

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analysis of mathematical models of continuous and discrete non-linear systems / U. A. Bichkov, U. M. Inshakov, E. B. Solovyeva, S. A. Scherbakov. SPb.: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017. 174 p.
2. Haykin S. Neural networks and learning machines. New York: Pearson Education Inc., 2009. 906 p.
3. Bianchini M., Maggini M., Jain L. C. Handbook on neural information processing. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 538 p.
4. Mathews V. J., Sicuranza G. L. Polynomial signal processing. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 452 p.
5. Ogunfunmi T. Adaptive nonlinear system identification. The Volterra and Wiener model approaches. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 229 p.
6. Billings S. A. Nonlinear system identification: NARMAX methods in the time, frequency, and spatio-temporal domains. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 555 p.
7. RF power amplifier behavioral modelling / D. Schreurs, M. O'Droma, A. A. Goacher, M. Gadringer // New York: Cambridge university press, 2009. 269 p.

Yu. A. Bychkov, E. B. Solovyeva, S. V. Scherbakov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

FUNCTIONAL MODELING AND CALCULATION OF THE DYNAMICS OF CONTINUOUS AND DISCRETE NONLINEAR SYSTEMS

The construction of the mathematical models of nonlinear dynamical systems within the framework of the «black box» principle is considered, when the input-output mapping of an object with the application of multidimensional polynomials and neural networks is described. The functional models of nonlinear compensators for power amplifiers and the results of their comparative analysis are presented. An algorithm for the analytical calculation of the dynamics of nonlinear non-autonomous electrical circuits with lumped parameters is proposed. The conditions for obtaining the descriptions of the existing equations solutions for nonlinear non-autonomous dynamic circuits in a closed analytical form are determined. The specifics of the implementation and the required efficiency of the algorithm are determined by the application of generalized functions, the generalized Laplace transform, the Laurent series and the Taylor series. The algorithm is illustrated with an example of the analytical calculation of the nonlinear electrical circuit dynamics.

Nonlinear model, dynamic system, analytical-numerical method, neural network, nonlinear compensator

УДК 621.314

А. Г. Лавров, Е. Н. Попов, А. С. Шляпников
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ способов регулирования напряжения автотрансформаторов

Проводится анализ способов регулирования напряжения трехобмоточного понижающего автотрансформатора с устройством регулирования под нагрузкой, размещенным на стороне обмотки высшего напряжения, в нейтрали, в линии и в рассечке обмотки среднего напряжения автотрансформатора. Подробно рассмотрены способы регулирования в линии и в рассечке обмотки среднего напряжения как наиболее широко применяемые. Проведен анализ режимов регулирования напряжения автотрансформатора при постоянном и переменном магнитном потоке. Для указанных способов регулирования напряжения автотрансформатора предложена методика выбора необходимого регулировочного ответвления автотрансформатора, учитывающая влияние изменения величины магнитного потока на процесс регулирования с помощью коэффициента магнитного потока. Показана необходимость учета изменения величины магнитного потока в методиках выбора регулировочного ответвления при режиме регулирования с переменным магнитным потоком.

Трехобмоточный автотрансформатор, регулирование под нагрузкой, регулирование в рассечке, регулирование в линии, режимы регулирования, методика расчета, магнитный поток

Для наиболее экономичной и безаварийной работы потребителя необходимо, чтобы отклонение фактической величины напряжения, при ко-

тором он получает электроэнергию, от номинального значения не превышало установленной ГОСТ Р 32144–2013 допустимой величины.

Так как колебания напряжения принципиально неизбежны ввиду изменения режимов работы сетей и потребителей, для обеспечения необходимых уровней напряжения требуется его регулирование.

На данный момент наиболее распространенным средством регулирования напряжения в распределительных сетях, в узлах которых применяются силовые понижающие автотрансформаторы (АТ), являются устройства регулирования под нагрузкой (РПН).

В АТ выделяют последовательную и общую (параллельную) обмотки с числом витков w_{Π} и w_o соответственно (рис. 1). Сторона высшего напряжения (ВН) состоит из последовательной и общей обмоток, включенных последовательно, а стороной среднего напряжения (СН) служит общая обмотка, которая является частью обмотки ВН. На рис. 1: $w_{ВН}$ – число витков обмотки ВН; $w_{СН}$ – число витков обмотки СН; $w_{НН}$ – число витков обмотки НН; $U_{НН}$, $U_{СН}$, $U_{ВН}$ – соответственно низшее, среднее и высшее напряжения.

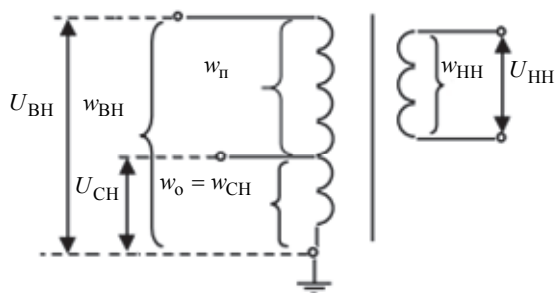


Рис. 1

Коэффициенты трансформации автотрансформатора

$$k_{\text{АТ(ВН-СН)}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{СН}}} = \frac{w_{\Pi} + w_o}{w_o}; \quad k_{\text{АТ(ВН-НН)}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}};$$

$$k_{\text{АТ(СН-НН)}} = \frac{w_{\text{СН}}}{w_{\text{НН}}}.$$

Автотрансформаторы могут иметь устройство регулирования напряжения под нагрузкой в нейтрали (рис. 2, а), со стороны среднего напряжения (рис. 2, в, г) либо со стороны высшего напряжения (рис. 2, б). Регулирование целесообразно осуществлять в той обмотке, напряжение которой необходимо поддерживать неизменным при изменяющихся условиях работы АТ. Это следует учитывать при выборе схемы с помощью регулирования на стороне ВН или СН [1].

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – вывод ВН; 2 – вывод СН; 3 – нейтраль; 4 – регулировочная обмотка; 5 – переключающее устройство.

В соответствии с ГОСТ 17544–85 [2] силовые автотрансформаторы с устройством регулирования на стороне ВН и в нейтрали выпускаются в ограниченной номенклатуре и поэтому не имеют широкого применения. Следовательно, представляется целесообразным рассматривать только понижающие трехобмоточные автотрансформаторы с устройством регулирования на стороне СН. В этом случае устройство РПН может быть размещено в линии со стороны обмотки СН (рис. 2, в) или в ее расщепке (рис. 2, г).

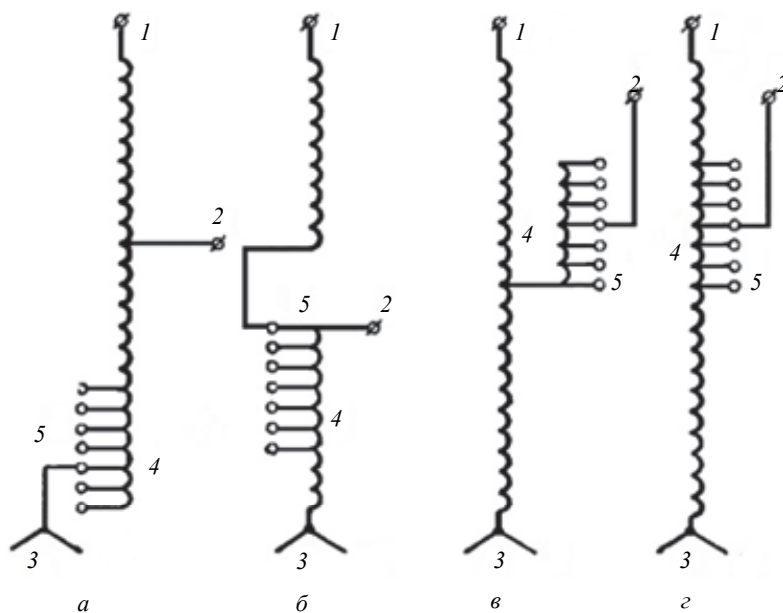


Рис. 2

Информация, имеющаяся на данный момент в научно-технической литературе [1], [3]–[8] и посвященная указанным способам регулирования напряжения, представлена в неполном объеме или не отражает реальный физический смысл процессов регулирования напряжения. Общий недостаток указанных работ – это неучет режимов регулирования, т. е. осуществляется ли регулирование с изменяющимся по значению основным магнитным потоком в сердечники автотрансформатора или в процессе регулирования магнитный поток остается неизменным. На существование таких режимов регулирования указано в [9], а необходимость их учета при анализе процессов регулирования подробно рассмотрена в [10], [11].

Режиму регулирования при постоянном по значению магнитном потоке применительно к понижающему АТ с регулированием напряжения на стороне СН соответствуют следующие условия:

- питающее напряжение, подводимое к зажимам обмотки стороны ВН, остается неизменным в процессе регулирования;

- изменение величины $w_{\text{СН}}$ не вносит изменение в величину $w_{\text{ВН}}$, тем самым не изменяя магнитный поток, который однозначно определяется питающим напряжением $U_{\text{С}} = U_{\text{ВН}}$ и $w_{\text{ВН}}$, и направлено на поддержание требуемого уровня напряжения на зажимах обмотки СН вследствие изменения тока нагрузки.

Режиму регулирования при переменном магнитном потоке соответствуют следующие условия:

- питающее напряжение, подводимое к зажимам обмотки стороны ВН, изменяется относительно номинального значения, приводя к изменению магнитного потока в магнитопроводе;

- изменение $w_{\text{СН}}$ не вносит изменение в $w_{\text{ВН}}$, тем самым не влияет на магнитный поток и направлено на поддержание требуемого уровня напряжения у потребителей.

Схема трехобмоточного АТ с устройством РПН в линии со стороны обмотки СН показана на рис. 3.

Регулировочная обмотка в данном случае подключена к выводам обмотки СН последовательно с нагрузкой и расположена на сердечнике АТ, т. е. витки регулировочной обмотки пронизывает основной магнитный поток автотрансформатора Φ_m .

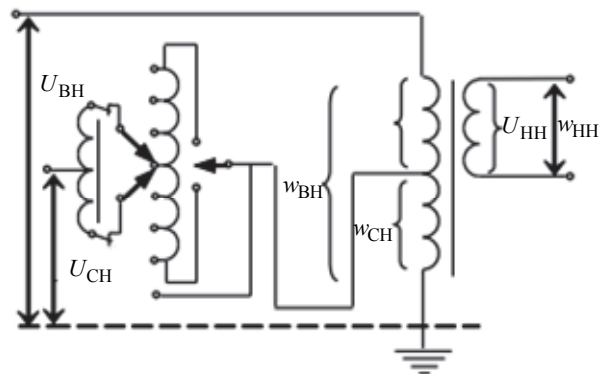


Рис. 3

При изменении положения переключающего устройства в линию СН вводится дополнительное число витков регулировочной обмотки, тем самым вводится добавочное напряжение $\Delta U_{\text{д}}$:

$$\Delta U_{\text{д}} = E_{\text{рег}} - I_{\text{нагр}} Z_{\text{рег}},$$

где $E_{\text{рег}} = 4.44 f_1 w_{\text{рег}} \Phi_m$ – ЭДС самоиндукции регулировочной обмотки ($w_{\text{рег}} = n \Delta w_{\text{рег}}$ – число витков регулировочной обмотки (n – номер отвления регулировочной обмотки; $\Delta w_{\text{рег}}$ – ступень (шаг) регулирования числа витков); Φ_m – основной магнитный поток АТ); $Z_{\text{рег}}$ – полное комплексное сопротивление регулировочной обмотки.

Регулировочная обмотка может быть включена встречно или согласно с обмоткой СН, что соответствует отрицательной и положительной добавкам напряжения $\pm \Delta U_{\text{д}}$ в линию СН.

Стоит отметить, что в данном случае коэффициент трансформации АТ не будет меняться, поскольку не изменится число витков $w_{\text{ВН}}$ и $w_{\text{СН}}$.

1. Рассмотрим режим работы АТ, когда обмотка ВН подключена к питающей сети с изменяющимся по уровню напряжением $U_{\text{С}}$ и, следовательно, напряжение на ней $U_{\text{ВН}}$ в любой момент времени однозначно определяется режимом напряжения сети, т. е. $U_{\text{ВН}} = U_{\text{С}}$. Обмотки СН и НН служат источниками питания потребителей с постоянным графиком нагрузки. Из этого следует, что в данном режиме напряжение на обмотках СН и НН не изменяется под влиянием потребителей.

При изменении питающего напряжения обмотки ВН на какую либо величину $\Delta U_{\text{ВН}}$, изменится результирующий магнитный поток Φ_m , что приве-

дет к изменению величин $E_{CH}(U_{CH})$ и $E_{HH}(U_{HH})$ и, как следствие, к изменению напряжения на шинах потребителя.

Для поддержания требуемого ГОСТ Р 32144–2013 [12] уровня напряжения обмотки СН необходимо изменять число витков регулировочной обмотки, тем самым вводя в линию СН добавочное напряжение ΔU_d .

После завершения процесса регулирования автотрансформатор будет работать с отличным от номинального значения магнитным потоком.

Изменение значения магнитного потока приводит к изменению намагничивающего тока, электрических и магнитных потерь, степени насыщения магнитной системы, температурного режима работы, электродинамических сил, действующих на обмотки. Это отрицательно отражается на технико-экономических показателях АТ, а в ряде случаев, по всей видимости, может привести к тяжелым или даже аварийным условиям работы. Несмотря на указанные факты на настоящее время в научно-технической литературе отсутствуют работы, посвященные данному вопросу. Представляется необходимым проведение научно-технического анализа процессов, сопровождающих данный режим регулирования напряжения автотрансформатора, оценки его влияния на основные технико-экономические показатели АТ, определения областей его возможного применения.

Рассмотрим методику определения (выбора) необходимого ответвления регулировочной обмотки установленной в линии СН, при подключении к которому изменения напряжения обмотки СН, вызванные изменением напряжения питающей сети, были бы скомпенсированы.

В настоящее время в научно-технической литературе [1], [3], [7] представлены методики расчета необходимого регулировочного ответвления, в которых добавка напряжения ΔU_d определяется как напряжение между основным и выбранным ответвлениями, рассчитанное при номинальном магнитном потоке в сердечнике АТ. Однако в случае изменения уровня питающего напряжения произойдет изменение магнитного потока в сердечнике, что приведет к изменению напряжения ступени регулирования. Неучет изменения магнитного потока в указанных методиках приводит к ошибочному выбору номера необходимого регулировочного ответвления.

В соответствии с предложенной в [10], [11] методикой определения необходимого регулировочного ответвления обмотки трансформатора авторами предлагается уточненная методика выбора необходимого ответвления регулировочной обмотки АТ:

– определяем относительное изменение напряжения обмотки СН в процентах, а следовательно, и добавку напряжения, компенсирующую отклонение напряжения обмотки СН [%]: $\Delta U_d =$

$$= \Delta U_{CH} = \frac{U_{CH} - U_{CH\text{ж}}}{U_{CH\text{ж}}} 100, \text{ где } U_{CH\text{ж}} - \text{жела-}$$

емое напряжение на обмотке СН, которое в различных режимах может отличаться от номинального;

– вычисляем, какое количество регулировочных ступеней необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжения до номинального, по формуле $n = \frac{\mp \Delta U_{CH}}{\Delta w_{\text{рег}}} =$

$$= \frac{\mp \Delta U_d}{\Delta w_{\text{рег}}} \text{ и округляем до ближайшего целого, где}$$

$\Delta w_{\text{рег}}$ – ступень (шаг) регулирования числа витков регулировочной обмотки, %;

– определяем действительное напряжение обмотки СН после завершения процесса регулирования с учетом того, что $\frac{n \Delta w_{\text{рег}}}{100} = \frac{w_{\text{рег}}}{w_{CH}}$;

$$\begin{aligned} U_{CH\text{д}} &= U_{CH} \pm \Delta U_d = 4.44 f_1 w_{CH} \Phi_m \pm \\ &\pm 4.44 f_1 w_{\text{рег}} \Phi_m = 4.44 f_1 \Phi_m (w_{CH} \pm w_{\text{рег}}) = \\ &= 4.44 f_1 \Phi_m \left(w_{CH} \pm w_{CH} \frac{n \Delta w_{\text{рег}}}{100} \right) = \\ &= 4.44 f_1 w_{CH} \Phi_m \left(1 \pm \frac{n \Delta w_{\text{рег}}}{100} \right) = \\ &= U_{CH} \left(1 \pm \frac{n \Delta w_{\text{рег}}}{100} \right); \end{aligned}$$

– чтобы учесть изменение магнитного потока АТ при изменении напряжения питающей сети, вводится коэффициент

$$\begin{aligned} k_{AT\phi} &= 1 \pm \frac{\Delta \Phi_m}{100} = 1 \pm \frac{\Delta E_{BH}}{100}, \\ U_{CH\text{д}} &= U_{CH} \left(1 \pm \frac{n \Delta w_{\text{рег}}}{100} k_{AT\phi} \right). \end{aligned}$$

Расчеты значений напряжения обмотки СН автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110 с РПН $\pm 9.1.78\%$ в режиме регулирования при переменном магнитном потоке, полученные по существующим методикам и методике, предложенной авторами, показали, что значение ошибки составляет $\Delta U = 2.04\%$ и превышает значение ступени регулирования регулировочной обмотки.

2. Рассмотрим другой возможный режим работы АТ. На обмотку ВН автотрансформатора подается неизменное по уровню напряжение, а к обмотке СН подключены потребители с переменным графиком нагрузки. В этом случае напряжение в линии СН необходимо регулировать с целью обеспечения потребителей электроэнергией с напряжением, удовлетворяющим нормативным документам.

Физический смысл данного режима регулирования заключается в том, что, изменяя число витков регулировочной обмотки, вводят добавку напряжения, компенсирующую отклонение напряжения обмотки СН U_{CH} , вызванное изменением тока нагрузки, для сохранения постоянства напряжения у потребителя $U_{потр}$.

Так как в данном режиме регулирования число витков обмоток ВН и СН АТ остается без изменений и с учетом постоянства напряжения обмотки ВН, регулирование осуществляется без изменения магнитного потока. Следовательно, при расчете процесса регулирования по предложенной ранее методике необходимо коэффициент, учитывающий изменение магнитного потока, принять равным единице, т. е. $k_{AT\phi} = 1 \pm \Delta\Phi_m/100 = 1$.

Схема трехобмоточного АТ с устройством РПН в расщепке обмотки показана на рис. 4. При

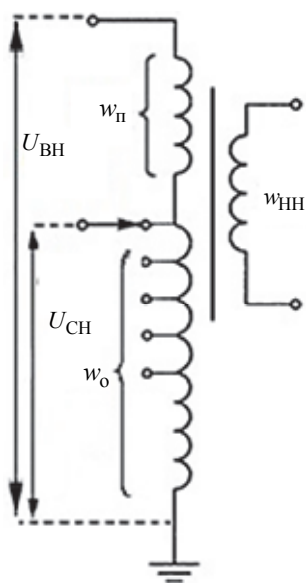


Рис. 4

таким способе установки РПН ответвления выполняются непосредственно на обмотках АТ без введения дополнительной регулировочной обмотки, как в случае установки РПН в линию со стороны СН [3].

Из рис. 4 и по выражению коэффициента трансформации для понижающего АТ

$$k_{AT(VH-CH)} = \frac{w_{BH}}{w_{CH}} = \frac{w_{II} + w_0}{w_0}$$

видно, что при переключении регулировочного ответвления будут изменяться числа витков w_{II} и w_0 . Причем, так как ответвления располагаются непосредственно на обмотках, то на какое число витков увеличится/уменьшится w_{II} , на такое же число витков уменьшится/увеличится w_0 .

Из вышесказанного следует, что при данном способе регулирования напряжения будет происходить изменение коэффициента трансформации $k_{AT(VH-CH)}^{(n)}$ за счет изменения чисел витков обмотки СН ($w_{CH} = w_0$), при этом сумма чисел витков обмотки ВН ($w_{BH} = w_{II} + w_0$) будет неизменной. Следовательно, магнитный поток АТ в процессе регулирования будет зависеть только от величины питающего напряжения U_C . Если указанное напряжение не изменяется, то процесс регулирования не будет влиять на уровень магнитного потока. В противном случае, после завершения процесса регулирования АТ будет работать с параметрами, отличными от номинальных.

Коэффициент трансформации $k_{AT(VH-CH)}^{(n)}$ при регулировании напряжения АТ с помощью РПН, установленного в расщепке

$$k_{AT(VH-CH)}^{(n)} = \frac{(w_{II} \pm n\Delta w_{OTB}) + (w_0 \mp n\Delta w_{OTB})}{w_0 \mp n\Delta w_{OTB}} = \frac{w_{II} + w_0}{w_0 \mp n\Delta w_{OTB}} = \frac{w_{BH}}{w_{CH} \mp n\Delta w_{OTB}},$$

где $n\Delta w_{OTB}$ – число перераспределяющихся витков последовательной/общей обмотки.

В имеющейся на сегодняшний день научнотехнической литературе отсутствуют какие-либо методики выбора необходимого регулировочного ответвления для схемы регулирования напряжения АТ с помощью устройства РПН установленного в расщепке.

Предложенная ранее методика определения необходимого ответвления регулировочной обмотки АТ, установленной в линии на стороне СН, может использоваться после незначительной корректировки

ки и для расчета процесса регулирования с постоянным по значению магнитным потоком, с помощью РПН установленного в расщелке обмотки АТ:

– определяем относительное изменение напряжения обмотки СН [%]: $\Delta U_{\text{СН}} = \frac{U_{\text{СН}} - U_{\text{СН ж}}}{U_{\text{СН ж}}} 100$, где $U_{\text{СН ж}}$ – желаемое

напряжение на обмотке СН, которое в различных режимах может отличаться от номинального;

– вычисляем, какое количество регулировочных ступеней необходимо включить (+) или выключить (–) для восстановления напряжения до желаемой величины, по формуле: $n = \frac{\mp \Delta U_{\text{СН}}}{\Delta w_{\text{отв}}}$ и

округляем до ближайшего целого, где $\Delta w_{\text{отв}}$ – ступень (шаг) регулирования числа витков устройства РПН, %.

– определяем действительное напряжение обмотки СН после завершения процесса регулирования: $U_{\text{СН д}} = U_{\text{СН}} \left(1 \pm n \frac{\Delta w_{\text{отв}}}{100} \right)$.

В случае изменяющихся питающего напряжения и магнитного потока для расчета процесса регулирования необходимо введение коэффициента $k_{\text{АТ ф}}$ аналогично рассмотренной ранее методике.

Анализ способов регулирования напряжения АТ показывает:

1. При регулировании напряжения обмотки СН возможны два режима регулирования – в зависимости от причины, которая вызывает отклонение напряжения.

2. Если причина отклонения напряжения – изменение напряжения питающей сети, то регулирование осуществляется при переменном по значению магнитном потоке, что необходимо учитывать при расчете процессов регулирования. После завершения процесса регулирования АТ продолжает работать в неблагоприятном режиме,

что может привести к аварийным ситуациям и к выходу его из строя.

3. Если напряжение СН АТ изменяется под действием нагрузки, то регулирование осуществляется при постоянном магнитном потоке и параметры работы АТ после его завершения остаются без изменения.

4. Введение необходимого числа витков регулировочной обмотки в линию приводит к появлению дополнительных потерь, обусловленных активным и индуктивным сопротивлениями регулировочной обмотки, что снижает коэффициент полезного действия АТ.

5. Указанного в п. 4 недостатка лишен способ регулирования напряжения обмотки СН с помощью устройства РПН, установленного в расщелке АТ. Однако при данном способе регулирования напряжения отсутствует возможность реверсирования регулировочных витков обмотки, что уменьшает диапазон регулирования по сравнению со схемой установки регулировочной обмотки в линию со стороны СН.

6. Рассмотренные схемы регулирования напряжения обеспечивают регулирование только напряжения обмотки СН и не влияют на коэффициент трансформации между обмотками высшего и низшего напряжений АТ. Следовательно, такие схемы регулирования удобны для применения в понижающих АТ, так как в данном случае процесс регулирования не вызовет изменений как результирующего магнитного потока в магнитопроводе АТ, так и напряжения на обмотке НН, а будет определяться только напряжением питающей сети.

7. Анализ существующих в научно-технической литературе методик расчета процессов регулирования показал, что они не учитывают режим регулирования и корректны только в случае регулирования напряжения с постоянным магнитным потоком. Авторами предложена универсальная методика, позволяющая рассчитывать регулировочные процессы при любом режиме регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Электрические системы и сети. Проектирование: учеб. пособие для вузов. Минск: Высш. шк., 1988. 308 с.
2. ГОСТ 17544–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия. М.: Министерство электротехнической промышленности СССР, 1985.
3. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. 4-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2014. 648 с.
4. Ананичева С. С., Алексеев А. А., Мызин А. Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения

- и частоты в энергосистемах: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. 93 с.
5. Александров Г. Н. Силовые трансформаторы: справ. кн. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
6. Бики М. А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров: учеб. пособие. М.: Знак, 2013. 612 с.
7. Электропитающие системы и электрические сети: комплекс учебно-методических материалов / сост. Е. И. Татаров; НГТУ. Нижний Новгород, 2013. 117 с.

8. Костин В. Н., Распопов Е. В., Родченко Е. А. Передача и распределение электроэнергии: учеб. пособие / СЗТУ. СПб., 2003.

9. ГОСТ 30830–2002. Трансформаторы силовые. Ч. 1: Общие положения. М.: Ц СВЭП, 2002.

10. Лавров А. Г., Попов Е. Н. Анализ режимов регулирования вторичного напряжения трансформаторов с устройствами РПН // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 5. С. 53–58.

11. Лавров А. Г., Попов Е. Н. Анализ процессов регулирования вторичного напряжения силовых трансформаторов // II Междунар. науч. конф. по пробл. управления в техн. системах (ПУТС-2017). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 396–397.

12. ГОСТ Р 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

A. G. Lavrov, E. N. Popov, A. S. Shlyapnikov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ANALYSIS OF METHODS FOR REGULATING THE AUTOTRANSFORMER VOLTAGE

Presents the analysis of methods for regulating the voltage of a three-winding step-down autotransformer with a load regulation device located on the side of the high-voltage winding, in the neutral, in the line and in the medium voltage winding of the autotransformer. The methods of regulating in the line and in the cross-section of the medium voltage winding, as the most widely used, are considered in detail. The analysis of the autotransformer voltage regulation modes under constant and variable magnetic flux is carried out. For these methods of autotransformer voltage regulation, a technique is proposed for selecting the necessary regulating branch of the autotransformer, taking into account the effect of the change in the magnitude of the magnetic flux on the control process by means of the magnetic flux coefficient. The necessity of taking into account the change in the magnitude of the magnetic flux in the methods of selecting the control branch at the regulating mode with a variable magnetic flux in the methods of regulation in the cut and the winding line of the average voltage of the autotransformer.

Three-winding autotransformer, regulation on load, shear regulation, line regulation, regulating modes, the method of calculation, magnetic flux

УДК 621.313

М. А. Ваганов, И. А. Бабская

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

Синхронный явнополюсный генератор при учете активного сопротивления обмотки статора

Рассматривается математическая модель синхронного явнополюсного генератора, составленная при учете активного сопротивления обмотки статора и позволяющая выявить ряд особенностей подобных генераторов в общем случае, безотносительно к их мощности и скорости вращения. Для удобства анализа вводятся в рассмотрение относительные значения синхронных индуктивных сопротивлений обмотки статора по продольной и поперечной осям, а также безразмерные функции, характеризующие потребляемую и электромагнитную мощности и электромагнитный момент синхронного явнополюсного генератора. Учет активного сопротивления обмотки статора имеет своим следствием появление дополнительных составляющих в активной и электромагнитной мощностях синхронного явнополюсного генератора, так что электромагнитная мощность рассматриваемого генератора содержит шесть составляющих вместо двух, причем кроме гармонических еще и постоянные составляющие, не зависящие от углового положения ротора относительно вращающегося магнитного поля обмотки статора. Повышение мощности генератора сопровождается быстрым снижением амплитудных значений этих составляющих.

Предлагаемая модель дает возможность оценивать технико-экономические показатели качества генератора в общем виде безотносительно к его мощности. Рассматривается влияние отношения синхронных индуктивных сопротивлений обмотки статора по поперечной и продольной осям, а также влияние коэффициента возбуждения на угловые характеристики синхронного явнополюсного генератора.

Относительный параметр, коэффициент возбуждения, функции тока, функции угла нагрузки, функции активной и электромагнитной мощностей, перегрузочная способность, угловая характеристика, дополнительные составляющие активной и электромагнитной мощностей

В синхронных машинах независимо от их мощности и типа ротора при исследовании уста-

новившихся режимов их работы в большинстве случаев активное сопротивление обмотки статора