (применяются для получения различных уровней напряжения, необходимых при испытаниях на электрическую прочность электроизоляционных изделий), *радиотрансформаторы* (применяются в устройствах радио- и проводной связи, в системах автоматики и телемеханики, гальванического разделения цепей и др.).

Кроме того, трансформаторы могут различаться по следующим признакам: *по виду охлаждения* (сухие и масляные), *по числу трансформируемых фаз* (однофазные и многофазные), *по форме магнитопровода* (стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные), *по числу обмоток* (двухобмоточные и многообмоточные), *по конструкции обмоток* (концентрические и чередующиеся).

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют величину переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

При передаче электрической энергии от электростанции к потребителям сила тока в линии обусловливает потери энергии в этой линии и расход цветных металлов на ее устройство. Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то сила тока в такой же мере уменьшится, а следовательно, это позволит сократить расход цветных металлов при строительстве линии (за счет уменьшения поперечного сечения проводов) и снизить потери энергии в ней.

Электрическая энергия вырабатывается на генерирующих электростанциях синхронными генераторами обычно напряжением до 20 кВ (в отдельных случаях до 35 кВ), однако, несмотря на сравнительно высокий уровень этого напряжения, его недостаточно при передаче электроэнергии на большие расстояния. Дальнейшее повышение напряжения в линиях электропередачи (до 750 кВ и более) осуществляют повышающими трансформаторами, которые располагаются непосредственно у электростанции в начале линии.

Потребители электрической энергии имеют более низкий уровень питающего напряжения до 380 В. Поэтому высокое напряжение, при котором происходит передача электроэнергии, не может быть непосредственно использовано для питания приемников и подводится к ним через понижающие трансформаторы, установленные в конце линии.

Таким образом, электрическая энергия переменного тока, передаваемая от электростанции до потребителя, может трансформироваться 3 – 4 раза.

### *2.2 Принцип действия трансформаторов*

Принцип действия трансформатора основан на явлении взаимной индукции. Если первичную обмотку трансформатора подключить к

источнику переменного тока с величиной напряжения $U_1$, то по ней начнет протекать переменный ток $I_0$, который создаст в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Этот магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, будет индуктировать в ней электродвижущую силу (Э.Д.С.) $E_2$. Если ко вторичной обмотке подключить приемник электрической энергии, то под действием индуктируемой Э.Д.С. $E_2$ по этой обмотке начнет протекать ток $I_2$, а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение $U_2$. В это же время, в первичной обмотке появится нагрузочный ток $I'_1$, который в сумме с током $I_0$ составит ток первичной обмотки $I_1$, рисунок 2.1.

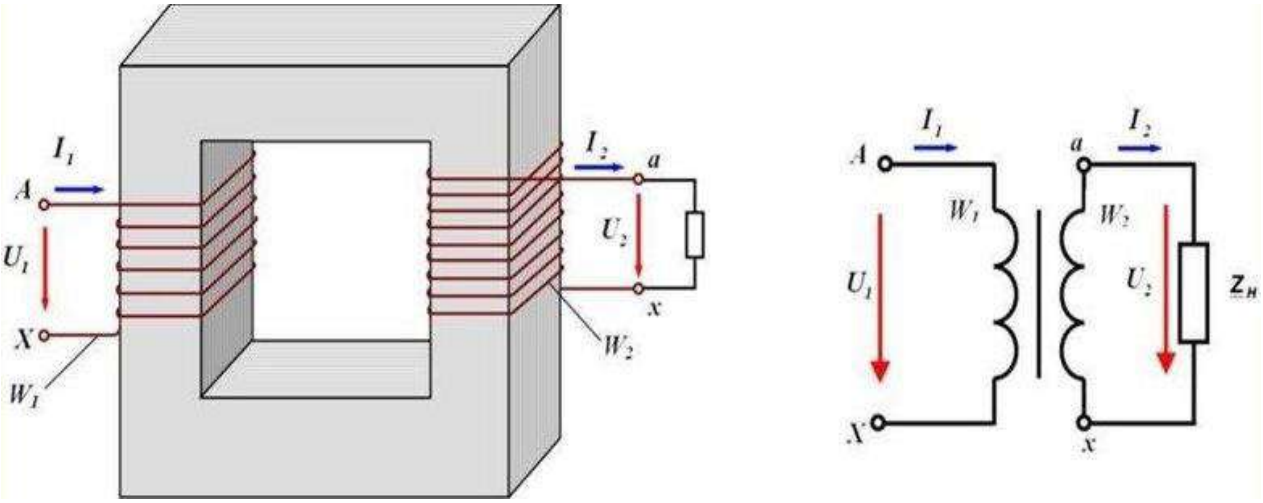



Рисунок 2.1 – Пояснение к принципу действия трансформатора

В целях улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их размещают на магнитопроводе – пакет, изготовленный из пластин электротехнической стали изолированных друг от друга. При этом обмотки изолируют как друг от друга, так и от магнитопровода.

Обмотка трансформатора более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а обмотку более низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Обмотка, включенная в сеть источника

электрической энергии, называется первичной, а обмотка, от которой энергия поступает к потребителю – вторичной.

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего ($U_2 > U_1$) и понижающего ($U_1 > U_2$). Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо является повышающим, либо понижающим.

Трансформатор – это аппарат переменного тока, т.е. если на первичную обмотку подать напряжение постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора так же будет постоянным, как по направлению, так и по величине ($d\Phi/dt = 0$), следовательно, в обмотках Э.Д.С. наводиться не будет.

### *2.3 Конструкция трансформаторов*

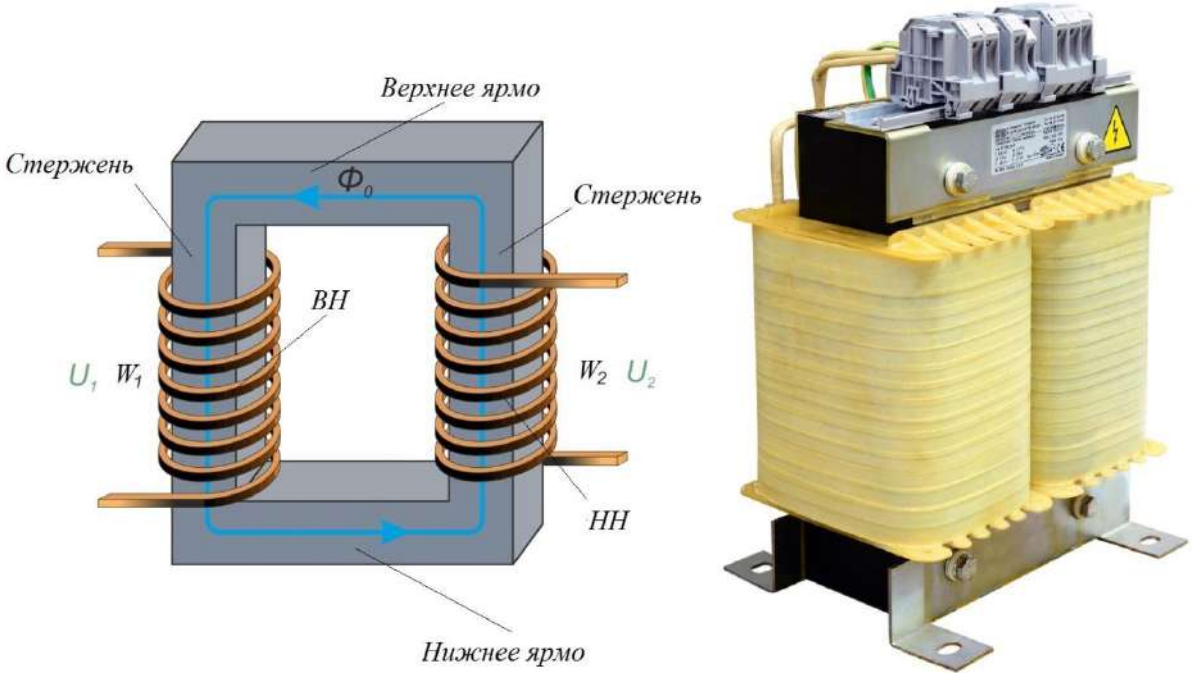
Магнитопровод и обмотки называются активной частью трансформатора. Часть магнитопровода, на которой размещаются обмотки, называется ***стержнем***, а соединяющая стержни сверху и снизу ***ярмом***. Магнитопровод трансформатора должен быть сконструирован таким образом, чтобы в нем в достаточной мере были ослаблены потери на вихревые токи и гистерезис, возникающие при перемагничивании. Решение этой задачи производится комплексно:

- использование магнитно-мягких электротехнических сталей, имеющих малые потери на гистерезис;
- применение марок электротехнических сталей обладающих увеличенным удельным электрическим сопротивлением;
- магнитопровод должен собираться из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали, толщина которых выбирается таким образом, чтобы вихревые токи не вызывали значительных потерь (толщина пластин зависит от частоты перемагничивания – для 50 Гц используют 0,35 или 0,5 мм).

Реализация озвученных выше мероприятий позволяет снизить потери энергии на перемагничивание в магнитопроводе до уровня электрических потерь в обмотках, а также исключить размагничивающее действие вихревых токов.

Магнитные системы (магнитопроводы) трансформаторов встречаются в четырех основных исполнениях: *стержневые, броневые, бронестержневые* и *тороидальные.*

В стержневых трансформаторах имеются стержни (два для однофазного и три для трехфазного) и соединяющие их два ярма, рисунок 2.2 а. Броневые трансформаторы имеют разветвленный магнитопровод с одним стержнем и ярмами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки, рисунок 2.3.



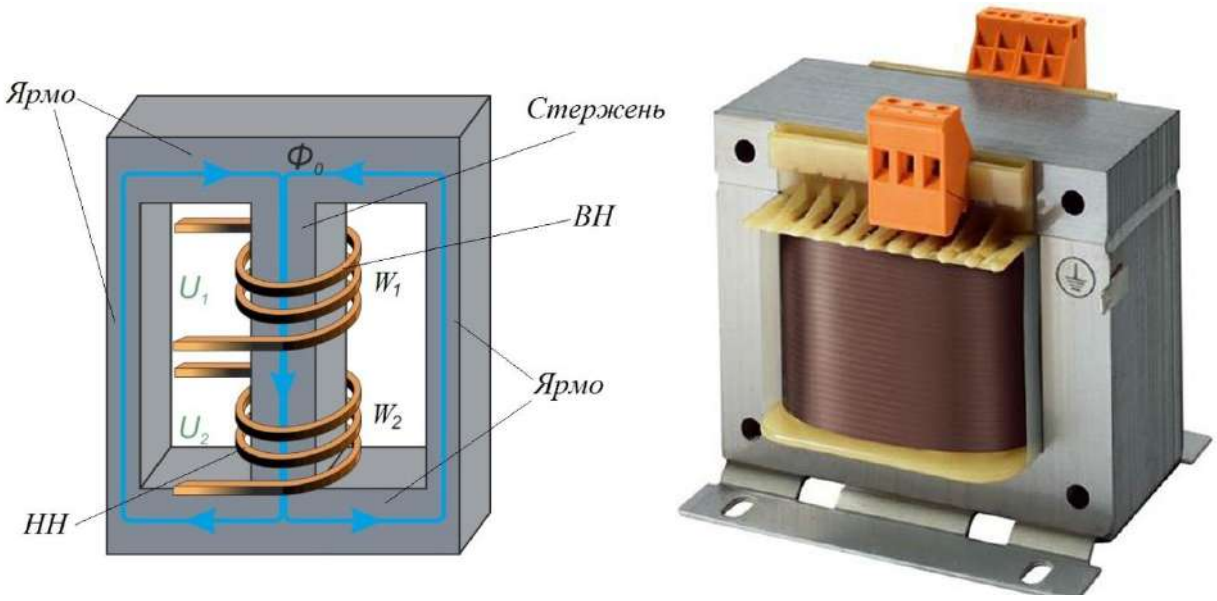

а б

*а – конструкция однофазного трансформатора; б – внешний вид*

Рисунок 2.2 – Однофазный трансформатор со стрежневым магнитопроводом

Стержневая конструкция имеет наибольшее распространение, особенно в трансформаторах малой и средней мощности. Достоинства этой конструкции – простота изоляции обмоток, лучшие условия охлаждения, простота ремонта.

Однофазные трансформаторы малой мощности чаще имеют броневую конструкцию, что позволяет уменьшить габариты трансформатора, рисунок 2.3. Кроме того, боковые ярма защищают обмотку от механических повреждений, что является важным обстоятельством для трансформаторов малой мощности, которые часто не имеют защитного кожуха, но устанавливаются вместе с другим электрооборудованием на общей панели или в общем шкафу.



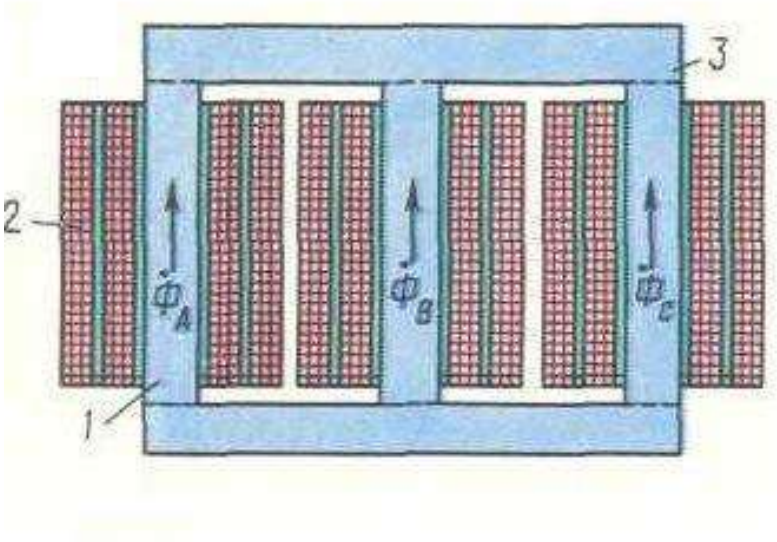

а б

*а – конструкция однофазного трансформатора; б – внешний вид*

Рисунок 2.3 – Однофазный трансформатор с броневым магнитопроводом

Трехфазные трансформаторы малой и средней мощности изготавливаются на магнитопроводе стержневого типа (рисунок 2.4 а). В магнитопроводе данного типа вертикальные стержни *1*, на которых расположены обмотки *2*, сверху и снизу замкнуты ярмами *3*. На каждом

стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях – потоки $\Phi_A$ и $\Phi_C$, а в среднем стержне – поток $\Phi_B$. На рисунке 2.4 б представлен внешний вид трансформатора с магнитопроводом стержневого типа.




***а***

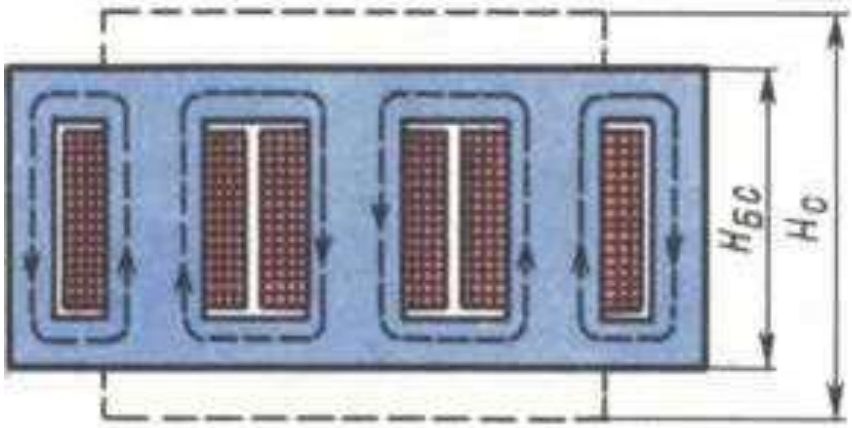



*б*

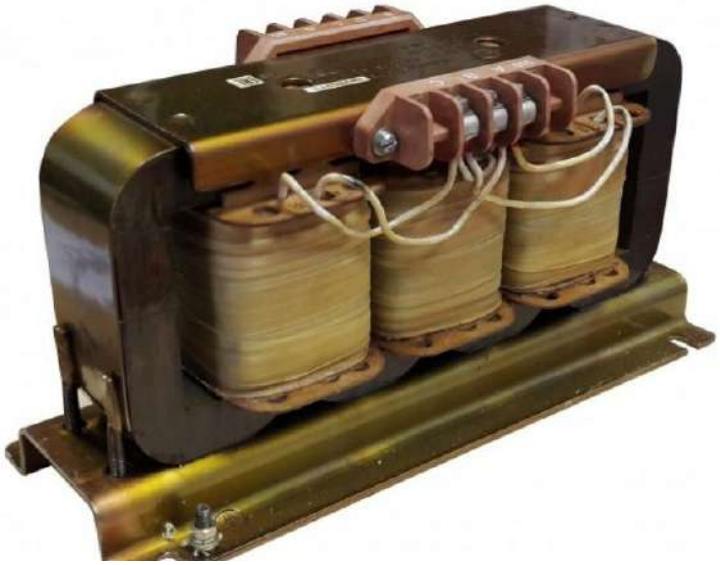
*а – конструкция трехфазного трансформатора; б – внешний вид*

Рисунок 2.4 – Трехфазный трансформатор со стержневым магнитопроводом

Для трансформаторов большой мощности, с целью снижения их габаритов по высоте и возможности перевозки в собранном виде применяется бронестержневая конструкция магнитопровода (рисунок 2.5). Высота магнитопровода бронестержневого трехфазного трансформатора уменьшается за счет высоты ярм, которые проводят поток в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем в стержнях (в стержневом трехфазном трансформаторе поток в ярмах не отличается от потока в стержнях).




*а*

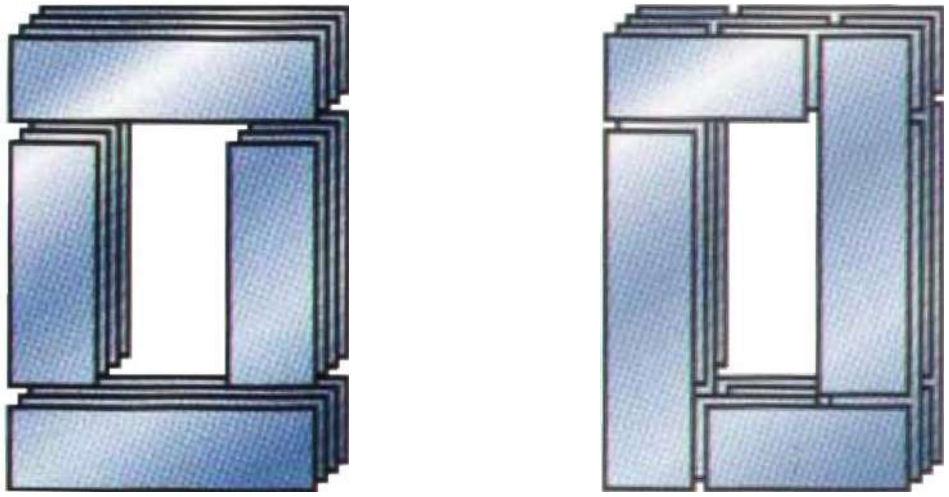


*б*

*а – конструкция трехфазного трансформатора; б – внешний вид*

Рисунок 2.5 – Конструкция бронестрежневого магнитопровода

В зависимости от способа сочленения стержней с ярмами различают магнитопроводы *стыковые* и *шихтованные* (рисунок 2.6). Стержни и ярма стыкового магнитопровода собираются из электротехнической стали отдельно и объединяются в замкнутую систему после размещения на стержнях обмоток (рисунок 2.6 а).



*а* *б*

*а – стыковая, б – шихтованная*

Рисунок 2.6 – Способы соединения стержней с ярмами магнитопровода

В стыке между стержнями и ярмами (во избежание вихревых токов через взаимно перекрытые листы сопрягаемых частей) помещают изоляционные прокладки, которые образуют немагнитный зазор, заметно увеличивающий потребляемую трансформатором реактивную мощность. Поэтому, несмотря на простоту сборки и демонтажа, стыковые магнитопроводы имеют ограниченное применение.

Наиболее распространены шихтованные магнитопроводы (рисунок 2.6 б), стержни и ярма которых собираются вперeплет (шихтуются) и образуют цельную конструкцию. Для установки обмоток листы верхнего ярма вынимаются и затем снова зашихтовываются. В шихтованной

конструкции также присутствуют немагнитные зазоры в стыках между листами данного слоя, но эти зазоры оказываются перекрытыми листами следующих слоев и не оказывают столь заметного влияния на потребляемую трансформатором реактивную мощность, как в стыковой конструкции.

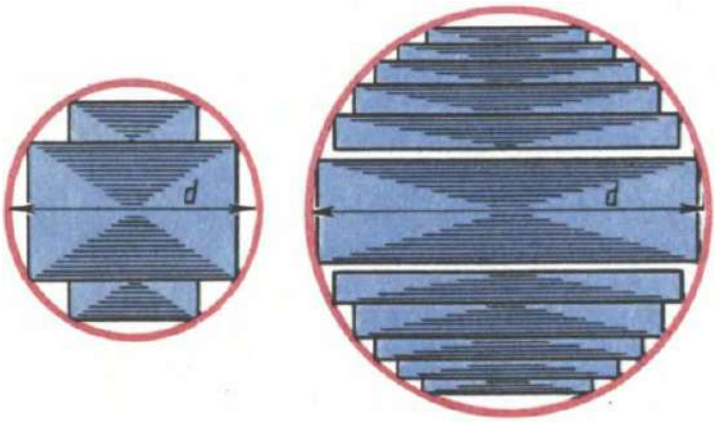
При сборке магнитопровода из анизотропной холоднокатаной стали, у которой удельные потери меньше, а магнитная проницаемость больше в направлении прокатки листов, в зоне переходов от стержней к ярмам, где линии магнитного поля поворачивают на $90^0$ от направления прокатки, наблюдается увеличение потерь и падение магнитного напряжения (рисунок 2.7 а). Это явление удается в значительной мере ослабить применением косых стыков (рисунок 2.7 б).




*а* *б*

Рисунок 2.7 – «Зоны несовпадения» при прямом (*а*) и при косом (б) стыках

В трансформаторах малой мощности и на небольшие напряжения обмотки могут быть намотаны на прямоугольный каркас, а сечения стержней иметь прямоугольную форму (рисунок 2.8 а). В трансформаторах большой мощности катушки наматываются на цилиндрический шаблон, а для получения лучшего заполнения пространства внутри катушки сталью сечению стержня придается ступенчатая форма (рисунок 2.8 б). Размеры отдельных ступеней выбираются таким образом, чтобы стержень наилучше вписывался в цилиндрическое пространство внутри катушки. Ярма выполняются прямоугольными или с небольшим числом ступеней.




*а* *б*

*а – для трансформаторов малой и средней мощности,*
*б – для трансформаторов большой мощности*

Рисунок 2.8 – Форма сечения стержней

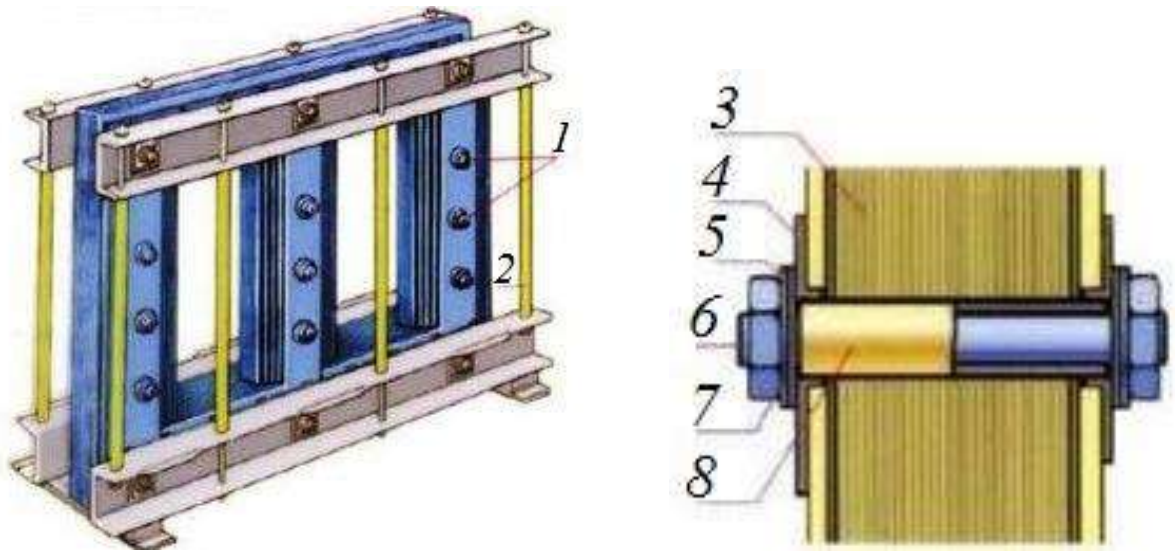
Стяжка пакетов стержней в силовых трансформаторах производится при помощи деревянных или пластмассовых планок, которыми заполняется пространство между стержнем и изоляционным цилиндром, на котором закреплена ближайшая к стержню обмотка НН (рисунок 2.9).




*1 – стержень магнитопровода, 2 – деревянные или пластмассовые клинья,*
*3 – бумажно-бакелитовый цилиндр, 4 – деревянные или пластмассовые стержни*

Рисунок 2.9 – Прессовка стержней магнитопровода деревянными или пластмассовыми планками

В трансформаторах большой мощности стяжка стержней ранее осуществлялась стальными шпильками, изолированными от стержня трубками из бакелизированной бумаги (рисунок 2.10). Для прессовки ярм также использовались шпильки, стягивающие деревянные или стальные нажимные балки.

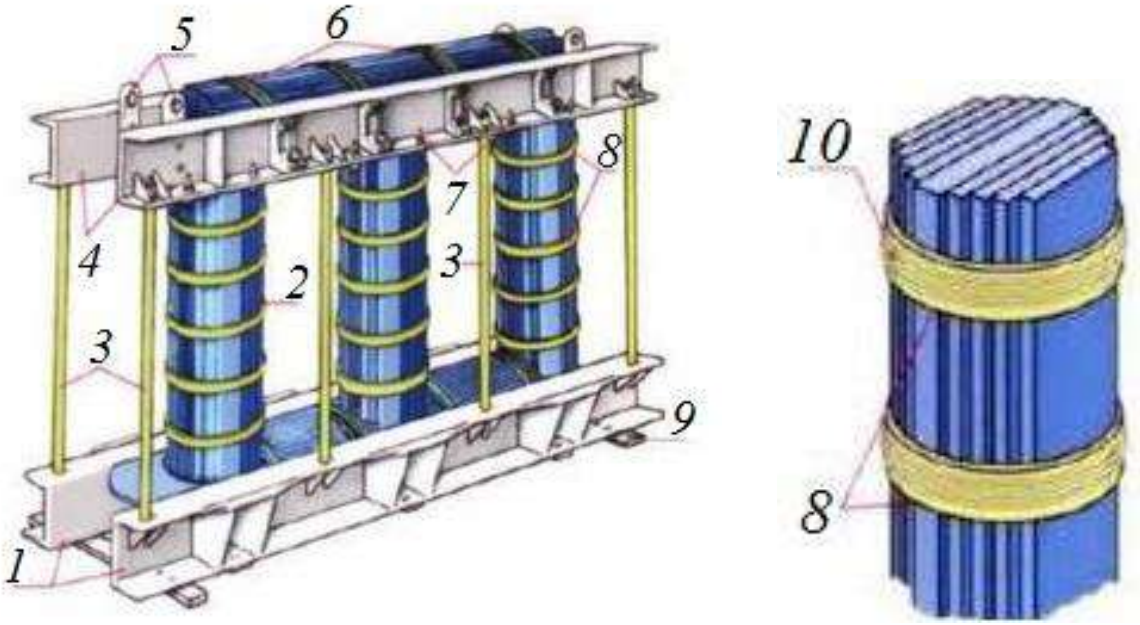



*а* *б*

*1 – шпилька стальная, 2 – вертикальные связующие шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками,3 – активная (электротехническая) сталь стержня,4 –изолирующая (гетинаксовая) угловая шайба, 5 – шайба стальная, 6 – шпилька стальная, 7 – изолирующая (электрокартонная) шайба, 8 – трубка бумажно-бакелитовая*

Рисунок 2.10 – Трехфазная магнитная система с прессовкой стержней магнитопровода шпильками

В настоящее время для стяжки стержней, а во многих случаях и ярм, широко применяется бандажировка стеклолентой, пропитанной эпоксидными термореактивными компаундами (рисунок 2.11). При использовании бандажей пропадает необходимость в применении стягивающих шпилек и в штамповке отверстий в листах магнитопровода, что приводит к уменьшению его магнитного сопротивления и добавочных потерь при холостом ходе.




*а* *б*

*1 – нижние ярмовые балки, 2 – стержень магнитопровода, 3 – вертикальные связующие шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками, 4 – верхние ярмовые балки,5 – подъемные планки,6 – полубандажи (стяжки), 7 – винты для прессовки обмоток,8 – стеклобандажи, 9 – стальные опорные пластины, 10 – полоса электрокартона*

Рисунок 2.11 – Трехфазная магнитная система с прессовкой стержней магнитопровода стеклобандажами

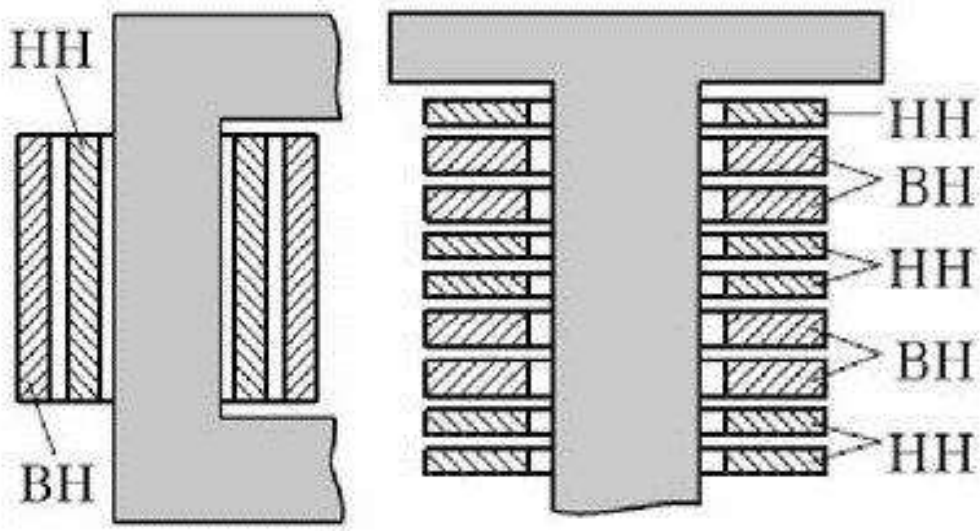
Магнитопровод вместе с ярмовыми балками и другими деталями, предназначенными для прессовки магнитопровода и крепления на его стержнях обмоток, образует *остов трансформатора* (рисунки 2.10 а и 2.11 а).

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на: концентрические и чередующиеся (дисковые).

*Концентрические обмотки* (рисунок 2.12 а) выполняют в виде цилиндров, размещенных на стержне концентрически – ближе к стрежню

обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи – обмотку ВН.

*Чередующиеся (дисковые) обмотки* (рисунок 2.12 б) выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке. Их применяют крайне редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.




*а* *б*

*а – концентрические обмотки; б – чередующиеся (дисковые) обмотки*

Рисунок 2.12 – Взаимное расположение обмоток на стержне магнитопровода

Обмотки трансформаторов должны соответствовать следующим требованиям:

- способностью выдерживать различные коммутационные и атмосферные перенапряжения, т.е. обладать *электрической прочностью*;

- при работе с номинальной мощностью никакая часть трансформатора не должна перегреваться сверх установленных норм, т.е. обладать *термической прочностью*;

- способностью выдерживать без повреждений и остаточных деформаций механические усилия, возникающие от взаимодействия токов короткого замыкания в обмотках с магнитным полем рассеяния, т.е. обладать *механической прочностью*.

Последнее требование вызвано тем, что при прохождении по концентрическим обмоткам токов короткого замыкания они испытывают большие радиальные усилия, стремящиеся растянуть радиально наружную и, наоборот, сжать внутреннюю обмотку (рисунок 2.13).

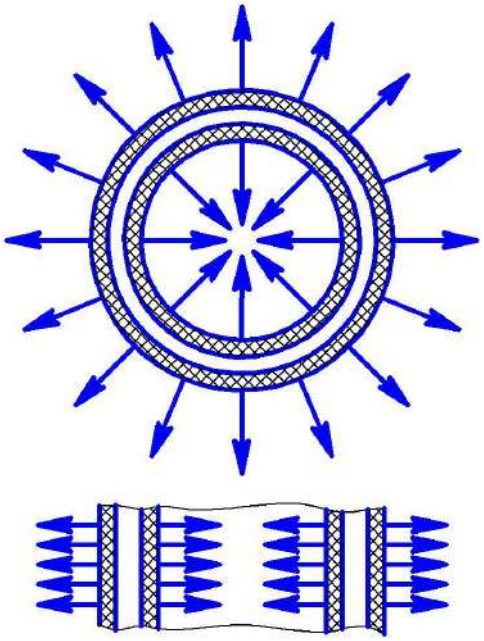


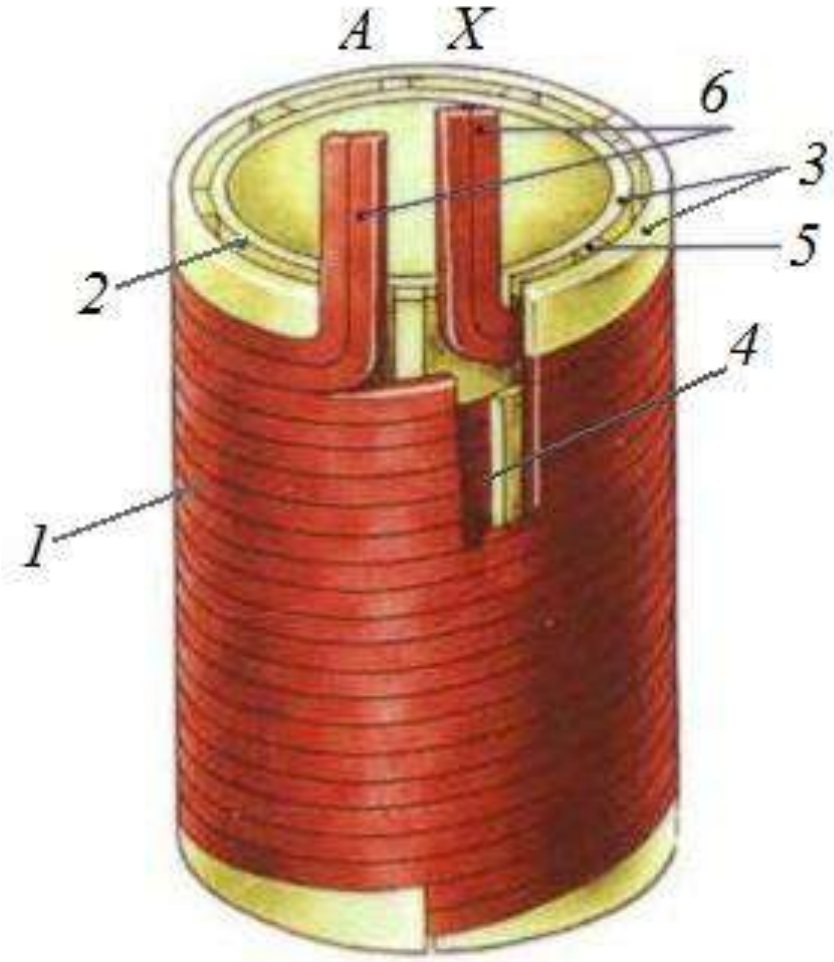
Рисунок 2.13 – Растягивающие и сжимающие радиальные усилия, действующие на обмотки при их концентрическом расположении

Кроме этого, в осевом направлении концентрические обмотки также испытывают усилия, сжимающие обмотки по их высоте. В симметричных обмотках усилия незначительны. В тоже время, при несимметрии (неодинаковой высоте обмотки и неравномерном распределении витков с током по высоте) сжимающие усилия становятся существенными и могут достичь опасных значений. Для снижения влияния этого негативного воздействия, обмоткам придают механическую прочность, путем расклинивания их в радиальном направлении деревянными планками,

рейками, прокладками. В осевом направлении обмотки прессуют прессующими кольцами, которые должны быть изолированными от нее.

По характеру намотки провода, наибольшее распространение получили концентрические обмотки следующих видов: цилиндрические, винтовые, непрерывные спиральные и переплетенные (петлевые).

Двухслойная цилиндрическая обмотка представлена на рисунке 2.14. Ее витки плотно прижаты друг к другу. Она намотана на бумажно-бакелитовом цилиндре. Наружный слой *1* переходит во внутренний слой *4* снизу.




*1 – наружный слой обмотки, 2 – охлаждающий масляный канал,*
*3 – выравнивающие бумажно-бакелитовые опорные кольца,*
*4 – внутренний слой обмотки, 5 – буковая рейка, 6 – выводы обмотки*

Рисунок 2.14 – Двухслойная цилиндрическая обмотка с двумя параллельными проводами

Между слоями обмотки имеется масляный канал, образованный при помощи реек 5 и обеспечивающий как дополнительную изоляцию, так и доступ к обмотке охлаждающего масла. По своим конструктивным данным обмотка недостаточно стойка к токам короткого замыкания, поэтому ее применение ограничено трансформаторами небольшой мощности.

Винтовая обмотка состоит из ряда витков, которые следует один за другим по винтовой линии, как в однозаходном винте (рисунок 2.15).

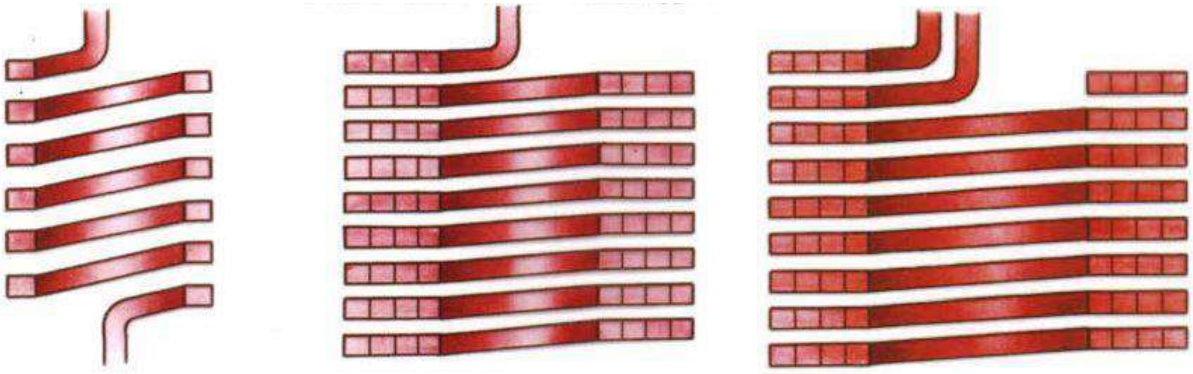



*1 – бумажно-бакелитовый цилиндр, 2 – буковая рейка, 3 – изолирующие прокладки*

Рисунок 2.15 – Винтовая одноходовая обмотка

Витки обмотки намотаны на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре. Между витками установлены изоляционные (дистанционные) прокладки. Механическую прочность в радиальном направлении придают обмотке деревянные расклинивающие рейки, идущие по всей ее высоте. Наличие масляных каналов между витками обеспечивает повышение электрической прочности обмотки.

Винтовые обмотки чаще всего изготавливаются из нескольких параллельных проводов в витке (рисунок 2.16). Параллельные провода обмотки, расположенные концентрически (на разном расстоянии от оси обмотки), имеют разные активные и индуктивные сопротивления.



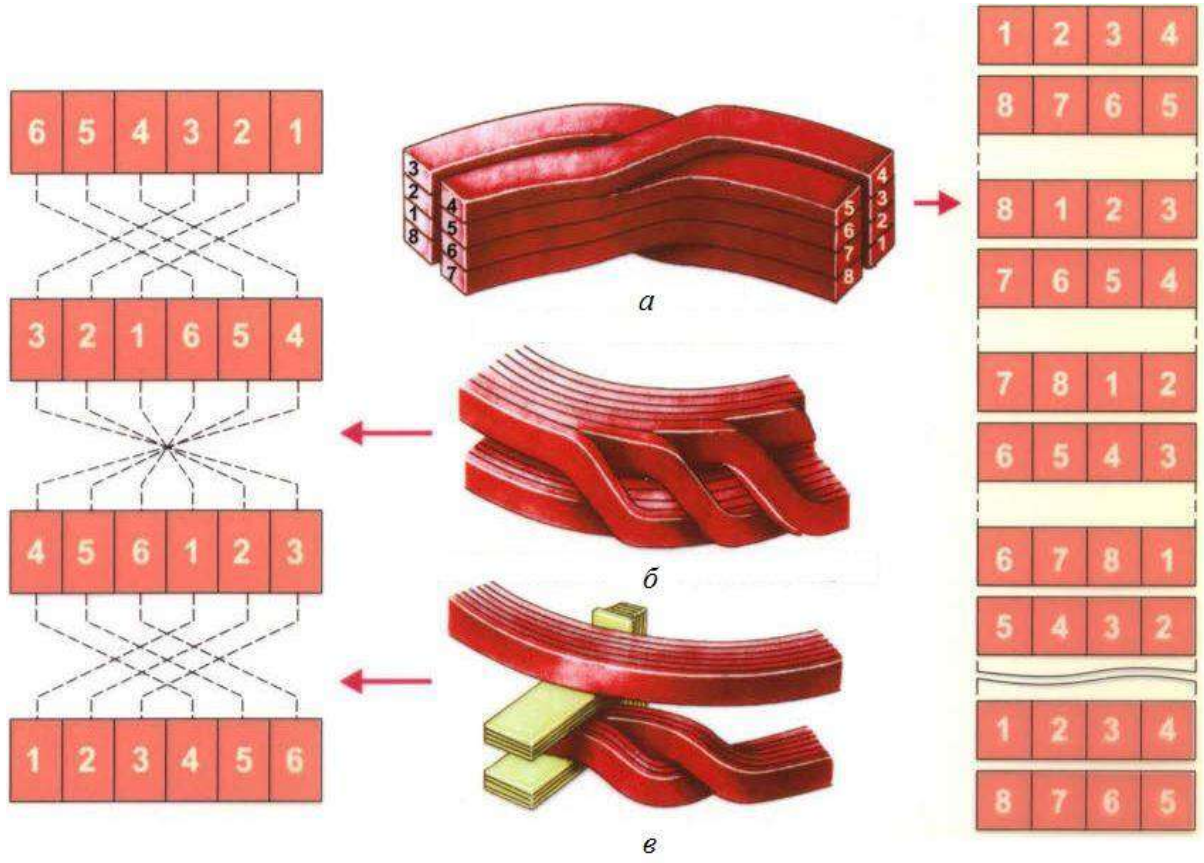
*а* *б* *в*

*а – одноходовая, б – одноходовая из четырех параллельных проводов, в - двухходовая*

Рисунок 2.16 – Способы намотки винтовой обмотки

Для равномерного распределения тока между параллельными проводами их сопротивления выравнивают транспозицией, т.е. перекладкой проводов, в результате которой каждый провод попеременно занимает различные положения (рисунок 2.17).

У винтовой обмотки обычно делают одну общую и две групповые транспозиции.



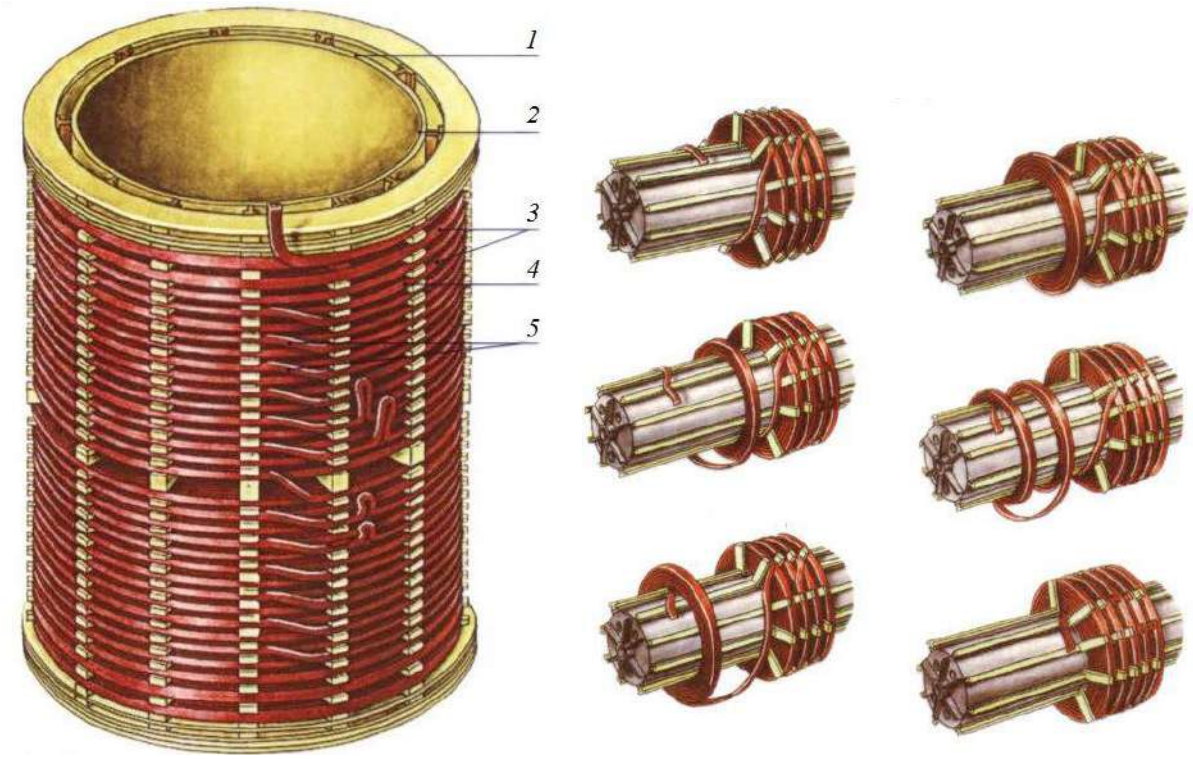

*а – двухходовая обмотка, б – общая транспозиция, в – групповая транспозиция*

Рисунок 2.17 – Транспозиция

Непрерывная спиральная обмотка составляется из ряда последовательно соединенных дисков (катушек), намотанных по спирали (рисунок 2.18). Переход провода из одной катушки в другую выполняется без нарушения его целостности (без пайки). Между катушками устанавливаются прокладки из электрокартона. Такие обмотки обладают высокой, как электрической, так механической прочностями и хорошим уровнем охлаждения. Непрерывная спиральная обмотка применяется в силовых трансформаторах напряжением до 220 кВ.

Напряжение у силовых масляных трехфазных трансформаторов регулируют переключением регулировочных ответвлений от обмоток. Ответвления выполняют при изготовлении обмоток. При расположении ответвлений с наружной стороны обмотки их выполняют в виде петель из

того же провода, что и витки обмотки. Внутренние ответвления выполняют из полос ленточной меди, припаиваемых к проводам обмотки. Ответвления соединяются с переключателями и вводами трансформаторов при помощи отводов, изготовляемых из гибкого медного провода и медных стержней. Отводы надежно изолируются от бака, ярмовых балок, обмоток и других отводов.




*а* *б*

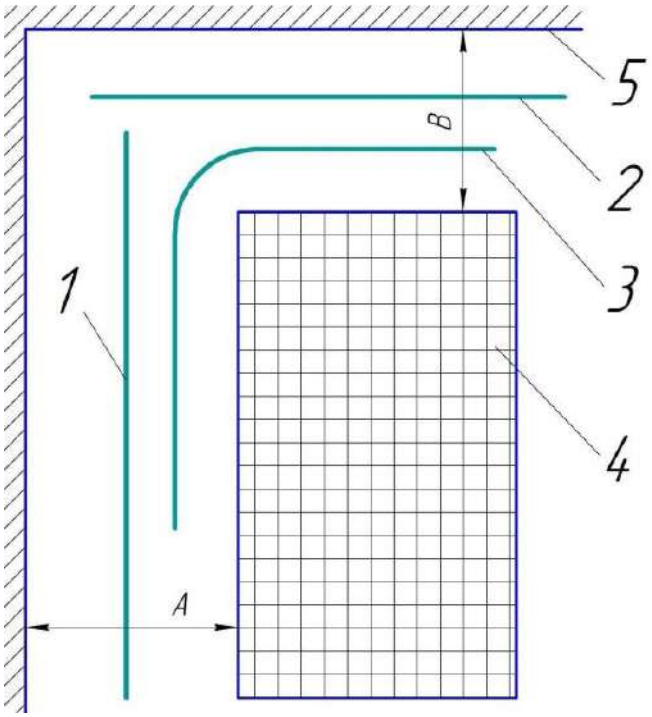
*1 – бумажно-бакелитовый цилиндр, 2 – внутренняя рейка,*
*3 – обмоточный провод, 4 – изолирующие прокладки, 5 – наружные переходы проводов*

Рисунок 2.18 – Непрерывная спиральная обмотка: (*а*) внешний вид и (*б*) схема намотки

Изоляция является важным элементом конструкции любого трансформатора. Различают внутреннюю и внешнюю изоляцию трансформатора. Внутренняя изоляция подразделяется на главную изоляцию – изоляцию обмоток от заземленных частей и других обмоток; продольную

изоляцию – изоляцию между витками, слоями и катушками одной и той же обмотки, изоляцию отводов и переключателей.

Один из вариантов конструкции главной изоляции обмоток представлен на рисунке 2.19. Изоляция обмоток от стержней магнитопровода, а также изоляция между обмотками выполняется при помощи изоляционных цилиндров, перегородок, распорок и шайб, промежутки между которыми заполнены маслом (для трансформаторов с масляным охлаждением). Чередование твердых и жидких диэлектриков повышает электрическую прочность изоляции. Цилиндры выступают над обмотками, что исключает разряды по поверхности цилиндров с обмотками на стержень и между обмотками. Изоляция обмоток от ярма усиливается угловыми шайбами. В качестве междуфазной изоляции применяются перегородки из электрокартона.




*1 – цилиндрический барьер, 2 – плоская шайба, 3 – угловая шайба, 4 – обмотка ВН, 5 – ярмо магнитопровода, А и В – главные изоляционные расстояния*

Рисунок 2.19 – Главная изоляция трансформатора

Продольная изоляция обмоток между витками обеспечивается изоляцией самого обмоточного провода. Усилие этой изоляции производится только на входных витках катушек фазных обмоток.

Междуслойная изоляция выполняется из кабельной бумаги, электрокартона или путем оставления между слоями обмотки масляного канала.

Междукатушечная изоляция выполняется с помощью электрокартонных шайб и радиальных масляных каналов.

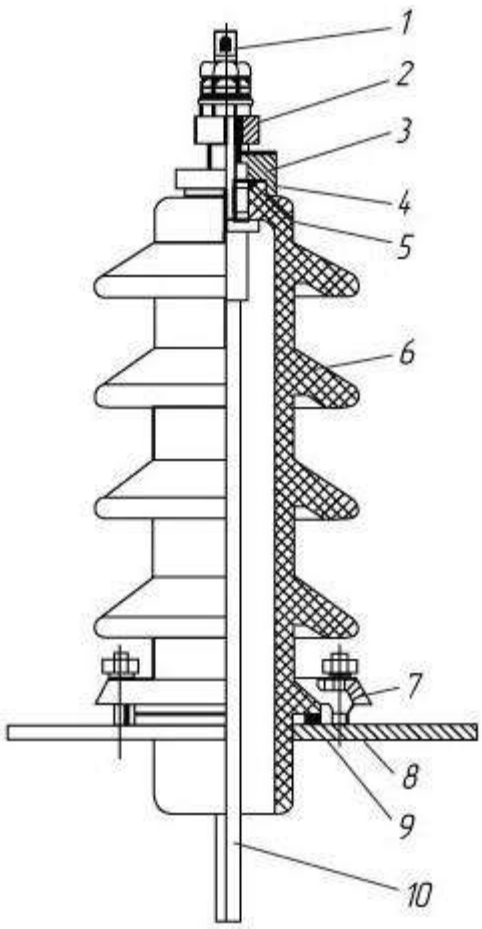
К внешней изоляции трансформатора относят наружную изоляцию: вводы и воздушные промежутки, отделяющие друг от друга и от заземленных частей трансформатора.

Токоведущий стержень ввода должен быть надежно изолирован от заземленной крышки бака, как со стороны масла, так и со стороны воздуха. С увеличением напряжения размеры вводов увеличиваются, а их конструкция усложняется.

Вводы служат для подачи напряжения к обмоткам трансформатора. На напряжение 35 кВ и ниже применяются съемные вводы (рисунок 2.20). Отвод *10* проходит внутри фарфорового изолятора, который крепится к крышке бака *8* трансформатора накидным фланцем с кулачками *7*. Внутреннюю полость изолятора заполняет масло из бака. Верхняя торцевая часть изолятора уплотняется резиновым кольцом *4* и электрокартонной шайбой *5*. Достоинством съемных вводов состоит в удобстве замены фарфоровых изоляторов *6* при их повреждениях. Для этого достаточно снять колпак *3* и кулачки *7*.

Бак масляного трансформатора представляет собой резервуар, внутри которого устанавливается активная часть. Баки трансформаторов малой и средней мощности закрываются сверху крышками. Крышка служит основанием для установки на ней вводов, расширителя, выхлопной трубы,

контрольно-сигнальных и других устройств. В ряде конструкций к крышкам механически крепится активная часть.

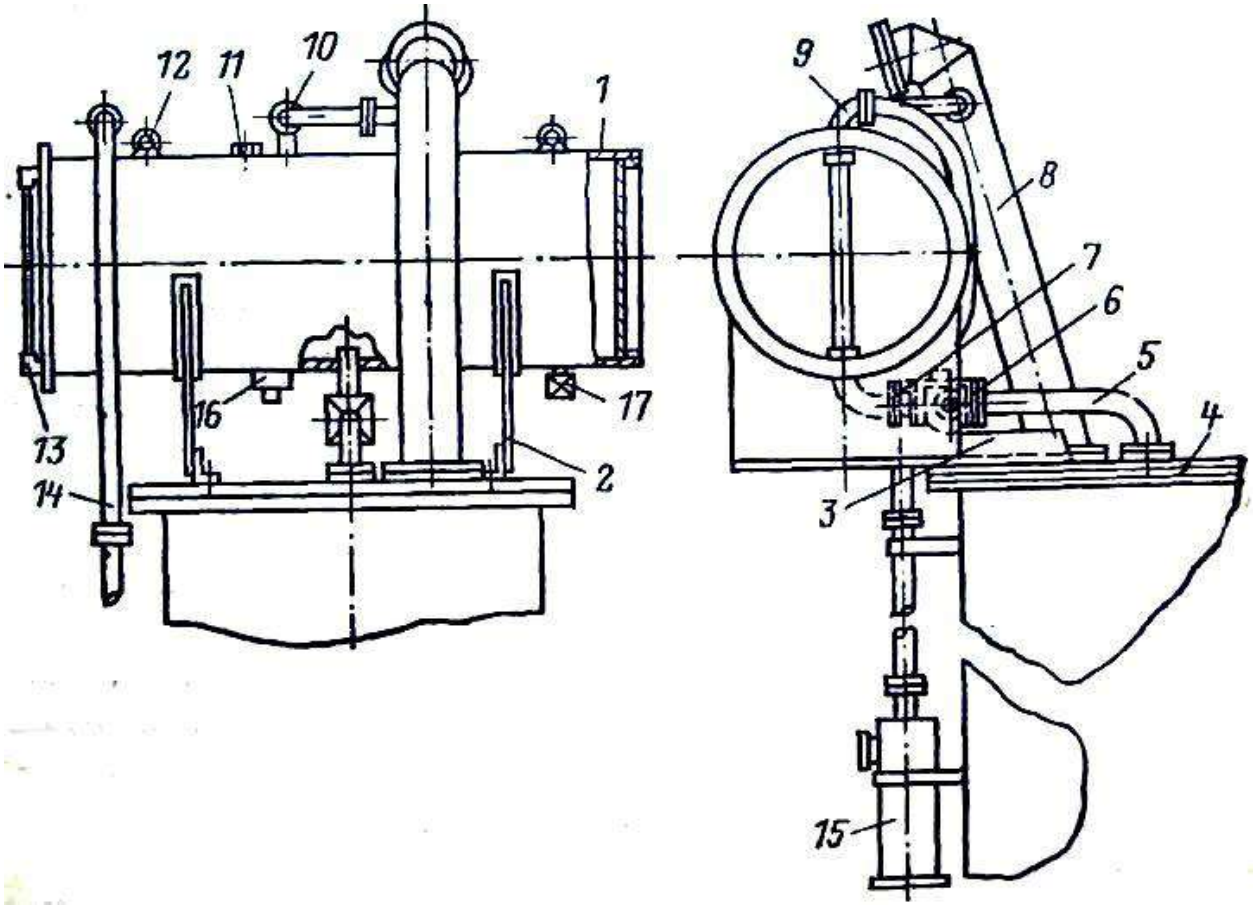



*1 – токоведущий стержень,2 – латунная шпилька, 3 – колпак ввода, 4 – резиновое кольцо, 5 – электрокартонная шайба, 6 – фарфоровый изолятор, 7 – прижимной кулачок, 8 – крышка бака, 9 – прокладка, 10 - отвод*

Рисунок 2.20 – Конструкция съемного ввода трансформатора

Применение только одного бака трансформатора, без дополнительной арматуры, было бы невозможно, поскольку полное заполнение объема маслом и герметизация, привели к неизбежному разрушению конструкции давлением, возникающим в баке при увеличении объема масла при колебаниях температуры. Из-за этого, бак следовало бы заполнять не полностью для создания воздушного пространства. Однако, от соприкосновения с окружающим воздухом масло в трансформаторе окисляется и увлажняется, при этом постепенно теряя свои

электроизоляционные свойства. Для решения их задач, баки масляных трансформаторов снабжаются расширителем – цилиндрическим сосудом из листовой стали, сообщающимся с баком (рисунок 2.21). Трансформаторы, имеющие расширители, значительно реже нуждаются в сушке, очистке, регенерации масла или замене его новым.




*1 – расширитель, 2 – опорные пластины, 3 – крепящие уголки, 4 – крышка, 5 – маслоотвод, 6 – газовое реле, 7 – плоский кран, 8 – выхлопная труба, 9 – патрубок для присоединения воздухоосушителя, 10 – газоотводные трубы, 11 – пробка, 12 – кольцо для подъема расширителя, 13 – маслоуказатель, 14 – труба для присоединения воздухоосушителя, 15 – воздухоосушитель, 16 – отстойник, 17 – пробка или вентиль для спуска и заливки масла*

Рисунок 2.21 – Конструкция расширителя бака трансформатора

Необходимыми элементами конструкции расширителя являются указатель масла и отстойник для грязи и влаги. Расширитель соединяется патрубком с баком трансформатора и обеспечивает заполнение его маслом,

приема масла вследствие колебаний температуры. Кроме того, трансформатор с расширителем имеет меньшую площадь открытой поверхности масла, соприкасающегося с воздухом, что уменьшает степень его окисления, увлажнения и загрязнения масла. Объем расширителя составляет 9,5 – 10% объема масла в трансформаторе и системе охлаждения.

Сообщение внутри объема расширителя с атмосферой осуществляется через трубу *14*, заканчивающуюся воздухоосушителем *15*. К расширителю приварен отстойник *16*, в котором накапливаются вода и осадки, попадающие в масло. Расширитель связан с газоотводными трубками с высоко расположенными точками колокола для отвода газов, которые могут там накапливаться.

В маслопровод, соединяющий расширитель с баком, встраивается газовое реле *6*, реагирующее на внутренние повреждения, сопровождающиеся выделением газов, а также на понижение уровня масла. Газовые реле применяются двух типов: поплавковые и чашечные. При повреждениях, приводящих к незначительному местному нагреванию (ухудшение контакта в соединениях, нарушение изоляции между листами сердечника), происходит разложение твердой изоляции и масла, сопровождающееся выделением пузырьков газа. Поднимаясь вверх, пузырьки газа скапливаются в газовом реле, вытесняя из него масло. Это приводит к опрокидыванию поплавка, замыкающего сигнальный контакт.

При значительных повреждениях, сопровождающихся взрывообразным выделением газов (короткое замыкание одного или нескольких витков и т.п.), масло толчкообразно перемещается из бака в расширитель. Струя масла опрокидывает другой поплавок реле, который, замыкая соответствующие контакты, отключает трансформатор от сети.

Выхлопная (предохранительная) труба *8* на крышке бака защищает его от разрыва при интенсивном выделении газа во время крупных повреждений внутри трансформатора. Верхний конец выхлопной трубы

герметично закрывается диафрагмой из стекла или медной фольги. При взрывообразных выделениях газа диафрагма выдавливается, давление в баке понижается, что и предохраняет его от деформации. Верхняя полость выхлопной трубы и воздушное пространство над поверхностью масла в расширителе соединены между собой трубкой. Это необходимо для выравнивания давлений с обеих сторон диафрагмы при изменении объема масла в нормальных эксплуатационных условиях.

Вместо выхлопной трубы в настоящее время находят применение механические пружинные предохранительные клапаны, устанавливаемые на верхней части стенки бака трансформатора. Клапан срабатывает при повышении давления в баке до 80 кПа и закрывается при давлении ниже 35 кПа. На баке устанавливаются два клапана и более.

Расширитель снабжается маслоуказателем *13*, служащим для контроля уровня масла в трансформаторе. Применяются плоские и трубчатые маслоуказатели, работающие по принципу сообщающихся сосудов. На шкале маслоуказателя наносятся три контрольные риски, соответствующие уровням масла в неработающем трансформаторе при температурах -45, +15 и $+40^0$C.

*(назад)*

*Лабораторная работа №5*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В отличие от трехфазных трансформаторов, однофазные имеют более простую конструкцию. В понижающем трансформаторе первичная обмотка подключается к однофазной питающей сети. Вторичная обмотка (или несколько обмоток) соединена с однофазной нагрузкой. В данной работе нагрузкой является реостат.

Параметры трансформатора определяются посредством опытов холостого хода (х.х.), короткого замыкания (к.з.) и включения под нагрузкой. По результатам опытов рассчитываются активные и реактивные сопротивления обмоток и ветви намагничивания. Кроме того, определяются напряжение к.з. и его активная и реактивная составляющие.

Особенностью трансформаторов малой мощности являются более высокие активные и низкие реактивные сопротивления обмоток, чем у трансформаторов большой мощности.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* исследование характеристик трансформатора малой мощности по опытам холостого хода, короткого замыкания и нагрузки. Изучение методики приведения параметров вторичной обмотки к первичной. Расчет изменения вторичного напряжения аналитически и по внешней характеристике.

*Программа работы:*

- ✓ провести опыт х.х. при номинальном первичном напряжении;
- ✓ провести опыт к.з. при пониженном первичном напряжении;
- ✓ снять внешнюю характеристику при активной нагрузке;

✓рассчитать параметры схемы замещения, а также полное напряжение к.з. и его активную и реактивную составляющие;

✓построить внешнюю характеристику и рассчитать изменение вторичного напряжения при номинальном вторичном токе.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Опыт холостого хода*

Электрическая схема трансформатора в режиме холостого хода и его схема замещения приведены, соответственно, на рисунках 1 и 2. По показаниям приборов можно определить модуль полного сопротивления, а также активное и реактивное сопротивления холостого хода. Сопротивления рассчитываются по формулам:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \left|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_m\right| ; \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} = R_1 + R_m; \quad (2)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = X_1 + X_m , \quad (3)$$

где $U_{10}$ – первичное напряжение х.х., равное номинальному, В;

$I_{10}$ – ток х.х., А;

$P_{10}$ – мощность, потребляемая из сети при х.х., Вт;

$Z_{10}$ – полное сопротивление первичной цепи при х.х., Ом;

$Z_1$ – полное сопротивление первичной обмотки, Ом;

$Z_m$ – полное сопротивление цепи намагничивания, Ом;

$R_0, R_1, R_m$ – активные составляющие сопротивлений, соответственно, первичной цепи при х.х., первичной обмотки, цепи намагничивания, Ом;

$X_0, X_1, X_m$ – реактивные составляющие сопротивлений, соответственно, первичной цепи при х.х., первичной обмотки, цепи намагничивания, Ом.

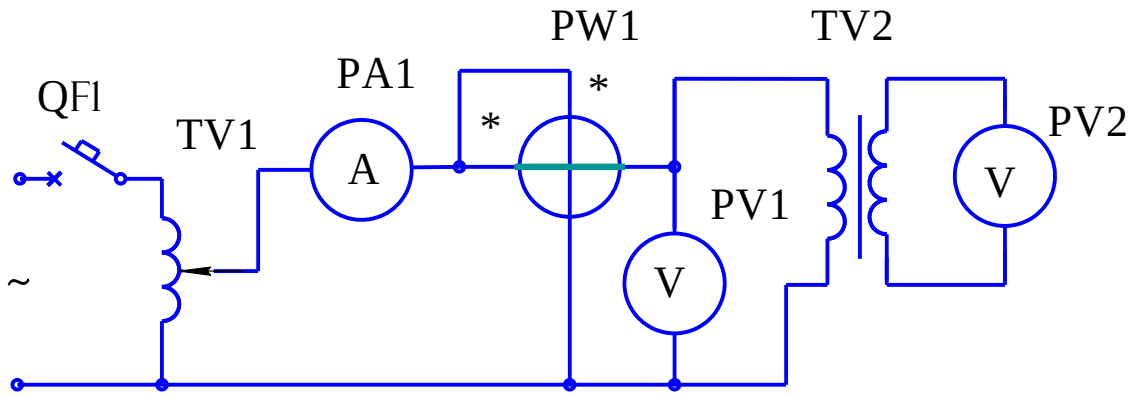



Рисунок 1 – Схема опыта при х.х. трансформатора

Из опыта х.х. можно определить коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}}, \tag{4}$$

где $U_{20}$ – вторичное напряжение при х.х., В.

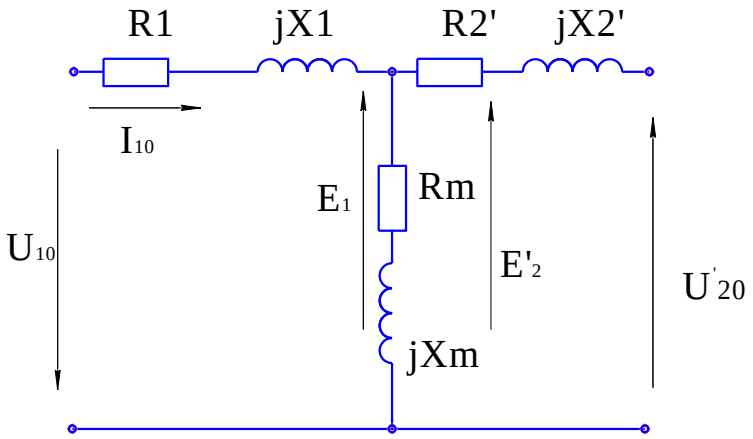



Рисунок 2 – Схема замещения при х.х. трансформатора

Величина коэффициента мощности при х.х. рассчитывается по формуле:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}}, \tag{5}$$

Так как ток холостого хода в силовых трансформаторах величина незначительная, то можно принять, что потребляемая из сети мощность идет на компенсацию потерь в стали. На основании этого, а также учитывая, что

поток взаимной индукции значительно больше потока рассеяния первичной обмотки и $\underline{Z}_1 << Z_m$, можно принять $Z_0 \approx Z_m$; $R_0 \approx R_m$; $X_0 \approx X_m$.

Относительную величину тока х.х. определяют по формуле:

$$I_{0*} = \frac{I_{10}}{I_{1H}}, \tag{6}$$

где $I_{1H}$ – первичный номинальный ток, А.

*2 Опыт короткого замыкания*

Электрическая схема трансформатора в режиме короткого замыкания и его схемы замещения приведены, соответственно, на рисунках 3, 4 и 5.

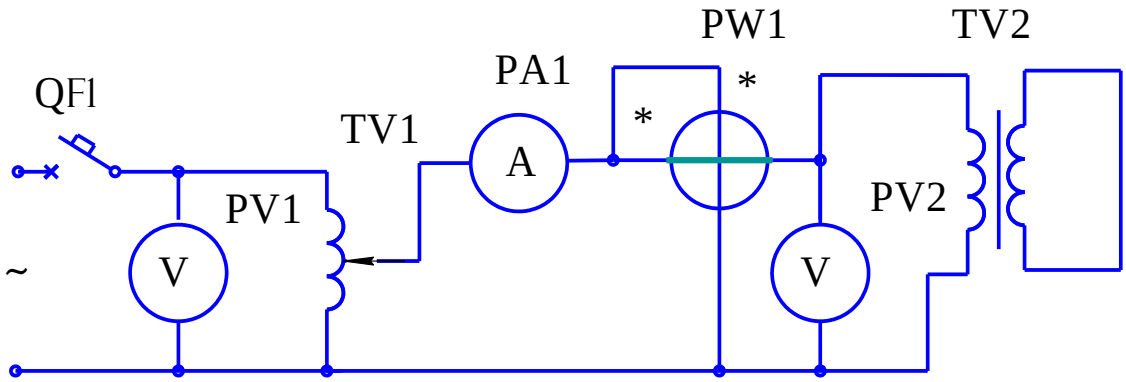



Рисунок 3 – Схема опыта при коротком замыкании трансформатора

По показаниям приборов при пониженном напряжении можно определить модуль полного сопротивления к.з., а также его активную и реактивную составляющие. Сопротивления рассчитываются по формулам:

$$Z_K = \left|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2'\right| = \frac{U_{1K}}{I_{1H}}; \tag{7}$$

$$R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1H}^2} = R_1 + R_2'; \tag{8}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = X_1 + X_2'. \tag{9}$$

где $U_{1K}$ – напряжение к.з., В;

$I_{1H}$ – номинальный ток первичной обмотки , А;

$P_{1K}$ – мощность, потребляемая из сети при к.з., Вт;

$Z_K$ – полное сопротивление к.з., Ом;

$Z_2'$ – полное приведенное сопротивление вторичной обмотки, Ом;

$R_K$ – активная составляющая сопротивления к.з., Ом;

$R_2'$ – активная составляющая приведенного сопротивления вторичной обмотки, Ом;

$X_K$ – реактивная составляющая сопротивления к.з., Ом;

$X_2'$ – реактивная составляющая приведенного сопротивления вторичной обмотки, Ом.

В опыте короткого замыкания первичное напряжение трансформатора постепенно повышают до величины, при которой первичный ток становится равным номинальному. Напряжение, подведенное к первичной обмотке, при котором первичный ток достигает своего номинального значения, при замкнутой накоротко вторичной обмотке, называется напряжением короткого замыкания. Его величину выражают в процентах от номинального первичного напряжения:

$$U_{K\%} = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% = \frac{I_{1K} \cdot Z_K}{U_{1H}} \cdot 100\%. \qquad (10)$$

Активная $U_{ка\%}$ и реактивная $U_{кр\%}$ составляющие напряжения к.з. могут быть рассчитаны по формулам, соответственно:

$$U_{ка\%} = \frac{I_{1K} R_K}{U_{1H}} 100\% \quad \text{или} \quad U_{ка\%} = U_{K\%} \cos\varphi_K; \qquad (11)$$

$$U_{кр\%} \frac{I_{1K} X_{1K}}{U_{1H}} 100\% \quad \text{или} \quad U_{кр\%} = U_{K\%} \sin\varphi_K. \qquad (12)$$

Величина коэффициента мощности при к.з. рассчитывается по формуле:

$$\cos\varphi_K = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}, \tag{13}$$

где $I_{1K}$ – ток при коротком замыкании, А.

При таком подводимом напряжении индукция в магнитопроводе незначительна, ток холостого хода и потери в стали очень малы. Для этого режима вполне справедлива упрощенная схема замещения (рисунок 5).

Мощность, потребляемая из сети при номинальном токе, идет на компенсацию электрических потерь в обмотках трансформатора $P_{KH.}$ Это можно записать в виде:

$$P_{1K} = I_{1K}^2 \cdot R_K = I_{1H}^2 \left(R_1 + R_2^{/}\right) = P_{KH} \tag{14}$$

*3 Расчет параметров схемы замещения трансформатора*

По данным опытов х.х. и к.з. определяются параметры схемы замещения по формулам:

$$Z_1 = Z_2^{/} = \frac{Z_K}{2}; \qquad R_1 = R_2^{/} = \frac{R_K}{2}; \qquad X_1 = X_2^{/} = \frac{X_K}{2}; \tag{15}$$

$$Z_m = Z_0 - Z_1; \qquad R_m = R_0 - R_1; \qquad X_m = X_0 - X_1. \tag{16}$$

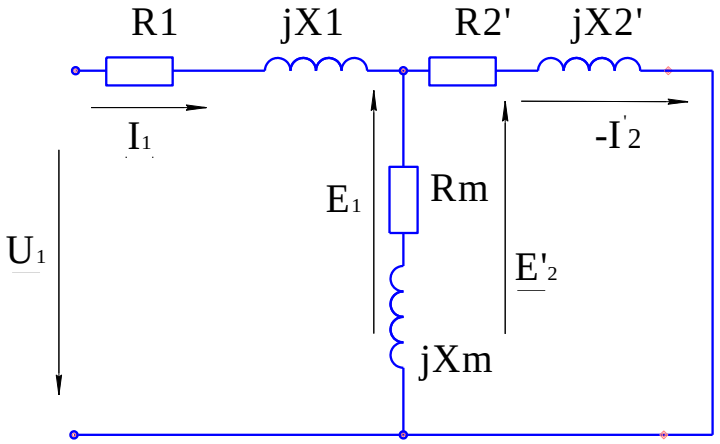



Рисунок 4 – Полная схема замещения трансформатора при к.з.

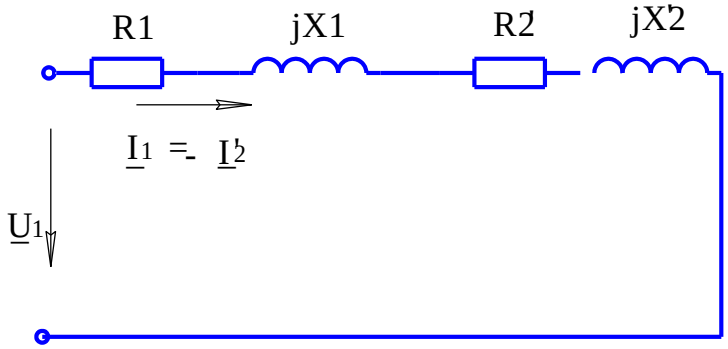



Рисунок 5 – Упрощенная схема замещения трансформатора при к.з.

*4 Работа трансформатора под нагрузкой*

На рисунке 6 приведена электрическая схема трансформатора с подключенной нагрузкой. В данной лабораторной работе нагрузка активная. На рисунке 7 приведена схема замещения трансформатора с нагрузкой. Система векторных уравнений для первичного и вторичного напряжений имеет следующий вид:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j\,X_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1; \qquad (17)$$

$$\underline{U}_2{}' = \underline{E}_2{}' - \underline{I}_2{}' \cdot (R_2' + j\,X_2{}') = \underline{E}_2{}' - \underline{I}_2{}' \cdot \underline{Z}_2{}' \cdot$$

Без учета цепи намагничивания, выражение для $\underline{U}_2{}'$ можно записать так:

$$\underline{U}_1 - \underline{I}_1(R_1 + j\,X_1) - \underline{I}_2'(R_2' + j\,X_2') = -\underline{U}_2' \qquad (18)$$

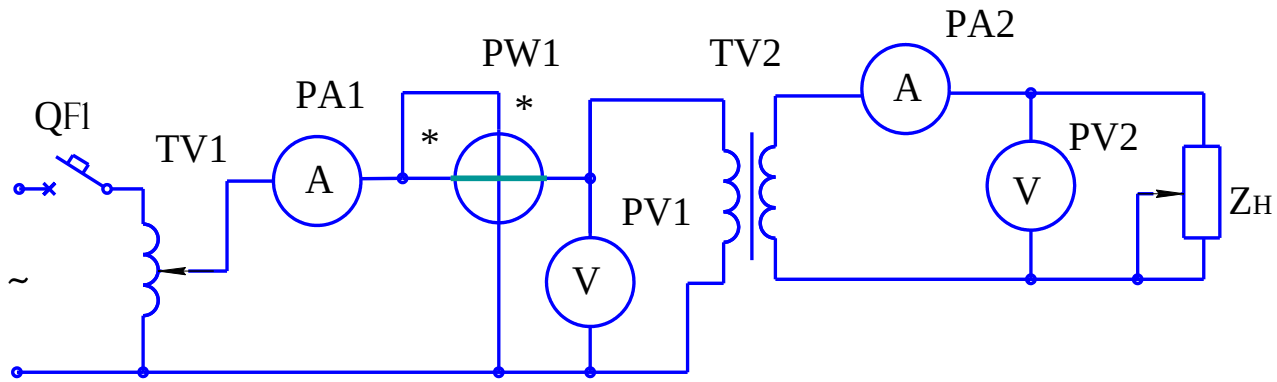



Рисунок 6 – Электрическая схема трансформатора с нагрузкой

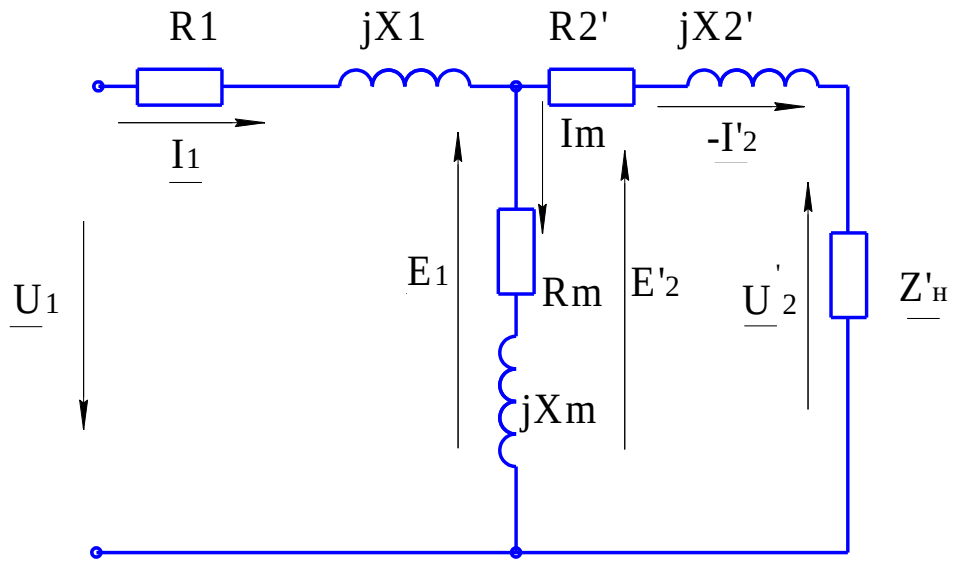



Рисунок 7 – Схема замещения трансформатора с нагрузкой

*5 Внешняя характеристика трансформатора*

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при определенном характере нагрузки и постоянном первичном напряжении: $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = const$ и $\cos\varphi_2 = const$. В трансформаторах малой мощности активная нагрузка вызывает большее падение напряжения, чем активно-индуктивная или активно-емкостная. Это обусловлено более высоким активным сопротивлением обмоток, чем у трансформаторов большой и средней мощности. Примерный вид внешней характеристики приведен на рисунке 8.

Изменение вторичного напряжения обычно выражают в процентах. По внешней характеристике его рассчитывают по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} \cdot 100\%, \qquad (19)$$

где $U_{2H}$ – вторичное напряжение при нагрузке, В.

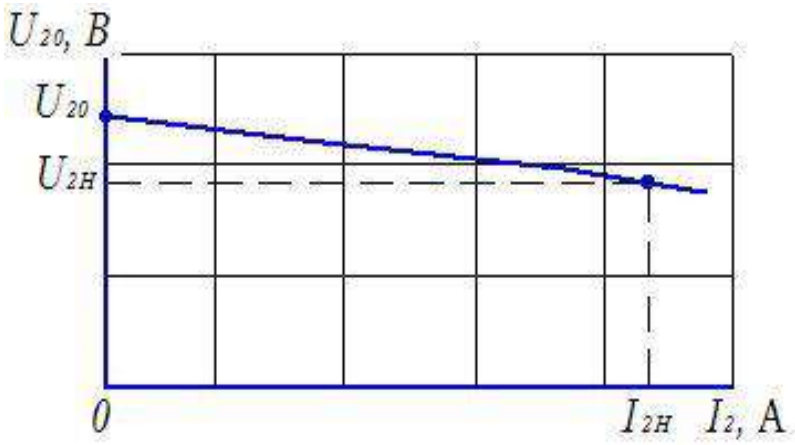



Рисунок 8 – Внешняя характеристика трансформатора

Аналитически $\Delta U_{\%}$ определяется следующим образом:

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{ка\%}\cos\varphi_2 + U_{кр\%}\sin\varphi_2), \quad (20)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ - коэффициент загрузки;

$\varphi_2$ – угол нагрузки, зависящий от вида нагрузки (*R*, *RL*, *RC*).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### *Опыт холостого хода*

1. Собрать схему опыта холостого хода (рисунок 1).

2. Включить автоматический выключатель QF1 и автотрансформатором TV1 установить напряжение $U_1$ = 220В.

3. Записать показания приборов и результаты расчетов в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты опыта холостого хода

| $U_{1H}$, В | $I_{10}$, А | $P_{10}$, Вт | $Z_0$, Ом | $R_0$, Ом | $X_0$, Ом | $\cos\varphi_0$ | $I_{0*}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 220 | | | | | | | |

### *Опыт короткого замыкания*

1. Установить автотрансформатор TV1 в начальное положение.

2. Собрать схему опыта короткого замыкания (рисунок 3).

3. Включить автоматический выключатель QF1 и

автотрансформатором TV1 установить такое напряжение, при котором ток первичной обмотки равен номинальному.

4. Записать показания приборов и результаты расчетов в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты опыта короткого замыкания

| $U_{1K}$, В | $I_{1K}$, А | $P_{1K}$, Вт | $Z_K$, Ом | $R_K$, Ом | $X_K$, Ом | $\cos\varphi_K$ | $U_{K\%}$ | $U_{ka\%}$ | $U_{kp\%}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | |

*Внешняя характеристика*

1. Подключить нагрузку к вторичной обмотке.

2. Включить автоматический выключатель QF1 и автотрансформатором TV1 установить напряжение $U_{1H}$ = 220 В.

3. Поддерживая $U_{1H} = const$, устанавливать реостатом $R_H$ значения вторичного тока, указанные в таблице 3, и записывать результаты измерений.

4. Построить зависимость $U_2 = f(I_2)$.

5. Рассчитать $\Delta U_{\%}$ аналитически (по формуле 20) и по внешней характеристике.

Таблица 3– Внешняя характеристика трансформатора

| $U_2$, В | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_2$, А | 0 | 2,5 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 |

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Электрические схемы, схемы замещения и результаты опытов холостого хода и короткого замыкания.

2. Электрическая схема, схема замещения с нагрузкой, данные внешней характеристики.

3. Результаты расчетов параметров схемы замещения.

4. График внешней характеристики.

5. Расчет $\Delta U\%$ для $I_2$ =10 А по внешней характеристике.

6. Аналитический расчет $\Delta U\%$.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Из какого опыта можно определить коэффициент трансформации?

2. Запишите формулу для расчета коэффициента трансформации.

3. Что такое напряжение короткого замыкания трансформатора?

4. Из каких опытов можно определить параметры схемы замещения?

5. Что такое внешняя характеристика трансформатора?

6. Опишите методику проведения опыта холостого хода.

7. Опишите методику проведения опыта короткого замыкания.

8. Запишите формулу для выражения напряжения короткого замыкания в процентах.

9. Запишите формулу для определения $U_{ка\%}$.

10. Запишите формулу для определения $U_{кр\%}$.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Все переключения производить при отключенном автоматическим выключателем QF1напряжении.

2. Без разрешения преподавателя стенд не включать.

3. После окончания каждого опыта регулятор автотрансформатора Т1 перевести в исходное положение.

4. Перед включением схемы под напряжение предупредить об этом своих товарищей.

*(назад)*

*Лабораторная работа №6*

# МАРКИРОВКА ВЫВОДОВ, СБОРКА СХЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатор состоит из двух и более индуктивно связанных обмоток, расположенных на общем ферромагнитном сердечнике. В двухобмоточном понижающем трансформаторе обмотка, присоединяемая к источнику питания, называется первичной, или обмоткой высокого напряжения (ВН), а обмотка, к которой подключается нагрузка, - вторичной или – низкого напряжения (НН). Соответственно, токи и напряжения этих обмоток называются первичными и вторичными. По числу фазных обмоток трансформаторы бывают однофазными и трехфазными.

Одним из условий включения нескольких трансформаторов на параллельную работу является тождественность их групп соединения обмоток**,** то есть, совпадение по фазе векторов одноименных вторичных линейных напряжений. Если это условие не выполняется, то при параллельном включении трансформаторов с группами, различающимися даже на один номер (например, 0 и 1), появляется вектор разности вторичных напряжений, и по обмоткам протекают уравнительные токи, значительно большие номинальных. Это вызовет дополнительный нагрев обмоток, и трансформаторы могут выйти из строя.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* изучение методики маркировки выводов первичной и вторичной обмоток трансформатора и методики практического определения групп соединения обмоток трехфазного трансформатора.

*Программа работы:*

- ✓ определить омметром выводы первичных и вторичных фазных

обмоток;

- ✓ выполнить маркировку выводов первичных обмоток;
- ✓ выполнить маркировку выводов вторичных обмоток;
- ✓ собрать схемы соединения обмоток ВН и НН - Y/Y – (звезда/звезда) для нулевой группы и сделать необходимые измерения;
- ✓ собрать схемы соединения обмоток ВН и НН - Y/Y - для 6-ой группы и сделать необходимые измерения;
- ✓ собрать схемы соединения обмоток ВН и НН-Y/Δ-(звезда/треугольник) для 1-ой группы и сделать необходимые измерения;
- ✓ собрать схемы соединения обмоток ВН и НН-Y/Δ-для 11-ой группы и сделать необходимые измерения;
- ✓ рассчитать коэффициенты трансформации напряжений для каждой схемы соединения обмоток;
- ✓ построить диаграммы напряжений для каждой группы соединения обмоток.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Маркировка выводов фазных обмоток ВН и НН*

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора может быть соединена в звезду Y, треугольник Δ или зигзаг Z. Если выведена нейтральная точка обмоток, то схема соединения - звезда с нулем - $Y_н$, или зигзаг с нулем – $Z_н$.

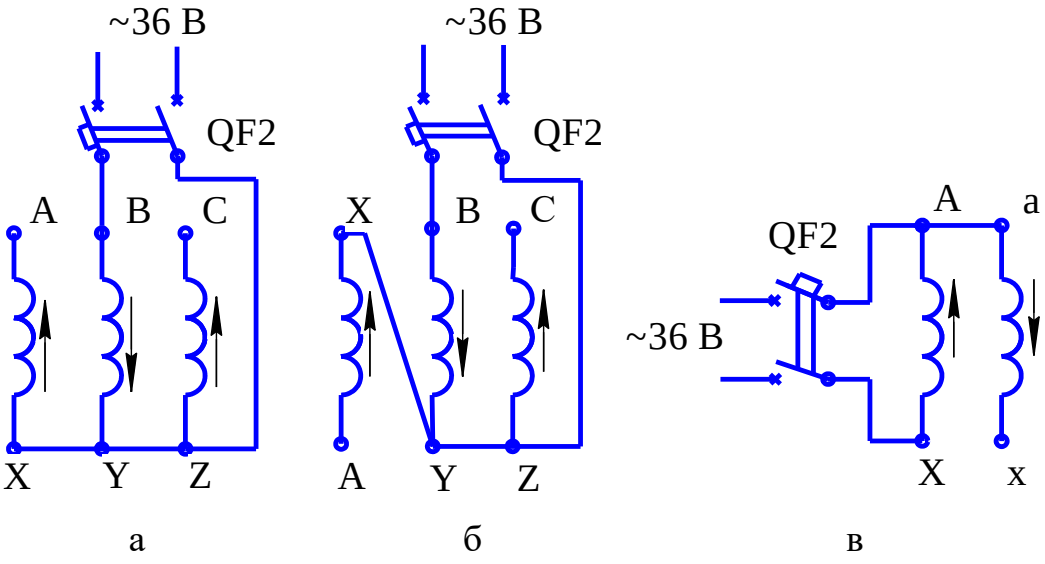
Схемы соединения обмоток выбираются с учетом явлений, происходящих при намагничивании и несимметричной нагрузке. Чаще всего для двухобмоточных трансформаторов применяются схемы соединения $Y/Y_н$, $Y/Z_н$, Y/Δ, $Δ/Y_н$.

Схемы соединения $Y/Y_н$ и $Y/Z_н$ применяются в трансформаторах распределительных сетей небольшой мощности. Обмотка ВН имеет соединение Y. В этом случае фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при схеме соединения Δ, следовательно, и меньше расход изоляционных материалов.

Схема соединения обмоток Δ/Y применяется у трансформаторов распределительных сетей при значительно большем диапазоне изменения мощностей и напряжений, чем $Y/Y_н$. Эта схема используется, главным образом, для питания силовой нагрузки.

Одним из факторов, определяющих группу соединений обмоток трансформаторов, является маркировка обмоток, то есть, условные обозначения их начал и концов. В понижающем трансформаторе обмотка ВН имеет большее число витков, чем обмотка НН. При этом первичные токи ниже вторичных, поэтому сопротивления фазных обмоток ВН выше, чем у обмоток НН. Следовательно, принадлежность выводов к тем или иным обмоткам можно определить путем измерения их активных сопротивлений.

Сначала проверяют маркировку обмоток ВН по схеме, приведенной на рисунке 1.




*а – для ВН – маркировка правильная; б – для ВН – маркировка неправильная; в – для НН – маркировка правильная*

Рисунок 1 – Схемы для маркировки выводов обмоток

Обмотку ВН, соединенную в звезду, подключают к однофазному источнику переменного тока при пониженном напряжении.

При этом в крайних стержнях сердечника магнитный поток равен половине потока среднего стержня, следовательно, ЭДС, индуктированная в

фазах *AX* и *CZ*, численно равна половине ЭДС фазы среднего стержня или половине напряжения $U_{BY}$, так как $U_{BY} \approx E_{BY}$.

При правильной маркировке обмоток (рисунок 1а) по результатам измерений можно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= E_{AX} + E_{BY}; \\ U_{BC} &= E_{CZ} + E_{BY}; \\ U_{AC} &= E_{AX} - E_{CZ} = 0. \end{aligned} \qquad (1)$$

Численно напряжение $U_{AB} = U_{BC} \approx 1{,}5U_{BY}$. Если маркировка обмоток ВН неправильная, то величина напряжений $U_{AB}$ и $U_{BC}$ будет определяться разностью тех же ЭДС (рисунок 1б):

$$U_{AB} = 0{,}5U_{BY}. \qquad (2)$$

Маркировку обмоток НН проверяют поочередно для каждой фазы по схеме, изображенной на рисунке 1в. При правильном обозначении выводов обмотки НН показания вольтметра, включенного, например, между выводами "*X*" и "*x*", будут определяться разностью питающего напряжения и ЭДС, индуктируемой в обмотке НН:

$$U_{Xx} = U_{AX} - E_{ax} \qquad (3)$$

При неправильной маркировке обмотки НН получим выражение:

$$U_{Xx} = U_{AX} + E_{ax} \qquad (4)$$

Проверив маркировку обмоток ВН и НН всех трех фаз, при необходимости, следует изменить обозначения выводов обмоток.

В силовом трансформаторе выводы располагаются слева направо, если смотреть со стороны высшего напряжения. Маркировка выводов обмоток приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Маркировка выводов обмоток силового трансформатора

| Обмотка | Маркировка выводов обмоток | |
|---|---|---|
| | трехфазного | однофазного |
| Высокого напряжения | *A-B-C* | *A-X* |
| Низкого напряжения | *o-a-в-c* | *a-x* |
| Среднего напряжения | $0_m$-$A_m$-$B_m$-$C_m$ | $A_m$-$X_m$ |

*2 Схемы и группы соединения обмоток трансформатора*

Для расчета номера группы соединения обмоток трансформатора необходимо сделать следующее:

- определить угол между векторами соответствующих линейных напряжений (или ЭДС) обмоток ВН и НН;

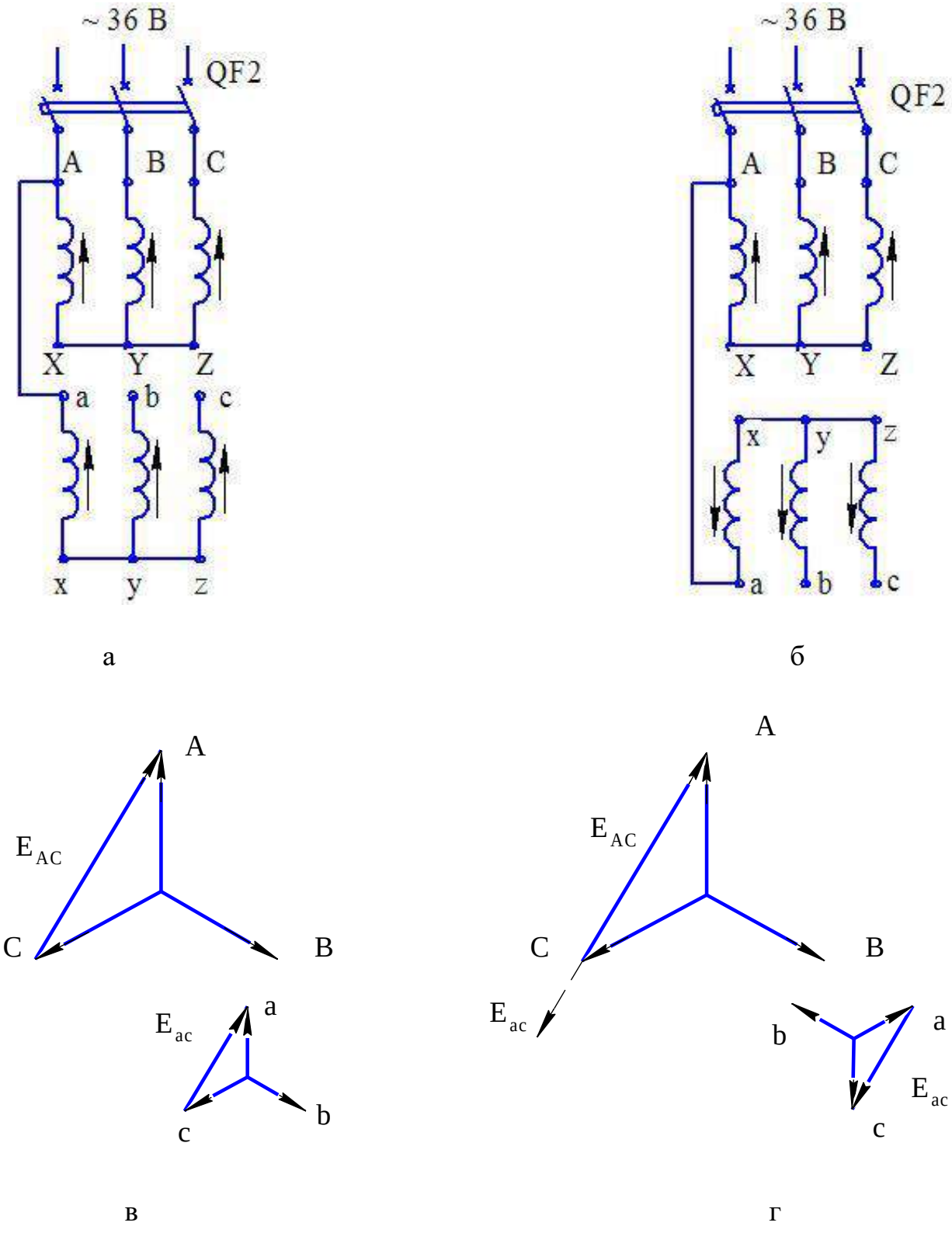
- разделить этот угол на $30^0$.

Необходимо учитывать, что вектор напряжения обмотки ВН всегда является *опережающим*, а положительное направление вращения векторов – *против часовой стрелки*. То есть, вектор напряжения обмотки НН всегда отстает от соответствующего вектора напряжения обмотки ВН.

Применяется практическая система векторов ЭДС и напряжений. На схемах соединения обмоток, например, Y/Y – рисунок 2 а, вектора фазных ЭДС направлены от концов обмоток к началам. Принимается, что обмотки имеют одинаковое направление намотки витков на каркасах катушек. Данная схема соответствует 0-ой группе соединения обмоток.

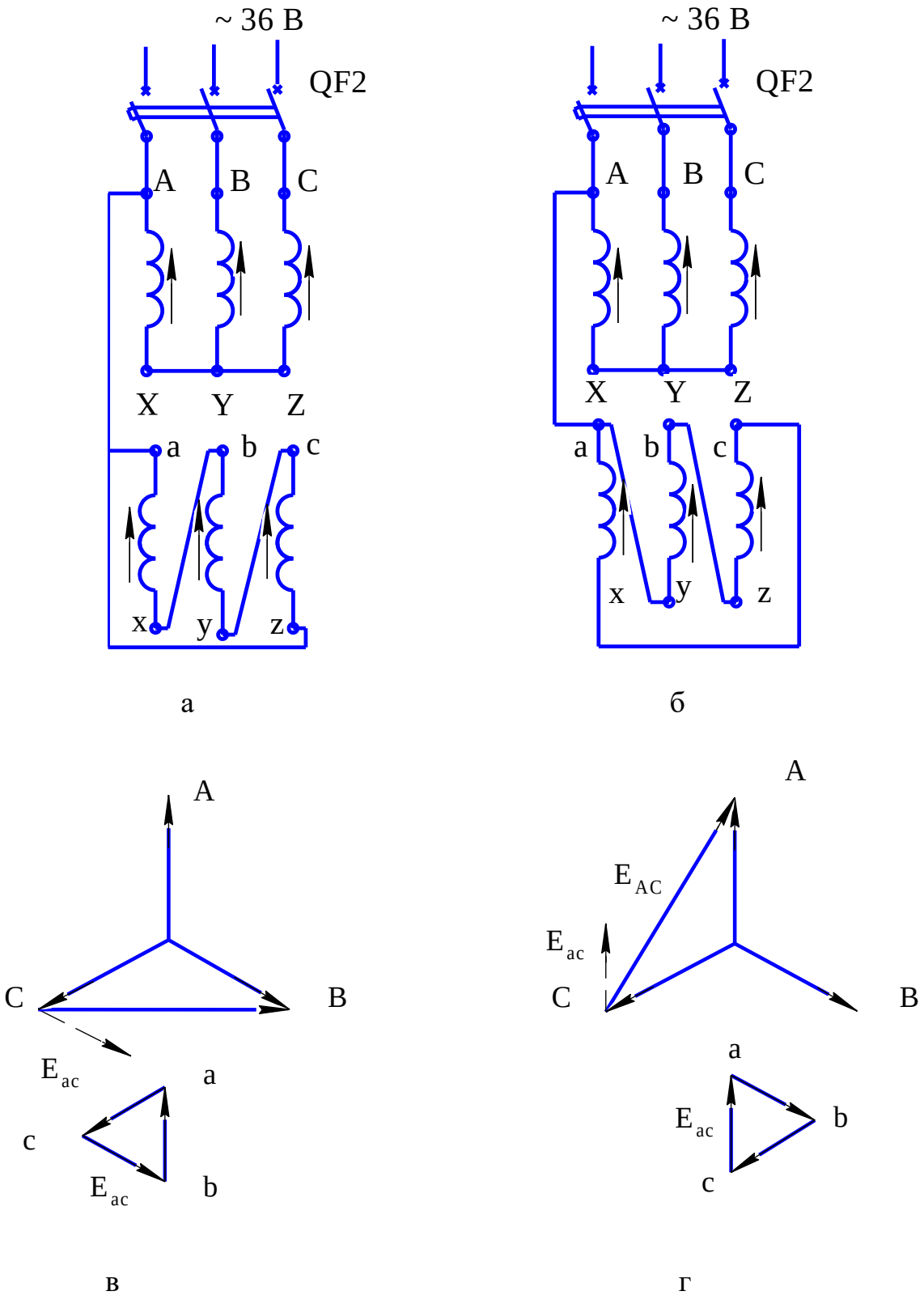
На рисунке 2 б, при таком же соединении обмоток, выводы вторичной обмотки обозначены противоположно, по сравнению со схемой 2 а. Так как направление намотки не изменилось, то вектора вторичных ЭДС поворачиваются на $180^0$ и номер группы соединения для этой схемы – 6.

Всего существует 12 возможных вариантов групп соединения обмоток трансформаторов при круговой перестановке обозначений выводов. При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН номера групп – четные; при разных схемах – нечетные.




*а, в – для 0 группы соединения; б, г – для 6 группы соединения*

Рисунок 2 – Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы




*а, в – для 1 группы соединения; б, г – для 11 группы соединения*

Рисунок 3 – Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы

Номер группы соединения обмоток можно определить не только теоретически – по векторным диаграммам, но и практически – по диаграммам напряжений. Для этого электрически соединяют одноименные выводы обмоток ВН и НН одной фазы: например, *A* и *a*. Затем подают пониженное напряжение на обмотку ВН и измеряют напряжения $U_{Bв}$, $U_{Bc}$, $U_{Cв}$, $U_{Cc}$. Проводят отрезки, соответствующие этим напряжениям в каком-либо масштабе, и соединяют их концы. Вид получившейся диаграммы соответствует определенной группе соединения обмоток (рисунок 4).

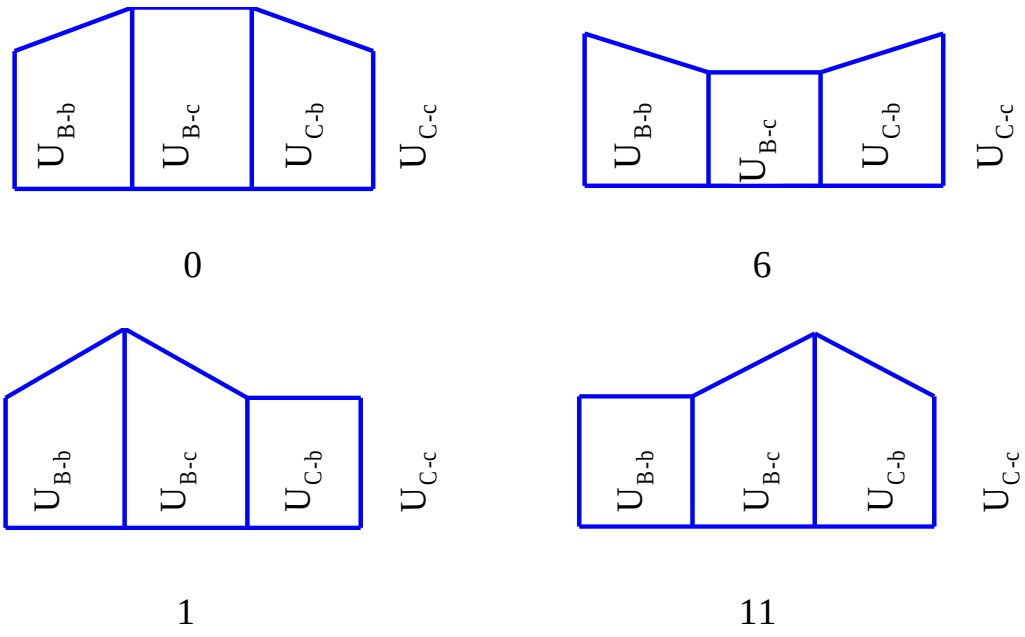



Рисунок 4 – Диаграммы напряжений некоторых групп соединения обмоток трансформаторов

Положительной особенностью трансформатора с соединением вторичной обмотки в зигзаг, по сравнению со схемой соединения в звезду, является то, что при несимметричной нагрузке значительно меньше нарушается симметрия фазных напряжений. Такие трансформаторы целесообразно применять в сельских электрических сетях, где наиболее вероятна несимметричная нагрузка фаз при подключении однофазных потребителей. Недостатком трансформатора со схемой Y/Z является дополнительный расход меди для вторичной обмотки, так как каждая фазная

обмотка состоит из двух частей, расположенных на разных стержнях по принципу кругового перемещения. Так как вектора ЭДС полуобмоток смещены относительно друг друга на $120^0$, то при заданном фазном вторичном напряжении общее число витков в фазных обмотках НН должно быть увеличено в $2/\sqrt{3}$, по сравнению со схемой соединения Y. При этом увеличиваются индуктивные падения напряжения в обмотках НН.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### *Определение выводов фазных обмоток*

Определить омметром принадлежность выводов фазным обмоткам ВН и НН, измерить их сопротивления и данные записать в таблицу 1.

Таблица 1 – Сопротивления фазных обмоток ВН и НН

| $R_{AX}$ | $R_{BY}$ | $R_{CZ}$ | $R_{ax}$ | $R_{by}$ | $R_{cz}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом |
| | | | | | |

### *Маркировка выводов обмоток ВН и НН*

1. Собрать схему, приведенную на рисунке 1а, подать пониженное напряжение на обмотку ВН, сделать необходимые измерения, в соответствии с теоретическими положениями, изложенными в пункте 1, и записать их в таблицу 2.

2. Собрать схему, приведенную на рисунке 1в, подать пониженное напряжение на обмотку ВН, сделать необходимые измерения и записать их в таблицу 3.

3. По выражениям (1)…(4) определить маркировку выводов обмоток ВН и НН и проставить её мелом на панели стенда.

Таблица 2 – Маркировка выводов обмоток ВН

| $U_{AB}$, В | $U_{BC}$, В | $U_{AC}$, В | $E_{AX}$, В | $E_{BY}$, В | $E_{CZ}$, В |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

Таблица 3 – Маркировка выводов обмотки НН

| $U_{AX}$, В | $E_{ax}$, В | $U_{Xx}$, В |
|---|---|---|
| | | |

*Определение групп соединения обмоток*

1. Для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора необходимо электрически соединить одноименные выводы обмоток ВН и НН одной фазы: например, *A* и *a*. Выводы начал фазных обмоток обозначены, соответственно, *A, B, C* и *a, в, c*.

2. Собрать схему, приведенную на рисунке 2а, и подать пониженное трехфазное напряжение на первичную обмотку.

3. Измерить напряжения, указанные в таблице 4, рассчитать коэффициент трансформации и построить диаграмму напряжений.

4. Выполнить то же для схемы рисунка 2б, и схем рисунков 3а и 3б.

5. Сравнить построенные диаграммы напряжений со стандартными, приведенными на рисунке 4.

Таблица 4 – Напряжения для различных групп соединения обмоток

| Группы соединения | $U_{AB}$, В | $U_{ав}$, В | $K$ | $U_{Вв}$, В | $U_{Вс}$, В | $U_{Св}$, В | $U_{Сс}$, В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Y/Y-0 | | | | | | | |
| Y/Y-6 | | | | | | | |
| Y/Δ-1 | | | | | | | |
| Y/Δ-11 | | | | | | | |

Коэффициент трансформации рассчитывается как отношение фазных напряжений обмоток ВН и НН.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты измерений сопротивлений обмоток ВН и НН.

2. Схемы и результаты измерений для маркировки выводов обмоток ВН и НН.

3. Расчеты по формулам (1)…(4) для определения правильной маркировки выводов.

4. Схемы соединения обмоток ВН и НН, результаты измерений и расчетов, диаграммы напряжений для 0, 6, 1 и 11 групп соединения.

5. Краткие выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как по сопротивлению обмоток ВН и НН определить их выводы?

2. Как обозначаются выводы обмоток однофазного трансформатора?

3. Как обозначаются выводы обмоток трехфазного трансформатора?

4. Какие схемы соединения обмоток бывают?

5. Какие преимущества и недостатки имеют трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Z?

6. Как рассчитать коэффициент трансформации трансформатора?

7. Какие группы соединения обмоток трансформатора бывают?

8. От чего зависит группа соединения обмоток трехфазного трансформатора?

9. Может ли иметь трансформатор 1 группу соединения, если его обмотки ВН и НН соединены в звезду?

10. Что необходимо выполнить, для определения номера группы соединения обмоток трансформатора?

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Напряжение можно включать только после проверки схемы преподавателем.

2. Все измерения выполнять при пониженном напряжении - 36 В.

3. Пересоединения в схемах производить только при отключенном напряжении сети 220 В.

4. Перед включением схемы под напряжение предупредить об этом своих товарищей.

*(назад)*

*Лабораторная работа №7*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Параллельное включение силовых трансформаторов необходимо при суточных или сезонных колебаниях нагрузки. Это позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, что уменьшает расход энергии на магнитные потери в них. При этом более просто решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора, остальные могут принять на себя его нагрузку.

При параллельной работе обмотки трансформаторов подключают к общей сети, соответственно, с первичной и вторичной стороны. Нагрузка между параллельно работающими трансформаторами должна распределяться пропорционально их номинальным мощностям.

В данной работе применяются трансформаторы со схемами соединения обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения - $\Delta/\Delta$. Номинальные данные обоих трансформаторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – номинальные данные трансформаторов

| $U_{1H}$, В | $U_{2H}$, В | $I_{1H}$, А | $I_{2H}$, А | $U_{K\%}$, % | $S_H$, кВА |
|---|---|---|---|---|---|
| 220 | 127 | 5,3 | 9,0 | 8,6 | 2 |

Составляющие таблицы 1 следующие:

$U_{1H}$ – первичное номинальное напряжение;

$U_{2H}$ – вторичное номинальное напряжение;

$I_{1H}$ – первичный номинальный ток;

$I_{2H}$ – вторичный номинальный ток;

$U_{K\%}$ – напряжение короткого замыкания;

$S_H$ – полная номинальная мощность.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* проверить выполнение условий включения на параллельную работу двух трансформаторов. Определить параметры распределения нагрузки между трансформаторами.

*Программа работы:*

- ✓ рассчитать коэффициенты трансформации обоих трансформаторов;
- ✓ определить группу соединения обмоток трансформаторов;
- ✓ определить чередование фаз обоих трансформаторов;
- ✓ измерить уравнительный ток между параллельно работающими трансформаторами;
- ✓ определить параметры параллельно работающих трансформаторов и нагрузки;
- ✓ по паспортным данным рассчитать полное сопротивление короткого замыкания трансформаторов;
- ✓ рассчитать уравнительный ток между двумя трансформаторами;
- ✓ построить зависимости вторичных токов трансформаторов от тока нагрузки в одной системе координат.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Условия включения на параллельную работу двух трансформаторов*

Для параллельной работы двух трансформаторов необходимо выполнение следующих условий:

- первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть, соответственно, одинаковы, то есть, $U_{1\ I}=U_{1\ II}$ ; $U_{2\ I}=U_{2\ II}$ – это означает равенство коэффициентов трансформации при допустимом отклонении не более $\pm$ 0,5% от их среднего значения;

- группы соединения обмоток должны быть одинаковы, что соответствует совпадению направления линейных одноименных векторов вторичных напряжений обоих трансформаторов;

- равенство напряжений короткого замыкания, их активных и реактивных составляющих: $U_{K\,I\%} = U_{K\,II\%}$.

Практически допускается разница в $U_{K\%}$ на $\pm 10\%$ от их среднего арифметического значения.

Для определения номера группы соединения обмоток двухобмоточного трансформатора необходимо угол между соответствующими векторами линейных напряжений обмоток ВН и НН разделить на $30^0$.

Соблюдение первых двух условий исключает появление уравнительного тока (и при холостом ходе) в обмотках трансформаторов при их включении на параллельную работу.

Нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется следующим образом:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{U_{KII\%}}{U_{KI\%}} \cdot \frac{S_{HI}}{S_{HII}} \qquad (1)$$

Это выражение показывает, что нагрузка распределяется прямо пропорционально номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания трансформаторов, то есть, третье условие необходимо соблюдать для распределения нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

При подключении на параллельную работу трансформаторов различных номинальных мощностей необходимо, чтобы меньший по мощности трансформатор имел более высокую величину напряжения к.з. В этом случае его возможная недозагрузка не будет ограничивать работу всей системы. Стандарты рекомендуют включать на параллельную работу трансформаторы при отношении их номинальных мощностей не более чем 3:1.

*2 Расчет уравнительного тока*

Рассчитать уравнительный ток можно, зная разность напряжений между соответствующими фазными обмотками. Кроме того, необходимо знать сопротивление короткого замыкания каждого трансформатора. Уравнительный ток рассчитывается по формуле:

$$I_{ур} = \frac{\Delta U}{Z_{К\,I} + Z_{К\,II}}\ , \qquad (2)$$

где $\Delta U$ – разность напряжений, В;

$Z_{К\,I}$, $Z_{К\,II}$ – сопротивления к.з. трансформаторов, Ом.

Сопротивления к.з. трансформаторов $Z_К$ можно определить, по их паспортным данным (таблица 1):

$$Z_К = (\ U_{К\%}\ /100\ )(U_{2Н}\ /I_{2Н})\ . \qquad (3)$$

*3 Группы соединения обмоток*

Группу соединения обмоток двухобмоточного трансформатора, имеющего по 6 выводных концов от первичных и вторичных обмоток (А, В, С и *а, в, с*) можно проверить измерением напряжений между соответствующими выводами обмоток ВН и НН. Для этого соединяют накоротко начала одной фазы ВН и НН, например, А1 и *а*1, (рисунок 1), трансформатор подключают к сети и измеряют напряжения $U_{Вв,}$ $U_{Вс}$, $U_{Св}$, $U_{Сс}$.

Напряжения $U_{Вв}$ и $U_{Сс}$ должны быть одинаковы и равны значениям, которые определены по формуле:

$$U_{Вв}=U_{Сс}=U_2(К-1), \qquad (4)$$

где $U_2$ – вторичное линейное напряжение, В;

$К$ – коэффициент трансформации.

Если для искомой группы соединения измеренные в опыте и рассчитанные по формуле (4) значения напряжений $U_{Вв}$ и $U_{Сс}$ одинаковы, а

измеренное напряжение $U_{Bc}$ больше напряжений $U_{Bв}$ и $U_{Cc}$, то номер группы соединения – 0. В данном случае это соответствует схеме соединения обмоток ВН и НН – Δ/Δ.

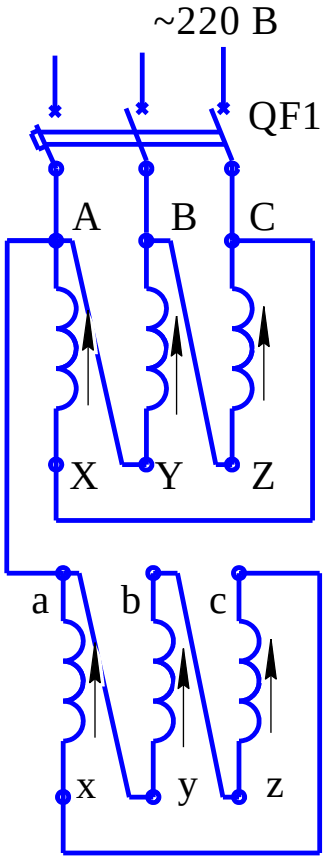



Рисунок 1 – Схема опытного определения группы соединения обмоток трансформатора

*4 Чередование фазных обмоток трансформаторов*

Кроме выполнения перечисленных выше условий, у трансформаторов, включаемых на параллельную работу, должно быть одинаковое чередование фазных обмоток. Это необходимо для исключения аварийного режима при параллельном включении трансформаторов. При правильном подключении трансформаторов к сетям ВН и НН, величина напряжения между соответствующими фазными обмотками обоих трансформаторов должна быть равна 0.

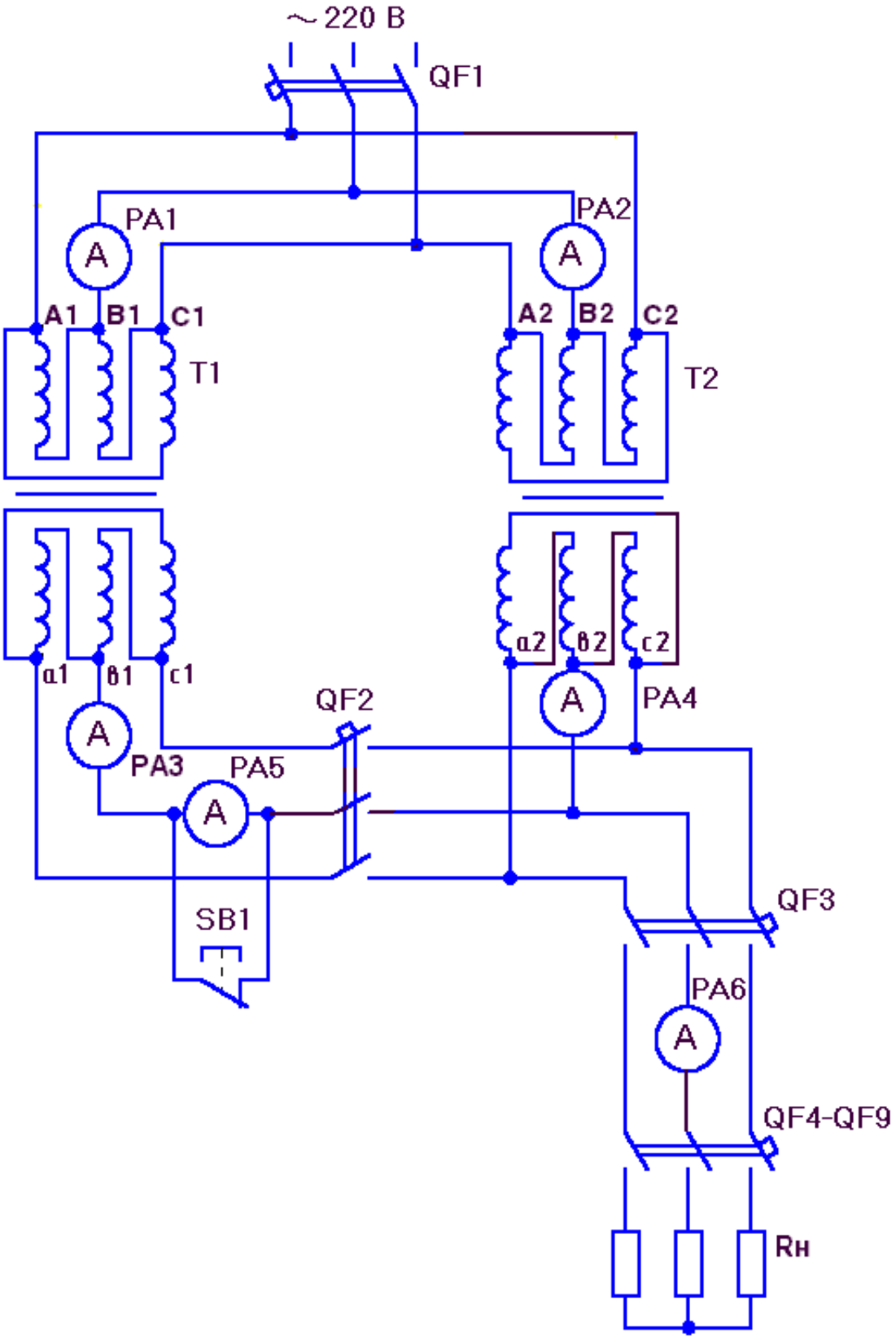



Рисунок 2 – Схема включения трансформаторов на параллельную работу

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### *Определение группы соединения обмоток*

1. Соединить накоротко начала обмоток ВН и НН фазы А (рисунок 1).

2. Автоматическим выключателем QF1 подать напряжение на обмотку ВН.

3. Измерить и записать в таблицу 2 значения напряжений $U_{Bв}$ , $U_{Bc}$ , $U_{Cв}$, $U_{Cc}$.

Таблица 2 – Значения напряжений для определения группы соединения

| Номер трансформатора | $U_{Bв}$, В | $U_{Bc}$, В | $U_{Cв}$, В | $U_{Cc}$, В | Группа соединения |
|---|---|---|---|---|---|
| Т1 | | | | | |
| Т2 | | | | | |

По методике, приведенной в пункте 3, определить группу соединения обмоток трансформаторов.

### *Проверка чередования фазных обмоток*

1. Соединить накоротко выводы *с1-с2* обмоток НН обоих трансформаторов.

2. Включить автоматический выключатель QF1 и измерить напряжение между выводами *а1* и *а2*, *в1* и *в2*.

При правильном подключении обмоток ВН и НН обоих трансформаторов к первичной и вторичной сетям, показания вольтметра должны быть равны 0.

### *Измерение уравнительного тока при холостом ходе трансформаторов*

1. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2.

2. Нажать кнопку SB1, амперметром PA5 измерить уравнительный ток и записать полученный результат.

При расчете уравнительного тока по формуле (2) следует принять величину $\Delta U = 0{,}85$ В.

*Распределение нагрузки между трансформаторами*

Для проведения опыта необходимо включить автоматические выключатели QF1, QF2, QF3 и записать значения токов и напряжения в таблицу 3. Постепенно увеличивая нагрузку выключателями QF4…QF9, записывать показания приборов. Общий ток нагрузки измеряется амперметром PA6. В данной работе нагрузка трансформаторов – активная.

Таблица 3 – Распределение нагрузки между трансформаторами

| № п/п | $I_{1T1,}$ А | $I_{1T2,}$ А | $I_{2T1,}$ А | $I_{2T2,}$ А | $I_{н,}$ А | $U_{2,}$ В |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Построить в одной системе координат зависимости $I_{2T1}$ , $I_{2T2} = f\,(I_н)$.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Электрическая схема для определения группы соединения обмоток трансформаторов.

2. Результаты измерений напряжений и вычислений при определении группы соединения обмоток трансформаторов.

3. Измеренное значение уравнительного тока.

4. Паспортные данные трансформаторов.

5. Расчетные значения $Z_K$ и уравнительного тока.

6. Электрическая схема включения двух трансформаторов на параллельную работу.

7. Результаты измерений токов и вторичного напряжения трансформаторов при нагрузке.

8. Графики зависимостей вторичных токов от тока нагрузки в одной системе координат.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется необходимость включения трансформаторов на параллельную работу?

2. Какие условия должны быть соблюдены при включении трансформаторов на параллельную работу?

3. Почему нежелательна параллельная работа трансформаторов различных мощностей?

4. Для чего необходимо одинаковое чередование фазных обмоток ВН и НН при включении трансформаторов на параллельную работу?

5. По какой формуле можно определить сопротивление к.з. трансформатора?

6. Опишите методику для определения группы соединения обмоток трансформатора.

7. Опишите методику для определения чередования фазных обмоток трансформатора.

8. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами?

9. Для чего необходимо равенство напряжения короткого замыкания, их активных и реактивных составляющих?

10. Какие группы соединения обмоток трансформатора бывают

# ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Все переключения производить при отключенном напряжении.
2. Без проверки схемы преподавателем стенд не включать.
3. При определении распределения нагрузки между трансформаторами кнопку SB1 не нажимать, во избежание повреждения амперметра.
4. Перед включением схемы под напряжение предупредить об этом своих товарищей.

*(назад)*

## *Лабораторная работа №8*

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одной из особенностей сельских электроустановок является то, что к одной трансформаторной подстанции подключены, как правило, одно-, двух- или трехфазные потребители. Это приводит к нарушению симметрии напряжений трансформатора, что оказывает существенное влияние на его работу. Несимметричные режимы работы трансформатора обычно исследуют, используя метод симметричных составляющих.

В данной лабораторной работе несимметричный режим создается посредством однофазного к.з. в обмотке низкого напряжения (НН) трансформатора. Обмотка высокого напряжения (ВН) трансформатора включается на пониженное напряжение.

Для измерения параметров на стенде установлены 3 амперметра с пределами измерения 1 А (PA1, PA2, PA3), 2 амперметра – на 5 А (PA4, PA5), 2 амперметра – на 15 А (PA6, PA7), ваттметр PW1, вольтметр V1 с пределом измерения 30 В, силовой трансформатор T1 с выводами первичной и вторичной обмоток. Трансформатор тока TA1 (15/5). Питание на стенд подается автоматическим выключателем QF1, пониженное напряжение 24 В снимается с выводов A1, B1, C1.

## ЦЕЛЬ И ПРОГРАММА РАБОТЫ

*Цель работы:* исследование несимметричного режима работы трехфазного трансформатора со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$. Исследование несимметричного режима работы трехфазного трансформатора со схемами соединения обмоток $\Delta/Y_н$. Определение сопротивления нулевой последовательности. Графическое и аналитическое определение напряжения нулевой последовательности.

*Программа работы:*

- ✓ соединить обмотки трансформатора по схеме $Y/Y_н$ и измерить линейные и фазные токи, напряжения при однофазном к.з. во вторичной обмотке;
- ✓ соединить обмотки трансформатора по схеме $\Delta/Y_н$ и измерить линейные и фазные токи, напряжения при однофазном к.з. во вторичной обмотке;
- ✓ собрать схемы и сделать необходимые измерения для определения сопротивлений нулевой последовательности, соответствующих схемам $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$ ;
- ✓ рассчитать напряжения нулевой последовательности для схем соединения $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$ ;
- ✓ построить векторные диаграммы напряжений обмотки НН и графическим методом определить напряжения нулевой последовательности, соответственно, для схем $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1 Распределение токов в трансформаторе при несимметричной нагрузке для схемы соединения $Y/Y_н$*

Для этой схемы соединения предельная несимметричная нагрузка получается при загрузке одной фазы вторичной обмотки, например, фазы "*a*".

Тогда $I_a=I_{2н}$ ; $I_B=I_C=0$ ($I_{2н}$ – номинальный вторичный ток).

Токи в первичной обмотке трансформатора могут быть рассчитаны по следующим выражениям:

$$I_A = I_{Aф} = \frac{2}{3}\cdot I_a \cdot K_{21}; \qquad I_B = I_{Bф} = \frac{1}{3}\cdot I_a \cdot K_{21}; \qquad I_C = I_{Cф} = \frac{1}{3}\cdot I_a \cdot K_{21},$$

где $K_{21}$ – коэффициент трансформации – отношение вторичного напряжения к первичному.

Приведенные уравнения показывают, что по первичной обмотке ток протекает по всем трем фазам. Это объясняется тем, что в трансформаторе, при соединении его обмоток по схеме Y/Yн, трансформируются только токи прямой и обратной последовательностей. Ток нулевой последовательности

$I_{оп}$ не трансформируется и протекает только по фазам вторичной обмотки. Он является намагничивающим и создает магнитный поток нулевой последовательности $Ф_{оп}$, одинаковый по величине и направлению во всех трех стержнях трансформатора. Потоки нулевой последовательности каждой фазы замыкаются между верхним и нижним ярмами магнитопровода через стенки масляного бака, вызывая добавочные потери и нагрев трансформатора.

Во всех фазах первичной и вторичной обмоток трансформатора потоки нулевой последовательности индуктируют ЭДС нулевой последовательности $E_{оп}$, которая определяет смещение потенциала нулевой точки и нарушение равенства фазных напряжений обеих обмоток. По этой причине ток нулевого провода трансформатора со схемой $Y/Y_н$ не должен быть более 25% от номинального тока данной обмотки. В этом случае смещение потенциала нулевой точки не превышает 5% от номинального фазного напряжения, что является допустимым.

### *2 Распределение токов в трансформаторе при несимметричной нагрузке для схемы соединения $Δ/Y_н$*

Если нагружена фаза "*a*" вторичной обмотки, то $I_a=I_{2н}$; $I_B=I_C=0$ и во вторичной обмотке протекает ток нулевой последовательности. Треугольник является замкнутым контуром для фазных токов нулевой последовательности, не имеющих временного сдвига. При этом поток $Ф_{02}$ вторичной обмотки будет почти полностью компенсирован потоком $Ф_{01}$, создаваемым током нулевой последовательности первичной обмотки. Смещение потенциала нулевой точки вторичной обмотки будет незначительным. Линейные токи первичной обмотки, определяются по формулам:

$$I_A = Ia \cdot K_{21};\ I_C = Ia \cdot K_{21};\ I_B = 0;$$

они не имеют составляющих нулевой последовательности.

*3 Сопротивление нулевой последовательности*

Системе токов нулевой последовательности соответствует сопротивление нулевой последовательности $Z_{оп}$. Расчет сопротивления нулевой последовательности очень сложен ввиду трудности учета магнитного сопротивления неоднородного контура, по которому замыкаются линии однофазного магнитного потока нулевой последовательности (сердечник, немагнитная среда, крышка и стенки бака). Поэтому сопротивление $Z_{оп}$ определяют опытным путем. Используют в качестве питающей - вторичную обмотку, подводя к ней однофазное переменное напряжение. Однофазный ток при этом соответствует току нулевой последовательности. Первичную обмотку трансформатора соединяют звездой или треугольником, в зависимости от того, для какой схемы соединения определяется $Z_{оп}$.

Этим схемам соединения обмоток соответствуют схемы замещения трансформатора (рисунок 1). В схеме Δ/Yн магнитодвижущие силы (МДС) нулевой последовательности первичной и вторичной обмоток уравновешивают друг друга, и поле нулевой последовательности принимает характер поля в режиме короткого замыкания (рисунок 1 б).

По измеренным напряжению, току и мощности определяют значение $Z_{оп}$ и его активную $R_{оп}$ и реактивную $X_{оп}$ составляющие для одной фазы по формулам:

$$Z_{оп} = \frac{U}{3I}\ ; \qquad R_{оп} = \frac{P}{3I^2}; \qquad X_{оп} = \sqrt{Z_{оп}^2 - R_{оп}^2}\ . \tag{1}$$

Смещение потенциала нулевой точки вторичной обмотки рассчитывается по формуле:

$$U_{оп} = I_{оп} \cdot Z_{оп}, \tag{2}$$

причем

$$I_{оп} = \frac{1}{3} \cdot I_{к}, \tag{3}$$

где $I_к$ – ток к.з., измеренный во вторичной обмотке в схемах, соответственно, $Y/Y_н$ и $\Delta/Yн$.

Эти схемы приведены, соответственно, на рисунках 3 и 4.

Согласно схеме замещения, приведенной на рисунке 1б, можно записать:

$$Z_{on} = \frac{Z_1' \cdot Z_m}{Z_1' + Z_m} + Z_2 = Z_2 + \frac{Z_1'}{\frac{Z_1'}{Z_m} + 1}; \quad (4)$$

так как $Z_1' << Z_m$, то $\frac{Z_1'}{Z_m} < 1$ и $Z_{on} \approx Z_2 + Z_1' = Z_K$. (5)

где $Z_m$ – сопротивление цепи намагничивания, Ом;

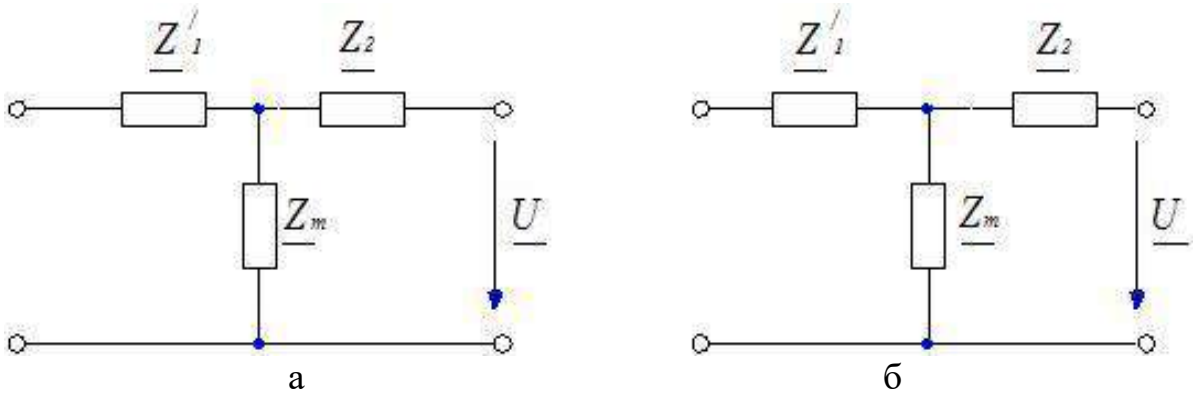
$Z_1'$ – сопротивление первичной обмотки, приведенное к вторичной, Ом;

$Z_2$ – сопротивление вторичной обмотки, Ом;

$Z_K'$ – сопротивление к.з., Ом.

Поэтому сопротивление нулевой последовательности при схеме соединения обмоток $\Delta/Y_н$ относительно мало и приблизительно равно сопротивлению короткого замыкания трансформатора. Малая величина $Z_{on}$ определяет для этой схемы небольшую величину смещения потенциала нулевой точки фазных напряжений.

Расчетные величины смещений потенциала должны совпадать со значениями, полученными графически из векторных диаграмм линейных и фазных напряжений вторичной обмотки (рисунок 2).




*а - для схемы* $Y/Y_н$; *б - для схемы* $\Delta/Y_н$

Рисунок 1 – Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

*4 Графическое определение напряжения нулевой последовательности*

Графическим представлением напряжения нулевой последовательности $U_{оп}$ является отрезок между нулевыми точками 0 и 01 векторных диаграмм напряжений, построенных для симметричного и несимметричного режимов работы (рисунок 2). Масштаб линейных и фазных напряжений необходимо выбрать таким, чтобы чертеж был достаточно крупным. Это снижает погрешность определения $U_{оп}$.

Векторные диаграммы строятся для обмоток низкого напряжения трансформатора по результатам измерений в схемах $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.

Порядок определения $U_{оп}$ следующий:

- задается масштаб напряжений;
- строится треугольник линейных напряжений *авс* для симметричного режима;
- на пересечении векторов фазных напряжений определяется расположение нулевой точки 0;
- аналогично делаются построения для несимметричного режима; при этом вектор $\overline{вс}$ является общим и для треугольника *а1 в1 с1* несимметричных напряжений, так как $U_{вс}$ практически не меняется;

- проводится отрезок между точками 0 и 01, и по масштабу определяется напряжение $U_{on}$.

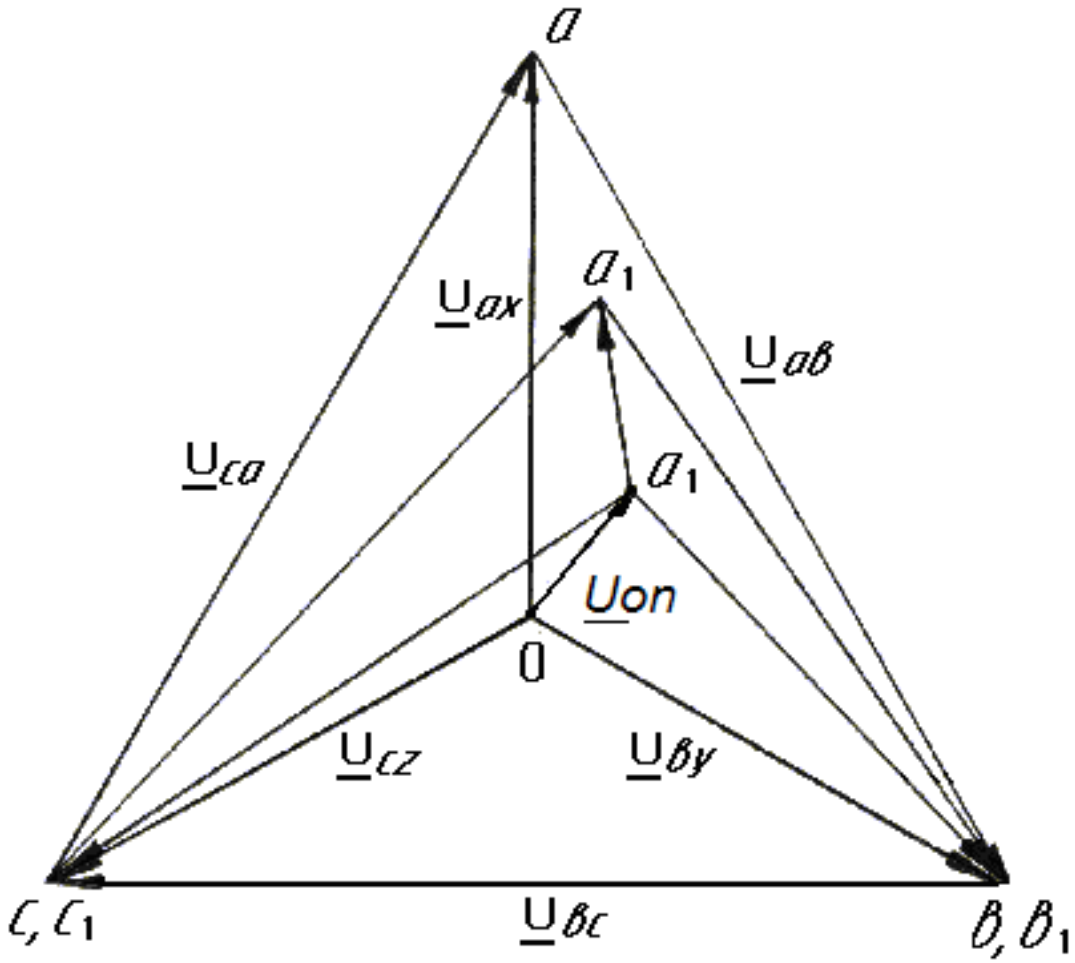



Рисунок 2 – Векторные диаграммы для графического определения напряжения $U_{on}$

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*Несимметричная нагрузка при схеме соединения обмоток Y/ $Y_н$*

1. Собрать схему, показанную на рисунке 3.

2. Измерить фазные и линейные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток, результаты измерений записать в таблицу 1.

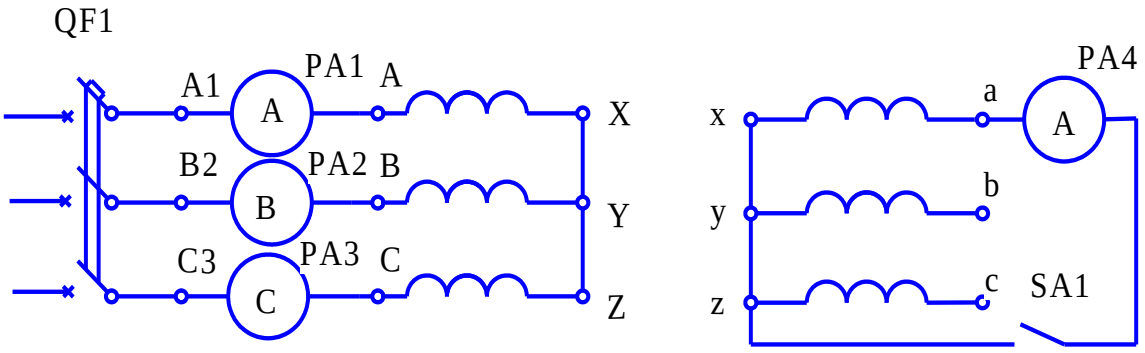



Рисунок 3 – Схема испытания трансформатора при соединении обмоток $Y/Y_н$

Таблица 1 – Результаты измерений при схеме соединения обмоток $Y/Y_н$

| Режим работы | $U_{AB}$ В | $U_{BC}$ В | $U_{CA}$ В | $U_{AX}$ В | $U_{BY}$ В | $U_{CZ}$ В | $U_{ав}$ В | $U_{вс}$ В | $U_{са}$ В | $U_{ах}$ В | $U_{ву}$ В | $U_{cz}$ В | $I_а$ А | $I_в$ А | $I_с$ А | $I_к$ А |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| х.х. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| н.н. | | | | | | | | | | | | | | | | |

*Несимметричная нагрузка при схеме соединения обмоток $\Delta/Y_н$*

1. Собрать схему, показанную на рисунке 4.

2. Измерить фазные и линейные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток, результаты измерений записать в таблицу 2.

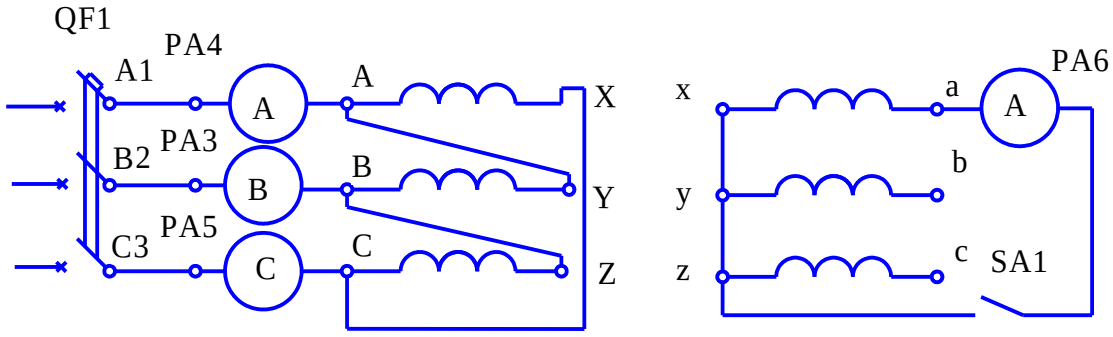



Рисунок 4 – Схема испытания трансформатора при соединении обмоток $\Delta/Y_н$

Таблица 2 – Результаты измерений при схеме соединения обмоток $\Delta/Y_н$

| Режим работы | $U_{AB}$ В | $U_{BC}$ В | $U_{CA}$ В | $U_{ав}$ В | $U_{вс}$ В | $U_{са}$ В | $U_{ах}$ В | $U_{ву}$ В | $U_{cz}$ В | $I_а$ А | $I_в$ А | $I_с$ А | $I_к$ А |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| х.х. | | | | | | | | | | | | | |
| н.н. | | | | | | | | | | | | | |

*Определение сопротивлений нулевой последовательности для схем соединения $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$*

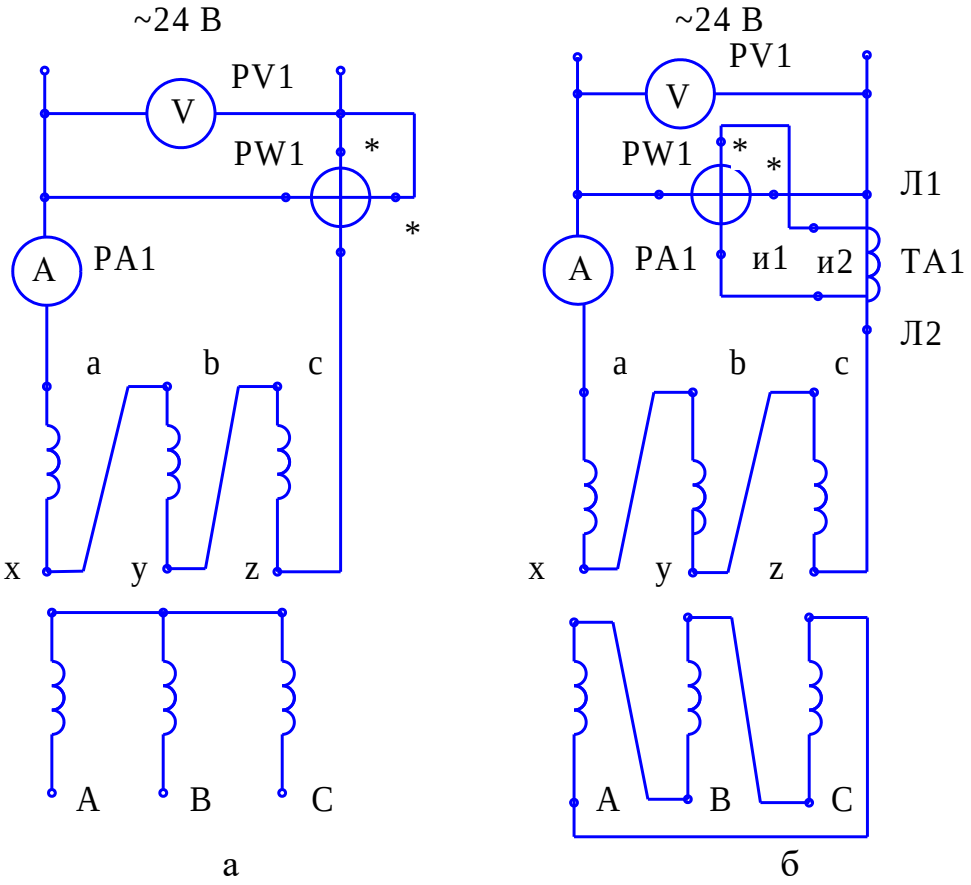
1. Собрать схемы, приведенные на рисунке 5.

2. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 3.

3. По формулам (1)…(3) рассчитать сопротивления и напряжения нулевой последовательности для схем $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.

Таблица 3 – Определение сопротивлений нулевой последовательности

| Схемы включения трансформаторов | Опытные данные | | | Расчетные данные | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U$ | $I$ | $P$ | $Z_{оп}$ | $R_{оп}$ | $X_{оп}$ | $U_{001}$ |
| | В | А | Вт | Ом | Ом | Ом | В |
| Y/Yн | | | | | | | |
| Δ/Yн | | | | | | | |




*а - для схемы $Y/Y_н$;  б - для схемы $\Delta/Y_н$*

Рисунок 5 – Схемы опытного определения сопротивления нулевой последовательности

*Построение векторных диаграмм линейных и фазных напряжений вторичной обмотки*

Построить векторные диаграммы линейных и фазных напряжений вторичной обмотки для схем соединения обмоток $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$. Определить величины смещений потенциала нулевой точки вторичной обмотки (согласно рекомендациям пункта 4).

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схемы соединения обмоток трансформатора $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$ при несимметричной нагрузке.
2. Таблицы с результатами измерений токов и напряжений.
3. Схемы для определения сопротивления нулевой последовательности.
4. Таблицы с результатами измерений и расчетов сопротивлений и напряжений нулевой последовательности.
5. Построенные в масштабе векторные диаграммы фазных и линейных напряжений вторичной обмотки трансформатора для схем соединения обмоток $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.
6. Определенные по векторным диаграммам значения напряжения нулевой последовательности для схем $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.
7. Краткие выводы по проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях по обмоткам трехфазного трансформатора могут протекать токи нулевой последовательности?
2. Как замыкается поток нулевой последовательности трехфазного трехстержневого трансформатора?

3. Почему при несимметричной нагрузке искажение фазных напряжений больше у трансформатора со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$, чем у трансформатора со схемами соединения $\Delta/Y_н$?

4. Как распределяются токи в трансформаторе при несимметричной нагрузке для схемы соединения $Y/Y_н$?

5. Как распределяются токи в трансформаторе при несимметричной нагрузке для схемы соединения $\Delta/Y_н$?

6. Запишите формулу для определения величины полного сопротивления нулевой последовательности.

7. Запишите формулу для определения величины активной составляющей сопротивления нулевой последовательности.

8. Запишите формулу для определения величины реактивной составляющей сопротивления нулевой последовательности.

9. Запишите формулу для расчета смещения потенциала нулевой точки вторичной обмотки.

10. Опишите графический способ определения напряжения нулевой последовательности.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Напряжение можно включать только после проверки схемы преподавателем.

2. Все измерения выполнять при пониженном напряжении - 24 В.

3. Пересоединения в схемах производить только при отключенном напряжении сети 220 В.

4. Вторичную обмотку трансформатора тока ТА1 не оставлять разомкнутой.

5. Перед включением схемы под напряжение предупредить об этом своих товарищей.

*(назад)*

# ЛИТЕРАТУРА

1. Ванурин В.Н. Электрические машины / В.Н. Ванурин. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 304 с.

2. Ванурин В.Н. Электрические машины: Учебник. / В.Н. Ванурин – Санкт-Петербург.: Издательство Лань, 2016. – 304 с.

3. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.

4. Встовский А.Л. Электрические машины: учебное пособие / А.Л. Встовский. – Красноярск: СФУ, 2013. – 464 с.

5. ГОСТ 2.702 – 2011. Правила выполнения электрических схем. М.: Стандартинформ, 2011.

6. ГОСТ 2.709 – 89. Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах. М.: Стандартинформ, 2005.

7. ГОСТ 2.710 – 81. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Стандартинформ, 2005.

8. ГОСТ 2.721 – 74. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. М.: Стандартинформ, 2005.

9. ГОСТ 2.722 – 68. Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические. М.: Стандартинформ, 2008.

10. ГОСТ 2.723 – 68. Обозначения условне графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. М.: Стандартинформ, 2010.

11. ГОСТ 2.727 – 68. Обозначения условные графические в схемах. Разрядники, предохранители. М.: Стандартинформ, 2010.

12. ГОСТ 2.728 – 74. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. М.: Стандартинформ, 2010.

13. ГОСТ 2.729 – 68. Обозначения условные графические в схемах. Приборы электроизмерительные. М.: Стандартинформ, 2010.

14. ГОСТ 2.730 – 73. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые. М.: Стандартинформ, 2010.

15. ГОСТ 2.732 – 68. Обозначения условные графические в схемах. Источники света. М.: Стандартинформ, 2010.

16. ГОСТ 2.747 – 68. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

17. ГОСТ 2.755 – 87. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

18. ГОСТ 2.767 – 89. Обозначения условные графические в электрических схемах. Реле защиты. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

19. Епифанов А.П. Электрические машины: учебник / А.П. Епифанов, Г.А. Епифанов. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 300 с.

20. Епифанов А.П. Электрические машины / А.П. Епифанов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 264 с.

21. Зарандия Ж.А. Электрические машины: учебное пособие / Ж.А. Зарандия, А.В. Кобелев. – Тамбов: ТГТУ, 2020. – 192 с.

22. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов /А.В. Иванов-Смоленский – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 656 с.

23. Кислицын А.Л. Трансформаторы: Учебное пособие по курсу «Электротехника» / А.Л. Кислицын – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 76 с.

24. Кобозев В.А. Электрические машины: учебное пособие / В.А. Кобозев. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 480 с.

25. Кобозев В.А. Электрические машины. Часть 3. Электрические машины постоянного тока: учебное пособие / В.А. Кобозев, А.И. Адошев, М.А. Мельников – Ставрополь: Сервисшкола, 2019. – 32 с.

26. Кобозев В.А. Электрические машины: учебное пособие / В.А. Кобозев. – Ставрополь: СтГАУ, [б.г.]. – Часть 1: Машины постоянного тока. Трансформаторы – 2015. – 200 с.

27. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для бакалавров / И.П. Копылов – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 675 с.

28. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов /И.П. Копылов. – 3-е изд., испр.- М.:Высш. шк., 2002.– с.533…539.

29. Обрусник В.П. Электрические машины. / В.П. Обрусник – М.: ТУСУР, 2007. – 125 с.

30. Паперный Л.Е. Эксплуатация силовых трансформаторов: учебно-методическое пособие для слушателей курсов повышения квалификации энергетиков и студентов / Л.Е. Паперный, М.В. Алейникова. – Минск: БНТУ, 2015. – 148 с.

31. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов / А.В. Сапожников – 2-е изд., перераб. – Москва: Госэнергоиздат, 1959. – 360 с.

32. Свиридов Ю.П. Обозначения условные буквенно-цифровые и графические на электрических схемах: практикум по дисциплине «Стандарты в проектировании». /Ю.П. Свиридов – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 41 с.

33. Скорняков В.А. Электрические машины: учебное пособие / В.А. Скорняков. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2012. – 152 с.

34. Соломин В.А. Электрические машины: учебное пособие: в 3 частях / В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020 – Часть 1: Трансформаторы – 76 с.

35. Сотников В.В. Электрические машины: в 2 ч. Ч.1. Трансформаторы. Общие вопросы теории электрических машин.

Асинхронные двигатели: учебное пособие / В.В. Сотников. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – 160 с.

36. Усольцев А.А. Электрические машины: учебное пособие /А.А. Усольцев. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.

37. Черномашенцев В.Г. Электрические машины: учеб.-метод. пособие для самостоятельной проработки курса: в 2 ч. Ч. 1. Трансформаторы. Асинхронные машины / В.Г. Черномашенцев, В.А. Пацкевич, В.Н. Галушко; под ред. В.Г. Черномашенцева; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 129 с.

38. Шевченко А.Ф. Электрические машины постоянного тока: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ, Г.Б. Вяльцев, Л.Г. Шевченко – Новосибирск: НГТУ, 2015. – 68 с.

39. Шевырёв Ю.В. Электрические машины: учебник/ Ю.В. Шевырёв. – Москва: МИСИС, 2017. – 261 с.

40. Электрические машины. Плакаты, схемы. – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. – 134 с.

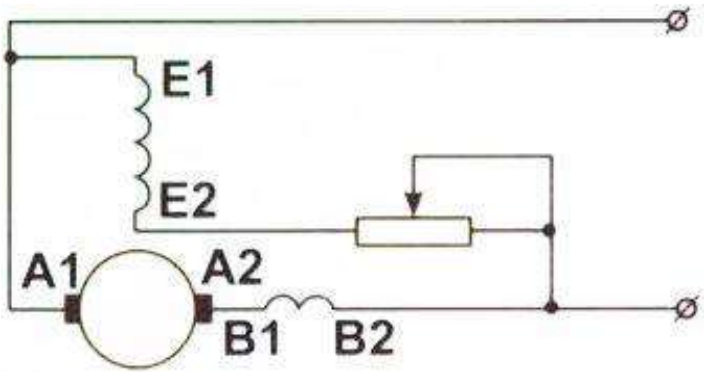
*(назад)*

# ПРИЛОЖЕНИЯ

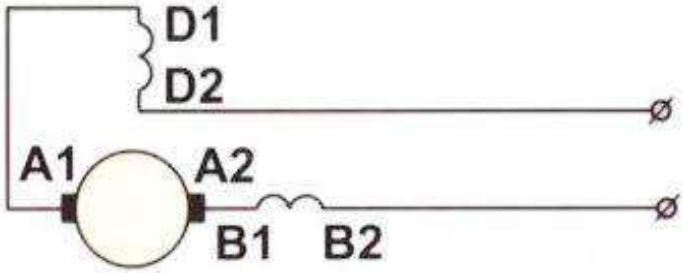
ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

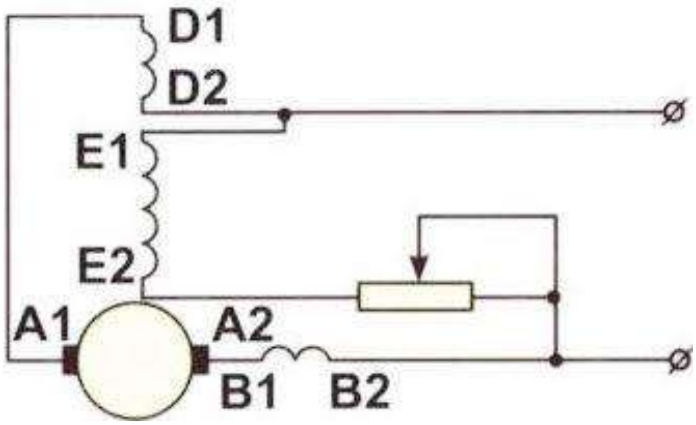
Машины постоянного тока




а



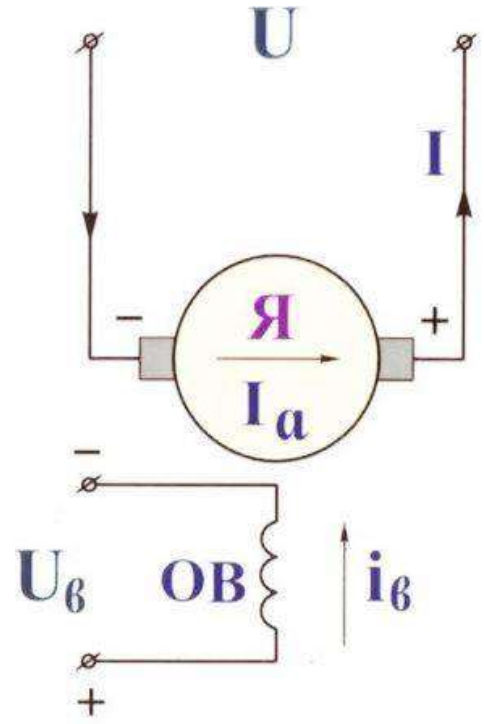

б



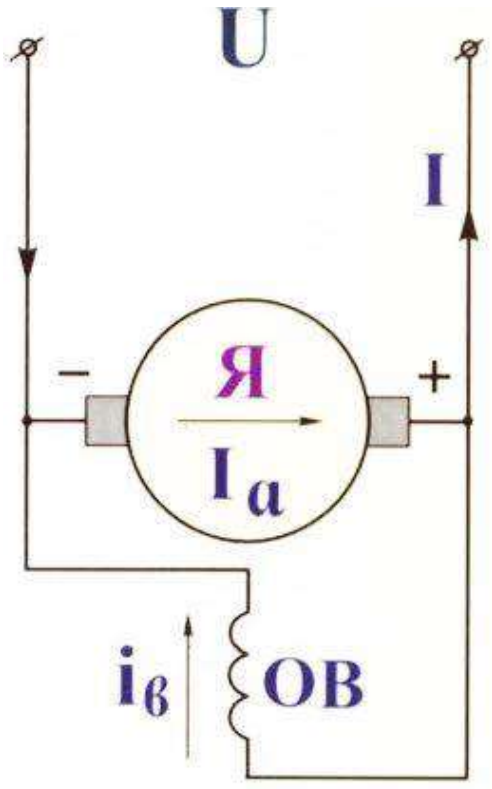

в

*A1, A2 – обмотка якоря; E1, E2 – обмотка параллельного возбуждения; D1, D2 – обмотка последовательного возбуждения; B1, B2 – обмотка добавочных полюсов*

Рисунок А.1 – Принципиальные схемы включения двигателей постоянного тока параллельного (а), последовательного (б) и смешанного возбуждения

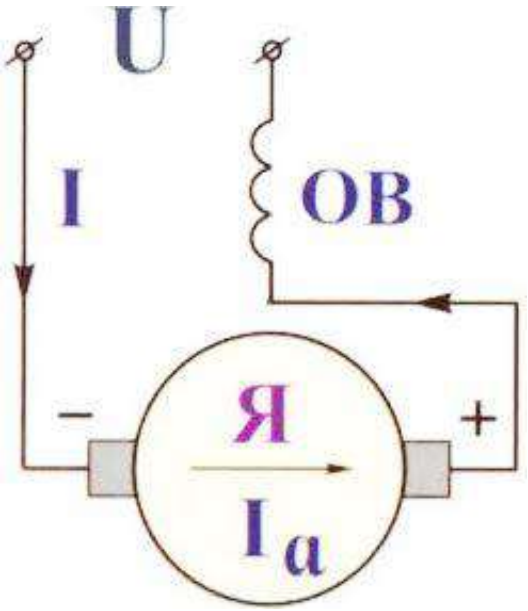



а

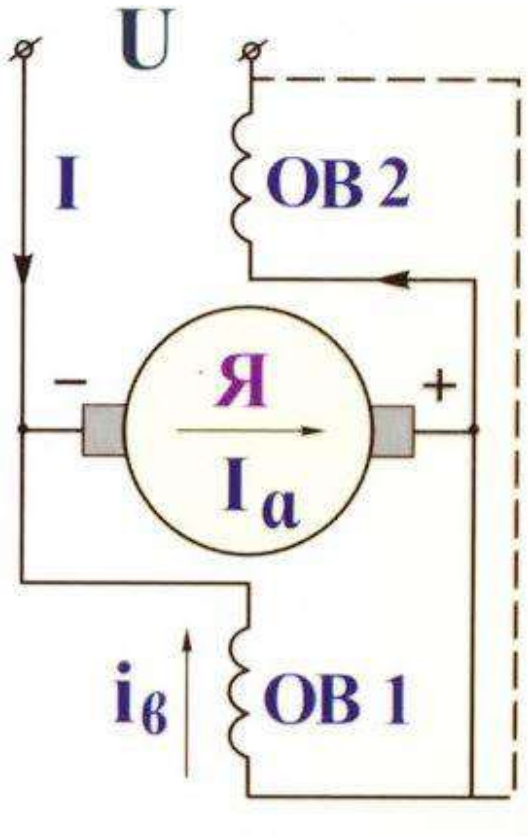



б

Рисунок А.2 – Принципиальные схемы включения генераторов постоянного тока независимого (а) и параллельного (б) возбуждения




а




б

Рисунок А.3 – Принципиальные схемы включения генераторов постоянного тока последовательного (а) и смешанного (б) возбуждения

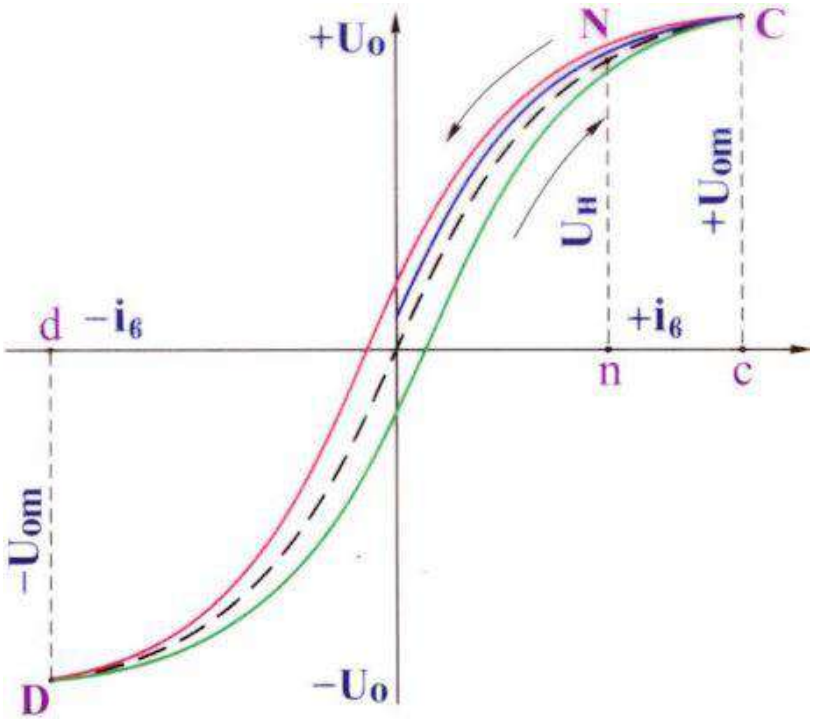



Рисунок А.4 – Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

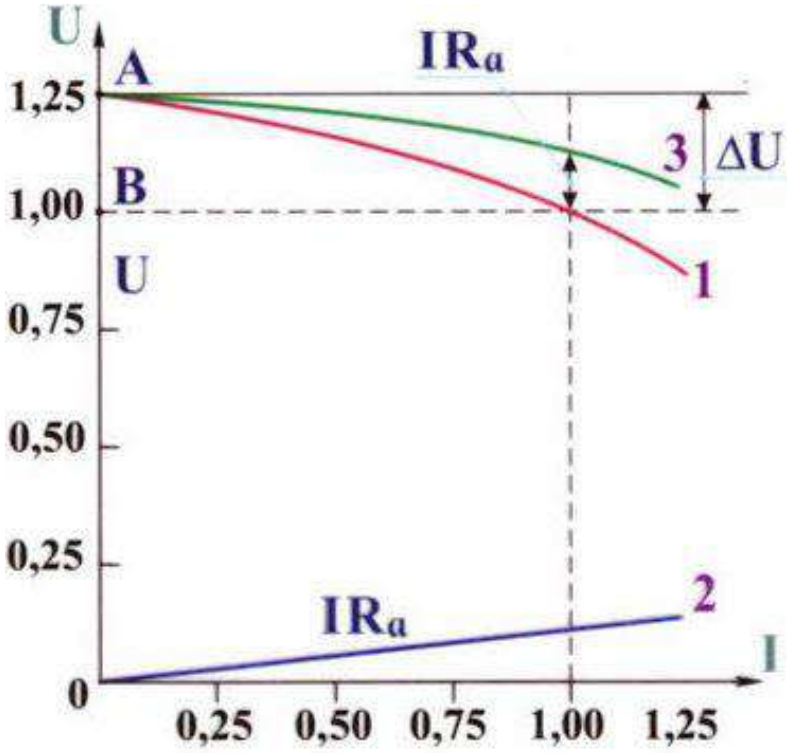



Рисунок А.5 – Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

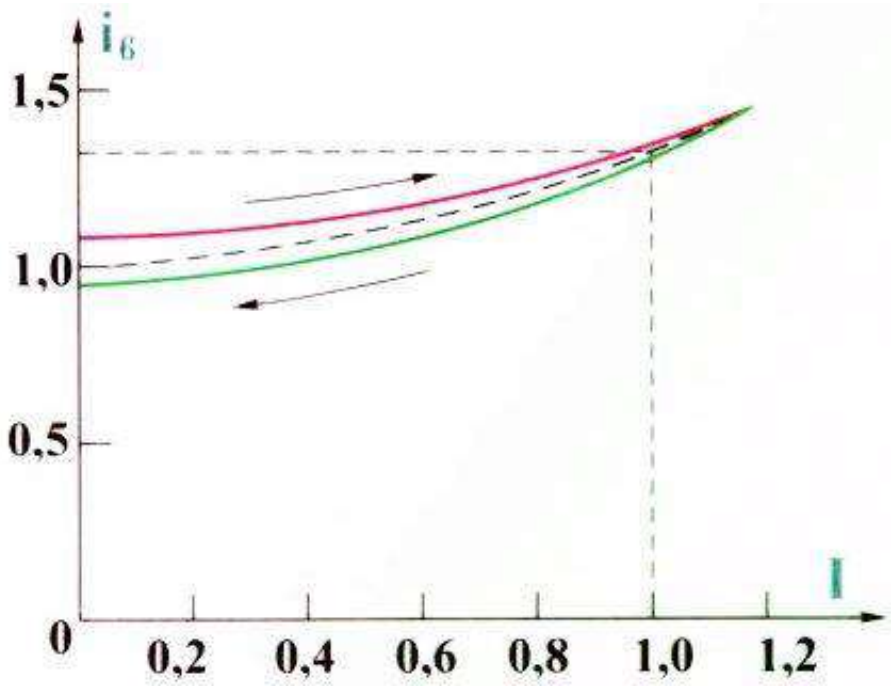



Рисунок А.6 – Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

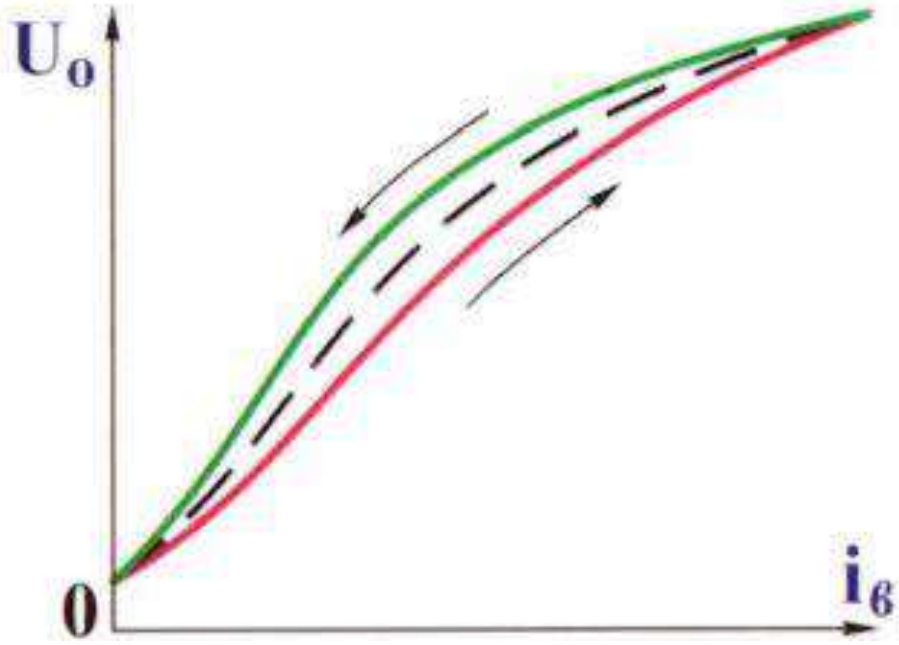



Рисунок А.7 – Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

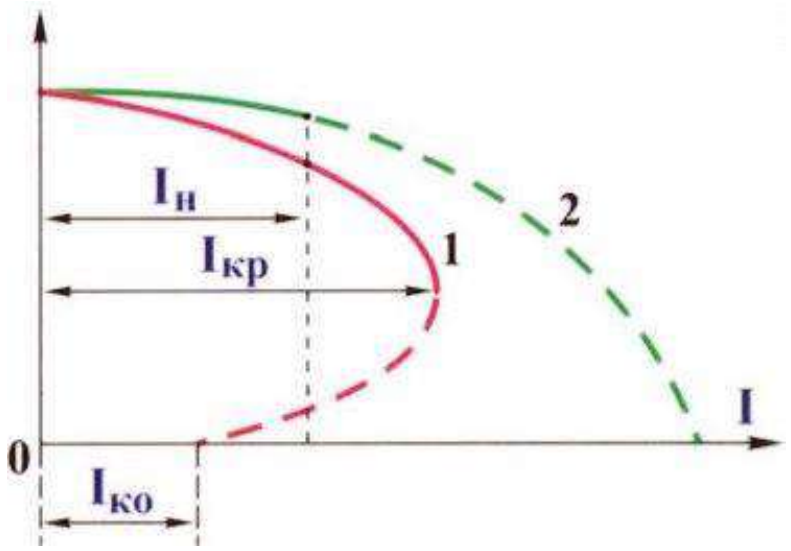
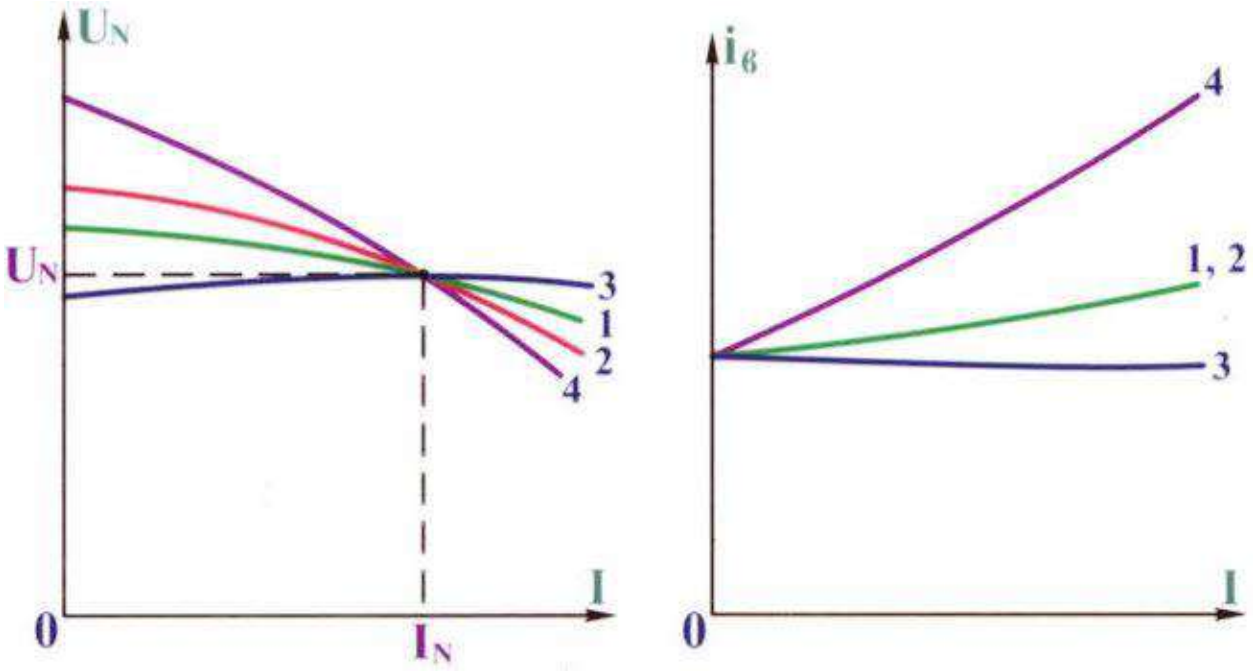


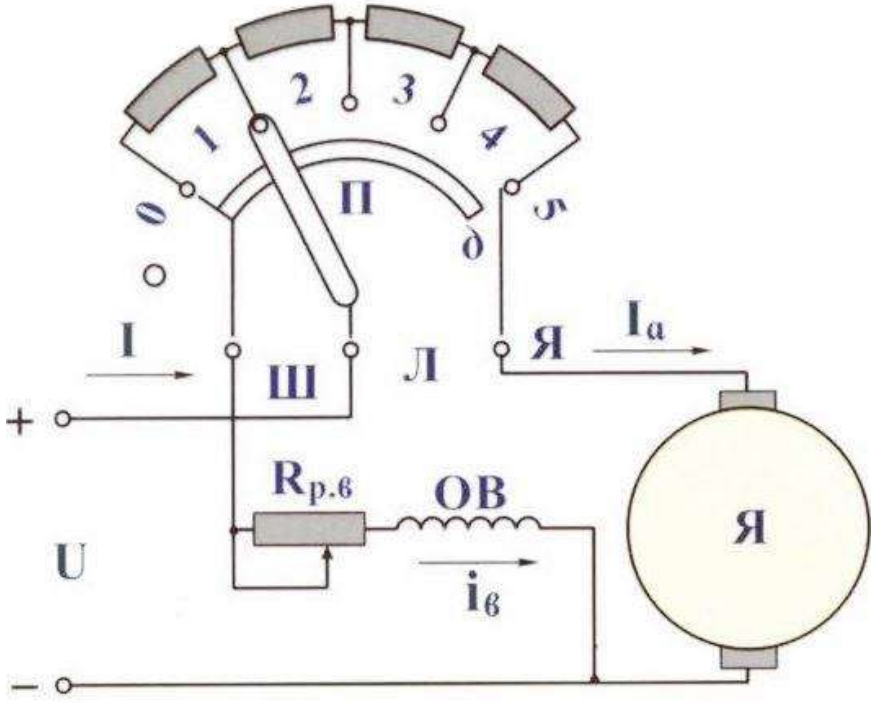

Рисунок А.8 – Внешняя характеристика генератора параллельного (1) и независимого (2) возбуждения



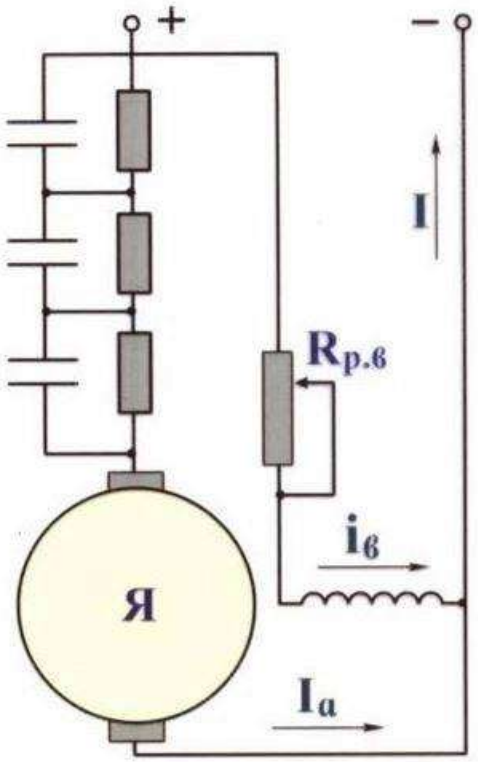

а б

*независимое возбуждение (1), параллельное возбуждение (2), смешанное возбуждение с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки*

Рисунок А.9 – Сравнение внешний (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов




а




б

Рисунок А.10 – Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с помощью пускового реостата (а) и пусковых сопротивлений

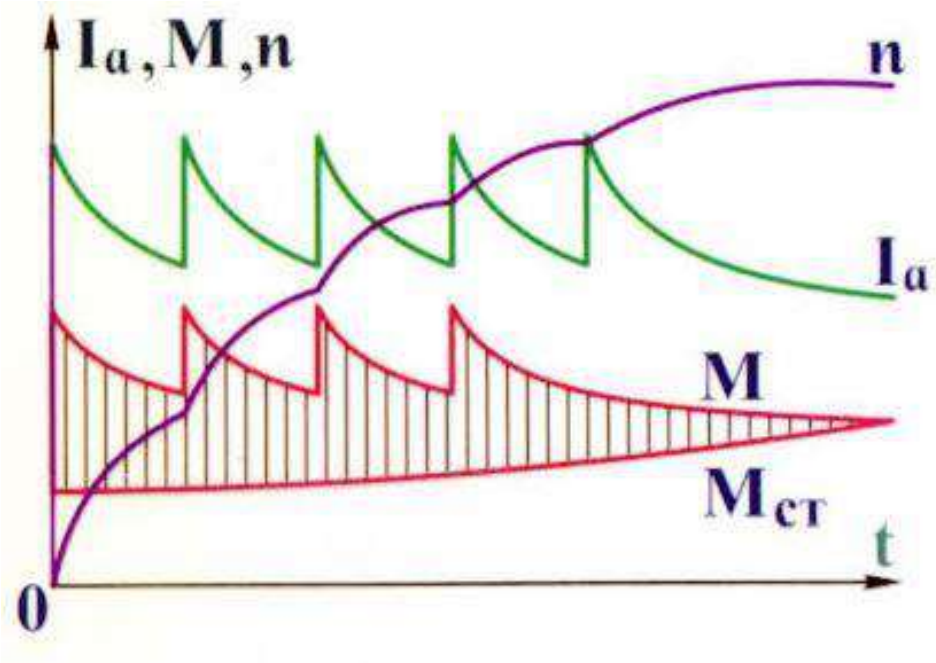



Рисунок А.11 – Зависимость $I_a$, M и n от времени при пуске двигателя параллельного возбуждения

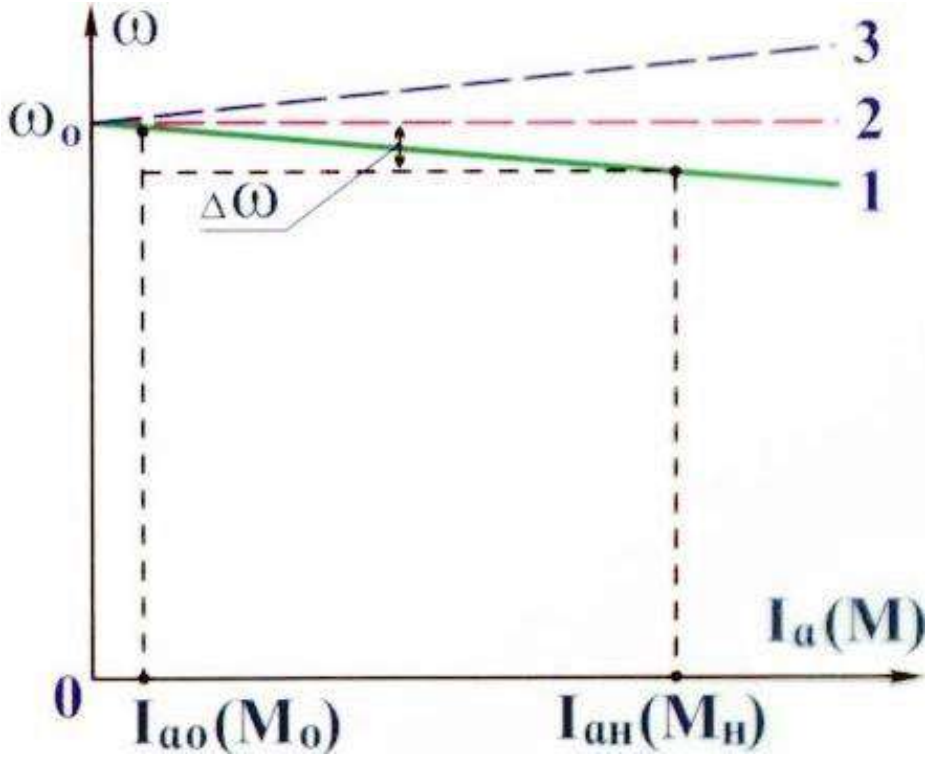



Рисунок А.12 – Виды естественных скоростных и механических характеристик двигателя параллельного возбуждения

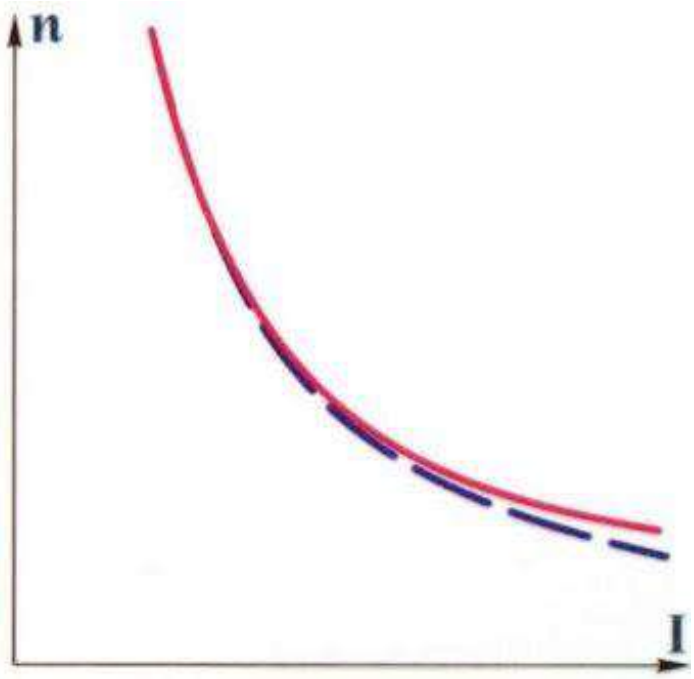
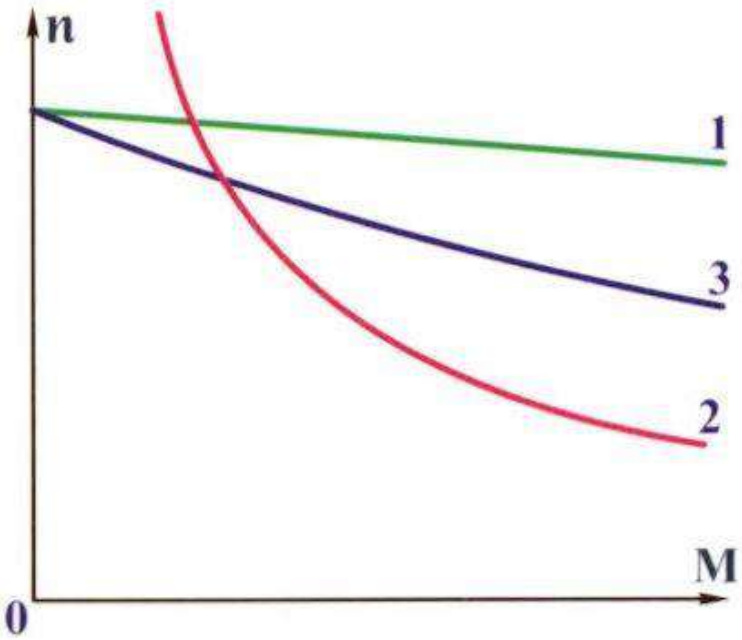



Рисунок А.13 – Естественная скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения




*1 – параллельное возбуждение; 2 – последовательное возбуждение; 3 – смешанное возбуждение с согласным включением последовательной обмотки*

Рисунок А.14 – Естественные механические характеристики двигателей постоянного тока

*(назад)*

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов

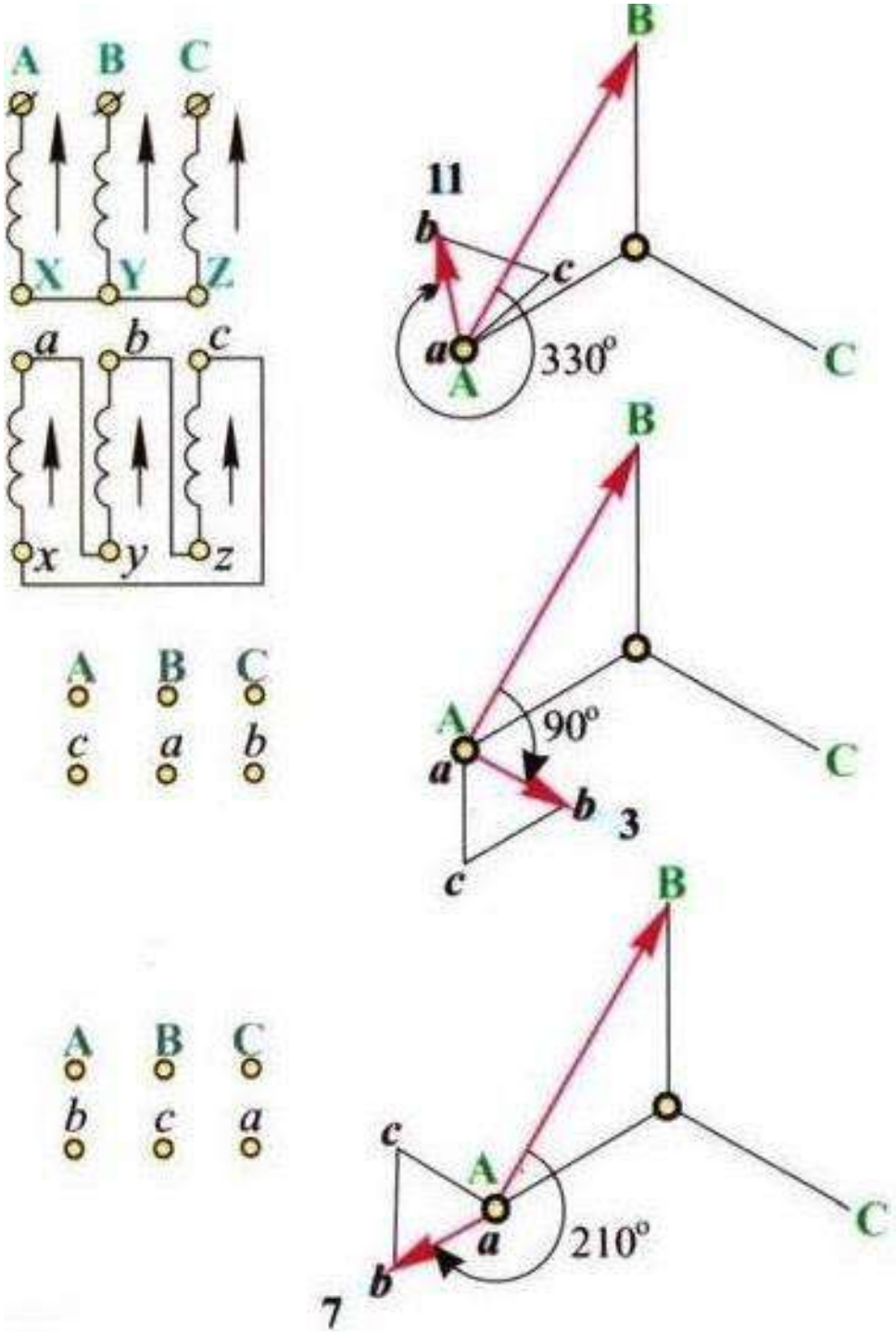
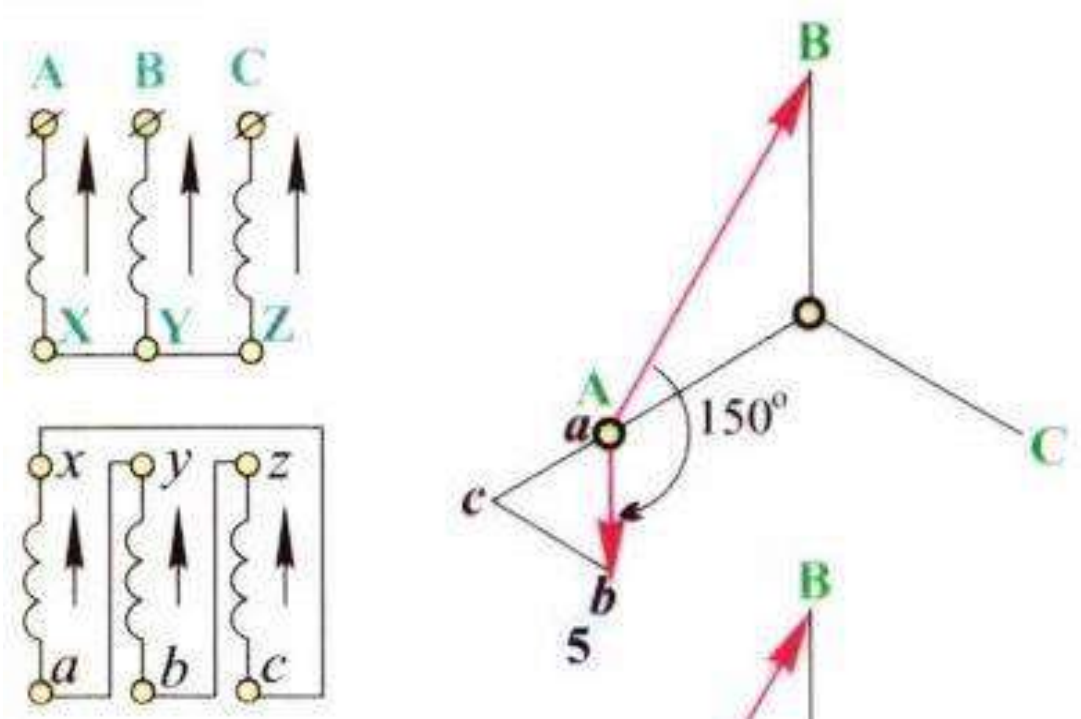
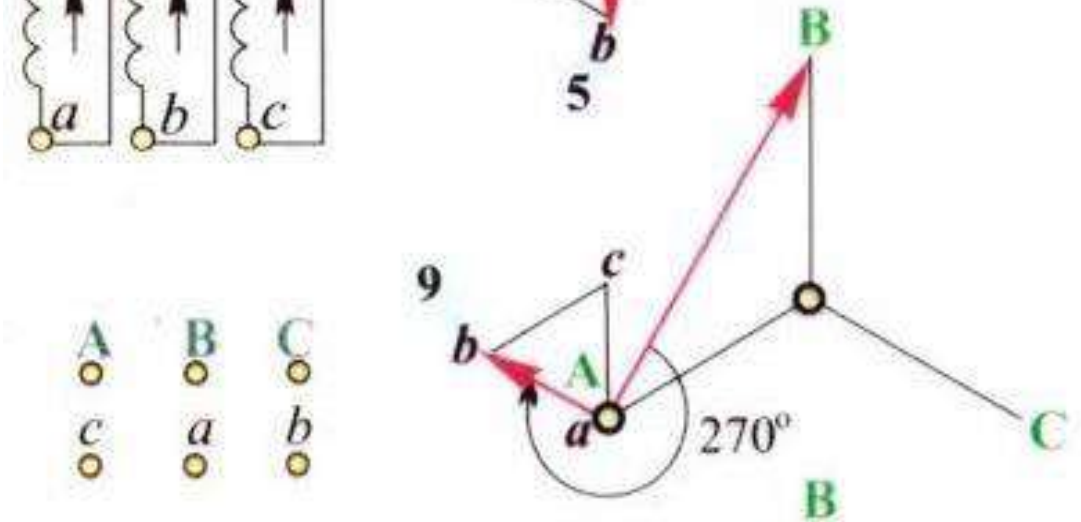



Рисунок Б.1 – Нечетные группы (11, 3, 7) соединений обмоток трехфазных трансформаторов

Y/Δ-5




Y/Δ-9




Y/Δ-1

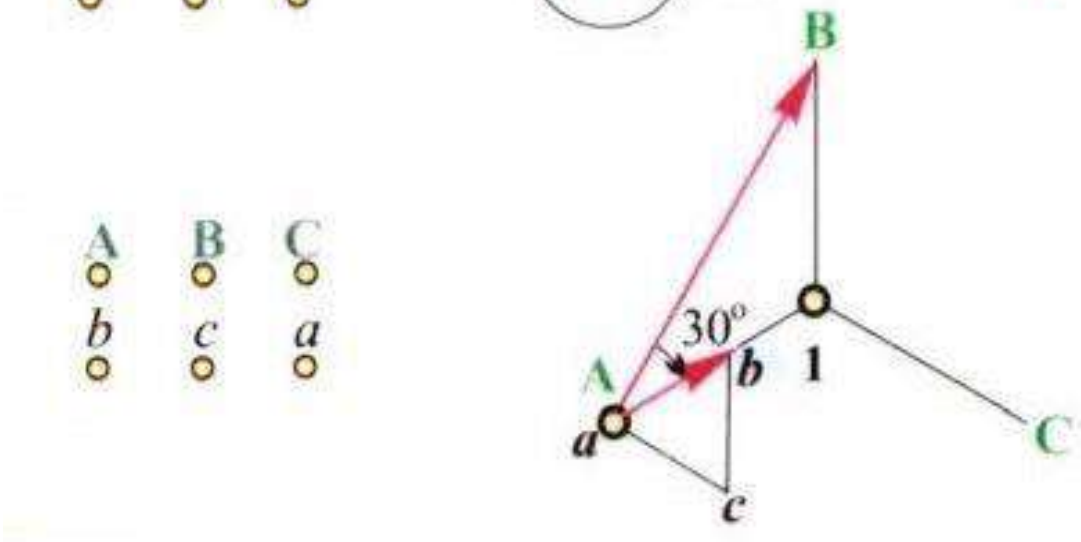
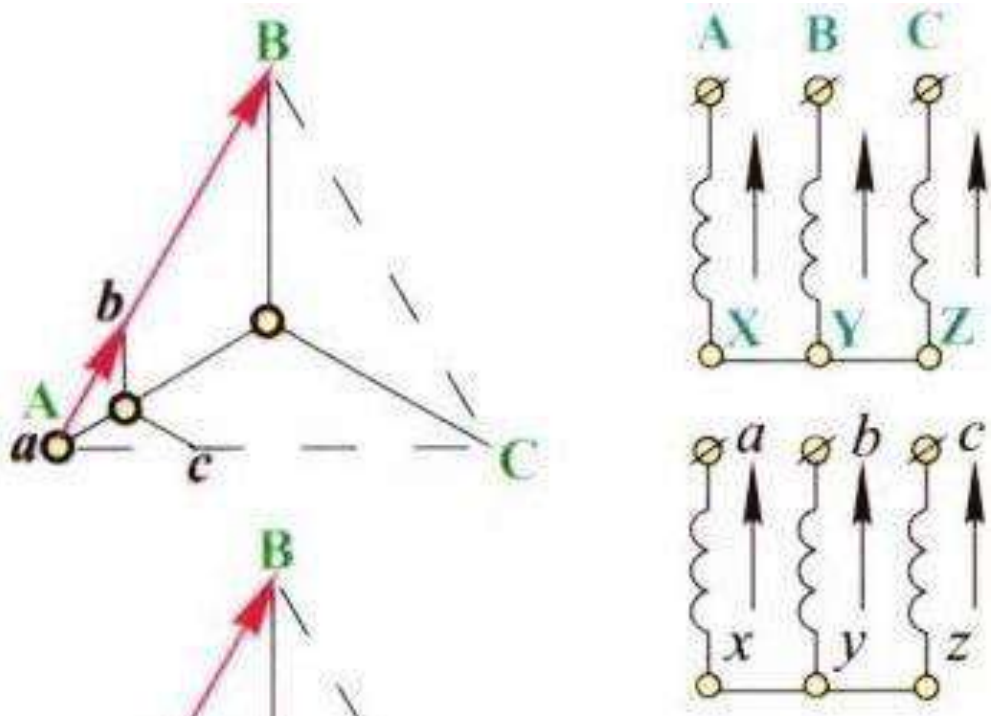
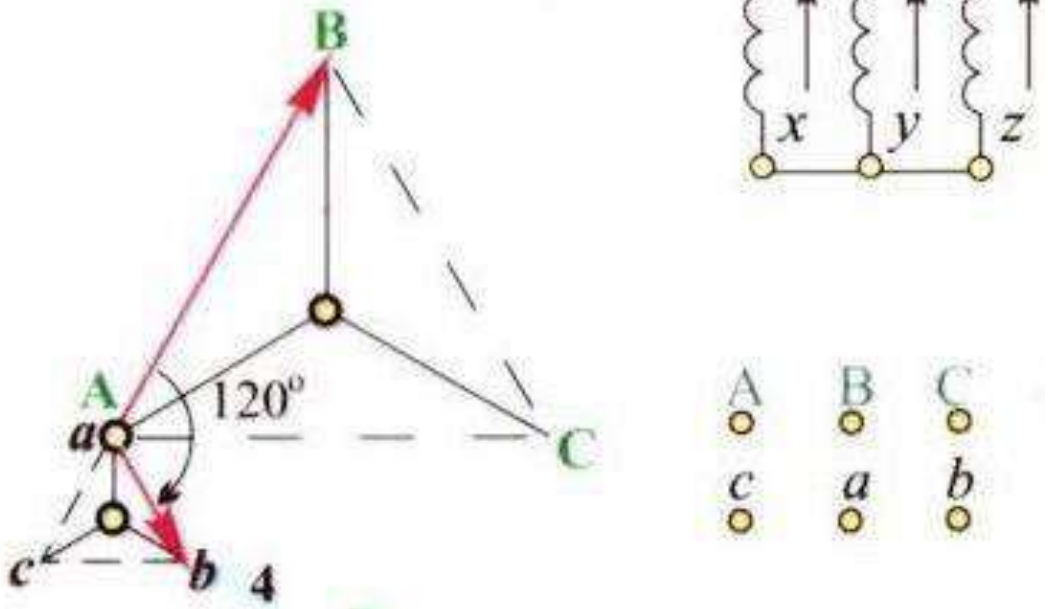



Рисунок Б.2 – Нечетные группы (5, 9, 1) соединений обмоток трехфазных трансформаторов

Y/Y-0




Y/Y-4




Y/Y-8

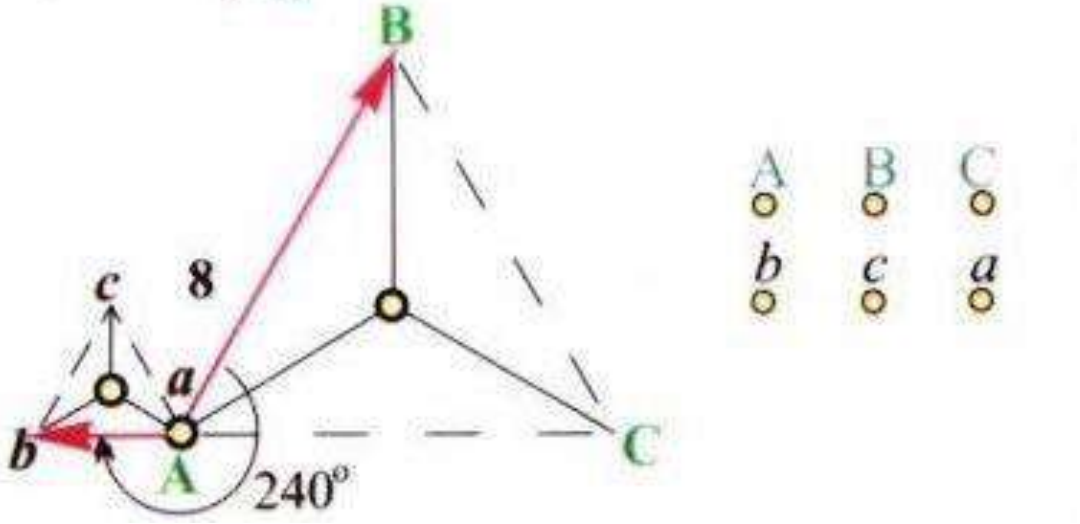
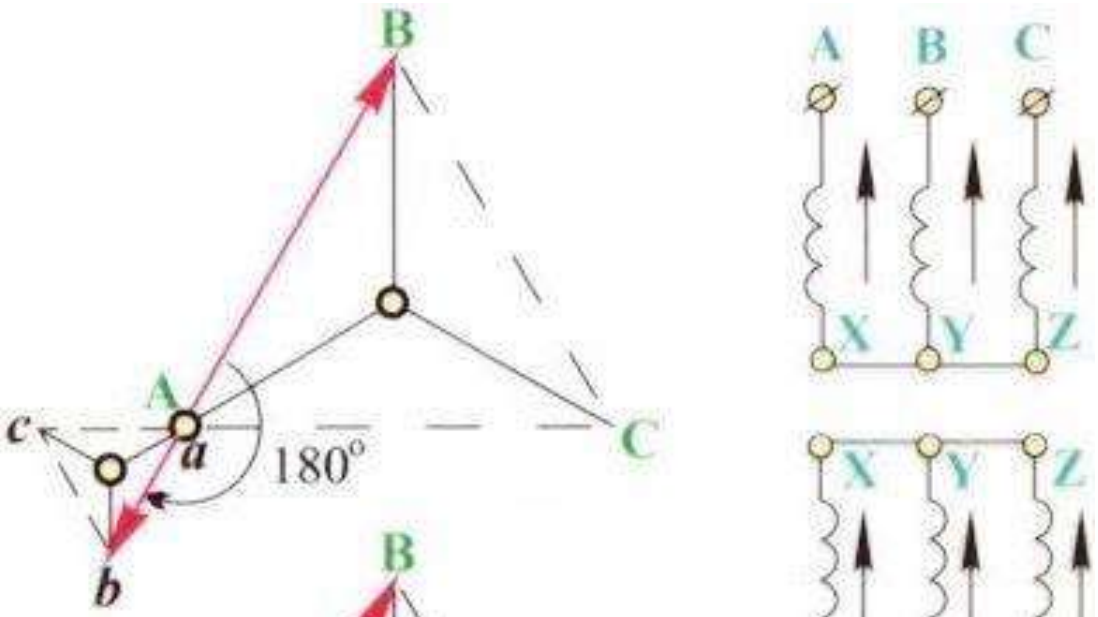
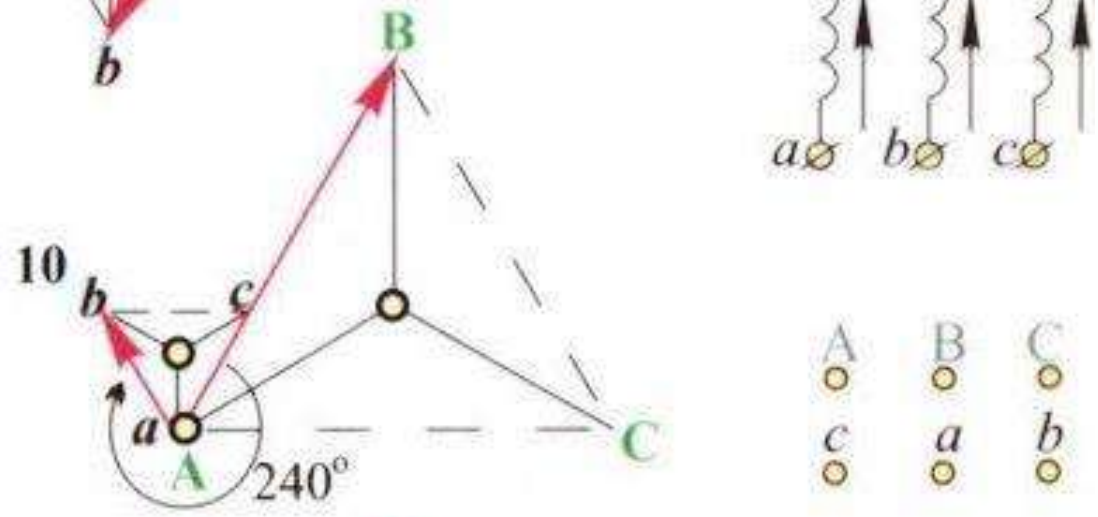



Рисунок Б.3 – Четные группы (0, 4, 8) соединений обмоток трехфазных трансформаторов

Y/Y-6




Y/Y-10




Y/Y-2

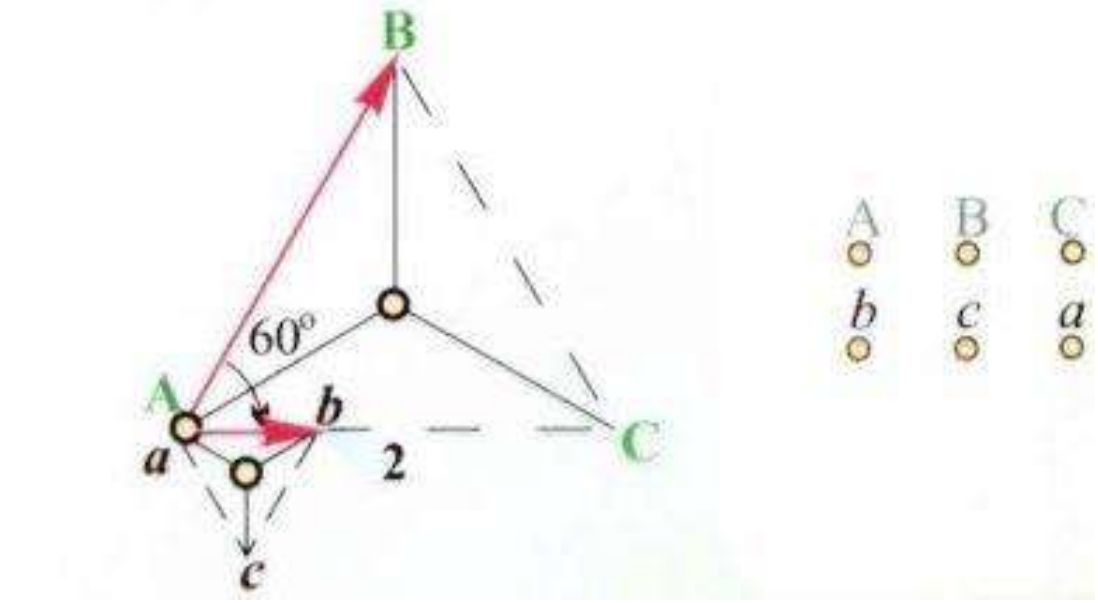


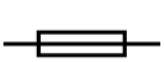
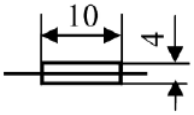
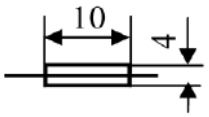
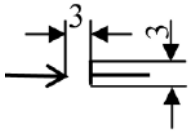
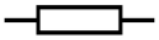
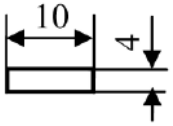
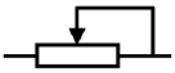
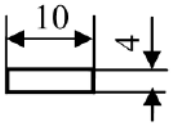
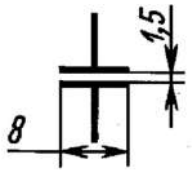
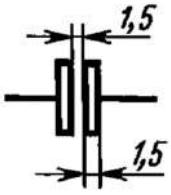

Рисунок Б.4 – Четные группы (6, 10, 2) соединений обмоток трехфазных трансформаторов

*(назад)*

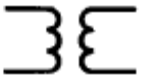
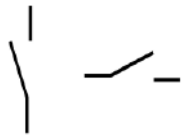
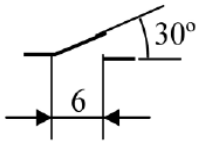
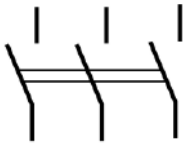
ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

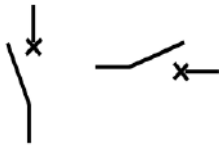
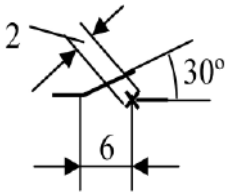
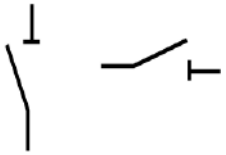
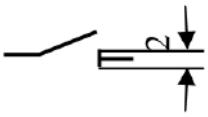
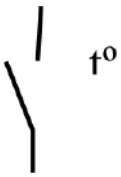
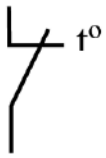
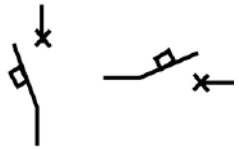
Таблица В.1 – Рекомендуемые размеры условных графических обозначений на схемах

| Наименование | Буквенное обозначение | Графическое обозначение | Размер, мм |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Предохранитель плавкий | FU |  |   |
| Предохранитель быстродействующий | FU |  |   |
| Предохранитель пробивной | FU |  |   |
| Резистор постоянный | R |  |   |
| Резистор переменный, реостат | R |  |   |
| Конденсатор постоянной емкости | C |  |   |
| Конденсатор электролитический поляризованный | C |  | |
| Конденсатор электролитический неполяризованный | C |  |   |
| Конденсатор переменной емкости | C |  |   |

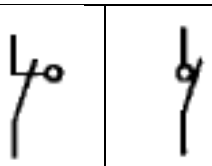
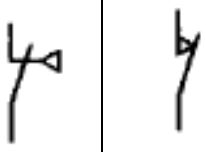
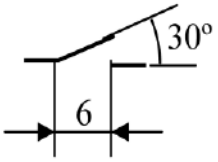
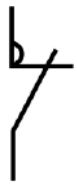
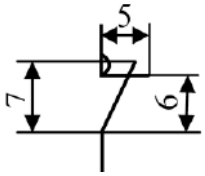
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода | |  | Радиус – 1,5...4 |
| Катушка индуктивности со скользящими контактами (например двумя) | |  | - « - |
| Катушка индуктивности с магнито-диэлектрическим магнитопроводом | |  | - « - |
| Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом | LL |  | - « - |
| Трансформатор без магнитопровода (с постоянной связью) | TV |  | - « - |
| Трансформатор с магнитодиэлектрическим магнитопроводом | TV |  | - « - |
| Трансформатор с ферромагнитным магнитопроводом | TV |  | - « - |
| Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой | TA |  | - « - |
| Рубильник, выключатель низковольтный однополюсный | QS, SA (в цепях управления и сигнализации) |  |  |
| Рубильник, выключатель низковольтный трехполюсный | |  | |

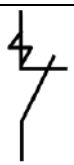
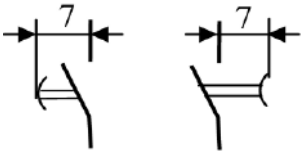
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Выключатель высоковольтный | Q |  |  |
| Разъединитель | QS |  |  |
| Контакт выключателя-разъединителя | |  | |
| Контакт концевого выключателя замыкающий | SQ |  | |
| Контакт концевого выключателя размыкающий | SQ |  | |
| Контакт чувствительный к температуре (термоконтакт) замыкающий | SK |  | |
| Контакт чувствительный к температуре (термоконтакт) размыкающий | SK |  | |
| Выключатель автоматический | QF, SF |  | |

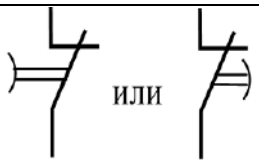
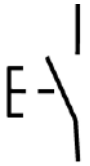
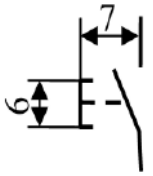
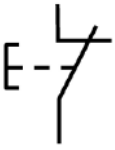
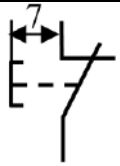
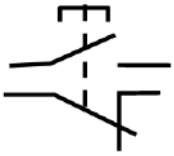
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Контакт без самовозврата замыкающий | |  | |
| Контакт без самовозврата размыкающий | |  | |
| Контакт с самовозвратом замыкающий | |  | |
| Контакт с самовозвратом размыкающий | |  | |
| Контакт замыкающий выключателя трехполюсного с автоматическим срабатыванием максимального тока | |   | |
| Контакт контактора замыкающий | |  |   |
| Контакт контактора размыкающий | |  |   |
| Контакт контактора замыкающий дугогасительный | |  | - « - |

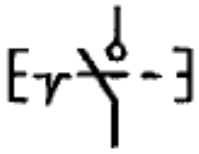
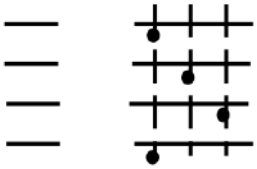
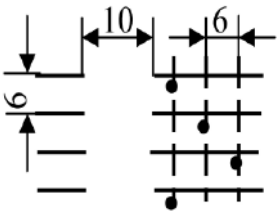
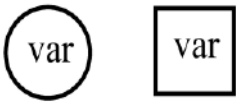
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Контакт контактора размыкающий дугогасительный | |  | - « - |
| Контакт контактора замыкающий дугогасительный | |  | - « - |
| Контакт контактора размыкающий дугогасительный | |  | - « - |
| Контакт контактора замыкающий с автоматическим срабатыванием | |  | - « - |
| Контакт переключающий с нейтральным центральным положением, с самовозвратом из левого положения и без возврата из правого положения | |  | |
| Контакт замыкающий с замедлением при срабатывании | |   |   |
| Контакт замыкающий с замедлением при возврате | |   | - « - |
| Контакт замыкающий с замедлением при срабатывании и возврате | |   | - « - |

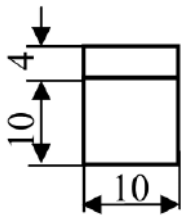
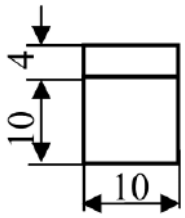
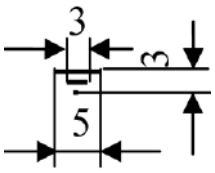
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Контакт размыкающий с замедлением при срабатывании | |   | - « - |
| Контакт размыкающий с замедлением при возврате | |   | - « - |
| Контакт размыкающий с замедлением при срабатывании и возврате | |   | - « - |
| Выключатель термический саморегулирующий | |  | |
| Контакт термореле | КК |  | |
| Кнопка управления с замыкающим контактом | SB |  |   |
| Кнопка управления с размыкающим контактом | SB |  |   |
| Кнопка управления с замыкающим и размыкающим контактами | SB |  | - « - |
| Контакт замыкающий нажимного кнопочного выключателя без самовозврата, с размыканием и возвратом элемента посредством вторичного нажатия | SB |  | - « - |

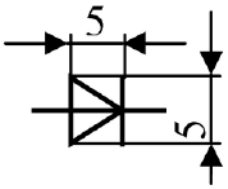
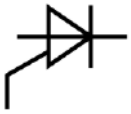
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Контакт замыкающий нажимного кнопочного выключателя без самовозврата, с размыканием и возвратом элемента посредством отдельного привода (пример нажатия кнопки-сброс) | SB |  | - « - |
| Переключатель со сложной коммутацией (точка указывает позицию замыкания соответствующего контакта) | |  |   |
| Амперметр:<br>а – показывающий;<br>б – регистрирующий | PA |   а б | Диаметр – 10;<br>Квадрат - 10×10 |
| Вольтметр:<br>а – показывающий;<br>б – регистрирующий | PV |   а б | Диаметр – 10;<br>Квадрат - 10×10 |
| Ваттметр:<br>а – показывающий;<br>б – регистрирующий | PW |   а б | Диаметр – 10;<br>Квадрат - 10×10 |
| Варметр:<br>а – показывающий;<br>б – регистрирующий | PVA |   а б | Диаметр – 10;<br>Квадрат - 10×10 |
| Ваттметр с нулем в середине шкалы | PW |   | Диаметр – 10 |
| Ваттметр однофазный | PW |  | Диаметр – 10 |

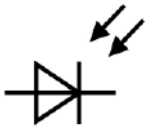
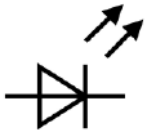
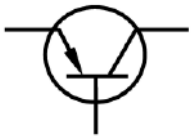
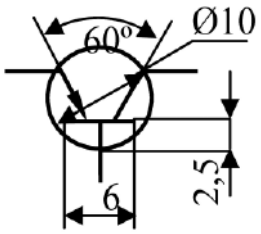
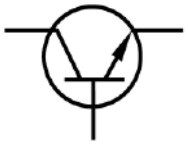
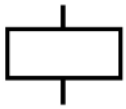
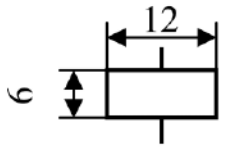
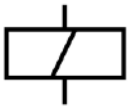
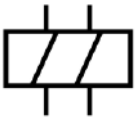
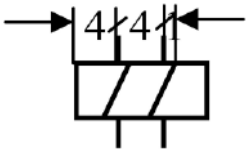
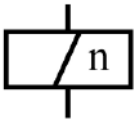
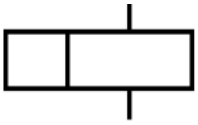
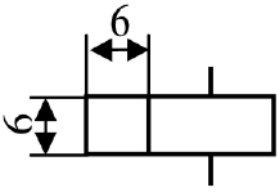
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Варметр с нулем в середине шкалы | PVA |  | Диаметр – 10 |
| Счетчик активной энергии | PI |  |  |
| Счетчик реактивной энергии | PK |  |  |
| Заземление | |  |  |
| Лампа накаливания:<br>а – осветительная;<br>б – сигнальная | а – EL;<br>б – HL |  | Диаметр – 6...8 |
| Пускатель для газоразрядных ламп | |  | |
| Лампа газоразрядная осветительная и сигнальная. Общее обозначение с двумя выводами | |  | |
| Лампа газоразрядная осветительная и сигнальная. Общее обозначение с четырьмя выводами | |  | |

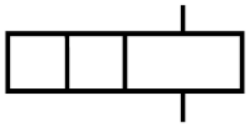
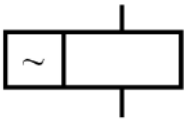
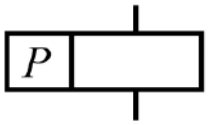
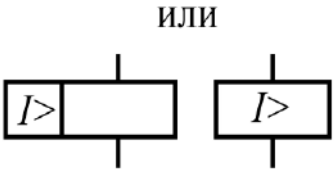
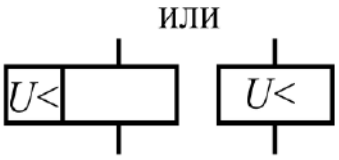
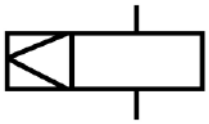
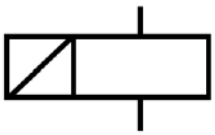
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Лампа газоразрядная низкого давления с комбинированными электродами | |  | |
| Лампа газоразрядная высокого давления с простыми электродами | |  | |
| Лампа газоразрядная сверхвысокого давления с простыми электродами | |  | |
| Диод | VD |  |  |
| Стабилитрон | VD |  | - « - |
| Стабилитрон двусторонний | VD |  | - « - |
| Тиристор с управлением по аноду | VS |  | - « - |
| Тиристор с управлением по катоду | VS |  | - « - |

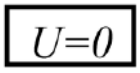
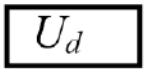
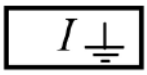
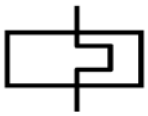
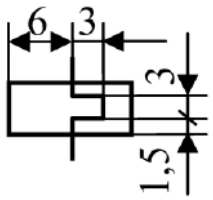
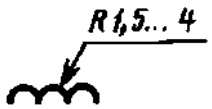
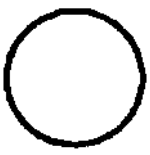
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Фотодиод | VD |  | - « - |
| Светодиод | VD |  | - « - |
| Транзистор типа PNP | VT |  |  |
| Транзистор типа NPN | VT |  | - « - |
| Катушка электротехнического устройства. Общее обозначение | К |  |  |
| Катушка электромеханического устройства с одной обмоткой | |  | - « - |
| Катушка электромеханического устройства с двумя обмотками | |  |  |
| Катушка электромеханического устройства с n обмотками | |  | |
| Катушка электромеханического устройства с одним дополнительным графическим полем | |  |  |

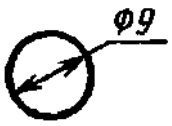
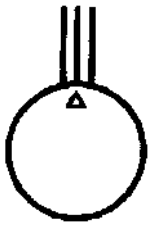
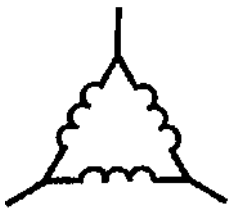
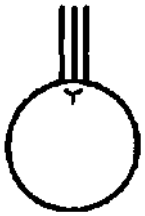
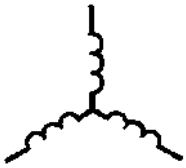
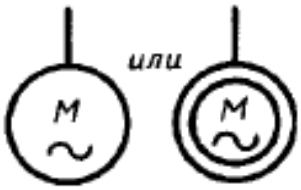
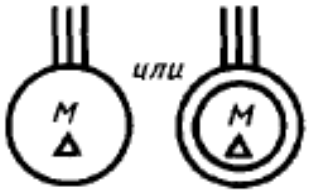
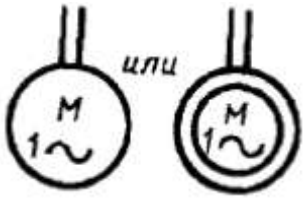
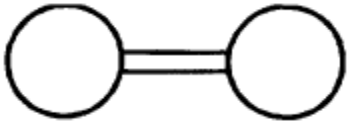
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Катушка электромеханического устройства с двумя дополнительными графическими полями | |  | - « - |
| Катушка электромеханического устройства переменного тока | |  | - « - |
| Катушка поляризованного электромеханического устройства | |  | - « - |
| Катушка максимального реле тока | КА |  | - « - |
| Катушка минимального реле напряжения | KV |  | - « - |
| Катушка электромеханического устройства, имеющего механическую блокировку | |  | - « - |
| Катушка электромеханического устройства, работающая с замедлением при отпускании | |  | - « - |

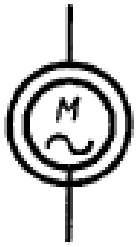
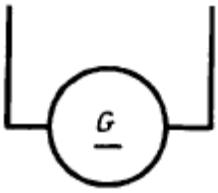
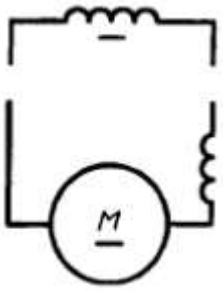
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Реле нулевое (срабатывающее при потере напряжения) | KV |   | - « - |
| Дифференциальное реле напряжения | KV |   | - « - |
| Реле тока, срабатывающее при замыкании на землю | KA |   | - « - |
| Воспринимающая часть электротеплового реле | KK |  |   |
| Обмотка статора (каждой фазы) машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машин постоянного тока | |  |   |
| Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения | |  | - « - |
| Статор. Общее обозначение | |  |   |

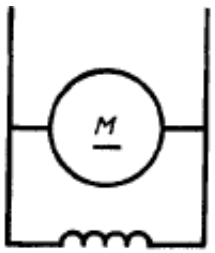
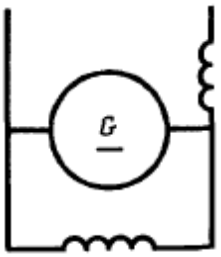
Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Ротор. Общее обозначение | |  |   |
| Статор с трехфазной обмоткой соединенной в треугольник | M |   | |
| Статор с трехфазной обмоткой соединенной в звезду | M |   | |
| Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором. Общее обозначение | M |   | |
| Двигатель асинхронный трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором | M |   | |
| Двигатель асинхронный однофазный с короткозамкнутым ротором | M |   | |
| Машины, связанные механически | |  | |

Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Двигатель асинхронный с фазным ротором. Общее обозначение | М |  | |
| Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором, обмотка которого соединена в звезду; обмотка статора соединена в треугольник | М |  | |
| Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором, обмотка которого соединена в звезду; обмотка статора соединена в звезду | М |  | |
| Машина постоянного тока с независимым возбуждением | |  | |
| Машина постоянного тока с последовательным возбуждением | |  | |

Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Машина постоянного тока с параллельным возбуждением | |   | |
| Машина постоянного тока со смешанным возбуждением | |   | |

*(назад)*

**Украинцев Максим Михайлович**
*кандидат технических наук*

**Корчагин Павел Тимофеевич**
*кандидат технических наук*

**Гуляев Павел Владимирович**
*кандидат технических наук*

**Чуркин Александр Евгеньевич**
*кандидат технических наук*

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Часть 1.
## МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие
для выполнения лабораторных работ

Издается в авторской редакции
Объем ЭИ: 6,23 МБ
Формат ЭИ Portable Document Format (PDF)