

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3 СРЕДСТВА МЕСТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: научиться рассчитывать положение переключателя анцапф трансформатора 10/0,4 кВ для обеспечения норм по отклонению напряжения.

Порядок выполнения

1. Изучить теоретический материала.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Содержание отчёта

1. Необходимые теоретические сведения.
2. Ответы на контрольные вопросы.

Основные теоретические сведения

Средствами сетевого регулирования должен обеспечиваться необходимый уровень напряжения на вводе в производственное помещение. Потребители же обычно располагаются на значительном удалении от ввода. Тогда для получения качественного напряжения у конкретного потребителя или у группы потребителей применяют местное регулирование напряжения. Особенно страдают потребители от повышенного напряжения в ночные часы, когда нагрузка на линиях и трансформаторах падает, а напряжение источника уменьшается незначительно.

Потенциометры, дроссели, автотрансформаторы

Существует много средств, обеспечивающих непосредственно у потребителя необходимый для длительного функционирования уровень напряжения. Простейшим регулятором напряжения является реостат, включаемый по схеме потенциометра и обеспечивающий регулирование постоянного или выпрямленного напряжения. Потенциометры используются в лабораториях в тех случаях, когда требуется поочередная регулировка на одной и той же схеме постоянного и переменного напряжения. Сечение проводов потенциометра должно обеспечивать протекание тока нагрузки I_n и собственного потребления I_n (рис.3.1).

$$I_c = I_n + I_n = U_c/R_n + U_c/R_n = U_c (R_n + R_n) / (R_n R_n).$$

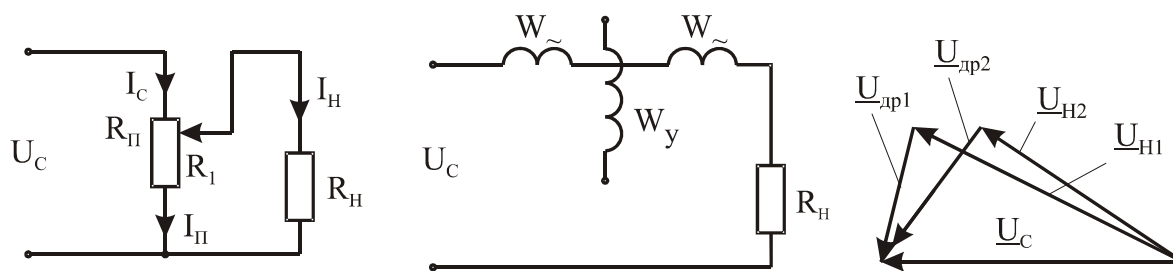


Рис. 3.1. Регулирование напряжения потенциометром и дросселем

Обычно выходят из строя верхние витки высокоомного провода, из которого выполняется обмотка потенциометра. Когда движок потенциометра установлен в верхнем положении, то через его верхние витки проходит ток

Необходимо, чтобы допустимый ток через потенциометр $I_{\text{доп.п.}}$, превышал ток, потребляемый из сети потенциометром и нагрузкой. Чтобы величина нагрузки незначительно влияла на величину снимаемого с потенциометра напряжения, желательно выполнение условия $R_H > 10 R_{\text{пот.}}$. Тогда примерно напряжение на нагрузке будет равно

$$U_H = U_C \cdot R_I / R_{\text{ном}} .$$

Основным недостатком потенциометра является наличие потерь активной мощности при любой нагрузке.

Встречаются схемы, в которых для регулирования напряжения последовательно с нагрузкой включают дроссели с подмагничиванием, которые представляют собой магнитные усилители (см. рис.2.9). С изменением тока подмагничивания в обмотке управления изменяется индуктивное сопротивление обмоток дросселя и падение напряжения на них. Поэтому при неизменном входном напряжении U_C изменится напряжение на нагрузке.

Большое распространение для регулирования напряжения непосредственно у потребителей получили автотрансформаторы (рис.3.2). Автотрансформаторы со ступенчатым изменением числа витков применяют, например, для изменения частоты вращения вентиляторов в системе регулирования воздухообмена птицеводческих помещений.

Автотрансформаторы с плавным регулированием напряжения путем изменения числа витков используют для бытовых, производственных потребителей и в лабораторных условиях — лабораторные автотрансформаторы (ЛАТРы). ЛАТРы допускают протекание токов нагрузки до 9 А (рис.3.2).

Основным недостатком ЛАТРов является наличие скользящего контакта по поверхностям оголенных витков обмотки. Скользящий контакт обеспечивается графитовым роликом-электродом, который должен

перекрывать не более двух витков. Длительная эксплуатация приводит к срабатыванию ролика, тогда перекрывается три и больше витка. Через ролик протекают большие токи виткового замыкания, и он выходит из строя. Кроме этого даже незначительные токовые перегрузки ЛАТРа приводят к нарушению целостности токосъемного ролика от перегрева и, как следствие, к витковому КЗ.

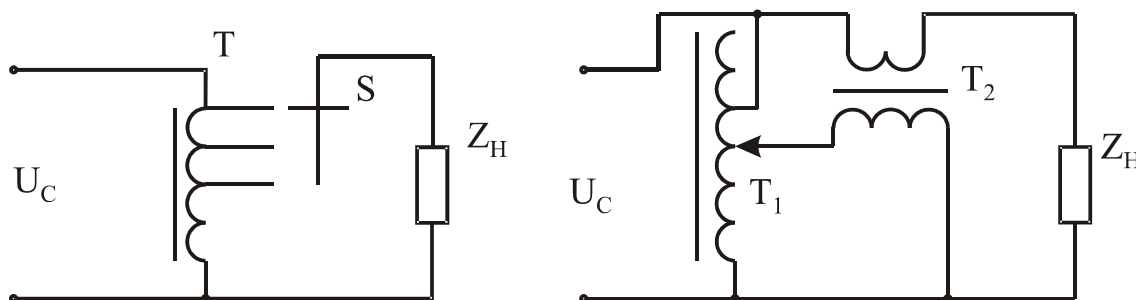


Рис.3.2. Регулирование напряжения автотрансформаторами

Однофазные ЛАТРы выпускаются на напряжение 220 В, но ими можно регулировать напряжение как от 0 до 220 В, так и от 220 до 380 В. Для этого в трехфазной сети 380 В с нулевым проводом между фазой А и N включается обмотка ЛАТРа, а нагрузка, например, катушка магнитного пускателя, подключается между движком ЛАТРа и фазой В. Тогда на катушке магнитного пускателя напряжение движком ЛАТРа можно изменять от 220 В до 380 В.

Наряду с ЛАТРами промышленность выпускает регуляторы напряжения однофазные (РНО) и трехфазные (РНТ) с одной или двумя регулируемыми цепями. В этих регуляторах токосъем осуществляется так же, как и в ЛАТРах, подпружиненными графитовыми роликами. Характеристики таких регуляторов приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1. Технические характеристики автотрансформаторов

Тип регулятора	Число регулир. цепей	Охлаждение	Масса кг	Одночас. мощ. кВА	Пределы регул. В
РНО-250-0,5	1	Воздушное	5	0,5	0...250
РНО-250-2	1	Воздушное	15	2,0	0...250
РНО-250-5	2	Воздушное	40	5,0	0...250
РНО-250-10	2	Масляное	70	10,0	0...250
РНТ-250-6	2	Воздушное	60	6,0	0...250
РНТ-250-12	2	Масляное	100	12,0	0...250

При нагрузке, потребляющей больший по величине ток, чем номинальный ток имеющегося автотрансформатора, регулирование напряжения в небольших пределах можно осуществить трансформатором Т2 небольшой мощности. Для регулировки напряжения автотрансформатор Т1 включают на первичную обмотку понижающего трансформатора Т2. Вторичная обмотка трансформатора Т2 с напряжением U_2 должна пропускать ток нагрузки по условию $I_{2доп} \geq I_n$, она включается последовательно с нагрузкой. Получаем вольтодобавочный трансформатор, который позволяет плавно изменять напряжение у потребителя от 0 до U_2 . Мощность Т2 выбирается из расчета пропускания тока нагрузки по вторичной обмотке. Если подключить автотрансформатор Т2 на "чужую" фазу, то получим регулятор напряжения по величине и по фазе.

Бесконтактный регулятор токов и напряжений

Бесконтактное (без подвижного токосъема) регулирование напряжения привлекательно во всех отношениях. В электромонтажных предприятиях получили распространение бесконтактные регуляторы для плавного изменения токов и напряжений мощностью 6 кВА и 12 кВА. Основное достоинство такого регулятора заключается в том, что он совмещает в себе функции нагрузочного и регулирующего устройств. Нагрузочное устройство в простейшем виде представляет собой понижающий трансформатор, со вторичной обмотки которого можно получать большие токи. Бесконтактный регулятор представляет собой однофазный трансформатор с разъемным магнитопроводом. Магнитопровод состоит из неподвижной 1 и подвижной частей 2 (рис.3.3).

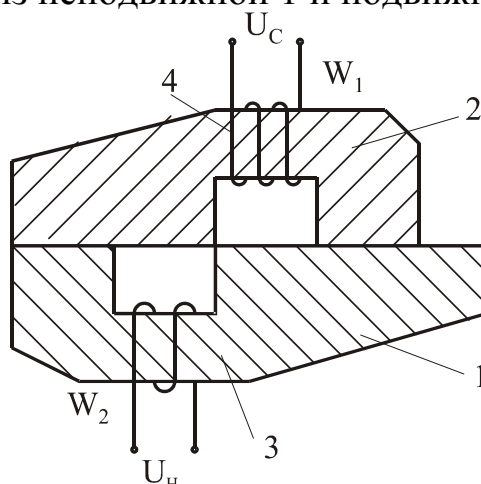


Рис.3.3. Бесконтактный регулятор тока и напряжения

Подвижная часть магнитопровода перемещается винтовым устройством, на ней находится первичная обмотка 4, на неподвижной части - сменная вторичная обмотка 3. Вторичная обмотка вкладывается в паз нижней части магнитопровода из расчета 0,9 или 1,6 витка на Вольт. Количество ее витков определяет верхний уровень получаемого напряжения. Число витков на Вольт напряжения определяется конструкцией трансформатора. Подвижная часть 2 прижимается к неподвижной 1 пружинным устройством.

Регулирование напряжений во вторичной обмотке осуществляется путем плавного изменения величины магнитного потока, пронизывающего витки вторичной обмотки W_2 , за счет его перераспределения при перемещении подвижной части. Магнитопровод собирается из листов электротехнической стали и размеры его определяются мощностью трансформатора.

Основным недостатком такого регулятора является несинусоидальность выходного напряжения. Это объясняется тем, что ток намагничивания несинусоидален из-за насыщения стали. По мере движения подвижной части несинусоидальность вторичного напряжения исчезает.

Благодаря простоте конструкции, малым габаритам и незначительной массе по сравнению с другими регуляторами тока бесконтактные регуляторы находят широкое применение.

Регулирование напряжения тиристорами

В последнее время получают широкое распространение тиристорные регуляторы напряжения, основным элементом которых является тиристор. Тиристор - это управляемый диод с тремя выводами: анод, катод и управляющий электрод. В закрытом состоянии сопротивление его составляет десятки кОм. Открытие тиристора может осуществляться двумя путями: -увеличением напряжения между анодом и катодом до значения, превышающего напряжение включения $U_{вкл}$; -пропусканием тока управления между управляющим электродом и катодом. С увеличением тока управления уменьшается напряжение включения тиристора. В пределе при токе управления, который называется током спрямления, характеристика тиристора становится такой же, как и у диода. Когда потенциал анода тиристора выше потенциала катода, то в момент включения тиристора сопротивление его резко изменяется от десятков кОм до нескольких десятых Ома. После открытия на тиристоре падает часть напряжения, которое называется остаточным $U_{ост}$ и находится

в пределах 0,5...1 В. В сетях 380 В остаточное напряжение на выводах тиристора обычно не учитывают.

Рассмотрим работу тиристора, когда он подключен последовательно с нагрузкой к синусоидальному напряжению (рис.3.4). Тиристор проводит ток только при одной полярности приложенного напряжения, поэтому совместим характеристики тиристора и полупериод синусоиды приложенного напряжения источника $U_{ист}$.

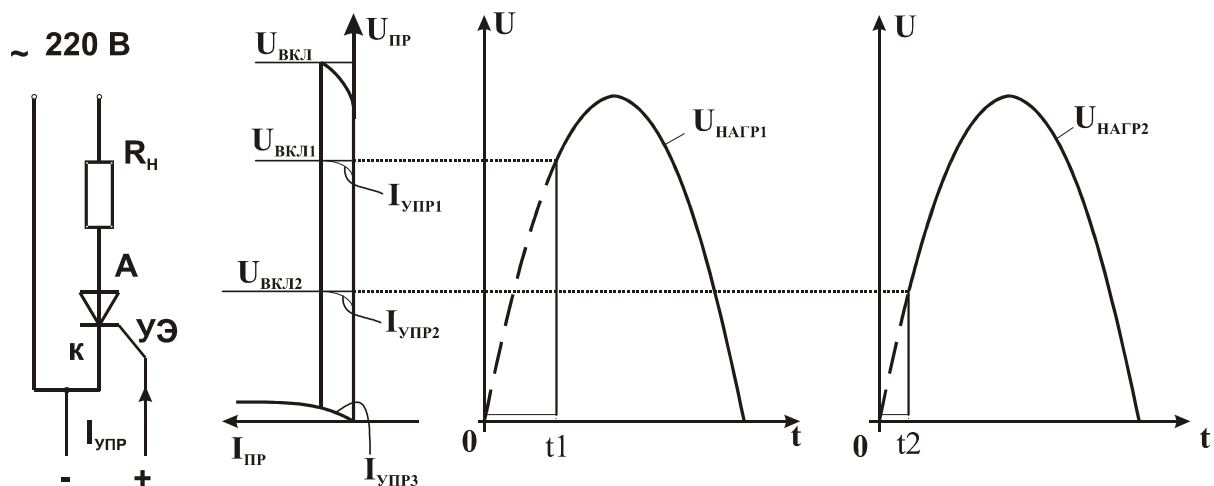


Рис. 3.4. Управление тиристора постоянным током

Выбирают всегда такой тиристор, чтобы его исходное $U_{вкл}$ было больше амплитуды подведенного напряжения. Тогда при отсутствии тока управления ($I_{упр} = 0$) тиристор закрыт, и через нагрузку ток не протекает. Когда величина тока управления достигнет значения $I_{упр.1}$, в каждый положительный полупериод в момент времени t_1 происходит открытие тиристора. На нем падает $U_{ост}$, а остальное напряжение прикладывается к нагрузке. С увеличением тока управления до значения $I_{упр.2}$ открытие тиристора происходит в момент времени t_2 , и через нагрузку протекает ток с менее обрезанной синусоидой. Таким образом регулированием тока управления можно изменять момент открытия тиристора от 0 до 90° , что соответствует по времени от 0 до 0,005 с. Этот способ управления тиристорами применяется сравнительно редко из-за перегрева перехода между управляющим электродом и катодом.

Чаще всего используют импульсное управление тиристорами. Ввиду того, что тиристор является быстродействующим прибором, для его открытия достаточен импульс тока между управляющим электродом и катодом продолжительностью в несколько микросекунд. Этот импульс может специальной схемой смещаться по времени в течение полупериода синусоиды. Такое управление тиристорами называется фазо-импульсным.

Тиристор открывается только в один полупериод, а в другой полупериод закрыт. Поэтому для регулирования переменного тока в нагрузке с помощью одного тиристора его включают в диагональ выпрямительного моста (рис.3.5). Для фазового управления тиристором импульсы вырабатываются в специальном формирователе. В простейшем виде формирователь импульсов представляет собой R-С цепь и динистор. Динистор - это двухэлектродный полупроводниковый прибор, который открывается только при определенном напряжении включения $U_{\text{вкл}}$ между его выводами. $U_{\text{вкл}}$ динистора определяется его типом. Характеристика динистора аналогична характеристике тиристора без управляющего электрода.

Момент открытия динистора VD5 определяется напряжением на конденсаторе С1. Постоянная времени заряда конденсатора С1 зависит от величины резисторов R1 и R2. Когда R2 имеет максимальное значение, постоянная времени заряда конденсатора С1 наибольшая, и конденсатор заряжается медленно по кривой $U_c = f_1(t)$. В момент времени t_1 напряжение на конденсаторе достигает значения включения динистора. Тогда сопротивление динистора изменяется от сотен кОм до нескольких Ом. При этом конденсатор С1 разряжается через управляющий электрод и катод тиристора, создавая импульс управляющего тока. Тиристор открывается и с этого момента времени t_1 до момента перехода синусоиды тока через нулевое значение t_2 все напряжение приложено к нагрузке.

Когда R2 имеет минимальное значение, уменьшается постоянная времени R-С цепи, конденсатор С1 заряжается быстрее в соответствии с графиком $U_{C1} = f_2(t)$. В момент времени t_3 напряжение на конденсаторе достигает значения включения динистора. Через динистор подается сигнал на открытие тиристора, и через нагрузку протекает ток в течение времени $t_3 - t_2$ каждый полупериод.

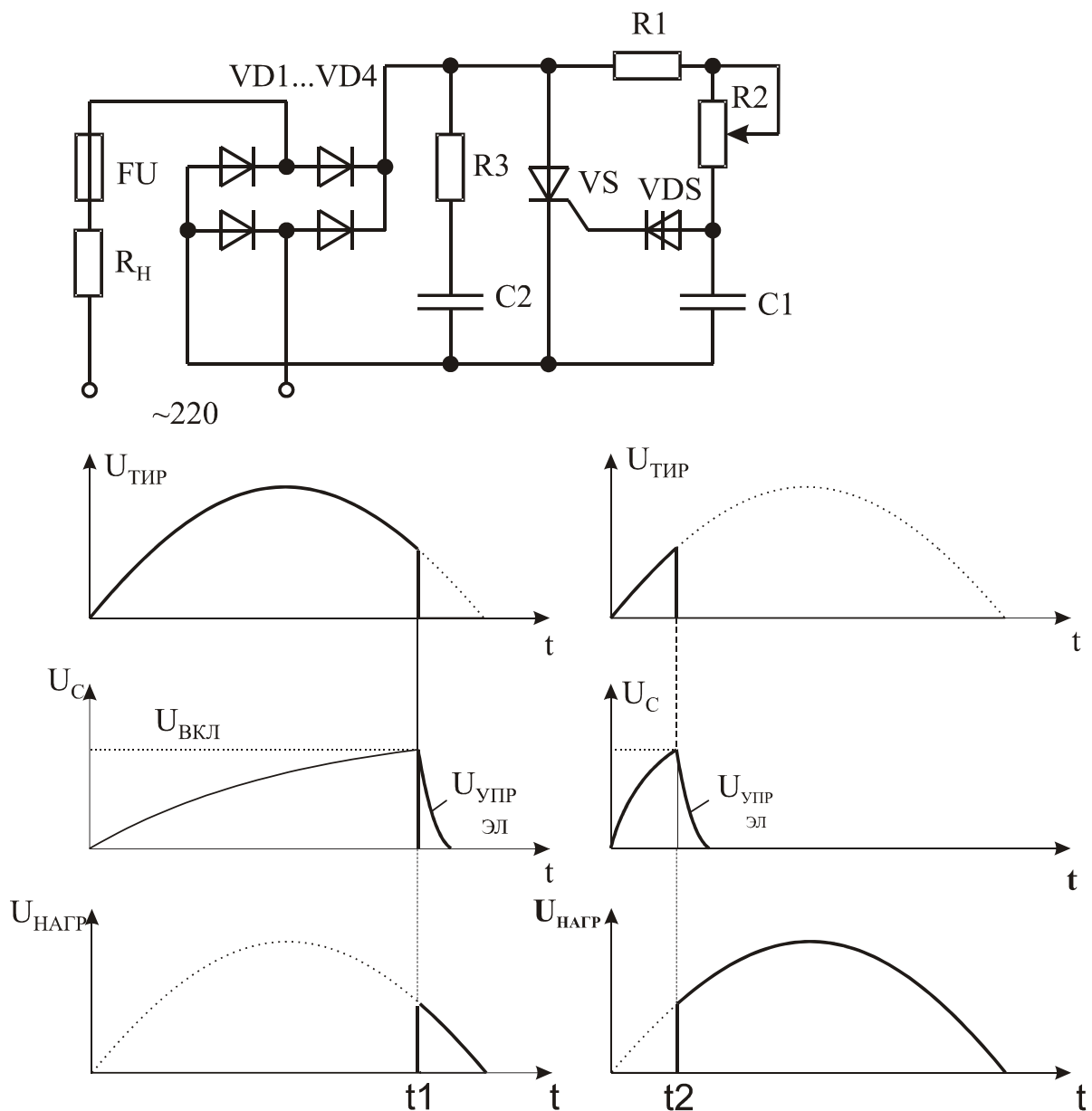


Рис.3.5. Регулирование напряжения одним тиристором в одной фазе

Таким образом, величиной резистора $R2$ регулируется момент открытия тиристора и этим самым регулируется ток и напряжение на нагрузке. Напряжение на нагрузке после тиристора несинусоидально. Действующее его значение зависит от площади, ограниченной кривой напряжения на нагрузке. Поскольку напряжение на нагрузке отличается от синусоидального, то оно состоит из гармоник основной частоты и высших гармонических составляющих, то есть в сети при работе тиристора появляются высокочастотные колебания. Эти колебания вносят помехи в работу теле и радиоприемников. В некоторой степени высшие гармоники могут подавляться фильтром $R3-C2$ (см.рис.3.5). Однако для полного подавления высших гармоник требуются сложные и дорогие фильтры.

Использование одного тиристора требует дополнительной установки в силовой цепи четырех диодов. При этом через тиристор протекает ток одной полярности. С целью уменьшения габаритов регулятора последовательно с нагрузкой включают два встречно-параллельно соединенных тиристора (рис.3.6). Эти тиристоры поочередно открываются в каждый полупериод. Но каждый тиристор управляется своим формирователем импульсов.

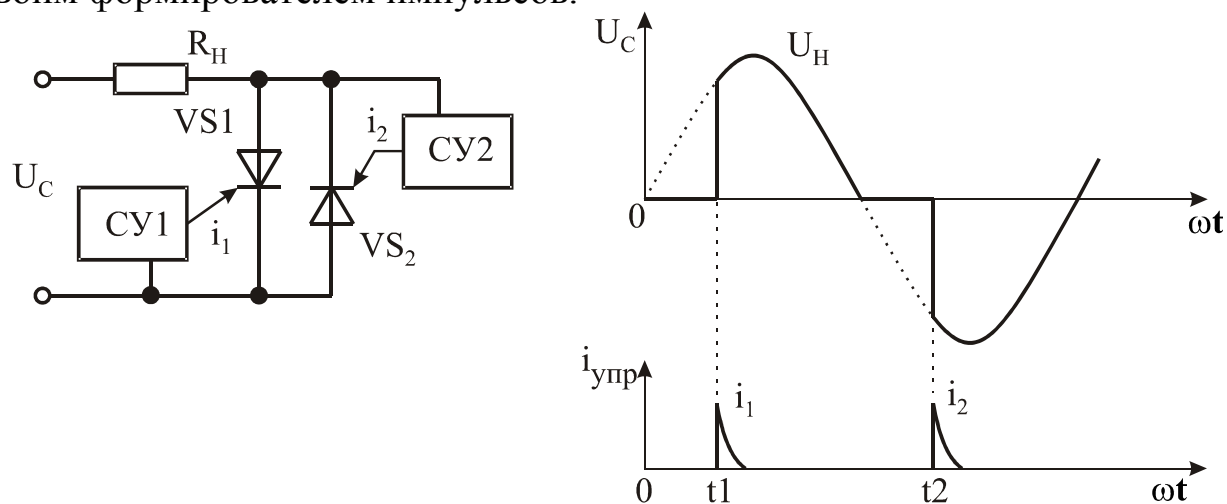


Рис.3.6. Регулирование напряжения двумя тиристорами в фазе

Для снижения напряжения у потребителей промышленность выпускает тиристорные стабилизаторы-ограничители напряжения (ТОН). Они выполняются в однофазном и трехфазном исполнении. В однофазном исполнении в силовой цепи включены два тиристора встречно - параллельно, а в трехфазном исполнении шесть тиристоров по два встречно - параллельно в каждой фазе.

ТОН-3-220-63 и ТОН-3-220-100 на номинальные токи соответственно 63 и 100 А допускают повышение напряжения в питающей сети до 286 В. Они поддерживают заданную уставку напряжения на нагрузке с точностью +15% от 0,9 до 1,05 $U_{ном}$ КПД их составляет 99%, масса не менее 60 кг. Стабилизатор-ограничитель включают в сеть в начале осветительной линии. Принцип его действия основан на автоматическом изменении угла открытия силовых тиристоров по закону, обеспечивающему постоянство действующего напряжения на нагрузке при напряжении питающей сети, превышающей заданную уставку.

Основным недостатком тиристорных ограничителей напряжения является искажение синусоиды тока и напряжения у потребителей. Искаженная синусоида может быть представлена в виде суммы основной гармоники и высших гармоник. Высшие гармоники вносят помехи в работу теле- и

радиоприемников, в работу средств радиосвязи. От таких ограничителей не могут работать люминесцентные лампы с емкостными балластами.

Ограничители серии ТОН-3 работают на аналоговых элементах. На этих элементах трудно обеспечить равенство значений угла включения тиристоров. При повышенном уровне сетевых помех систему управления приходится эффективно защищать от них заграждающими фильтрами.

Указанные недостатки исключаются при выполнении схемы управления тиристорами на цифровых элементах. При этом увеличивается мощность управляющих импульсов, увеличивается надежность работы, упрощается процесс налаживания схемы.

Рассмотрим блок-схему одного из вариантов цифрового управления тиристором в один полупериод напряжения (рис.3.7). Резистором R на входе высокочастотного генератора импульсов (ВГИ) изменяется частота на выходе его от 5 до 1000 кГц. Счетчик импульсов (СИ) начинает отсчет импульсов по команде формирователя нулевого импульса (ФНИ). Эта команда подается в момент перехода напряжения питания через нулевое значение. После 64 входных импульсов на выходе СИ появляется сигнал, запускающий генератор управляющих импульсов (ГУИ), работающий на частоте 6 кГц. После ГУИ формирователь импульса управления (ФИУ) подает сигнал на управляющий электрод тиристора. Длительность импульса управления равна длительности открытого состояния тиристора. Это исключает самопроизвольное его выключение при прерывистом характере нагрузочного тока и обеспечивает надежное выключение при индуктивном характере нагрузки.

ВГИ является общим для шести тиристоров в трехфазной системе управления, поэтому угол открытия у тиристоров одинаковый. Изменение частоты ВГИ позволяет изменять угол открытия тиристоров практически от 0 до 180°.

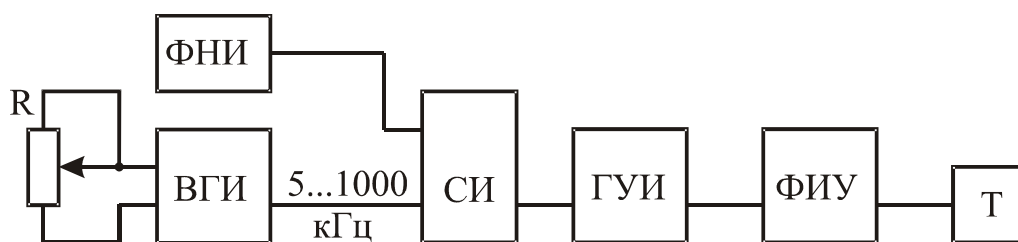


Рис.3.7. Блок-схема цифрового управления тиристором

Автотрансформаторные ограничители напряжения

Альтернативным вариантом по отношению к тиристорному ограничителю напряжения является автотрансформаторный ограничитель напряжения. Рассмотрим ограничитель напряжения, построенный на базе серийно выпускаемого трехфазного сухого трансформатора ТС-2,5 мощностью 2,5 кВА и линейными напряжениями 380 В и 38 В. Обмотки высокого напряжения у этого трансформатора маркируются: начала обмоток А, В, С, а концы соответственно X, Y, Z; у обмотки низкого напряжения начала обозначаются а, b, с, а концы соответственно x, y, z. Таким образом на одном стержне магнитопровода расположены две обмотки А-Х и а-х, на втором стержне- В-У и b-y, на третьем С-Z и с-z. Для преобразования трансформатора в ограничитель напряжения конец каждой фазы вторичной обмотки x, y, z соединяют с началом соответствующей фазы первичной обмотки А, В, С (рис.3.8). Три фазы питающей сети подключают к началам вторичных обмоток а, b, с, а нулевой провод- к объединенным концам первичных фазных обмоток X, Y, Z.

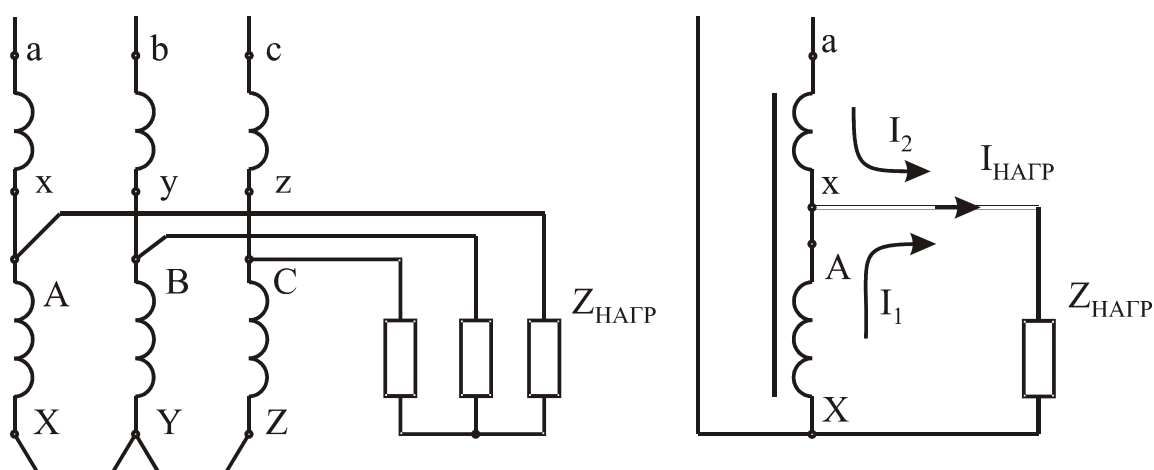


Рис. 3.8. Автотрансформаторный ограничитель напряжения

При таком последовательно-согласном соединении обмоток трансформатора получается ограничитель напряжения в виде автотрансформатора. Тогда напряжение на нагрузке определяется из соотношения чисел витков обмоток:

$$U_{нагр} = U_c W_1 / (W_1 + W_2) = U_c k / (k+1),$$

где W_1, W_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

k — коэффициент трансформации понижающего трансформатора, из которого выполнен ограничитель напряжения,

$$k = U_{1ном}/U_{2ном} = W_1/W_2,$$

где $U_{1ном}, U_{2ном}$ — номинальные напряжения, на которые рассчитаны обмотки исходного трансформатора.

От протекания тока нагрузки в обмотке W_2 возникает дополнительная потеря напряжения, но напряжение на нагрузке при этом изменится незначительно.

Если в процессе соединения будут перепутаны начало и конец одной из обмоток трансформатора, то получается их последовательно-встречное включение, при этом напряжение на нагрузке будет больше подведенного от питающей сети.

Определим мощность нагрузки, которую можно передавать через трансформатор при включении обмоток по автотрансформаторной схеме. Мощность каждой фазы трансформатора составляет $S_{т.ном}/3$. При этом через первичную обмотку W_1 трансформатора будет протекать ток $I_{1ном}$, а через вторичную обмотку $I_{2ном}$.

Мощность, протекающая через автотрансформатор, передается в нагрузку как электрическим, так и магнитным путем

$$S_{нагр} = S_{эл} + S_{маг},$$

где $S_{эл}$ — мощность, передаваемая электрическим путем;

$S_{маг}$ — мощность, передаваемая магнитным путем.

В соответствии с этим выберем направления токов в обмотках и в нагрузке. В понижающем трансформаторе или автотрансформаторе вторичный ток всегда больше первичного, поэтому направление токов однозначное (см. рис. 3.8)

$$I_{нагр.доп} = I_{2ном} + I_{1ном},$$

где $I_{нагр.доп}$ — предельно допустимый ток в нагрузке.

Поскольку для любого режима загрузки трансформатора или автотрансформатора справедливо равенство $I_2 = k I_1$, то предыдущая формула может быть записана в виде

$$I_{нагр.доп} = I_{1ном}(k+1).$$

Умножим левую и правую часть равенства на $U_{1ном}$. Учитывая, что напряжение на нагрузке прикладывается к обмотке ограничителя с числом витков W_1 , запишем равенство для мощностей

$$S_{нагр.доп} = S_{1ном}(k+1),$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность первичной обмотки трансформатора.

Для ограничителя напряжения, выполненного на базе трансформатора ТС-2,5, 380/38 В, получим предельно допустимую мощность нагрузки

$$S_{\text{нагр.доп}} = 2,5 (10+1) = 27,5 \text{ кВА.}$$

Такая мощность достаточна для снижения напряжения в сетях освещения животноводческих помещений, на зажимах электродвигателей. В рассмотренном варианте в каждой фазе напряжение снижается примерно на 20 В. Удобно использовать аналогичные однофазные ограничители напряжения в сетях наружного освещения. В соответствии с полученной формулой однофазный автотрансформатор, полученный из трансформатора ОСО-0,25 мощностью 0,25 кВА, 220/12 В способен пропускать поток мощности

$$S_{0,25} = 0,25 (220/12 + 1) = 4,8 \text{ кВА.}$$

Если недостаточно снижение напряжения на 12 В, то можно использовать их каскадное включение, когда один автотрансформатор снижает напряжение на 12 В и второй - также на 12 В.

Опыт эксплуатации автотрансформаторного ограничителя напряжения в хозяйствах Ростовской и Костромской области показал их высокую надежность и экономичность.

По сравнению с тиристорными ограничителями напряжения автотрансформаторные ограничители не боятся коротких замыканий, их можно защищать автоматическими выключателями и предохранителями. Поскольку они представляют собой сопротивление, то у потребителей снижаются токи короткого замыкания, снижаются пусковые токи электродвигателей и ламп накаливания.

В электрических сетях с удаленными потребителями, работающими на напряжении 220 В, стремятся увеличить напряжение с помощью автотрансформаторов. Включение повышающего автотрансформатора (рис.3.9) приводит к увеличению потребляемого из сети тока, что влечет за собой увеличение потери напряжения в питающей сети. Увеличение же потери напряжения приводит к снижению напряжения на входе автотрансформатора.

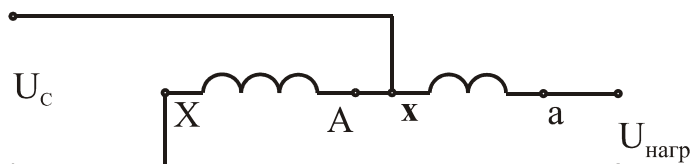


Рис. 3.9. Повышающий автотрансформатор

Подсчитаем выходное напряжение на нагрузке, которое можно получить от автотрансформатора с известным коэффициентом трансформации k :

$$k = U_{ВХ}/U_{НАГР} = I_{НАГР}/I_{СЕТИ}.$$

Напряжение на входе автотрансформатора зависит от напряжения источника $U_{ИСТ}$, сопротивления сети $Z_{СЕТИ}$ и тока $I_{СЕТИ}$. Если к линии не подключены другие потребители, то

$$U_{ВХ} = U_{ИСТ} - I_{СЕТИ} Z_{СЕТИ}.$$

Находим

$$I_{СЕТИ} = I_{НАГР} / k = U_{НАГР} / (Z_{НАГР} k), \text{ а } U_{ВХ} = U_{НАГР} k,$$

после подстановки получаем

$$U_{НАГР} k = U_{ИСТ} - (U_{НАГР} / (Z_{НАГР} k)) Z_{СЕТИ},$$

отсюда вычисляем

$$U_{НАГР} = \frac{U_{ИСТ} Z_{НАГР} k}{Z_{НАГР} k^2 + Z_{СЕТИ}}$$

Если $U_{ИСТ} = 230$ В; $Z_{НАГР} = 10$ Ом; $k = 0,9$; $Z_{СЕТИ} = 1$ Ом, то на нагрузке можем получить 227,5 В. Таким образом при расчете напряжения после автотрансформатора следует учитывать увеличение потери напряжения в сети от увеличения тока нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Для чего регулируют напряжение у потребителей?
2. В чем достоинства регулирования напряжения ЛАТРОм?
3. Основной недостаток лабораторного автотрансформатора.
4. Как ограничить напряжение с помощью ЛАТРа и небольшого трансформатора?
5. Как осуществляется управление тиристором на постоянном токе?
6. Как включить два тиристорами в фазу для регулирования напряжения?
7. Как включить обмотки трансформатора по автотрансформаторной схеме?
8. Как передается мощность из первичной цепи во вторичную в автотрансформаторе?