

УДК 621.314.214.33

А. Г. Лавров, Е. Н. Попов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Анализ процессов регулирования напряжения силовых трехобмоточных трансформаторов

*Рассматриваются теоретические аспекты регулирования напряжения силовых трансформаторов и сделаны выводы о необходимости внесения корректировок в ГОСТ 30830–2002, а также предложены изменения применяемых терминологии и формул. Дано подробное описание режимов регулирования вторичного напряжения трехобмоточного трансформатора, отсутствующее на данный момент в учебно-методической и научно-технической литературе. Предложены формулы определения коэффициента трансформации от ветвления, выраженные не через напряжение ответвления, а через число витков обмоток. Возвращая процессу регулирования его физический смысл, главной целью этой замены является возможность оперировать количеством витков в любом режиме регулирования. Разработаны методики выбора необходимого регулировочного ответвления, которые отвечают истинному физическому смыслу процесса регулирования напряжения, рассматривают оба варианта размещения устройства регулирования под нагрузкой на обмотках трехобмоточного трансформатора и позволяют использовать их в любом режиме регулирования.*

### Трехобмоточный трансформатор, регулирование напряжения, переменный магнитный поток, режимы регулирования, коэффициент трансформации

Особенностью энергосистемы России, унаследованной от СССР, является высокая степень концентрации и огромные размеры энергогенерирующих предприятий.

Единая энергетическая система РФ располагается на территории, охватывающей 8 часовых поясов, и для обеспечения электроэнергией столь огромной территории необходимо применение линий электропередачи (ЛЭП) высокого и сверхвысокого напряжений [1], [2].

На сегодняшний день практически в любой системе электроснабжения насчитывается минимум 4 этапа преобразования уровня генерируемого напряжения, которые осуществляются с помощью трансформаторов для уменьшения активных потерь в линиях сети.

В большинстве случаев распределительные сети, непосредственно обеспечивающие электроэнергией потребителей, функционируют в переменных режимах, что сопровождается колебаниями, иногда значительными, рабочего напряжения конкретной распределительной сети. Вслед-

ствие этого на зажимах электроприемников происходит превышение установленных пределов изменения напряжения, которые определяются ГОСТ Р 32144–2013 [3].

В современных отечественных электрических сетях, характеризующихся многоступенчатой трансформацией и все увеличивающейся длиной линий различных напряжений, невозможно обеспечить напряжение требуемого качества без применения специальных регулирующих устройств [4].

Учитывая особенности электроэнергетической системы России, наиболее эффективным способом обеспечения стабильности напряжения в системе электроснабжения является регулирование напряжения трансформаторов.

Процесс регулирования напряжения связан с качеством электрической энергии, поставляемой потребителю, и регламентируется ГОСТ 30830–2002 [5], ряд статей которого вводит необходимую терминологию и предопределяет методику количественной оценки соответствующих параметров регулирования.

Как показано в [6], определения, данные ГОСТом [5] относительно понятий режимов регулирования при постоянном и переменном магнитном потоке, некорректны, так как оба режима регулирования осуществляются путем изменения магнитного потока, а различие заключается в режиме, в котором трансформатор будет работать по завершении процесса регулирования.

В соответствии с имеющейся научно-технической литературой [4], [7]–[10] и стандартами на силовые трансформаторы [11]–[13], предприятия отечественного трансформаторостроения не изготавливают понижающие трансформаторы с устройством регулирования числа витков на вторичной обмотке. Регулировочные ответвления трансформаторов размещаются на обмотке высшего напряжения (ВН) трансформатора [14]. Это связано с тем, что ток в обмотке ВН меньше, чем ток в обмотке низшего напряжения (НН). Это уменьшает электрические потери на активном сопротивлении регулировочной обмотки, а также облегчает работу переключающего устройства регулирования под нагрузкой (РПН) и, как следствие, позволяет изготавливать их с меньшими массогабаритными показателями.

В связи с этим предлагаемые далее определения режимов регулирования напряжения трансформатора справедливы только для трансформаторов с устройством регулирования на первичной обмотке (ВН).

На основании изложенного предлагается в учебной и научно-технической литературе оперировать формулировками режимов регулирования напряжения трансформатора, соответствующими реальному физическому смыслу процесса регулирования:

1. Регулирование без изменения магнитного потока: регулированием числа витков обмотки компенсируется отклонение напряжения потребителя, вызванное изменением напряжения питающей сети.

После завершения процесса регулирования трансформатор продолжает работу с номинальным магнитным потоком.

2. Регулирование с изменением магнитного потока: регулированием числа витков обмотки компенсируется отклонение напряжения потребителя, вызванное изменением тока нагрузки.

После завершения процесса регулирования трансформатор продолжает работу с отличным от номинального магнитным потоком.

3. Комбинированное регулирование: в случае, если отклонение напряжения у потребителя вызвано одновременным изменением напряжения питающей сети и тока нагрузки, путем регулирования числа витков восстанавливают магнитный поток трансформатора до номинального значения, после чего в зависимости от нужд потребителя напряжение регулируется путем изменения магнитного потока.

Трансформаторы, предназначенные для соединения мощных высоковольтных ЛЭП между собой и для подстанций высоковольтных распределительных сетей и промышленных предприятий, преимущественно трехобмоточные. Экономическая целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов объясняется тем, что один такой трансформатор заменяет два двухобмоточных, вследствие чего капитальные затраты на сооружение подстанции уменьшаются и схема коммутации становится проще [7].

В имеющейся учебно-методической и научно-технической литературе отсутствует подробное описание процессов регулирования напряжения трехобмоточного трансформатора. Как показано в [15], отсутствие описания физических основ регулирования напряжения трансформатора приводит к неучету важных явлений и, как следствие, уменьшению срока службы и тяжелым или даже аварийным условиям его работы.

Представляется необходимым анализ физических процессов, сопровождающих регулирование вторичного напряжения трехобмоточного трансформатора.

При использовании трехобмоточного трансформатора для обмена энергией между двумя ЛЭП с разным напряжением главным расчетным режимом является режим ВН–СН [7].

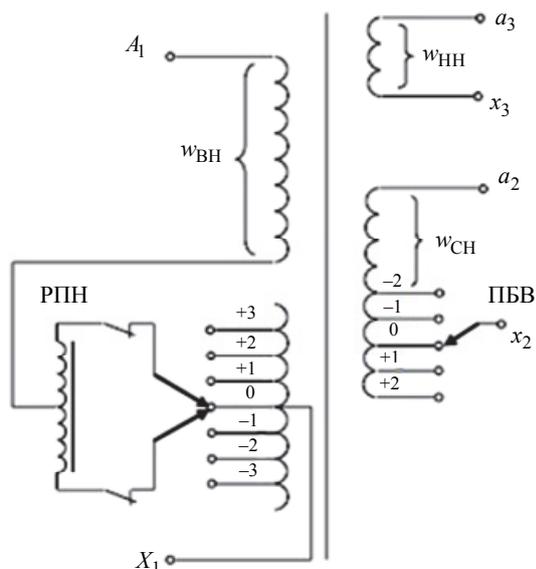
Обмотка НН выполняет, как правило, вспомогательную функцию. Она может быть использована для подсоединения источника реактивной мощности, для питания близких к подстанции потребителей или для собственных нужд электростанции [7].

Трехобмоточные трансформаторы имеют либо одно устройство РПН в обмотке среднего напряжения (СН) [4], либо два устройства регулирования напряжения [8]:

- РПН в нейтрали обмотки ВН;
- ПБВ (переключение без возбуждения) в обмотке СН.

При размещении устройства РПН на стороне ВН (см. рисунок) регулирование напряжения на сторонах СН и НН не может быть выполнено

независимо, так как изменение числа витков обмотки ВН  $w_{ВН}$ , приводит к одновременному изменению коэффициентов трансформации  $k_{ВН-СН}$  и  $k_{ВН-НН}$ , следовательно, и напряжений на сторонах СН и НН [4]. При этом не удастся обеспечить желаемые напряжения одновременно на шинах СН и НН, поэтому обмотка СН снабжается дополнительным устройством ПБВ, с помощью которого обеспечивается требуемое напряжение на стороне СН для заданного режима.



На рисунке  $w_{ВН}$ ,  $w_{СН}$ ,  $w_{НН}$  – число витков обмоток ВН, СН и НН соответственно;  $A_1X_1$  – выводы обмотки ВН;  $a_2x_2$  – выводы обмотки СН;  $a_3x_3$  – выводы обмотки НН.

Рассмотрим режим регулирования напряжения, в котором изменение вторичного напряжения трехобмоточного трансформатора вызвано отклонением действующего значения напряжения  $U_c = U_{ВН}$  питающей сети.

При отклонении напряжения питающей сети изменяется магнитный поток взаимной индукции  $\Phi_m$ , что сопровождается пропорциональным изменением ЭДС первичной обмотки  $E_{ВН}$ . При этом в соответствии с формулами

$$E_{СН} = \pi\sqrt{2}f_1w_{СН}\Phi_m, \quad (1)$$

$$E_{НН} = \pi\sqrt{2}f_1w_{НН}\Phi_m \quad (2)$$

изменяются действующие значения ЭДС взаимной индукции  $E_{СН}$  и  $E_{НН}$  обмоток СН и НН, соответственно и напряжения на вторичных выводах трансформатора  $U_{СН}$  и  $U_{НН}$ .

Для восстановления исходных значений напряжений  $U_{СН}$  и  $U_{НН}$  необходимо регулировать действующие значения ЭДС взаимной индукции  $E_{СН}$  и  $E_{НН}$  за счет соответствующего изменения амплитуды магнитного потока взаимной индукции  $\Phi_m$  путем регулирования числа витков первичной обмотки  $w_{ВН}$  с помощью устройства РПН.

Путем изменения числа витков первичной обмотки происходит «подстройка» трансформатора на изменившееся напряжение питающей сети, и напряжения на обмотках СН и НН регулируются одновременно до исходных значений, в связи с чем в данном режиме регулирования устройство ПБВ не используется.

Поскольку трехобмоточные трансформаторы принципиально не отличаются от двухобмоточных, как и применяемые для регулирования устройства РПН, то в соответствии с [6] действительные напряжения обмоток СН и НН трехобмоточного трансформатора после завершения процесса регулирования определяются по формулам

$$U_{СН д} = U_{СН} \left( 1 \mp n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100} \right), \quad (3)$$

$$U_{НН д} = U_{НН} \left( 1 \mp n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100} \right), \quad (4)$$

где  $U_{СН}$ ,  $U_{НН}$  – напряжения обмоток СН и НН до переключения устройства РПН;  $\Delta w_{ВН}$  – ступень (шаг) регулирования числа витков устройства РПН обмотки ВН, %; произведение  $n_1\Delta w_{ВН}$  – добавка числа витков обмотки ВН, соответствующая  $n_1$ -й ступени по отношению к числу витков основного ответвления устройства РПН.

Сегодня в учебной и научно-технической литературе [4], [8] расчет коэффициентов трансформации ответвления производят через известные значения напряжения ответвлений  $\Delta U_{ВН}$  и  $\Delta U_{СН}$ , значения которых определяются для номинального магнитного потока в сердечнике трансформатора. В режиме регулирования с изменением магнитного потока значения указанных величин будут изменяться пропорционально изменению магнитного потока, что не учитывают предлагаемые формулы.

Анализ режимов регулирования напряжения силовых трансформаторов [6] показал, что определение коэффициента трансформации через отношение числа витков возвращает процессу регу-

лирования его физический смысл и позволяет оперировать количеством витков в любом режиме регулирования.

Представляется необходимым и в рассматриваемом случае поступить аналогично и представить коэффициенты трансформации ответвлений в виде

$$k_{\text{т.отв.ВН-СН}} = \frac{w_{\text{ВН}} w_{\text{отв}}}{w_{\text{СН}} w_{\text{ВН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{СН}}} \frac{w_{\text{ВН}} \pm n_1 \frac{\Delta w_{\text{ВН}}}{100} w_{\text{ВН}}}{w_{\text{ВН}}} = k_{\text{т.ВН-СН}} (1 \pm n_1 \Delta w_{\text{ВН}}), \quad (5)$$

$$k_{\text{т.отв.ВН-НН}} = \frac{w_{\text{ВН}} w_{\text{отв}}}{w_{\text{НН}} w_{\text{ВН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} \frac{w_{\text{ВН}} \pm n_1 \frac{\Delta w_{\text{ВН}}}{100} w_{\text{ВН}}}{w_{\text{ВН}}} = k_{\text{т.ВН-НН}} (1 \pm n_1 \Delta w_{\text{ВН}}). \quad (6)$$

Поскольку величина магнитного потока в сердечнике трансформатора до изменения питающего напряжения и после завершения процесса регулирования остается практически неизменной, такой процесс регулирования напряжения можно назвать регулированием без изменения магнитного потока.

Рассмотрим режим работы трансформатора, в котором на первичную обмотку (ВН) подается неизменное по уровню напряжение, а к вторичным обмоткам (СН, НН) подключены потребители с переменным графиком нагрузки.

Любое изменение тока нагрузки вызывает соответствующее изменение тока в обмотке ВН трансформатора до величины, необходимой для сохранения результирующего магнитного потока без изменения. В этом случае ЭДС обмоток СН и НН также сохраняют свои значения. Однако согласно стандартной внешней характеристике напряжения обмоток СН и НН будут отличаться от номинальных значений, что вызвано изменением падений напряжения на внутренних сопротивлениях обмоток.

Для того чтобы напряжения вторичных обмоток  $U_{\text{СН}}$  и  $U_{\text{НН}}$  под действием нагрузки не изменяли свои значения, необходимо регулировать режим работы трансформатора, т. е. регулировать коэффициент трансформации изменением числа витков обмотки ВН с помощью устройства РПН.

Определение необходимых ответвлений устройства РПН начинается с обеспечения желаемого напряжения на выводах обмотки НН, так как никаким другим способом регулировать напряжение обмотки НН не представляется возможным. А в случае, если напряжение обмотки СН не восстановило свое исходное значение после переключения устройства РПН, имеется возможность дополнительного регулирования напряжения обмотки СН с помощью устройства ПБВ.

В соответствии с формулой

$$E_{\text{ВН}} = \pi \sqrt{2} f_1 w_{\text{ВН}} \Phi_m \quad (7)$$

при постоянном значении напряжения питающей сети изменение числа витков обмотки ВН вызывает изменение магнитного потока  $\Phi_m$  и, как следствие, в соответствии с (1) и (2) изменяются действующие значения ЭДС взаимной индукции  $E_{\text{СН}}$  и  $E_{\text{НН}}$  обмоток СН и НН, соответственно и напряжения  $U_{\text{СН}}$  и  $U_{\text{НН}}$ .

Действительные напряжения обмоток СН и НН и коэффициенты трансформации ответвления ВН–СН и ВН–НН после переключения устройства РПН на необходимое ответвление  $n_1$  определяются по формулам (3), (4) и (5), (6) соответственно.

В случае, если напряжение обмотки СН после переключения устройства РПН не восстановилось до исходного значения, необходимо дополнительно с помощью устройства ПБВ изменять число витков обмотки СН  $w_{\text{СН}}$ , тем самым подстраивая обмотку СН под изменившийся магнитный поток взаимной индукции.

Действительное напряжение обмотки СН  $U_{\text{СН.д}}$  после переключения устройств РПН и ПБВ на необходимые ответвления

$$U_{\text{СН.д}} = U_{\text{СН}} \left( 1 \mp n_1 \frac{\Delta w_{\text{ВН}}}{100} \right) \left( 1 \pm n_2 \frac{\Delta w_{\text{СН}}}{100} \right), \quad (8)$$

где  $\Delta w_{\text{СН}}$  – ступень (шаг) регулирования числа витков устройства ПБВ обмотки СН, %, а произведение  $n_2 \Delta w_{\text{СН}}$  – добавка числа витков обмотки СН, соответствующая  $n_2$ -й ступени по отношению к числу витков основного ответвления устройства ПБВ.

В соответствии с ГОСТ 30830–2002 [5] п. 3.5.8: «Коэффициент трансформации ответвле-

ния (пары обмоток): коэффициент, равный номинальному коэффициенту трансформации:

– умноженному на коэффициент ответвления обмотки с ответвлениями, если это обмотка высшего напряжения;

– деленному на коэффициент ответвления обмотки с ответвлениями, если это обмотка низшего напряжения».

Следовательно, коэффициент трансформации ответвления ВН–СН  $k_{т.отв.ВН-СН}$  после переключения устройств РПН и ПБВ на необходимые ответвления, с учетом (5):

$$k_{т.отв.ВН-СН} = \left( \frac{w_{ВН}}{w_{СН}} \frac{w_{отв.ВН}}{w_{ВН}} \right) \frac{w_{СН}}{w_{отв.СН}} = \frac{w_{отв.ВН}}{w_{отв.СН}} = \frac{w_{ВН} \pm n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100} w_{ВН}}{w_{СН} \pm n_2 \frac{\Delta w_{СН}}{100} w_{СН}} = k_{т.ВН-СН} \frac{(1 \pm n_1 \Delta w_{ВН})}{(1 \pm n_2 \Delta w_{СН})}, \quad (9)$$

где  $\frac{w_{отв.ВН}}{w_{ВН}}$  – коэффициент ответвления обмотки ВН;  $\frac{w_{отв.СН}}{w_{СН}}$  – коэффициент ответвления обмотки СН.

Поскольку после завершения процесса регулирования трансформатор продолжает работу с отличным от исходного значения магнитным потоком, такой режим регулирования можно назвать регулированием с изменением магнитного потока.

В [4], [8] расчет процессов регулирования напряжения трансформатора осуществляется через известные значения напряжения ответвлений. Вследствие изменения магнитного потока при регулировании предлагается ввести коэффициент изменения магнитного потока  $k_{\Phi_{ВН}}$ :

$$k'_{ВН-СН} = \frac{U_{ВН} \pm n_1 \frac{\Delta U_{ВН}}{100} U_{ВН} k_{\Phi_{ВН}}}{U_{СН} \pm n_2 \frac{\Delta U_{СН}}{100} U_{СН} k_{\Phi_{ВН}}},$$

$$k'_{ВН-НН} = \frac{U_{ВН} \pm n_1 \frac{\Delta U_{ВН}}{100} U_{ВН} k_{\Phi_{ВН}}}{U_{НН}},$$

где  $U_{СН}$ ,  $U_{НН}$  – напряжения обмоток СН и НН до переключения устройств РПН и ПБВ;  $k_{\Phi_{ВН}} =$

$$= \frac{1}{1 \pm n_1 \frac{\Delta U_{ВН}}{100}} = \frac{1}{1 \pm n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100}} \quad \text{– коэффициент,}$$

учитывающий изменение магнитного потока и определяемый по паспортным данным РПН.

В режиме регулирования напряжения без изменения магнитного потока коэффициент  $k_{\Phi_{ВН}}$  необходимо принять равным единице.

Рассматриваемый режим регулирования напряжений обмоток СН и НН при постоянном значении напряжения обмотки ВН и с изменением магнитного потока крайне неблагоприятен, особенно при регулировании с помощью устройства РПН в сторону уменьшения числа витков обмотки ВН. Указанное уменьшение числа витков обмотки ВН влечет за собой увеличение магнитного потока, степени насыщения магнитной системы, магнитных потерь, изменение температурного режима работы и увеличение электродинамических сил, действующих на обмотки, что может привести к тяжелым или даже аварийным условиям работы трансформатора [15].

При размещении устройства РПН со стороны обмотки СН регулирование напряжения на стороне среднего напряжения выполняется независимо от напряжения на низшей стороне [4].

Напряжение обмотки НН  $U_{НН}$  при размещении устройства РПН на обмотке СН никак не регулируется и остается отличным от исходного значения при изменении нагрузки со стороны обмотки НН, так как коэффициент трансформации ВН–НН не регулируется и всегда равен номинальному:  $k_{т.ВН-НН} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}$ .

Для того чтобы напряжение обмотки СН  $U_{СН}$  под действием нагрузки не изменяло своего значения, необходимо регулировать режим работы трансформатора, т. е. регулировать коэффициент трансформации ВН–СН изменением числа витков обмотки СН.

При изменении числа витков обмотки СН  $w_{СН}$  в соответствии с (1) происходит «подстройка» трансформатора под изменившийся ток нагрузки без изменения результирующего магнитного потока взаимной индукции.

Действительное напряжение обмотки СН и коэффициент трансформации ответвления ВН–СН  $k_{т.отв.ВН-СН}$  после завершения процесса регулирования определяются по формулам

$$U_{\text{СН.д}} = U_{\text{СН}} \left( 1 \pm n \frac{\Delta w_{\text{СН}}}{100} \right), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} k_{\text{т.отв.ВН-СН}} &= \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{СН}}} \frac{w_{\text{СН}}}{w_{\text{отв.СН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{отв.СН}}} = \\ &= \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{СН}} \pm n \frac{\Delta w_{\text{СН}}}{100} w_{\text{СН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{СН}}} \frac{1}{(1 \pm n \frac{\Delta w_{\text{СН}}}{100})} = \\ &= k_{\text{т.ВН-СН}} \frac{1}{(1 \pm n \frac{\Delta w_{\text{СН}}}{100})}, \quad (11) \end{aligned}$$

где  $U_{\text{СН}}$  – напряжение обмотки СН до переключения устройства РПН;  $\Delta w_{\text{СН}}$  – степень (шаг) регулирования числа витков устройства РПН обмотки СН; произведение  $n \Delta w_{\text{СН}}$  – добавка числа витков обмотки СН, соответствующая  $n$ -й ступени по отношению к числу витков основного ответвления устройства РПН;  $\frac{w_{\text{отв.СН}}}{w_{\text{СН}}}$  – коэффициент ответвления обмотки СН.

В случае изменения действующего значения напряжения питающей сети  $U_{\text{с}} = U_{\text{ВН}}$  в соответствии с (7) изменится величина магнитного потока взаимной индукции  $\Phi_m$ . При этом в соответствии с (1) и (2) изменяются действующие значения ЭДС взаимной индукции  $E_{\text{СН}}$  и  $E_{\text{НН}}$  обмоток СН и НН, соответственно и напряжения  $U_{\text{СН}}$  и  $U_{\text{НН}}$ .

Регулировать напряжение обмотки НН  $U_{\text{НН}}$ , как было указано ранее, не представляется возможным, а для восстановления напряжения  $U_{\text{СН}}$  до исходного значения необходимо изменять число витков обмотки СН. При этом происходит «подстройка» трансформатора на изменившееся питающее напряжение. Так как изменение числа витков обмотки СН не влияет на параметры обмотки ВН, которые определяют величину магнитного потока, то в рассматриваемом случае регулирование осуществляется без изменения магнитного потока  $\Phi_m$ . Но после завершения процесса регулирования трансформатор продолжает работу с отличным от исходного значения магнитным потоком, так как изменилось значение напряжения питающей сети, определяющее величину результирующего магнитного потока.

Действительное напряжение обмотки СН и коэффициент трансформации ответвления ВН–СН  $k_{\text{т.отв.ВН-СН}}$  после завершения процесса регулирования определяются по (10) и (11).

Задача определения необходимого регулировочного ответвления трансформаторов заключается в том, чтобы при любых возможных изменениях напряжения питающей сети и тока нагрузки обеспечить на шинах вторичного напряжения трансформатора требуемые напряжения.

В [4], [8] указаны только формулы, позволяющие определить напряжения обмоток СН и НН при переходе на необходимое ответвление, при этом отсутствуют методики выбора необходимого регулировочного ответвления устройств РПН и ПБВ на трехобмоточных трансформаторах.

В соответствии с [8] напряжение обмотки НН после завершения процесса регулирования определяется по формуле

$$U_{\text{НН}}^{(n_1)} = \frac{U'_{\text{НН}} U_{\text{НН ном}}}{U_{\text{ВН ном}} \left( 1 \pm \frac{\Delta U_{\text{ВН}} n_1}{100} \right)}, \quad (12)$$

где  $U'_{\text{НН}}$  – расчетное напряжение обмотки НН, приведенное к обмотке ВН;  $\Delta U_{\text{ВН}}$  – степень регулирования устройства РПН, %;  $n_1$  – номер ответвления устройства РПН.

Напряжение обмотки СН после завершения процесса регулирования определяется по формуле

$$U_{\text{СН}}^{(n_2)} = \frac{U'_{\text{СН}} U_{\text{СН ном}} \left( 1 \pm \frac{\Delta U_{\text{СН}} n_2}{100} \right)}{U_{\text{ВН ном}} \left( 1 \pm \frac{\Delta U_{\text{ВН}} n_1}{100} \right)}, \quad (13)$$

где  $U'_{\text{СН}}$  – расчетное напряжение обмотки СН, приведенное к стороне ВН;  $\Delta U_{\text{СН}}$  – степень регулирования устройства ПБВ, %;  $n_2$  – номер ответвления устройства ПБВ [8].

Коэффициенты трансформации  $k_{\text{ВН-СН}}$  и  $k_{\text{ВН-НН}}$ , в соответствии с [4] вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} k_{\text{ВН-СН}} &= \frac{U_{\text{ВН}} \pm n_1 \frac{\Delta U_{\text{ВН}}}{100} U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}} \pm n_2 \frac{\Delta U_{\text{СН}}}{100} U_{\text{СН}}}, \\ k_{\text{ВН-НН}} &= \frac{U_{\text{ВН}} \pm n_1 \frac{\Delta U_{\text{ВН}}}{100} U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}. \end{aligned} \quad (14)$$

В (12)–(14) используется понятие «добавка напряжения», но, как указано в [6], такого понятия не существует. Напряжение первичной обмотки однозначно определяется напряжением

питающей сети и никоим образом не зависит от положения переключателя числа витков самой обмотки и никакими изменениями коэффициента ответвлений его регулировать нельзя.

Применение (12)–(14) для расчета напряжений обмоток и коэффициентов трансформации в режиме регулирования с изменением магнитного потока представляется некорректным. Это связано с тем, что в указанные формулы входят величины  $\Delta U_{ВН}$  и  $\Delta U_{СН}$ , значение которых определяется для номинального магнитного потока в сердечнике трансформатора, а в данном режиме регулирования их значения будут изменяться пропорционально изменению магнитного потока, что не учитывают предлагаемые формулы.

Также в [4], [8] отсутствуют рекомендации по выбору регулировочного ответвления в случае размещения устройства РПН со стороны обмотки СН.

В соответствии с этим разработаны алгоритмы выбора необходимого регулировочного ответвления при размещении устройства РПН со стороны обмотки ВН и при размещении устройства РПН со стороны обмотки СН, отвечающие реальному физическому смыслу процесса регулирования и позволяющие использовать их в любом режиме регулирования.

Для расчета необходимого регулировочного ответвления  $n_1$  устройства РПН, размещенного со стороны обмотки ВН, рекомендуется использовать предложенные ранее формулы (3), (4) и следующий алгоритм:

– определяем относительные изменения напряжений обмоток СН и НН [%]:

$$\Delta U_{СН} = \Delta U_{НН} = \frac{U_{СН} - U_{СН ж}}{U_{СН ж}} 100 = \frac{U_{НН} - U_{НН ж}}{U_{НН ж}} 100,$$

где  $U_{СН ж}$ ,  $U_{НН ж}$  – желаемые напряжения на обмотках СН и НН соответственно, которые в различных режимах могут отличаться от номинальных значений;

– вычисляем, какое количество регулировочных ступеней устройства РПН необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжений до желаемого, по формуле

$$n_1 = \frac{\pm \Delta U_{СН}}{\Delta w_{ВН}} = \frac{\pm \Delta U_{НН}}{\Delta w_{ВН}}$$

и округляем до ближайшего целого. Предложенная формула справедлива, так как изменение напряжений обмоток СН и

НН было вызвано изменением магнитного потока вследствие изменения напряжения питающей сети и, следовательно, для его восстановления необходимо пропорционально изменить количество витков обмотки ВН;

– определяем действительные напряжения обмоток СН и НН после завершения процесса регулирования по (3) и (4).

В случае компенсации отклонений напряжений обмоток СН и НН, вызванных изменением тока нагрузки, определение необходимых ответвлений РПН и ПБВ начинается с обеспечения желаемого напряжения на стороне НН:

– определяем относительное изменение напряжения обмотки НН [%]:

$$\Delta U_{НН} = \frac{U_{НН} - U_{НН ж}}{U_{НН ж}} 100;$$

– вычисляем, какое количество регулировочных ступеней устройства РПН необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжения обмотки НН до исходного значения, по формуле  $n_1 = \frac{\pm \Delta U_{НН}}{\Delta w_{ВН}}$  и округляем до ближайшего целого;

– определяем действительные напряжения обмоток СН и НН после переключения устройства РПН на необходимое регулировочное ответвление  $n_1$  по (3) и (4) соответственно;

– вычисляем относительное изменение напряжения обмотки СН [%] с учетом переключения устройства РПН:

$$\Delta U_{СН} = \frac{U_{СН} \left( 1 \mp n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100} \right) - U_{СН ж}}{U_{СН ж}} 100,$$

где  $U_{СН} \left( 1 \mp n_1 \frac{\Delta w_{ВН}}{100} \right)$  – напряжение обмотки СН после переключения устройства РПН на  $n_1$  ответвление;

– вычисляем, какое количество регулировочных ступеней устройства ПБВ необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжения обмотки СН до исходного значения,

по формуле  $n_2 = \frac{\pm \Delta U_{СН}}{\Delta w_{СН}}$  и округляем до ближайшего целого;

– определяем действительное напряжение обмотки СН после завершения процесса регулирования по (8).

В случае компенсации отклонений напряжений обмоток СН и НН, вызванных изменением либо напряжения питающей сети, либо тока нагрузки, с помощью устройства РПН, размещенного на обмотке СН, алгоритм определения необходимого регулировочного ответвления аналогичен предложенному ранее.

Отличие заключается лишь в том, что при определении количества регулировочных ступеней устройства РПН, которое необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжения обмотки СН до исходного, используется величина ступени (шага) регулирования  $\Delta U_{\text{СН}}$ , и действительное напряжение обмотки СН после завершения процесса регулирования определяется по (10).

Напряжение обмотки НН, как было указано ранее, не зависит от положения переключателя устройства РПН, размещенного в обмотке СН.

#### **Выводы.**

Определения, данные в ГОСТ 30830–2002 относительно уточнения понятий режимов регулирования при постоянном и переменном магнитном потоке, некорректны. Предлагается ввести в данный

ГОСТ формулировки режимов регулирования напряжения трансформатора, отвечающие реальному физическому смыслу.

Дано подробное описание режимов регулирования вторичного напряжения трехобмоточного трансформатора, отсутствующее на данный момент в учебно-методической и научно-технической литературе.

Предложены формулы определения коэффициента трансформации ответвления, выраженные не через напряжение ответвления, а через число витков обмоток. Возвращая процессу регулирования его физический смысл, главной целью этой замены является возможность оперировать количеством витков в любом режиме регулирования, так как этот параметр не зависит от магнитного потока.

Разработаны методики выбора необходимого регулировочного ответвления, которые отвечают истинному физическому смыслу процесса регулирования напряжения, рассматривают оба варианта размещения устройства РПН на обмотках трехобмоточного трансформатора и позволяют использовать их в любом режиме регулирования.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Метельников А. Энергетика России: между прошлым и будущим // Новости энергетики. 28.02.2018. URL: <https://novostienergetiki.ru/energetika-rossii-mezhdu-proshlym-i-budushhim/> (дата обращения 02.03.2018).
2. Добрусин Л. А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России // Энергосбережение. 2013. № 7. С. 54–60.
3. ГОСТ Р 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
4. Ананичева С. С., Алексеев А. А., Мызин А. Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособие. Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2012. 93 с.
5. ГОСТ 30830–2002. Трансформаторы силовые. Ч. 1: Общие положения. М.: Изд-во стандартов, 2002. 28 с.
6. Лавров А. Г., Попов Е. Н. Регулирование выходного напряжения трансформаторов под нагрузкой // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. № 5. С. 86–91.
7. Бики М. А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров. М.: Знак, 2013. 612 с.
8. Татаров Е. И. Электропитающие системы и электрические сети: комплекс учеб.-метод. материалов / Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 2013. 117 с.
9. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. 4-е изд. М.: КНОРУС, 2014. 648 с.
10. Пospelов Г. Е., Федин В. Т. Электрические системы и сети. Проектирование: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. Минск: Высш. шк., 1988. 308 с.
11. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 42 с.
12. ГОСТ 12965–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1985. 32 с.
13. ГОСТ 17544–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1985. 32 с.
14. Аншин В. Ш., Худяков З. И. Сборка трансформаторов: учеб. пособие для ПТУ. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
15. Popov E. N., Lavrov A. G. Analysis of operation mode and performance indicators of a transformer when controlling its voltage with an alternating magnetic flux // Intern. J. of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. Vol. 9, № 10. P. 211–218.

A. G. Lavrov, E. N. Popov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## ANALYSIS OF VOLTAGE REGULATION PROCESSES OF POWER THREE-WINDING TRANSFORMERS

*Theoretical aspects of regulating the voltage of power transformers are considered and conclusions are drawn about the need to make adjustments to GOST 30830-2002, as well as changes to the applied terminology and formulas are proposed. A detailed description of the regulation modes of the secondary voltage of a three-winding transformer is given, which is currently missing in the educational-methodical and scientific-technical literature. Formulas are proposed for determining the branch transformation coefficient, expressed not through the branch voltage, but through the number of turns of the windings. Thus returning to the regulation process its physical meaning, the main purpose of this replacement is the ability to operate with the number of turns in any regulation mode. Methods have been developed for choosing the necessary regulatory branch, which correspond to the true physical meaning of the voltage regulation process, consider both options for placing the on-load tap-changer on the windings of a three-winding transformer and allow them to be used in any regulation mode.*

**Three-winding transformer, voltage control, alternating magnetic flux, control modes, transformation ratio**

УДК 621.316.73

Ю. Н. Журавлев  
ООО «Псковская Инженерная Компания»

М. Е. Лазарев, Р. К. Шарапов  
Псковский государственный университет

## Математическое моделирование подвеса ротора синхронного реактивного электродвигателя на активных магнитных подшипниках

*Описываются генерируемые магнитным полем 2-полюсного синхронного реактивного электродвигателя силы и моменты. С помощью анализа магнитных потенциалов ротора, вызванных несимметричным распределением потока при перемещениях ротора были определены магнитные потоки и индуктивности. Зная индуктивности, была получена магнитная энергия, частные производные которой дают вращающий момент и радиальные силы. Получено уравнение вращающего момента, состоящее из возмущающего и движущего момента, уравнения которого представлены для двигательного и генераторного режима. Показано, что в полученных аналитических выражениях для радиальных сил и угловых моментов содержатся возмущающие и позиционные компоненты, обладающие «отрицательной» жесткостью и оказывающие дестабилизирующее влияние на подвес ротора. В связи с этим применяется учет их в математическом описании объекта управления системы магнитного подвеса ротора на активных магнитных подшипниках.*

**Активный магнитный подшипник, магнитные силы и моменты, синхронный реактивный электродвигатель**

Дифференциальные уравнения движения жесткого ротора любой машины, опорами которого являются активные магнитные подшипники (АМП), имеют хорошо известный вид [1]–[3]:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= P_x + F_x + m\omega^2 \cos \omega t, \\ m\ddot{y} &= P_y + F_y + m\omega^2 \sin \omega t, \\ J\ddot{\phi}_x + \omega J_0 \dot{\phi}_y &= L_x + M_x + (J - J_0) \gamma \omega^2 \cos \omega t, \\ J\ddot{\phi}_y - \omega J_0 \dot{\phi}_x &= L_y + M_y + (J - J_0) \gamma \omega^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$