

УДК 621.313.32

А.М. Ларин /к.т.н./, И.И. Ларина /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДМАГНИЧИВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На основании экспериментальных исследований разработаны рекомендации по величине предварительного подмагничивания магнитопровода турбогенераторов, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижных электрических машин, предусмотренных действующим в странах СНГ отраслевым стандартом по методам экспериментального определения электромагнитных параметров синхронных генераторов.

Ключевые слова: электромагнитные параметры, турбогенератор, подмагничивание, магнитная проницаемость, магнитопровод.

Постановка проблемы

В настоящее время для определения совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов широкое распространение получил метод затухания постоянного тока, основанный на использовании осциллограмм переходных функций тока при ступенчатом толчке постоянного напряжения в цепи обмотки статора неподвижной машины. Методика проведения опытов и обработки результатов при определении параметров с учетом многоконтурности ротора регламентирована пунктом 25.1.4 отраслевого стандарта, действующего в странах СНГ, ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний» [1].

Для определения электромагнитных параметров, соответствующих одному и тому же уровню насыщения, испытания необходимо проводить либо при очень малых (не превышающих $0,005I_{ном}$) начальных значениях постоянного тока ($i_{нач}$), когда процесс перемагничивания стали при затухании тока лежит в области обратимой магнитной проницаемости, либо при больших значениях $i_{нач}$, но с осуществлением предварительного подмагничивания магнитопровода испытуемой машины постоянным током. Магнитная проницаемость массивной стали ротора при таких условиях во время переходного процесса в короткозамкнутом контуре может быть принята постоянной.

В первом случае при проведении опытов с малыми значениями изменяющегося тока следует учитывать влияние остаточного намагничивания сердечника. Однако если уровень остаточной магнитной индукции неизвестен, то для ис-

ключения влияния указанного фактора необходимо осуществлять размагничивание магнитной системы синхронной машины. При этом полученные электромагнитные параметры будут соответствовать величине магнитной проницаемости μ , близкой к ее значению в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора.

При осуществлении предварительного подмагничивания токами различной величины в опытах принципиально возможно получение частотных характеристик для магнитного состояния ферромагнитного материала, соответствующего различной степени насыщения. Полученные при этом электромагнитные параметры, соответствующие ненасыщенному состоянию магнитопровода машины, определяют величину постоянного тока, создающего намагничивающую силу предварительного подмагничивания, исходя из условия вывода магнитного состояния стали на спадающую ветвь, близкую к основной (предельной) петле гистерезиса. Очевидно, что величина этого тока зависит от конструкции магнитопровода машины и ферромагнитных свойств применяемых электротехнических материалов.

Рекомендованное существующей методикой проведения экспериментов значение тока подмагничивания, превышающее в 10-50 раз начальный ток затухания, не является в достаточной степени экспериментально проверенным. Особенно это относится к турбогенераторам, имеющим массивный ротор.

Таким образом, уточнение и обоснование требуемого уровня предварительного подмагни-

чивания при определении ненасыщенных значений электромагнитных параметров турбогенераторов в форме частотных характеристик является важной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Раздел отраслевого стандарта ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний» [1], предусматривающий экспериментальное определение электромагнитных параметров синхронных машин с учетом многоконтурности ротора (п. 25.1.4), был введен во второй половине 70-х годов прошлого столетия. В начале 80-х годов он был также включен в международный стандарт [2]. Этому способствовали исследования, проводимые в НИИ электромашиностроения (г. Санкт-Петербург) [3,4], Донецком политехническом институте (ныне ДонНТУ) [5], а также в других организациях и за рубежом [6].

При этом вопросы оценки магнитного состояния магнитопровода электрической машины рассматривались в основном путем теоретического анализа. Полученные при этом рекомендации экспериментально не подтверждались. Это связано с тем, что в то время для регистрации переходных функций использовались осциллографические гальванометры, позволяющие осуществлять измерения с относительно большими погрешностями. Кроме того, расчеты электромагнитных параметров и частотных характеристик осуществлялись на основе ручной обработки опытных данных.

В [7] были проведены исследования по оценке величины предварительного подмагничивания с использованием более точных способов регистрации и обработки переходных функций. Однако при этом анализировалось влияние исходного уровня магнитной проницаемости только на синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ротора явнополюсного синхронного генератора небольшой мощности типа СГ-15,75, не имеющего массивных элементов на роторе. Впоследствии полученные результаты были обобщены в [8,9].

Получившие в последнее время широкое внедрение в практику исследований современные цифровые средства измерений, а также применяемые высокоточные компьютерные технологии позволяют на основании экспериментальных исследований сформулировать уточненные требования к осуществлению процедуры предварительного подмагничивания, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является разработка практических рекомендаций, направленных на уточнение п. 25.1.4 отраслевого стандарта ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний».

Для достижения поставленной цели необходимо произвести оценку исходного магнитного состояния синхронного генератора, определяемого предварительным подмагничиванием магнитопровода электрической машины по пути основного магнитного потока, на совокупность электромагнитных параметров, представленных в форме частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора.

Основной материал исследования

С целью разработки рекомендаций по величине предварительного подмагничивания, осуществляемого в опытах затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижного турбогенератора, была проведена серия опытов на четырехполюсном турбогенераторе мощностью 100 МВт типа Г-1500/118 ($S_{ном}=118$ МВА; $P_{ном}=100$ МВт; $U_{ном}=15,75$ кВ; $I_{ном}=4,32$ кА). Все опыты производились при начальном значении затухающего тока в контуре обмотки статора, равном 15 А, что не превышает 0,5 % от номинального.

Для исследования влияния величины остаточной магнитной индукции в широких пределах предварительное подмагничивание пути основного магнитного потока машины осуществлялось со стороны обмотки возбуждения током от резервного возбудителя. Значения тока оказались равными 0; 0,295; 0,557; 0,836 и 1,115 в долях тока возбуждения холостого хода $i_{\beta x}$. Для исключения влияния экранирующего эффекта обмотки возбуждения последняя, после осуществления процедуры монотонного намагничивания магнитопровода, размыкалась.

В момент закорачивания контактора в цепи обмотки статора переходная функция тока в виде падения напряжения на безындукционном шунте подавалась на вход интегрирующего устройства. Для исключения влияния остаточного тока от цепи источника питания в схеме предусматривалось размыкание цепи аккумуляторной батареи путем запираания тиристора. Синхронное индуктивное сопротивление определялось по показаниям вольтметра, включенного на выходе интегрирующего устройства, по выражению, полученному в [7,8]:

$$x_d = \frac{314r}{z_{ном} i_{нач} r_{и}} U_{инт}$$

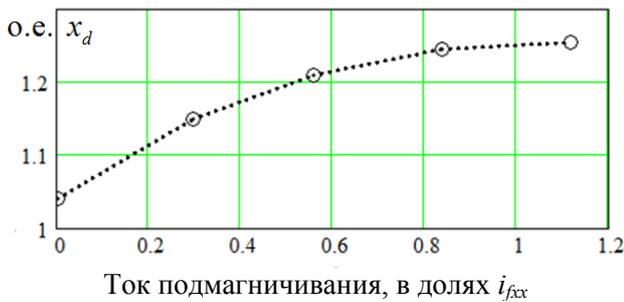


Рис. 1. Зависимость продольного индуктивного сопротивления турбогенератора Г-1500/118 от тока предварительного подмагничивания

где $i_{нач}$ – значение начального тока в контуре затухания, А; $z_{ном}$ – номинальное сопротивление обмотки статора генератора, Ом; r_u – сопротивление измерительного шунта, Ом; $U_{инт}$ – показания вольтметра, в конце переходного процесса, В.

Определение синхронных индуктивных сопротивлений осуществлялось как среднее арифметическое значение по данным трех опытов при каждом уровне подмагничивания. Разброс результатов измерений в каждом случае при этом не превышал 3 % от среднего значения.

Результаты определения синхронных индуктивных сопротивлений исследуемого турбогенератора в зависимости от величины тока предварительного подмагничивания приведены на рис. 1.

Как следует из анализа рис. 1, влияние предшествующего магнитного состояния проявляется в увеличении значения сопротивления. Характер кривой изменения синхронного индуктивного сопротивления в зависимости от тока предварительного подмагничивания указывает на асимптотический рост значений сопротивлений от величины, равной 1,04 о.е. в опыте, выполненном без предварительного подмагничивания, до 1.25 о.е. в опыте при токе подмагничивания, составляющем примерно 80 % от тока возбуждения холостого хода.

Приведенное значение индуктивного сопротивления, измеренное на неподвижной машине, близко к ненасыщенному значению, определяемому по характеристикам холостого хода и короткого замыкания ($x_{d ненас}=1,35$ о.е.). Полученное несовпадение, составляющее 7,4 %, может быть объяснено различием в учете дифференциального рассеяния обмотки статора при измерении синхронного индуктивного сопротивления на переменном и постоянном токе, а также погрешностью регистрирующей и измерительной аппаратуры при расчете значений x_d путем интегрирования переходной функции в опытах затухания постоянного тока.

Для исследования влияния степени предварительного подмагничивания на всю совокуп-

ность электромагнитных параметров турбогенератора, отображаемую в виде частотной характеристики проводимости со стороны обмотки статора $y_{sd}(js)$, в опытах регистрировались кривые затухающего тока.

Измерение переходных функций производилось с помощью цифрового регистратора «Рекон». В каждом опыте кривая затухания постоянного тока аппроксимировалась пятью экспоненциальными составляющими, исходя из условия минимизации суммы квадратов относительных погрешностей разложения экспериментальной кривой. Погрешность аппроксимации не превышала 3,8 %. Полученные при этом начальные значения и коэффициенты затухания экспоненты приведены в табл. 1.

Частотные характеристики $y_{sd}(js)$ определялись по соотношению, полученному в [8]:

$$y_{sd}(js) = \frac{js}{1 - r \sum_{k=1}^n \frac{i_k \alpha_k}{\alpha_k + js}}$$

где i_k , α_k – начальное значение и коэффициент затухания k -й экспоненциальной составляющей, аппроксимирующей кривую затухания, о.е.; r – омическое сопротивление контура затухания, о.е. ($r=0,0285$ о.е.).

Полученные частотные характеристики, соответствующие разомкнутому состоянию обмотки возбуждения генератора, показаны на рис. 2.

Как следует из рис. 2, осуществление предварительного подмагничивания в широких пределах привело к существенной деформации шкалы скольжений частотной характеристики. Особенно это проявляется для мнимых составляющих.

На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости соответственно мнимых и действительных составляющих частотных характеристик $y_{sd}(js)$ исследуемого турбогенератора Г-1500/118 в функции скольжения ротора.

В области значений скольжений от 0,03 до 1,0 о.е. увеличение тока предварительного подмагничивания приводит к увеличению мнимой составляющей характеристики. Наибольшее отличие в опытах, выполненных без предварительного подмагничивания и с подмагничиванием током $1,115i_{fx}$ при скольжении, равном 1,0 о.е., составляет 2,3 раза. При этом отличия указанных значений, полученных в опытах при подмагничивании токами от 0,557 до 1,115, отличаются от среднего значения не более чем на 5 %.

Табл. 1. Результаты аппроксимации переходных функций затухания постоянного тока в обмотке статора турбогенератора типа Г-1500/118

| Значение тока предварительного подмагничивания, в долях, i_{fxx} | Параметр экспоненты | Порядковый номер экспоненты | | | | |
|--|---------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 | i_k , д.е. | 0,0147 | 0,0432 | 0,3740 | 0,4690 | 0,0920 |
| | α_k , о.е. | 0,0010 | 0,0036 | 0,0462 | 0,1490 | 0,3090 |
| 0,295 | i_k , д.е. | 0,0119 | 0,0465 | 0,1320 | 0,5670 | 0,2390 |
| | α_k , о.е. | 0,0010 | 0,0025 | 0,0261 | 0,0812 | 0,2770 |
| 0,557 | i_k , д.е. | 0,0088 | 0,0777 | 0,2609 | 0,5093 | 0,1390 |
| | α_k , о.е. | 0,0010 | 0,0042 | 0,0223 | 0,1008 | 0,4220 |
| 0,836 | i_k , д.е. | 0,0155 | 0,0186 | 0,2222 | 0,4006 | 0,1710 |
| | α_k , о.е. | 0,0010 | 0,0090 | 0,0419 | 0,0990 | 0,3820 |
| 1,115 | i_k , д.е. | 0,0112 | 0,0890 | 0,2820 | 0,4678 | 0,1460 |
| | α_k , о.е. | 0,0010 | 0,0047 | 0,0258 | 0,1062 | 0,3980 |

При скольжениях менее 0,03 о.е. имеет место обратное соотношение для характеристик. В этой области их отличие снижается и составляет для скольжения 0,01 о.е. порядка 0,7.

Для действительных составляющих (рис. 4) и модульных значений тока отличия значительно меньше. Так, при скольжении 1,0 о.е. составляющая, полученная в опыте без подмагничивания и с подмагничиванием током $1.115i_{fxx}$, не превышает 0,96 и оказывается равной 0,58 при скольжении 0,01 о.е.

Представляет интерес оценка влияния исходного магнитного состояния магнитопровода турбогенератора на зависимости эквивалентных значений активного r_{D3} и индуктивного сопротивления рассеяния $x_{\sigma D3}$ массивных конструктивных элементов ротора в функции скольжения.

Указанные зависимости определялись по экспериментальным частотным характеристикам путем исключения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора ($x_{\sigma}=0,14$ о.е.) и сопротивления взаимоиндукции x_{ad} по соотношению:

$$z_{D3}(js) = x_{\sigma D3}(s) + \frac{r_{D3}}{js} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{y_{sd}(js)} - x_{\sigma}} - \frac{1}{x_{ad}}}, \quad (1)$$

где

$$x_{ad} = \frac{1}{y_{sd}(js)_{s=0}} - x_{\sigma}.$$

Анализ полученных по (1) результатов указывает на то, что характер изменения рассматриваемых активных и индуктивных сопротивлений рассеяния отражает физические процессы, имеющие место при различных величинах магнитной проницаемости. При увеличении остаточной

магнитной проницаемости за счет увеличения тока предварительного подмагничивания от 0 до $0,557i_{fxx}$ значения эквивалентных сопротивлений увеличиваются. Это и привело к существенной деформации шкалы скольжений частотных характеристик (см. рис. 1) в указанном диапазоне изменения тока предварительного подмагничивания. Наибольшее отличие характеристик, полученных в опыте без осуществления процедуры предварительного подмагничивания и при подмагничивании током $0,557i_{fxx}$, составляет 77 % для мнимой составляющей при скольжении 0,005 о.е. По действительной составляющей, отличие указанных характеристик достигает 55 % при скольжении 0,01 о.е. При этом же скольжении несовпадение характеристик, полученных в опытах с предварительным подмагничиванием токами $0,295i_{fxx}$ и $0,557i_{fxx}$, для вещественной составляющей составляет 43 %.

При осуществлении подмагничивания большими токами значение μ практически не изменяется. Это соответствует затуханию постоянного тока в опытах по спадающей ветви, весьма близкой к предельной петле гистерезиса. Вследствие этого соответствующие этим уровням предварительного намагничивания частотные характеристики $y_{sd}(js)$ практически совпали между собой (см. рис. 1).

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о том, что при определении ненасыщенных значений совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов опыты затухания постоянного тока должны производиться при осуществлении предварительного подмагничивания со стороны обмотки возбуждения током не менее $0,5i_{fxx}$.

Поскольку методика, регламентируемая действующим стандартом [1], предусматривает осуществление процедуры предварительного подмагничивания со стороны обмотки статора,

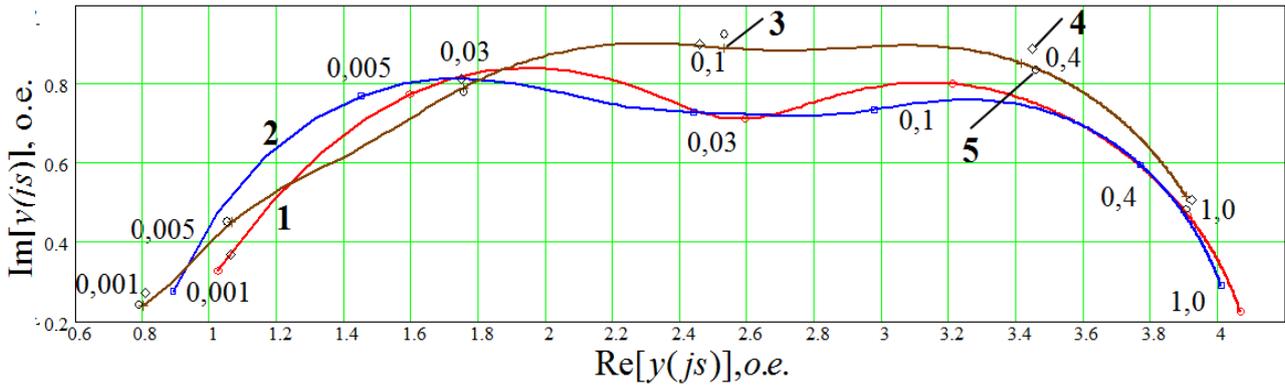


Рис. 2. Частотные характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118:
 1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{nod}=0,2$;
 2 – при $i_{nod}=0,295i_{fxx}$; 3 – при $i_{nod}=0,557i_{fxx}$; 4 – при $i_{nod}=0,836i_{fxx}$;
 5 – при $i_{nod}=1,115i_{fxx}$

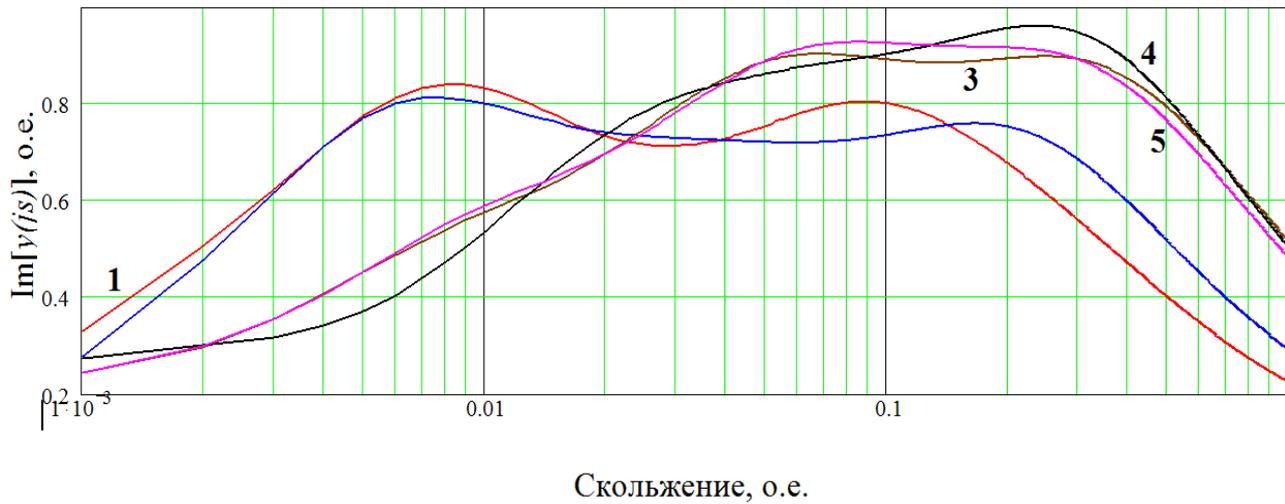


Рис. 3. Зависимость мнимой составляющей характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118 от скольжения ротора:
 1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{nod}=0$; 2 – при $i_{nod}=0,295i_{fxx}$;
 3 – при $i_{nod}=0,557i_{fxx}$; 4 – при $i_{nod}=0,836i_{fxx}$; 5 – при $i_{nod}=1,115i_{fxx}$

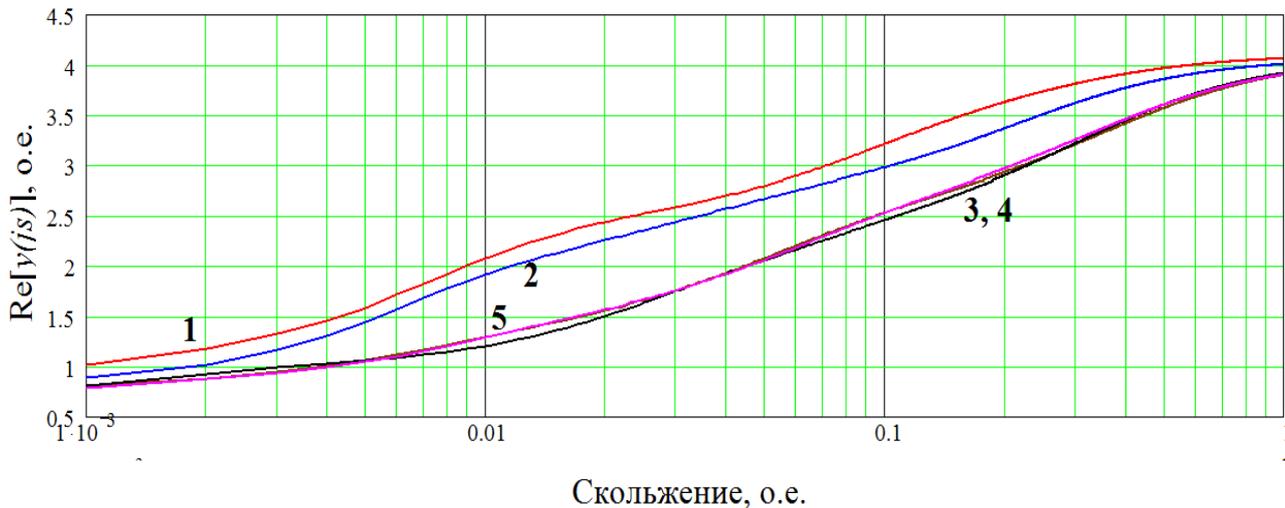


Рис. 4. Зависимость вещественной составляющей характеристики $y_{sd}(js)$ турбогенератора типа Г-1500/118 от скольжения ротора:
 1 – при токе предварительного подмагничивания $i_{nod}=0$; 2 – при $i_{nod}=0,295i_{fxx}$;
 3 – при $i_{nod}=0,557i_{fxx}$; 4 – при $i_{nod}=0,836i_{fxx}$; 5 – при $i_{nod}=1,115i_{fxx}$

то необходимая при этом величина тока подмагничивания может быть установлена на основании равнозначности поля первой гармонической в воздушном зазоре, создаваемого постоянным током в обмотке статора и возбуждения по известному соотношению:

$$i_{d0} = i_{f0} \frac{i_{s\bar{0}}}{i_{f\bar{0}}},$$

где $i_{s\bar{0}} = \sqrt{2}I_{ном}$ – базисный ток обмотки статора;
 $i_{f\bar{0}} = i_{fxx} \cdot x_{ad}$ – базисный ток обмотки возбуждения.
 Для исследуемого турбогенератора имеем:

$$i_{d0} = \frac{i_{f0}}{i_{fxx} \cdot x_{ad}} I_{ном} \sqrt{2} = \frac{i_{f^*(xx)}}{x_{ad}} I_{ном} \sqrt{2} = \\ = \frac{0,5}{1,12} \cdot 4320 \cdot \sqrt{2} \approx 2700, \text{ А.}$$

Полученное значение постоянного тока предварительного подмагничивания в обмотке статора (2700 А) превышает рекомендуемую существующей методикой ($50i_{нач} = 50 \times 15 = 750$ А) величину в 2,7 раза.

Выводы

С целью исключить влияние частных циклов гистерезиса, что необходимо для определения ненасыщенных значений совокупности электромагнитных параметров синхронных машин с массивным ротором, опыты затухания постоянного тока следует проводить при осуществлении процедуры предварительного подмагничивания током, создающим магнитный поток в машине не менее половины от потока, создаваемого в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора.

Рекомендовать текст абзаца пункта 25.1.4 ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний», описывающего осуществление процедуры предварительного подмагничивания: «...кратковременно подать в обмотку якоря ток намагничивания порядка $10-50i_{нач}$, но не более номинального», заменить следующим: «...кратковременно подать

в обмотку якоря ток намагничивания, создающий магнитный поток в машине не менее половины от потока в режиме холостого хода при номинальном напряжении на выводах обмотки статора, но не более номинального».

Список литературы

- ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 77 с.
- International Electrotechnical Commission (IEC) Standard. Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for determining synchronous machines quantities from tests. Publication 34-4. Geneva, 1985. – 175 p.
- Казовский, Е. Я. Анализ погрешностей определения частотных характеристик синхронных машин методом затухания постоянного тока / Е.Я. Казовский, А.М. Волков, А.В. Сидельников // Электротехника. – 1967. – №9. – С. 46-51.
- Сидельников, А. В. Анализ переходных процессов электрических машин с массивными ферромагнитными участками в магнитопроводе / А.В. Сидельников // Электротехника. – 1966. – №7. – С. 53-57.
- Рогозин, Г. Г. Определение частотных характеристик крупных турбогенераторов // Г.Г. Рогозин, В.Я. Горин // Электрические станции. – 1971. – №2. – С. 64-69.
- Canay, M. Gleichstrommessungen zur Bestimmung der charakteristischen Grossen von Synchronmaschinen / M. Canay // Bull. ASE. – 1965. – V.56. – No.21. – S. 43-47.
- Рогозин, Г. Г. Определение при неподвижном роторе индуктивных сопротивлений схемы замещения установившегося режима синхронной машины / Г.Г. Рогозин, Н.С. Лапшина // Электротехника. – 1976. – №6. – С. 15-18.
- Рогозин, Г. Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы / Г.Г. Рогозин // Киев: Техника. – 1992. – 168 с.
- Rogozin, G. G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines / G.G. Rogozin // Revu general de l'electricite. – 1993. – No.9. – P. 8-16.

A.M. Larin /Cand. Sci. (Eng.), I.I. Larina /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

JUSTIFICATION OF THE APPROPRIATE MAGNETIC PRE-BIASING LEVEL IN DETERMINING THE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF TURBOGENERATORS USING THE METHOD OF DC DAMPING

Background. Currently, the definition of electromagnetic parameters of turbogenerators considering the massive multichannel rotor regulated by paragraph 25.1.4 industry standard 10169-77 “Electrical three-

phase synchronous machines. Test methods". The methodology of experiments and results processing provides for the procedure of preliminary biasing of the magnetic core. Herewith, the value of the biasing current exceeding the initial damping current by 10-50 times is not sufficiently experimentally verified.

Materials and/or methods. *To develop recommendations on the value of the preliminary biasing carried out in experiments of DC damping in the stator winding of a stationary synchronous machine, a series of experiments on an industrial turbogenerator with a capacity of 100 MW carried out. The study of the effect of the value of the residual magnetic induction in a wide range carried out by preliminary biasing of the path of the main magnetic flux of the machine from the excitation winding. The transition functions checked by modern digital recorders.*

Results. *The research allowed establishing that for the determination of unsaturated values of turbogenerator electromagnetic parameters the experiments of direct current damping should be carried out at preliminary biasing with the current 2,7 times exceeding GOST regulated value. Recommendations for changing the text of paragraph 25.1.4 GOST 10169-77 "Electrical three-phase synchronous machines. Test methods" describing the procedure of preliminary biasing formulated.*

Conclusion. *To eliminate the influence of individual hysteresis cycles in order to determine the unsaturated values of electromagnetic parameters of synchronous machines with a massive rotor, DC damping experiments should be carried out in the implementation of the procedure of pre-biasing by current which creates magnetic flux in the machine at least half of the flux in idle mode at rated voltage of the stator winding output.*

Keywords: *electromagnetic parameters, turbogenerator, biasing, magnetic permeability, magnetic core.*

Сведения об авторах

А.М. Ларин

SPIN-код: 2232-6194
 Author ID: 856532
 ORCID iD: 0000-0003-0832-0749
 Телефон: +380 (71) 320-15-24
 Эл. почта: lam@elf.donntu.org

И.И. Ларина

SPIN-код: 9924-8519
 Author ID: 856531
 ORCID iD: 0000-0003-4675-6690
 Телефон: +380 (71) 320-15-23
 Эл. почта: innacompany@yandex.ru

Статья поступила 13.03.2018 г.

© А.М. Ларин, И.И. Ларина, 2018

Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев

