

**ЭЛЕКТР ТОРУН “ЭЛЕКТР ТОГУНУН ЖҮКТӨМҮ АСТЫНДА
БАШКАРУУ” ЖАНА “КОЗГОГУЧУ ЖОК ТОК ЖҮКТӨМҮН
АЛМАШТЫРУУ” НУН ЖАРДАМЫ МЕНЕН ЖӨНГӨ САЛУУНУ
ИЗИЛДӨӨ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С
ПОМОЩЬЮ «РЕГУЛИРОВКА ПОД НАГРУЗКОЙ» И
«ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ БЕЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ»**

**RESEARCH ADJUSTING OF ELECTRIC NETWORK BY MEANS OF
ADJUSTMENT UNDER LOAD AND SWITCH WITHOUT EXCITATION**

Бул макалада электр торундагы чыңалууну “Электр тогунун жүктөмү астында башкаруу” жана КЖТЖА нын жардамы менен жөнгө салууну изилдөө маселелери каралат.

Түйүндүү сөздөр: электр тору, жөнгө салуучу түзүлүш, чыңалуу, трансформатор.

В статье рассматриваются вопросы исследования регулирования напряжение в электрической сети с помощью «Регулировка под нагрузкой» и «Переключатель без возбуждения».

Ключевые слова: электрический сеть, регулирующее устройство, напряжение, трансформатор.

In the article, questions are examined research of adjusting tension in an electric network by means of RPN and PBV.

Keywords: electrical network, control device, voltage, transformer.

Одним из основных показателей качества электрической энергии является уровень напряжения у потребителей в распределительных сетях, поскольку все потребители рассчитаны на нормальную работу в течение срока службы при номинальном напряжении.

Согласно ГОСТ отклонения напряжения у потребителей не должны превышать $\pm 5\%$ номинального значения, однако во многих случаях фактическое напряжение не соответствует предъявляемым требованиям. Это приводит к ухудшению технико-экономических показателей всей системы электроснабжения в целом, а именно увеличению потерь, уменьшению срока службы электроприемников, увеличению ущерба и т.д. Одной из причин такого положения является отсутствие средств местного регулирования напряжения, поскольку использование устройств ПБВ распределительных трансформаторах 0,4-10 кВ возможно только при отключении трансформаторов от сети, что не применяется и может быть использовано только как средство сезонного регулирования.

В современных электрических сетях регулирование напряжения является необходимым условием обеспечения технически допустимых режимов работы. Это связано прежде всего с резким увеличением протяженности сетей и числа последовательных трансформаций в них, а также с достаточно узкими пределами допустимых отклонений напряжения у отдельных элементов электрооборудования и, в частности, у электроприёмников. В принципе регулирование напряжения имеет целью в какой-то мере компенсировать изменение потерь напряжения в сети, которое автоматически поучается с связи изменением нагрузок. При этом используя устройства для регулирования напряжения, можно одновременно и повышать экономичность рабочих режимов сети. Для целей регулирования напряжения можно использовать как собственно регулирующие устройства, позволяющие изменять коэффициенты трансформации под нагрузкой, так и автоматически управляемые компенсирующие устройства, генерирующие реактивную мощность, величину

которой можно изменять. Регулирующие устройства действуют на режим напряжений непосредственно. Их действие распространяется одновременно в основном на всю последующую часть сети (в направлении передачи электрической энергии). Однако это не всегда оказывается достаточно. Так, при попытке повышения напряжения в некоторой части сети в ней обычно увеличивается потребление реактивной мощности, поэтому в данном узле электрической системы должен быть соответствующий резерв. В противном случае возникает дефицит реактивной мощности, который ведет к снижению напряжений в остальной части сети. Городская электрическая сеть имеет свои специфические условия. К сожалению, до настоящего времени многие вопросы, связанные с регулированием напряжения в сетях, в том числе и в городских, остаются ещё недостаточно ясными или не полностью решёнными. Под городскими понимаются сети, расположенные на территории городов. От сетей промышленных предприятий городские сети отличаются большей протяженностью, а от сетей сельских районов – большей плотностью нагрузки. Известные особенности накладываются и некоторыми специфическими свойствами соответствующих потребителей электрической энергии и отдельных электроприёмников. Регулирование напряжения – это намеренное изменение режима напряжения в сети и у электроприемников в целях обеспечения технических условий или повышения экономичности электроснабжения. При этом имеется в виду повышение экономичности всей системы электроснабжения – сети и электроприемников вместе со связанными с ними производственными механизмами. Два аспекта цели регулирования напряжения – обеспечение технических требований технических требований и повышение экономичности. При достаточно больших отклонениях напряжения у электроприемников во многих случаях происходит нарушение условий их нормальной работы (вместе с механизмами). В результате получают такие явления как снижение качества и появление брака продукции, повышение повреждаемости электрической изоляции, сокращение срока службы электротехнического оборудования и т.д. В действительности эти явления

наступают не сразу, а со временем в зависимости от длительности данного режима работы, от условий работы в предшествующих режимах, от совместного состояния нескольких электроприемников, занятых в данной производственной операции, и т.д. Поэтому указанные условия не могут быть полностью отнесены только к свойствам данного рабочего режима отдельного электроприёмника или всей электрической сети. В условиях проектирования и эксплуатации электрических сетей невозможно осуществить контроль качества напряжения у каждого электроприемника, поэтому при рассмотрении режимов сетей 110-750 кВ качество напряжения должно обеспечиваться на шинах вторичного напряжения подстанций 110-750/35-6 кВ, т.е. в центрах питания распределительных сетей. Для этого должны быть нормированы режимы регулирования напряжения и допустимые отклонения напряжения на шинах вторичного напряжения подстанций [1]. Режимы напряжения выбирают в зависимости от характера подключенных к сети потребителей и их удаленности от центра питания. Принципиально возможны два режима (рис.1.)

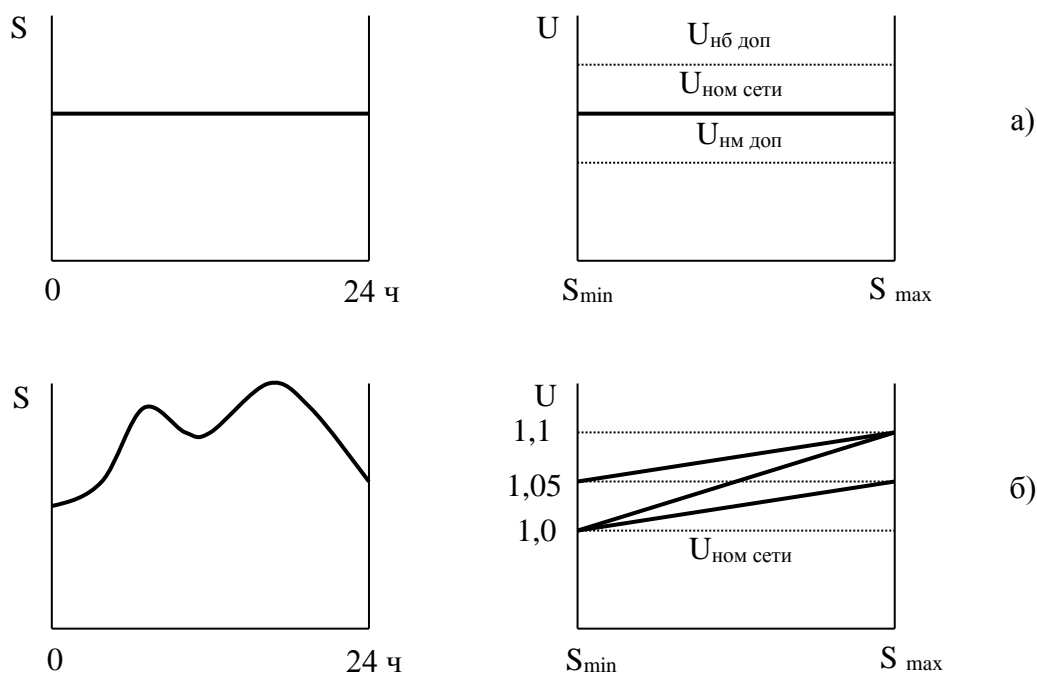


Рис. 1. Режимы (законы) регулирования напряжения.

а – стабилизация, б – встречное регулирование.

Стабилизацию напряжения применяют, когда к центру питания подключены промышленные предприятия с 3-х сменным характером работы, имеющие ровный график нагрузки, $T_m \geq 5500-6000$ ч.

Закон встречного регулирования применяют для смешанной нагрузки, коммунально-бытовой и 1-2-х сменных предприятий, $T_m < 5500$ ч, причем, чем меньше T_m , тем более глубокое требуется регулирование (от $1,0U_{ном}$ до $1,1U_{ном}$). При менее глубоком регулировании напряжение на шинах центра питания должно поддерживаться в диапазоне $(1,05-1,1) U_{ном}$ или $(1,0-1,05) U_{ном}$.

Для поддержания необходимого режима напряжения в электрических системах используются следующие принципы регулирования напряжения:

- централизованное регулирование, когда воздействие оказывается на большое количество узлов сети. Такое регулирование осуществляется генераторами и трансформаторами ОРУ электростанций, трансформаторами крупных системных и районных подстанций, синхронными компенсаторами;
- местное регулирование используется в связи с тем, что централизованного регулирования оказывается недостаточно для поддержания напряжения в требуемом диапазоне во всех узлах. Такое регулирование осуществляется трансформаторами понижающих подстанций и батареями статических конденсаторов;
- смешанное регулирование, использующее оба принципа.

Регулирование напряжения осуществляется:

- генераторами электростанций, в которых увеличение тока возбуждения ведет к увеличению ЭДС и напряжения на шинах генераторного напряжения U_G . Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) позволяет плавно регулировать напряжение U_G или поддерживать его постоянное значение;
- трансформаторами и автотрансформаторами;
- компенсирующими устройствами (синхронными компенсаторами - плавно, батареями статических конденсаторов - ступенчато);
- изменением параметров сети применением установок продольной компенсации (УПК);

- в замкнутых сетях - перераспределением потоков активной и реактивной мощности.

Генераторы электростанций являются только вспомогательным средством регулирования, потому что имеют недостаточный диапазон регулирования напряжения, кроме того, трудно согласовать требования по напряжению удаленных и близких потребителей. Как единственное средство регулирования генераторы применяются только для нагрузки, питающейся от шин генераторного напряжения.

Повышающие трансформаторы на электростанциях с номинальным напряжением обмотки ВН 110-220 кВ также являются вспомогательным средством регулирования напряжения, потому что имеют предел регулирования $\pm 2 \times 2,5 \% U_{в.ном}$, и с их помощью нельзя согласовать требования по напряжению близких и удаленных потребителей. Повышающие трансформаторы 330, 500, 750кВ выпускаются без устройств для регулирования напряжения. Поэтому основным средством регулирования напряжения являются трансформаторы и автотрансформаторы районных подстанций.

По конструктивному выполнению различают два типа трансформаторов понижающих подстанций:

- с переключением регулировочных ответвлений без возбуждения, т.е. с отключением от сети (трансформаторы с ПБВ);
- с переключением регулировочных ответвлений под нагрузкой (трансформаторы с РПН). Обычно их регулировочные ответвления выполняются на стороне высшего напряжения, которая имеет меньший рабочий ток. При этом облегчается работа переключающего устройства. Для нормальной работы потребителей необходимо поддерживать определенный уровень напряжения на шинах подстанций. В электрических сетях предусматриваются способы регулирования напряжения, одним из которых является изменение коэффициента трансформации трансформаторов [2].

Известно, что коэффициент трансформации определяется как отношение первичного напряжения ко вторичному, или

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

где w_1 w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно. Отсюда $U_2 = U_1 w_2 / w_1$.

Обмотки трансформаторов снабжаются дополнительными ответвлениями, с помощью которых можно изменять коэффициент трансформации. Переключение ответвлений может происходить без возбуждения (ПБВ), т.е. после отключения всех обмоток от сети или под нагрузкой (РПН).

Трансформаторы без регулирования под нагрузкой (ПБВ) изготавливают с основным и четырьмя дополнительными ответвлениями. Основное ответвление имеет напряжение, равное номинальному напряжению первичной обмотки трансформатора $U_{в.ном}$. Для понижающих трансформаторов $U_{в.ном}$ равно номинальному напряжению сети, к которой присоединяется данный трансформатор, для повышающих $U_{в.ном}$ на 5-10% выше $U_{ном}$ сети. При основном ответвлении коэффициент трансформации трансформатора называют номинальным. Чтобы переключить регулировочное ответвление в трансформаторе с ПБВ, требуется отключить его от сети. Такие переключения производятся редко, при сезонном изменении нагрузок. Поэтому в режиме наибольших и наименьших нагрузок в течение суток (например, днем и ночью) трансформатор с ПБВ работает на одном регулировочном ответвлении и соответственно с одним и тем же коэффициентом трансформации. При этом нельзя осуществить требование встречного регулирования, т.к. встречное регулирование можно осуществлять, только изменяя $U_{отв}$ и коэффициент трансформации в течение суток.

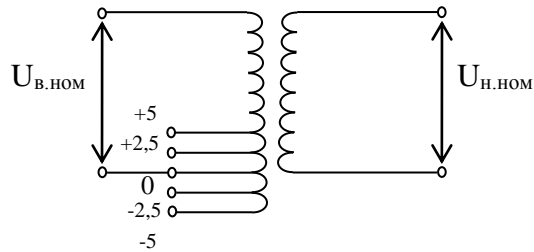


Рис. 2. Схема обмоток трансформатора с ПВВ.

По условиям встречного регулирования (рис.1.) желаемое напряжение на шинах низшего напряжения в режиме наибольших нагрузок:

$$U_{2\text{жел}}^{\text{нб}} \geq (1,05-1,1) U_{\text{НОМ}} \text{ сети}; \quad (1)$$

для режима наименьших нагрузок:

$$U_{2\text{жел}}^{\text{нм}} \geq U_{\text{НОМ}} \text{ сети}$$

Напряжение на стороне НН в режиме наибольших нагрузок, приведенное к ВН $U_{2\text{н.нб}}^{\text{В}}$ и напряжение на стороне НН в режиме наименьших нагрузок, приведенное к ВН $U_{2\text{н.нм}}^{\text{В}}$:

$$\begin{aligned} U_{2\text{н.нб}}^{\text{В}} &= U_{\text{нб}}^{\text{В}} - \Delta U_{\text{Т.нб}}^{\text{В}} \\ U_{2\text{н.нм}}^{\text{В}} &= U_{\text{нм}}^{\text{В}} - \Delta U_{\text{Т.нм}}^{\text{В}}, \end{aligned} \quad (2)$$

Где

$U_{\text{нб}}^{\text{В}}, U_{\text{нм}}^{\text{В}}$ - определяемые из электрического расчета сети напряжения на стороне ВН трансформатора в режимах наибольших и наименьших нагрузок,

$\Delta U_{\text{Т.нб}}^{\text{В}}, \Delta U_{\text{Т.нм}}^{\text{В}}$ - соответственно потери напряжения в трансформаторе в этих режимах.

Требуемое ответвление вычисляют и округляют до ближайшего стандартного:

$$U_{\text{отв}} = \frac{U_{2\text{нб}}^{\text{В}} + U_{2\text{нм}}^{\text{В}}}{U_{2\text{нб}}^{\text{жел}} + U_{2\text{нм}}^{\text{жел}}} U_{\text{НН}} \rightarrow U_{\text{СТ}}, \quad (3)$$

здесь $U_{\text{НН}}$ - номинальное напряжение на шинах НН трансформатора в режиме холостого хода (паспортные данные).

Стандартное ответвление U_{CT} определяет коэффициент трансформации:

$$n = \frac{U_{CT}}{U_{HH}} \quad (4)$$

при котором реальные напряжения на шинах НН в режимах наибольших и наименьших нагрузок составят:

$$U_{2НБ} = \frac{U_{2НБ}^B}{n}; \quad U_{2НМ} = \frac{U_{2НМ}^B}{n} . \quad (5)$$

Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой, со встроенным устройством РПН (3, а) отличаются от трансформаторов с ПБВ наличием специального переключающего устройства, а также увеличенным числом ступеней регулировочных ответвлений и диапазоном регулирования. Например, для трансформаторов с номинальным напряжением основной обмотки ВН, равным 115кВ, предусматривается диапазон регулирования +16 % при 18 ступенях регулирования по 1,78 % каждая.

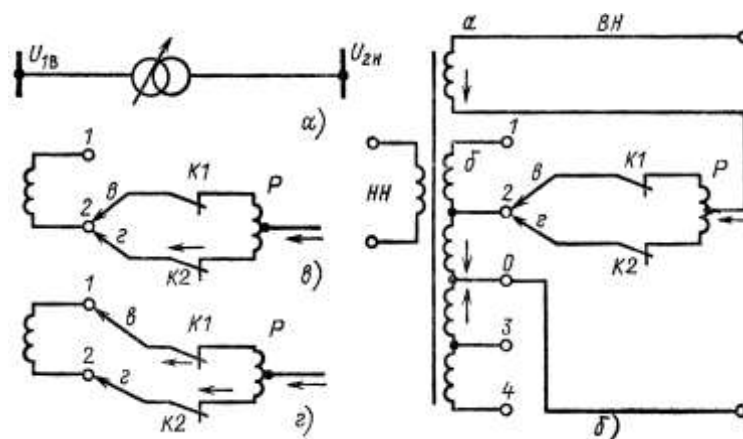


Рис. 3. Трансформатор с РПН.

а – условное обозначение, б – схема обмоток трансформатора с РПН, в, г – переключение ответвлений.

На рис. 3, б изображена схема обмоток трансформатора с РПН. Обмотка ВН этого трансформатора состоит из двух частей: нерегулируемой (а) и регулируемой (б). На регулируемой части имеется ряд ответвлений с неподвижными контактами 1...4. Ответвления 1, 2 соответствуют части витков, включенных согласно с витками основной обмотки (направление тока указано стрелками). При включении ответвлений 1,2 коэффициент трансформации увеличивается. Ответвления 3,4 соответствуют части витков, соединенных встречно по отношению к виткам основной обмотки. Их включение уменьшает коэффициент трансформации, так как компенсирует действие части витков основной обмотки. Основным выводом обмотки ВН трансформатора является точка 0.

На регулируемой части обмотки имеется переключающее устройство, состоящее из подвижных контактов (в) и (г), контактов К1 и К2 и реактора Р. Середина обмотки реактора соединена с нерегулируемой частью обмотки (а) трансформатора. Нормально ток нагрузки обмотки ВН распределяется поровну между половинами обмотки реактора. Поэтому магнитный поток мал, и потеря напряжения в реакторе также мала.

Допустим, что требуется переключить устройство с ответвления 2 на ответвление 1. При этом отключают контактор К1, переводят подвижный контакт в на контакт ответвления 1 (рис. 3, г) и вновь включают контактор К1. Таким образом, временно секция 1-2 обмотки оказывается замкнутой на обмотку реактора Р. Значительная индуктивность реактора ограничивает уравнивающий ток, который возникает вследствие наличия напряжения на секции 1-2 обмотки. После этого отключают контактор К2, переводят подвижный контакт (г) на контакт ответвления 1 и включают контактор К2 [1,3].

С помощью РПН можно изменять ответвления и коэффициент трансформации под нагрузкой в течение суток, выполняя, таким образом, требования встречного регулирования. При выборе ответвлений опираются на два крайних

режима: наибольших и наименьших нагрузок. Все другие ответвления в течение суток будут выбираться между ними.

По условиям встречного регулирования (1) принимают $U_{2\text{н.нм}}^{\text{жел}}$; $U_{2\text{н.нб}}^{\text{жел}}$.

По значениям $U_{2\text{н.нб}}^B$ и $U_{2\text{н.нм}}^B$ определяются желаемые ответвления регулируемой обмотки высшего напряжения трансформатора в режимах наибольших и наименьших нагрузок:

$$\begin{aligned} U_{\text{отв.нб}} &= U_{2\text{н.нб}}^B \frac{U_{\text{нн}}}{U_{2\text{н.нб}}^{\text{жел}}}, \\ U_{\text{отв.нм}} &= U_{2\text{н.нм}}^B \frac{U_{\text{нн}}}{U_{2\text{н.нм}}^{\text{жел}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Желаемые ответвления, определенные по (6), округляются до таких ближайших стандартных значений $U_{\text{ст нб}}$, $U_{\text{ст нм}}$, чтобы выполнялись условия (1).

Реальные напряжения на шинах НН в режимах наибольших и наименьших нагрузок при выбранных $U_{\text{ст нб}}$, $U_{\text{ст нм}}$:

$$\begin{aligned} U_{2\text{н.нб}} &= U_{2\text{н.нб}}^B \frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{ст нб}}}, \\ U_{2\text{н.нм}} &= U_{2\text{н.нм}}^B \frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{ст нм}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Автотрансформаторы 220-330 кВ выпускаются с РПН, встроенным на линейном конце обмотки среднего напряжения. Ранее для автотрансформаторов устройство РПН выполнялось встроенным в нейтрал, при этом изменение коэффициентов трансформации между обмотками ВН и СН и обмотками ВН и НН нельзя было производить независимо друг от друга и нельзя было осуществлять встречное регулирование одновременно на среднем и низшем напряжениях. В настоящее время с помощью РПН, встроенного на линейном конце обмотки СН, можно изменять под нагрузкой коэффициент трансформации только для обмоток ВН-СН. Если требуется одновременно изменить под нагрузкой коэффициент трансформации между обмотками ВН и НН, то необходимо установить дополнительно последовательно с обмоткой НН

автотрансформатора линейный регулятор. С экономической точки зрения такое решение оказывается более целесообразным, чем изготовление автотрансформаторов с двумя встроенными устройствами РПН [3.4].

Регулирование напряжения трансформаторов

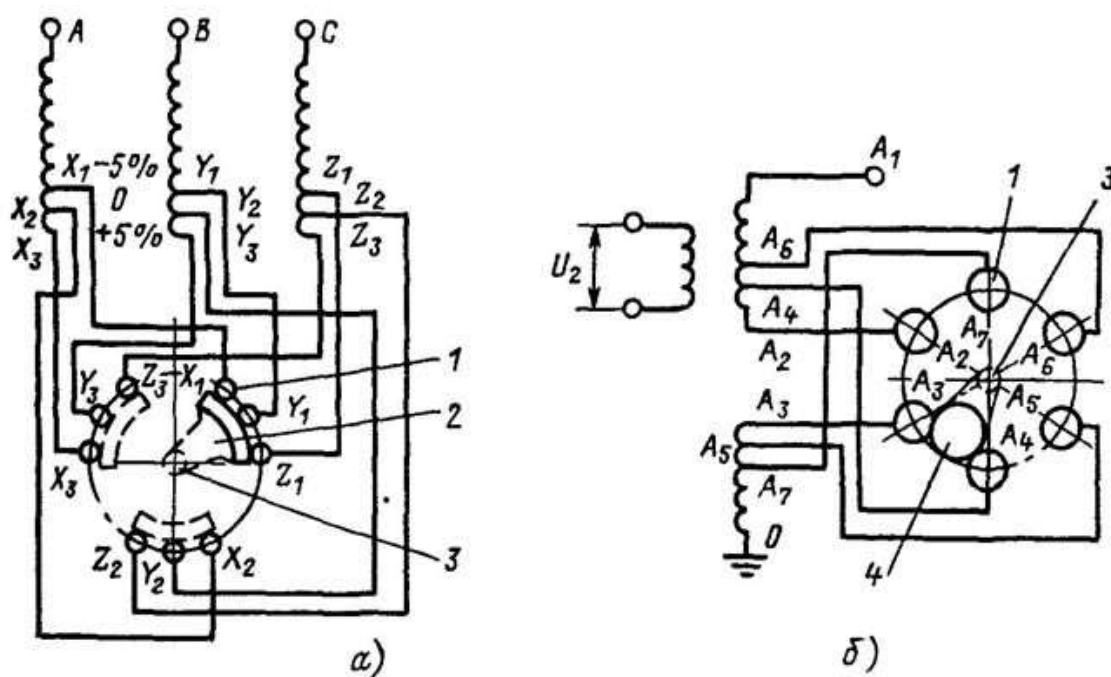


Рис. 4. Схема регулирования напряжения ПВБ.

а – ответвления вблизи нулевой точки обмотки $\pm 5\%$ с трехфазным переключателем на три положения,

б – ответвления в середине обмотки $\pm 2 \times 2,5\%$ с однофазными переключателями на пять положений (фаза А);

1 – неподвижный контакт, 2 – сегмент контактный,

3 – вал переключателя, 4 – контактные кольца.

Устройства ПВБ позволяет регулировать напряжение в пределах $\pm 5\%$, для чего трансформаторы небольшой мощности кроме основного вывода имеют два ответвление от обмотки высшего напряжение $+5\%$ и -5% (рис. 1, а). Если трансформатор работал на основном выводе 0 и необходимо повысить напряжение на вторичной стороне U_2 , то, отключив трансформатор, производят переключение на ответвление -5% , уменьшая тем самым число витков w_1 .

На трансформаторах средних и больших мощностей предусматриваются четыре ответвления $\pm 2 \times 2,5\%$, переключение которых производится

специальными переключателями барабанного типа, установленными отдельно для каждой фазы (рис. 1, б). Рукоятка привода переключателя выведена на крышку трансформатора. При замыкании роликом переключателя контактов A_2 - A_5 трансформатор имеет номинальный коэффициент трансформации. Положения A_3 - A_4 и A_2 - A_3 соответствуют увеличению коэффициента трансформации на 2,5 и 5%, а положения A_5 - A_6 и A_6 - A_7 уменьшению на 2,5 и 5%.

Учитывая, выше сказанное, можно сделать следующие выводы:

- 1). Устройство ПБВ не позволяет регулировать напряжение в течение суток, так как это потребовало бы частого отключения трансформатора для производства переключений, что по условиям эксплуатации практически недопустимо. Обычно ПБВ используется только для сезонного регулирования напряжения.
- 2). Регулирование под нагрузкой (РПН) позволяет переключать ответвления обмотки трансформатора без разрыва цепи. Устройство РПН предусматривает регулирование напряжения в различных пределах в зависимости от мощности и напряжения трансформатора (от ± 10 до $\pm 16\%$ ступенями приблизительно по 1,5%).

Литература:

1. **Идельчик, В. И.** Электрические системы и сети [Текст] / В. И. Идельчик – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 420 с.
2. **Поспелов, Г. Е.** Потери мощности и энергии в электрических сетях [Текст] / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. – М.: Энергоиздат, 1981. – 510 с.
3. **Петренко, Л. И.** Электрические системы и сети [Текст] / Л. И. Петренко – Киев: Вища школа, 1998. – 428 с.