

**В.И. МИЛЫХ**, д-р техн. наук, **Н.В. ПОЛЯКОВА**, ассистент (Харьков)

### ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Наведено принцип визначення індуктивних опорів обмоток електричних машин за допомогою чисельних розрахунків магнітного поля у їхньому поперечному перерізі. На цій підставі проведено порівнювальний аналіз індуктивних опорів розсіювання обмотки статора турбогенератора у одно- і трифазному її варіантах та у рамках різних уявлень про ці опори.

The method of determining the electrical machine winding inductive reactances is stated by means of the numerical computation of the magnetic field in their cross-section. On the basis of the comparative analysis of the turbogenerator stator winding inductive leakage reactances was carried out in its mono- and three-phase version and in the context of various concepts relating to these reactances.

**Введение.** При изучении, проектировании и исследовании электрических машин (ЭМ) важная роль отведена их индуктивным сопротивлениям (ИС) [1]. По классической теории в целостных структурах магнитных полей ЭМ условно выделяются: основной магнитный поток, связывающий обмотки статора и ротора, и поток рассеяния, связанный лишь с одной из них и еще подразделяемый на отдельные составляющие. Соответственно подразделяются и ИС обмоток, вызванные этими составляющими единого магнитного потока.

Традиционно в ЭМ априори задаются контуры для магнитных потоков основного и рассеяния и последние определяются отдельно методом магнитной цепи. Ввиду многообразия форм сердечников и обмоточных структур ЭМ в их теории индуктивных сопротивлениям посвящены значительные по объему разделы, а на практике приходится иметь дело с обширной разновидностью аналитических расчетных выражений. Их общим недостатком - относительно невысокая точность из-за несовершенства априорных моделей магнитного поля и ввиду весьма условного учета насыщения магнитопровода.

Развитие вычислительной техники и программных средств, в совокупности с численными методами расчета магнитного поля [2,3], позволяет всю теорию, касающуюся ИС ЭМ, и все множество расчетных соотношений для них свести всего лишь к нескольким общетеоретическим базовым выражениям и универсальным программным алгоритмам.

Следуя ранее поставленной глобальной цели [4], а именно - приспособление полевых методов расчета к определению все большего набора параметров и характеристик ЭМ, здесь целью работы поставили развитие универсальной методики определения ИС рассеяния ЭМ посредством численных расчетов магнитного поля. Сопутствующий этому расчетный анализ будем проводить на основе конструкции и данных турбогенератора (ТГ) мощно-

стью порядка (200..300) МВт, которые уже представлялись в работах [4,5]. Для этого объекта, как и вообще для синхронных машин, ИС имеют более значительную роль, чем для других типов ЭМ.

Структура магнитной системы ТГ проявлена на рис.1. Из его параметров укажем следующие: число пар полюсов  $p=1$ ; радиус ротора - 0,537 м; немагнитный зазор - 0,1 м; число витков на фазу обмотки статора  $w_s=10$ ; расчетная длина -  $l_a=5,29$  м; номинальные фазные напряжение  $U_{\phi N}=9093$  В и ток  $I_{SN}=8625$  А; частота  $f=50$  Гц; относительное укорочение обмотки статора  $\beta=4/5$ .

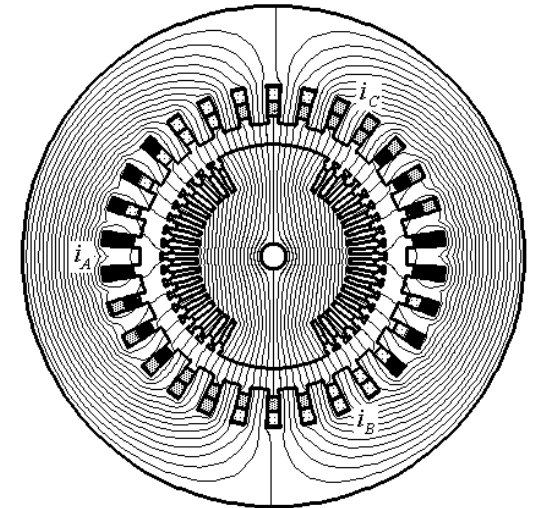


Рис. 1. Структура магнитной системы ТГ с картиной полного магнитного поля 3-х фаз обмотки статора

**1. Описание методики.** Расчетный анализ сосредоточим на ИС фазной обмотки статора ТГ. Это будет фаза А, которая располагается так, что ее ось намагничивания ориентирована по продольной оси ротора  $d$  (среди других фаз на рис.1 фаза А выделена наиболее темным цветом).

Чтобы получить ИС конкретной обмотки, необходимо рассчитать именно ее магнитное поле. Но так как фазная обмотка – это элемент общей трехфазной обмотки статора, то расчетный анализ проведем в сопоставлении вариантов: 1) фазная обмотка действует обособленно; 2) она же действует в составе симметричной трехфазной системы с фазными токами:

$$i_A = I_m \sin(\omega t); \quad i_B = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad i_C = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3), \quad (1)$$

где  $I_m$  - амплитуда токов;  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота.

Необходимо, чтобы рассматриваемая фаза А, для которой ищутся ИС, имела максимальное магнитное потокосцепление (МПС). Поэтому для (1) следует принять  $\omega t = \pi/2$ , и тогда получим мгновенные значения токов  $i_A = I_m$ ;  $i_B = -0,5 I_m$ ;  $i_C = -0,5 I_m$ , которые и следует задать при расчете магнитного поля (привязка токов к фазным зонам показана на рис.1). При расчете ИС обособленной фазы задается ток  $i_A = I_m$  только в ней.

Расчеты магнитного поля, являющегося базой для определения ИС, проводились в поперечном сечении ТГ методом конечных разностей (МКР) [2] в

той постановке, которая пояснялась в [4,5]. В таком случае результаты расчета распространяются только на прямолинейную часть обмотки в пределах активной длины машины  $l_a$ . Для лобовых частей обмотки пока можно применять приближенные традиционные подходы, либо решать задачу расчета трехмерного магнитного поля в торцевой зоне ЭМ.

Итак, понимая, что магнитное поле рассчитывается численно на ПЭВМ по однажды созданной универсальной программе, представим необходимый порядок действий на пути к получению ИС фазной обмотки статора ТГ.

Чтобы иметь ИС обмотки, соответствующие рабочему режиму, следует рассчитывать магнитное поле при наиболее вероятном для ТГ состоянии магнитопровода. Такое состояние можно установить предварительным расчетом магнитного поля в режиме холостого хода при токе возбуждения, обеспечивающем номинальное напряжение. В режиме нагрузки результирующий магнитный поток сохраняется практически таким же, поэтому расчеты магнитного поля обмотки статора будем проводить на фоне насыщения магнитопровода, которое оставим от режима холостого хода.

Результатом расчета магнитного поля является распределение аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП) в поперечном сечении ТГ по узлам расчетной сетки, соответствующей МКР:

$$A_{z,j,i} \quad j = 1,2,\dots, j_m; \quad i = 1,2,\dots, i_m, \quad (2)$$

где  $j, i$  - нумераторы радиальных и дуговых ее линий;  $j_m, i_m$  - их количества на всю область расчета (рис.1).

Ключом к вычислению ИС являются МПС фазной обмотки  $A$

$$\Psi_A = \frac{2w_s l_a}{S_A} \int_{S_A} A_z dS, \quad (3)$$

которое получается интегрированием по общей площади поперечного сечения  $S_A$  сторон ее секций (коэффициент 2 в данном случае означает оперирование только с одной фазной зоной на полюсном делении ТГ, так как по условиям симметрии поле обмотки статора может рассчитываться именно в его пределах, что уже обсуждалось в [4,5]).

При известном распределении ВМП (2) выражение (3) имеет достаточно простую численную реализацию

$$\Psi_{Ae} = \frac{2w_s l_a}{S_A} \sum_{j,i} A_{z,j,i,s} \Delta S_{j,i}, \quad (4)$$

где суммирование проводится по ячейкам сетки в сечениях указанных сторон секций;  $A_{z,j,i,s}$  - среднее значение ВМП в ячейке  $(i,j)$  с площадью  $\Delta S_{j,i}$ .

Если для (4) используется распределение ВМП, созданного самой фазной обмоткой  $A$ , то получается ее собственное МПС; если всеми фазными обмотками при соответствующих токах (1), то - результирующее МПС,

включающее в себя собственное и взаимные МПС. Соответственно по формуле

$$x = 2\pi f \Psi_A / I_m \quad (5)$$

получится собственное ИС фазной обмотки либо ее результирующее ИС с учетом собственного и взаимного потокоцеплений с остальными фазами.

**2. Анализ индуктивных сопротивлений.** Таким образом, в формулах (4-5) заключена вся теория вычисления ИС ЭМ (хотя в данном случае – без учета лобового рассеяния). Какие именно это сопротивления, зависит от расположения обмоток и условий формирования магнитного поля.

Конкретно, если магнитное поле рассчитано в полной области расчета (рис.1), то по (5) получится синхронное ИС  $x_c$  фазной обмотки.

Для получения какого-либо частного ИС [1] в области расчета достаточно на определенной линии  $\Gamma$  задать условие

$$A_{z\Gamma} = 0, \quad (6)$$

ограничивающее распространения магнитного поля.

Так, задав условие (6) на линии окружности в основаниях зубцов ротора (рис.2), по тем же формулам (4) и (5) после расчета поля получим переходное ИС обмотки статора  $x'_d$ .

Если то же самое сделать на поверхности сердечника

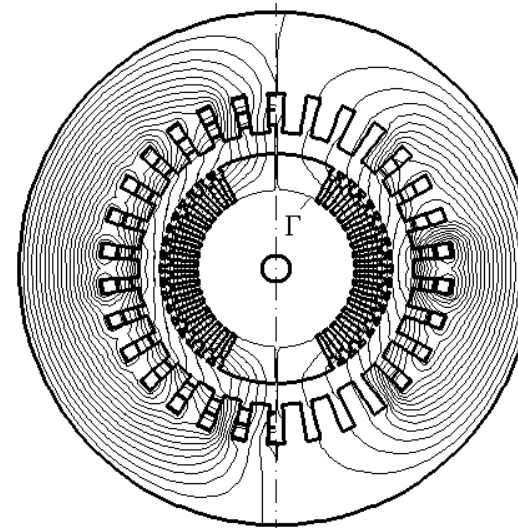


Рис. 2. Картины магнитных полей фазы А (справа) и 3-х фаз (слева) обмотки статора ТГ в переходном режиме

ротора, то получим картину поля на рис.3 и сверхпереходное ИС  $x''_d$ . А если линия  $\Gamma$  ограничит магнитное поле по расточке сердечника статора (рис.4), то получится ИС пазового рассеяния его обмотки  $x_{cp}$ .

Результаты расчета ИС в одно- и трехфазном вариантах приведены в табл.1. Значения ИС, как это принято [1], даны в относительных единицах (о.е.) при базовом сопротивлении  $Z_N = U_{\phi N} / I_{SN}$ , равном 1,054 Ом. Для сравнения отметим, что по традиционной методике расчета синхронное ИС

Таблица 1

Индуктивные сопротивления фазной обмотки статора ТГ при одно- и трехфазном вариантах расчета ее поля, о.е.

Число фаз при расчете поля	Варианты индуктивного сопротивления			
	$x_c$	$x'_d$	$x''_d$	$x_{\sigma p}$
1 фаза	1,181	0,271	0,154	0,097
3 фазы	1,709	0,356	0,186	0,113
$x_{3\phi}/x_{1\phi}$	1,447	1,314	1,208	1,165

ТГ составляет 1,9 о.е. (с учетом лобовых частей).

В табл.1 еще дано соотношение ИС трех- и однофазного вариантов  $x_{3\phi}/x_{1\phi}$ , которое по мере сужения области расчета поля все больше отличается от 1,5, теоретически обоснованного для ИС реакции якоря.

При расчете полей было принято  $I_m = \sqrt{2} I_{SN}$ . Хотя вообще, исходя из изложенного, конкретное значение  $I_m$  для ИС роли не играет, а только для трехфазного варианта расчета важно соотношение токов фазных обмоток (1).

Картинки полей на рис.1-4 даны в виде линий равного ВМП с шагом 0,05 от  $A_{max}$  – максимального значения ВМП в конкретном расчетном режиме. Так для полей трехфазной обмотки получены значения  $A_{max}$ , равные 0,7370; 0,1668; 0,0958 и 0,0638 Вб/м (в порядке номеров рисунков), при однофазном варианте для полей на тех же рис.2-4 (справа) значения  $A_{max}$  составляют, соответственно, 0,1475; 0,0945 и 0,0638 Вб/м.

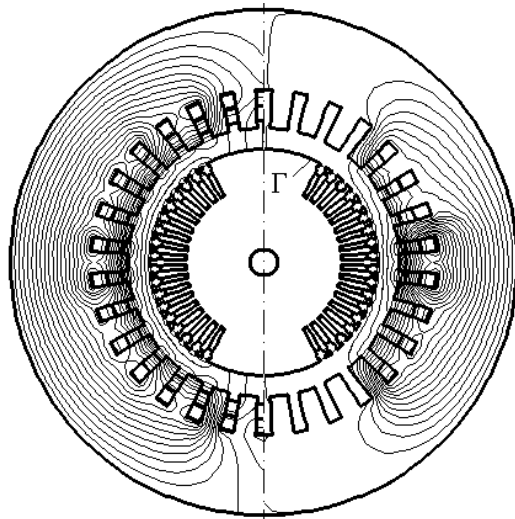


Рис. 3. Картинки магнитных полей фазы А(справа) и 3-х фаз (слева) обмотки статора ТГ в сверхпереходном режиме

Теперь рассмотрим подробнее вопрос – что представляет собой ИС рассеяния обмотки статора  $x_{\sigma}$  и как его можно определять по результатам расчета магнитного поля.

В классическом представлении ИС  $x_{\sigma}$  соответствует магнитному полю обмотки статора, которое

замыкается в пазах его сердечника и в зазоре. Именно в такой постановке здесь были рассчитаны поле на рис.3 и ИС  $x''_d$ . Следовательно, согласно классической постановке,

$$x_{\sigma} = x''_d \quad (7)$$

Однако в более общей трактовке ИС  $x_{\sigma}$  соответствует той части магнитного поля обмотки статора, которая не вошла в сердечник ротора. Тогда для полного магнитного поля (рис.1) на поверхности ротора найдем максимальное значение ВМП  $A_p$  и

внутри контура силовой линии (показана на рис.5), соответствующей этому значению, примем для ВМП  $A_z = A_p$ . Так убирается поток рассеяния обмотки статора в его зоне, которая на рис.5 затемнена. Применяя для получившегося модифицированного распределения ВМП формулы (4) и (5), получим не что иное, как ИС реакции якоря по продольной оси  $x_{ad}$ . С учетом того, что ИС  $x_c$  (табл.1) соответствовало полному полю обмотки якоря (рис.1), методом исключения получим новый вариант ИС рассеяния

$$x_{\sigma} = x_c - x_{ad} \quad (8)$$

Однако и такой подход не является достаточно обоснованным, так как реально потоком реакции якоря надо считать не ту часть общего поля, которая вошла в ротор, а ту, которая сцеплена с обмоткой ротора: все же остальное – поле рассеяния. В такой постановке по формулам (4) и (5) получится ИС  $x_{ad f}$ , если в формулах (3) и (4) вместо площади сечения фазной обмотки статора  $S_A$  интегрирование провести по площади сечения проводников обмотки ротора  $S_F$ . Остается опять методом исключения вычислить ИС рассеяния фазной обмотки статора

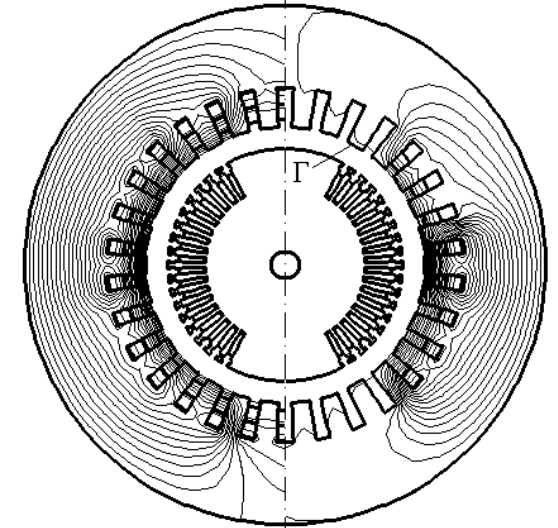


Рис. 4. Картинки магнитных полей пазового рассеяния фазы А(справа) и 3-х фаз (слева) обмотки статора ТГ

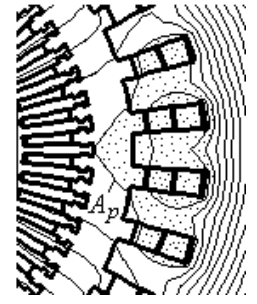


Рис.5. Вариант разделения зон полей основного и рассеяния

$$x_{\sigma} = x_c - x_{ad f} \cdot \quad (9)$$

Последний вариант (9) определения ИС рассеяния можно повторить, но при расчете поля в переходном режиме (рис.2), и тогда

$$x_{\sigma} = x'_d - x'_{ad f} \cdot \quad (10)$$

Данные расчетов ИС рассеяния фазной обмотки статора по формулам (7)-(10) представлены в табл.2 для двух вариантов расчета: одно- и трехфазного. Очевидна противоречивость этих данных и весьма большой их разброс. При этом, по нашему мнению, наиболее соответствует понятию о сути поля рассеяния ЭМ вариант по формуле (9), который соответствует аналогичному понятию и для трансформаторов. Отличие от него варианта (10) свидетельствует о том, что поток рассеяния не является самоопределяющейся величиной, независимо устанавливающейся на предопределенной части магнитной системы ЭМ. То есть поток рассеяния формируется в непосредственной связи с основной частью магнитного поля, проникающей в ротор. Особенно это подтверждается сравнением вариантов (7) и (8), базой для которых явилась установка: поток рассеяния не проникает в сердечник ротора. В первом из них магнитный поток рассеяния занимает полностью пространство, априори отведенное ему вне зависимости от основного потока. Во втором случае поток рассеяния занимает только часть пространства, оставленную ему основным магнитным полем, входящим в сердечник ротора.

Отметим также, что определение ИС рассеяния по основной формуле (9) для ненасыщенного магнитопровода дало в 3-фазном варианте  $x_c = 1,775$ ,  $x_{ad f} = 1,457$  и, соответственно,  $x_{\sigma} = 0,318$ . Сравнение этих данных с данными табл.1 ( $x_c = 1,709$ ) и табл.2 ( $x_{\sigma} = 0,306$ ) показывает степень влияния насыщения магнитопровода на ИС синхронное и рассеяния. В то же время, расчет по формуле (8) для ненасыщенного варианта дал  $x_{\sigma} = 0,075$ , что чуть больше приведенного в табл.2 значения  $x_{\sigma} = 0,072$ . То есть насыщение магнитопровода в условиях рассмотренного ТГ приводит к изменению ИС рассеяния примерно на 4%.

Таблица 2

Сравнение значений ИС рассеяния фазной обмотки статора  $x_{\sigma}$ , соответствующих различным принципам его определения, о.е.

Число фаз	$x'_d$ (7)	$x_c - x_{ad}$ (8)	$x_c - x_{ad f}$ (9)	$x'_d - x'_{ad f}$ (10)
1 фаза	0,154	0,067	0,252	0,233
3 фазы	0,186	0,072	0,306	0,292
$x_{3\phi} / x_{1\phi}$	1,208	1,075	1,214	1,253

**Выводы.** 1. Определение различных типов индуктивных сопротивлений ЭМ (как и других их электромагнитных параметров) посредством численных расчетов магнитных полей является универсальным подходом, пригодным фактически для любых типов и конструкций этих машин. Такой подход делает расчетчиков универсалами даже при овладении только минимумом единой теории ЭМ, а в современных условиях, при наличии пакетов прикладных программ, и минимумом навыков работы с вычислительной техникой без необходимости составления собственных программ. Основной проблемой определения ИС уже является не многообразие расчетных выражений, а понимание сути конкретного сопротивления.

2. Классический подход к определению индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток электрических машин по обособленным полям рассеяния в априори выделенных зонах оказывается весьма условным. Он дает противоречивые результаты, которые значительно отличаются от физически обоснованного подхода, когда поля рассеяния выделяются из единой структуры поля этих обмоток.

3. При определении ИС различных видов следует оперировать не с магнитными потоками (например, основным потоком, перешедшим от одного сердечника в другой, и оставшейся частью - потоком рассеяния), а непосредственно с магнитными потокоцеплениями обмоток.

4. В связи с изложенным, само понятие индуктивного сопротивления рассеяния обмоток ЭМ нуждается в переосмыслении. Формулировка этого понятия должна исходить из физически обоснованного представления о потокоцеплении рассеяния, как разности собственного и взаимного магнитных потокоцеплений конкретной обмотки.

5. В условиях, когда параметры ЭМ определяются на основе численно-полевого расчета, необходимо вообще стараться, по возможности, избегать использования ИС рассеяния, так как получаемые полные структуры магнитных полей сразу дают главные индуктивные сопротивления, которые в классической теории приходилось вынужденно «собирать по частям».

**Список литературы:** 1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. - 832 с. 2. Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II: Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p.1546-1564. 3. Chari M.V.K., Silvester P. Element analysis of magnetically Saturated DC machines // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1971. PAS-90, N2, p.2362-2372. 4. Мильх В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей. // Электротехника і електромеханіка.-2003.-№4.-С.59-64. 5. Мильх В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах.// Электротехніка і електромеханіка. - 2004.-№4.-46-51.

Поступила в редколлегию 4.04.2005