

# Модернизация возбуждателей синхронных генераторов

В.М.Гандшу

## **1. Введение.**

Число отказов мощных синхронных генераторов в России, как показали многолетние исследования, не уменьшается. Это закономерно, так как в настоящее время, например, более 50% общего числа турбо- и гидрогенераторов, установленных на отечественных электростанциях, отработало установленный стандартом минимальный ресурс 25 лет, определяемый ГОСТ 533-76. При этом в большинстве случаев их замена нецелесообразна как по техническим, так и по экономическим соображениям. В связи с этим большое значение имеют работы по модернизации мощного электрооборудования, которые проводятся практически на всех электростанциях страны. Эти работы ведутся по многим направлениям, в том числе по переводу возбуждения генераторов на бесщеточную систему, что обеспечивает значительный рост надежности систем электроснабжения и снижает время ремонтных простоев [1]. При щеточной системе питания обмотки ротора мощного синхронного генератора на одном контактном кольце могут быть установлены несколько десятков параллельно работающих щеток. Многочисленные измерения показывают, что нередко больше половины из них вообще не несут токовую нагрузку, а остальные перегружены и, как следствие, недопустимо искрят. Очевидно, что переход на бесщеточную систему полностью снимает все эти проблемы. При такой модернизации должен быть произведен перевод возбуждателя с постоянного тока на переменный. Проще всего это может быть осуществлено заменой существующего генератора постоянного тока на обращенный синхронный генератор. Однако такое решение не является экономически оправданным: большой объем работ по демонтажу старой машины, которая полностью отправляется в утиль, практически индивидуальное (следовательно, дорогое) изготовление новой машины.

Гораздо экономичнее произвести перевод на переменный ток существующего возбуждателя, используя то базисное положение теории электрических машин, что в их якорях, независимо от типа машины и рода тока, индуктируется пе-

ременный ток [2]. Только наличие щеточно-коллекторного узла является тем фактором, которое обеспечивает получение постоянного тока. В связи с прогрессом в области силовой электроники функции выпрямления переменного тока могут быть переведены с контактной системы коллектор-щеткой на бесконтактную систему диодного выпрямителя. При этом магнитная система (индуктор) остается неизменной, только удаляются дополнительные полюса вместе с их обмотками. Существенные работы должны быть проведены только с якорем: коллектор должен быть удален (при этом ламели коллектора должны быть отделены от петушков, поскольку петушки осуществляют соединение секций между собой), а секции обмотки пересоединяются, чтобы образовать многофазную обмотку переменного тока. Проблемам переделки обмотки постоянного тока и расчета полученной машины на примере возбуждателя постоянного тока ВВС 220/24-12 для гидрогенератора ВГС-800/110-52 посвящена настоящая работа.

## **2. Параметры существующей якорной обмотки постоянного тока.**

Исходная обмотка якоря представляет собой сложную волновую двухслойную 12-полюсную обмотку ( $2p=12$ ). После каждого обхода, включающего в себя 6 секций, происходит смещение против направления счета пазов на 3 стержня или, что то же самое, на целый паз. После 97.5 обходов происходит возвращение в исходную точку. Число секций якоря ( $S=585$ ) и число его пазов ( $Z=195$ ) имеют с числом пар полюсов наибольший общий делитель равный трем ( $D_{zp}=3$ ). В связи с этим и в конструктивном, и в электромагнитном отношении обмотка состоит из трех полностью идентичных частей. В данной якорной обмотке из них образовано 6 параллельных ветвей ( $a=6$ ). Поэтому все элементы обмотки, отстоящие друг относительно друга на одну треть окружности (195 стержней или 65 пазов), являются эквипотенциальными. Именно такие точки (точнее,  $1/13$  их часть) в исходной обмотке соединены уравнивателями.

Немаловажным обстоятельством является то, что секции обмотки не являются идентичными. Как видно из сопоставления числа секций и числа пазов, в одном реальном пазу находятся 3 элементарных паза. Для улучшения условий коммутации обмотка выполнена ступенчатой, поэтому для обеспечения непре-

рывности обхода все секции состоят из "троек", в которых первые две секции, далее именуемые "малыми", имеют один и тот же шаг по реальным пазам, а третья ("большая") – на единицу больший, в то время как по элементарным пазам у всех шаг одинаковый.

Поскольку в дальнейшем возникнет необходимость в нумерации секций, то примем за первую секцию первую малую секцию из любой "тройки". Счет пазов ведется против часовой стрелки, если смотреть на якорь со стороны коллектора (сторона "К", противоположная сторона – сторона "Р"). В этом случае секции, номера которых кратны трем, будут большими, а все остальные – малыми. Соответствующим образом пронумерованы стержни:  $k$ -ая секция начинается с  $k$ -ого нижнего стержня. Для различения слоев номера верхних стержней имеют пометку "в", а нижних – "н". В соответствии с принятой системой нумерации первый стержень лежит в нижнем слое первого паза вплотную к правой стенке паза.

### **3. Варианты схем обмотки переменного тока.**

Целью переделки якоря является создание симметричной  $m$ -фазной обмотки, линейные концы которой присоединяются к средним точкам диодных блоков. Каждый из блоков состоит из согласно-последовательно соединенной пары роторных диодов прямой и обратной полярности, в качестве которых использованы диоды типа Д105-630 и Д105-630Х. Поскольку при переходе на бесщеточную систему возбуждения необходимо с одной стороны сохранить величины выпрямленных напряжения и тока ротора, а с другой – минимизировать работы по переделке обмотки якоря, то ряд параметров новой якорной обмотки оказываются уже заданными. К ним относятся:

- число пазов;
- число полюсов;
- число секций;
- шаги секций;
- число параллельных ветвей.

Определению же подлежат:

- число фаз;
- сопряжение фаз;

- конкретный состав фаз (какие секции в какую фазу входят).

Выше уже указывалось, что данная обмотка состоит из трех совершенно идентичных частей по 195 ( $S_p = S/D_{zp} = 195$ ) секций в каждой. Все соответствующие точки этих частей являются эквипотенциальными. Поэтому в старой обмотке выполнены 6 параллельных ветвей. В новой обмотке все это сохраняется, только каждая часть будет представлять собой симметричную  $m$ -фазную систему. Требование симметрии означает, что эдс каждой фазы должны быть равны по амплитуде и сдвинуты друг относительно друга на угол  $2\pi/m$  эл.рад. Поскольку напряжение переменного тока, получаемое на зажимах обмотки, выпрямляется, число фаз не играет роли в плане энергоснабжения, и может быть выбрано, исходя исключительно из соображений возможности, экономичности и удобства выполнения. Вследствие этого теоретически число фаз может быть равно любому делителю числа  $S_p=195$ , т.е. 3, 5, 13, 15, 39... Очевидно, что при этом у каждой  $m$ -фазной обмотки появится столько же выводов, вследствие чего для выпрямления напряжения понадобится  $m \cdot a$  диодов. Разумеется, в окончательном варианте должно быть принято то минимальное число фаз, которое обеспечивает все требования, выдвигаемые системой возбуждения.

В данном случае в целях минимизации работ по переделке обмотки был принят трехфазный вариант ( $m=3$ ). В этом случае  $S_p$  секций разбиваются на три фазы по 65 секций в каждой. Наиболее целесообразно принять сопряжение фаз треугольником, при которой все секции всех фаз соединены последовательно, поскольку именно такое соединение уже имеет место в исходной обмотке постоянного тока. При выборе же звезды возникнет необходимость разрезать обмотку и делать необходимые перемычки. Кроме того, при соединении звездой увеличится напряжение на выходе выпрямителя, поскольку в этом случае к средним точкам диодных блоков будет подключено не фазное напряжение, а линейное. К тому же, в целях сохранения уровня нагрева, придется уменьшить ток на выходе выпрямителя, поскольку вдвое уменьшится число параллельных ветвей. Это придется сделать даже несмотря на то, что при звезде и мостовой схеме выпрямителя ток через секцию течет только  $2/3$  периода, а не постоянно, как при треугольнике. В случае треугольника получается вариант, требующий минимального объема работ

по переделке. У якорной обмотки, у которой удален коллектор, но оставлены петушки, через каждые 65 петушков выполняется вывод, который присоединяется к средней точке соответствующего диодного блока. При этом получается обмотка, схема которой представлена на рис. 1.

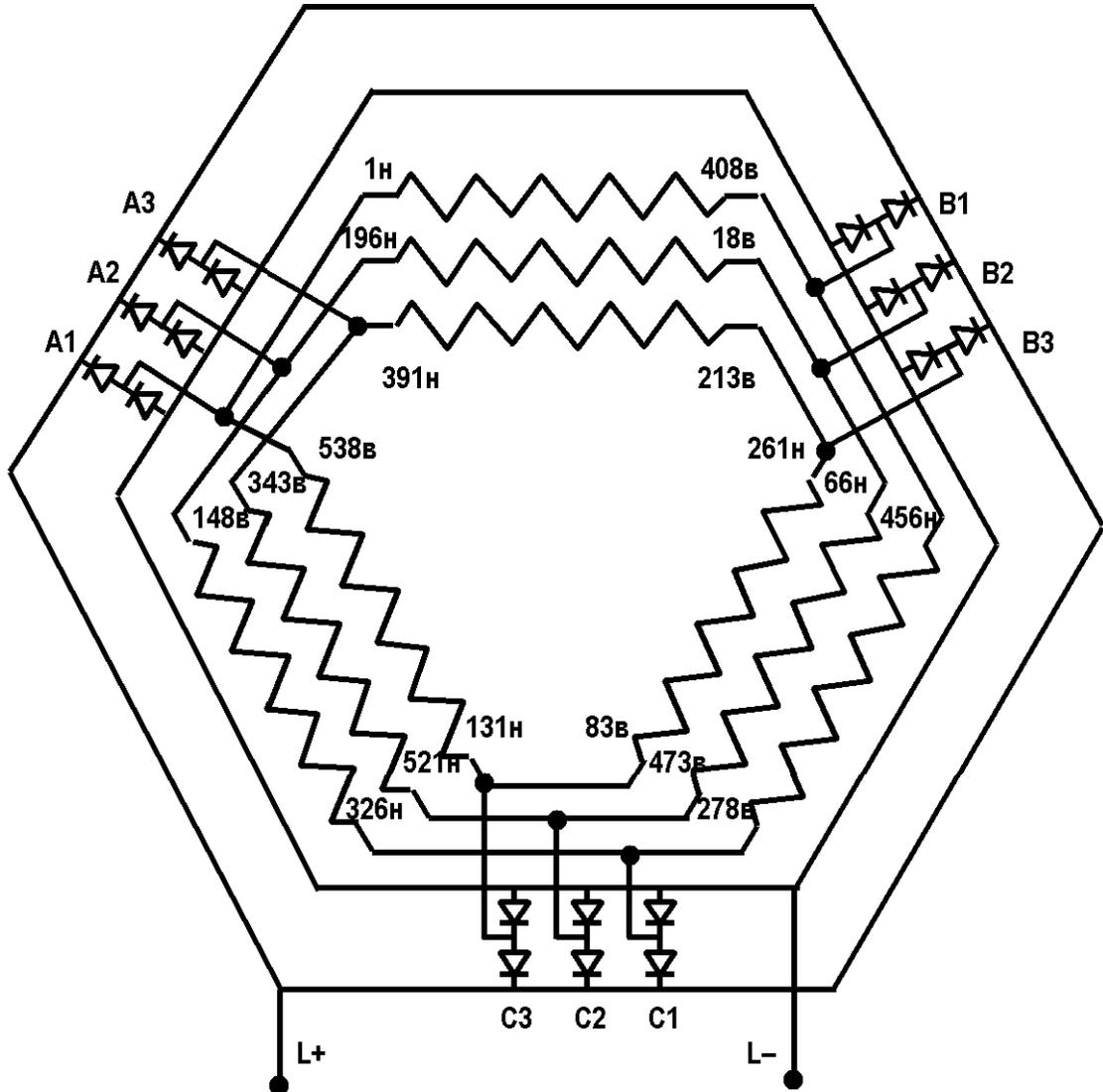


Рис 1. Схема обмотки. Обмотка неразрезанная. Три фазы образованы отпайками к средним точкам диодных блоков от лобовых дуг со стороны "К".

Все перемычки, указанные на схеме – "естественные" лобовые дуги на стороне "К".

Все уравнители удалены или разрезаны.

У концов фаз указаны номера стержней с пометками "в" (верхний) или "н" (нижний).

Дополнительно необходимо определить, следует ли оставлять или удалять уравнители. Теоретически уравнители при такой переделке могут быть оставлены, поскольку точки, которые они соединяют, остаются эквипотенциальными, но для надежности они должны быть удалены или просто разрезаны с последующей изолировкой всех концов. Известно, что не следует соединять диоды параллельно, поскольку неизбежное различие в их прямых сопротивлениях повлечет за собой существенное перераспределение токов. В некоторых случаях это может

привести даже к аварии. При наличии уравнивателей диоды оказываются включенными параллельно и на стороне анодов, и на стороне катодов. С одной стороны их соединяет шина постоянного тока, что неизбежно, а с другой стороны параллельное соединение диодов осуществляется уравнивателями, которые соединяют между собой параллельные ветви. Поскольку без параллельного соединения диодов в любом случае обойтись невозможно (в использованном диоде Д105-630 допустимый ток составляет 630 А, в то время как номинальный ток возбуждения превышает 1000 А, а в режиме форсировки – в два раза больше), то следует либо удалить уравниватели, либо подбирать диоды по прямому падению, либо снабдить диоды устройствами, выравнивающими ток между ними. Два последних варианта трудоемки и дорогостоящи, поэтому предпочтительно просто тем или иным способом разрывать связи между параллельными ветвями, тем более, что в отличие от машин постоянного тока, наличие уравнивателей в машине переменного тока не играет никакой роли.

Сравним выходное напряжение возбудителя с представленной трехфазной обмоткой с выходным напряжением исходного возбудителя постоянного тока. При работе на постоянном токе в каждой параллельной ветви векторы напряжений всех последовательно соединенных секций образуют замкнутый  $S_p$ -угольник. При  $S_p=195$  такой многоугольник практически представляет собой окружность. Из теории электрических машин известно, что эдс постоянного тока на зажимах якоря на холостом ходу  $E_{DC}$  является диаметром этой окружности

$$E_{DC} = \frac{S_p e_0}{\pi},$$

где  $e_0$  – амплитуда эдс холостого хода одной секции.

Полученное значение эдс является базовым, с которым будет сравниваться выпрямленная эдс полученной обмотки переменного тока.

Можно показать, что в  $m$ -фазной обмотке, полученной путем преобразования обмотки постоянного тока, при соединении фаз в  $m$ -угольник амплитуда линейной эдс, отнесенная к  $E_{DC}$  (обозначим её  $E_{AC}^*$ ), будет равна

$$E_{AC}^* = \cos(\pi/2m) \quad \text{при нечетном числе фаз} \quad (1)$$

$$E_{AC}^* = 1 \quad \text{при четном числе фаз} \quad (2)$$

Если бы выпрямитель работал на чисто активную нагрузку, то для получения выражения для средней выпрямленной эдс следовало бы учесть пульсации, но в нашем случае обмотку ротора основного генератора можно принять как бесконечно большую индуктивность, и поэтому для всех вариантов можно принять величину относительной выпрямленной эдс равной амплитуде относительной линейной эдс  $E_{AC}^*$ .

В итоге, при трех фазах в соответствии с (1) относительное значение выпрямленной эдс  $E_{AC}^*$  будет равно 0.866. Таким образом, имеет место снижение мощности возбудителя по сравнению с исходным более, чем на 13%. В ряде случаев это может являться существенным (это определяется реальными режимами работы, в которых используется данный гидрогенератор), и поэтому можно предложить два пути решения этой проблемы.

Как уже отмечалось, число фаз может быть равно любому делителю числа  $S_p$ . Число 3 уже рассмотрено, теперь проанализируем случай  $m=5$ . В этом случае в одну параллельную ветвь каждой фазы входит 39 секций. При этом у обмотки выполняется 15 выводов через каждые 39 стержней. При таком числе фаз относительное напряжение в соответствии с (1) будет составлять величину 0.951, т.е. напряжение и мощность повысятся более чем на 10%. Правда, при пяти фазах потребуется не 9 диодов, а 15. Следовательно, окончательный выбор можно сделать только в результате технико-экономического анализа. Попутно отметим, что дальнейшее увеличение числа фаз (в данном случае ближайшее возможное число 13) нецелесообразно, т.к. дает прирост мощности всего 4%, требуя почти 3-х кратного увеличения числа диодов.

Другим путем повышения напряжения одной фазы является переход с  $m$ -зонных обмоток на  $2m$ -зонные. Анализ схемы на рис. 1, что все секции параллельной ветви одной фазы расположены друг за другом на протяжении угла 120 эл.град. В то же время возможен другой способ организации трех фаз. Для

этого вся окружность должна быть разделена на 6 частей по 60 эл.град. каждая, и в состав одной фазы должны быть включены не два рядом лежащих участка, как на рис. 1, а два участка, эдс которых находятся в противофазе, т.е. два диаметрально противоположных участка, но при этом они должны быть включены встречно. Очевидно, что для выполнения этого условия нет возможности воспользоваться "естественными" соединениями секций, и все соединения выполняются перемычками. Схема трехфазной 6-зонной обмотки представлена на рис. 2.

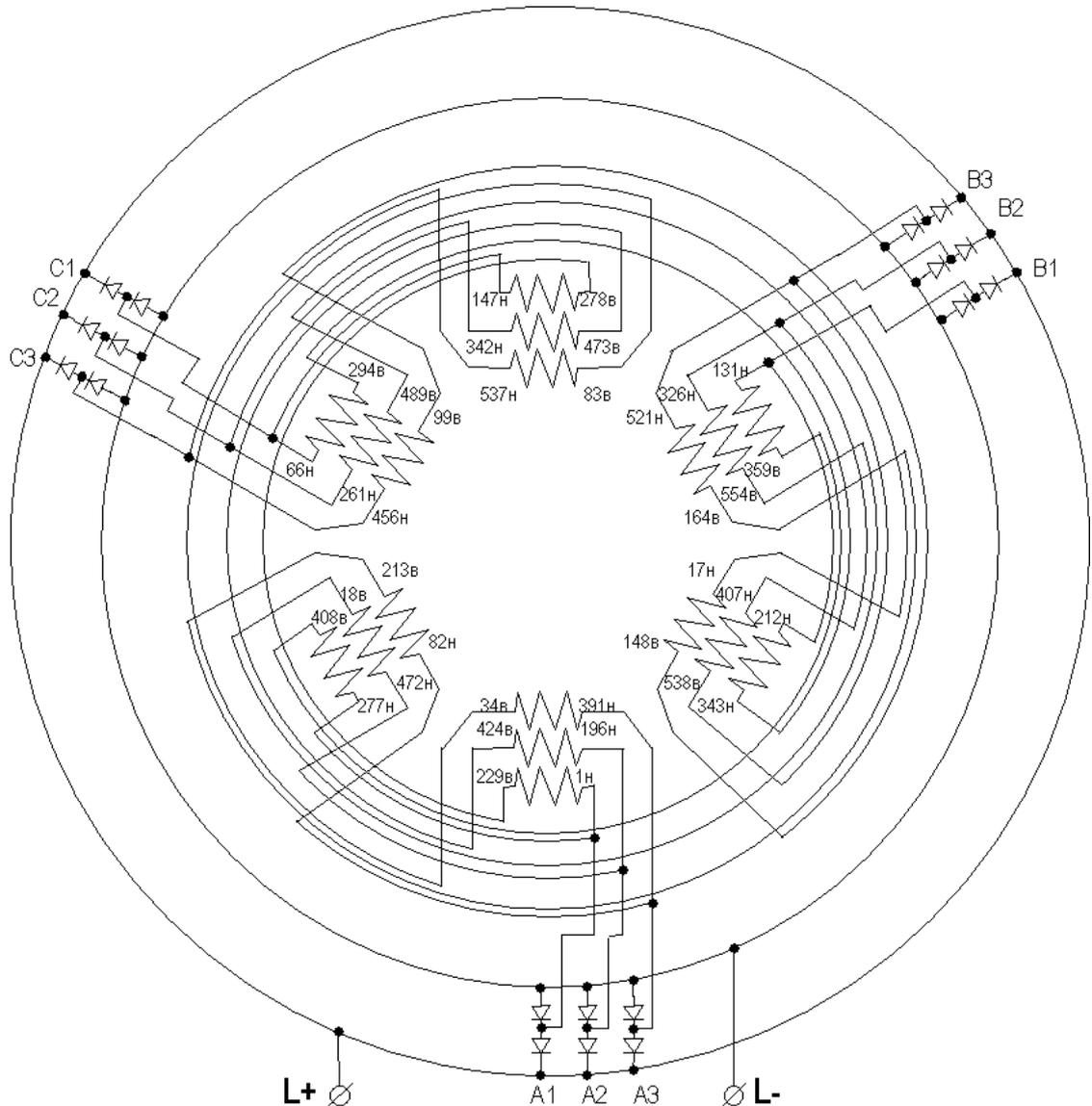


Рис. 2.

Основные характеристики:

Обмотка на стороне "К" разрезана на 18 частей по 60 эл.град. каждая, из которых сформированы три отдельных треугольника.

Каждая фаза состоит из двух, включенных встречно, зон, находящихся в противофазе.

Разрезанные части соединены перемычками на стороне "К" (на схеме – дуги).

Все уравниватели удалены или разрезаны.

У концов фаз указаны номера стержней с пометками "в" (верхний) или "н" (нижний).

В этом случае выпрямленное напряжение повышается до 1, т.е. мощность возбудителя переменного тока будет равна мощности исходной машины. И число диодов не повышается, остается равным 9. Однако вырастает трудоемкость переделки обмотки: вся обмотка разрезается на 18 частей, поочередно 33 секции, 32 секции, 33 секции, 32 секции и т.д. Эти части соединяются многочисленными перемычками согласно схеме на рис. 2, в результате чего получаются три отдельных треугольника, работающих каждый на свой выпрямитель, которые, в свою очередь, включены параллельно и работают на обмотку возбуждения гидрогенератора. Поскольку требования, предъявляемые реальными условиями работы ГЭС, могут быть удовлетворены при напряжениях, получаемых при обмотке по схеме рис. 1, а ее создание является наименее трудоемким, то окончательно был выбран именно этот вариант.

#### **4. Параметры возбудителя как синхронной машины.**

Для успешной эксплуатации гидрогенератора и построения его системы управления, прежде всего необходимо знать две его важнейшие характеристики:

- характеристику холостого хода  $E_0(i_f)$  при  $I_n=0$ ;
- нагрузочную характеристику  $U_n(i_f)$  при  $R_n=\text{const}$ .

Здесь и далее приняты следующие обозначения:

$E_0$  – выпрямленная эдс якоря на холостом ходу;

$U_n$  – выпрямленное напряжение якоря под нагрузкой;

$I_n$  – выпрямленный ток нагрузки;

$i_f$  – ток возбуждения возбудителя (шунтовая обмотка);

$R_n$  – сопротивление нагрузки якоря, т.е. сопротивление обмотки возбуждения гидрогенератора (здесь принято равным 0.2 Ом).

Для расчета вышеуказанных характеристик необходимо знать параметры возбудителя как синхронной машины, а именно:

- синхронные сопротивления по продольной и поперечной оси ( $X_d, X_q$ );
- переходное сопротивление по продольной оси ( $X'_d$ );
- индуктивные сопротивления рассеяния якоря и индуктора ( $X_{\sigma a}, X_{\sigma f}$ );
- активное сопротивление фазы якоря в нагретом состоянии ( $r_a$ ).

Сверхпереходные сопротивления определять не требуется, поскольку в машине отсутствуют демпферные контуры. Некоторое демпфирующее действие

оказывают массивные сердечники полюсов, но их влиянием можно пренебречь, как это всегда делается при расчете явнополюсных синхронных машин без демпферной клетки [3].

Для определения требуемых параметров явнополюсных синхронных машин существуют полуэмпирические классические расчетные формулы [2,3], которые дают хорошее приближение к экспериментальным данным, но только в том случае, когда конструктивное исполнение и соотношение между размерами находятся в заданных общеупотребительных пределах. Рассматриваемая же машина совершенно не соответствует общепринятым образцам явнополюсных синхронных машин. Во-первых, она имеет обращенное исполнение: у нее якорь вращается внутри индуктора, т.е. является ротором, в то время как обычно ротором является индуктор, вращающийся внутри якоря; во-вторых, полюса, их наконечники, увеличенное межполюсное пространство, возникшее из-за удаления добавочных полюсов, совершенно не соответствуют общепринятым соотношениям и, в-третьих, обмотка исследуемого якоря, полученная из обмотки постоянного тока, существенно отличается от обычной якорной обмотки синхронной машины. Это отличие состоит в том, что в синхронных машинах в каждом слое паза находится только один эффективный проводник, в то время как в данном случае – три. В машинах постоянного тока это делается ради облегчения коммутации на коллекторе, а в синхронных машинах в этом нет необходимости. Очевидно, что такое соседство существенно меняет распределение потоков рассеяния (в ряде пазов рядом находятся проводники одной фазы, а в ряде – разных). В результате всего этого был принят иной метод определения параметров, основывающийся, с одной стороны, на базовых закономерностях теории электрических машин, не зависящих ни от типа машины, ни от ее конфигурации, а с другой – на определении реального распределения поля в машине, т.е. на решении задачи в полевой постановке методом конечных элементов [5].

При этом необходимо иметь в виду, что при двумерной постановке задачи, машина предполагается однородной вдоль оси, перпендикулярной плоскости чертежа. Иными словами, предполагается равенство между собой эффективных длин

якорного сердечника  $l_{ae}$ , полюсного сердечника  $l_{me}$  и ярма  $l_j$ . В действительности же эти величины в рассматриваемой машине существенно различны:

$$l_{ae} = (L_a - n_k \cdot b_k) \cdot k_{za} = (240 - 3 \cdot 10) \cdot 0.93 = 195;$$

$$l_{me} = l_m \cdot k_{zm} = 240 \cdot 0.97 = 233;$$

$$l_j = 470.$$

Здесь  $L_a$  – конструктивная полная длина сердечника якоря (240 мм);  
 $l_m$  – конструктивная полная длина сердечника полюса (240 мм);  
 $l_j$  – конструктивная полная длина ярма (470 мм);  
 $n_k, b_k$  – число и ширина радиальных каналов в сердечнике якоря (3 и 10);  
 $k_{za}, k_{zm}$  – коэффициенты заполнения сталью пакетов сердечника якоря (0.93) и сердечника полюса (0.97).

При расчете было принято, что длина всех этих элементов магнитной цепи одна и та же ( $l_{ae}$ ), а чтобы учесть фактическое различие была произведена корректировка магнитных характеристик материала полюса и ярма. Каждой индукции  $B_i$  ставилась в соответствие не действительная напряженность магнитного поля, приведенная в справочнике на данный материал (в данном случае – литая сталь Ст3 для ярма и листовая сталь той же марки для полюсов), а некоторая фиктивная, соответствующая величине индукции [4]:

$$B_i(l_{ae}/l_{me}) = 0.837 \cdot B_i - \text{для полюса} \quad (1)$$

$$B_i(l_{ae}/l_j) = 0.415 \cdot B_i - \text{для ярма} \quad (2)$$

Для определения каждого параметра создавалась соответствующая ему геометрическая модель, определялись интересующие максимальные потокосцепления одной секции, по ним – эдс фазы якоря, а затем, после деления эдс на породивший потокосцепления ток, сопротивления.

Действующее значение эдс фазы  $E$  по максимальному потокосцеплению  $\Psi_m$  одной секции определялось с помощью соотношения:

$$E = 4.44 \cdot f \cdot \Psi_m \cdot N_s \cdot k_w, \quad (3)$$

где  $f = p \cdot n / 60 = 6 \cdot 115.4 / 60 = 11.54$  Гц – частота тока в обмотке якоря;  
 $N_s$  – число последовательно соединенных секций в одной параллельной

ветви фазы (65);

$k_w = (3/\pi) \cdot \sin(\pi/3) = 0.827$  – обмоточный коэффициент.

Далее для определения синхронных сопротивлений по каждой оси создавалась соответствующая геометрическая модель, распределялись источники поля и граничные условия, а затем, путем решения полевой задачи, определялось распределение магнитного поля. На рис. 3 представлены результаты решения при определении индуктивного сопротивления по поперечной оси (оси  $q$ ) для случая, когда выпрямленный ток нагрузки составляет  $I_n = 1125$  А. При этом поле обмотки возбуждения отсутствует.

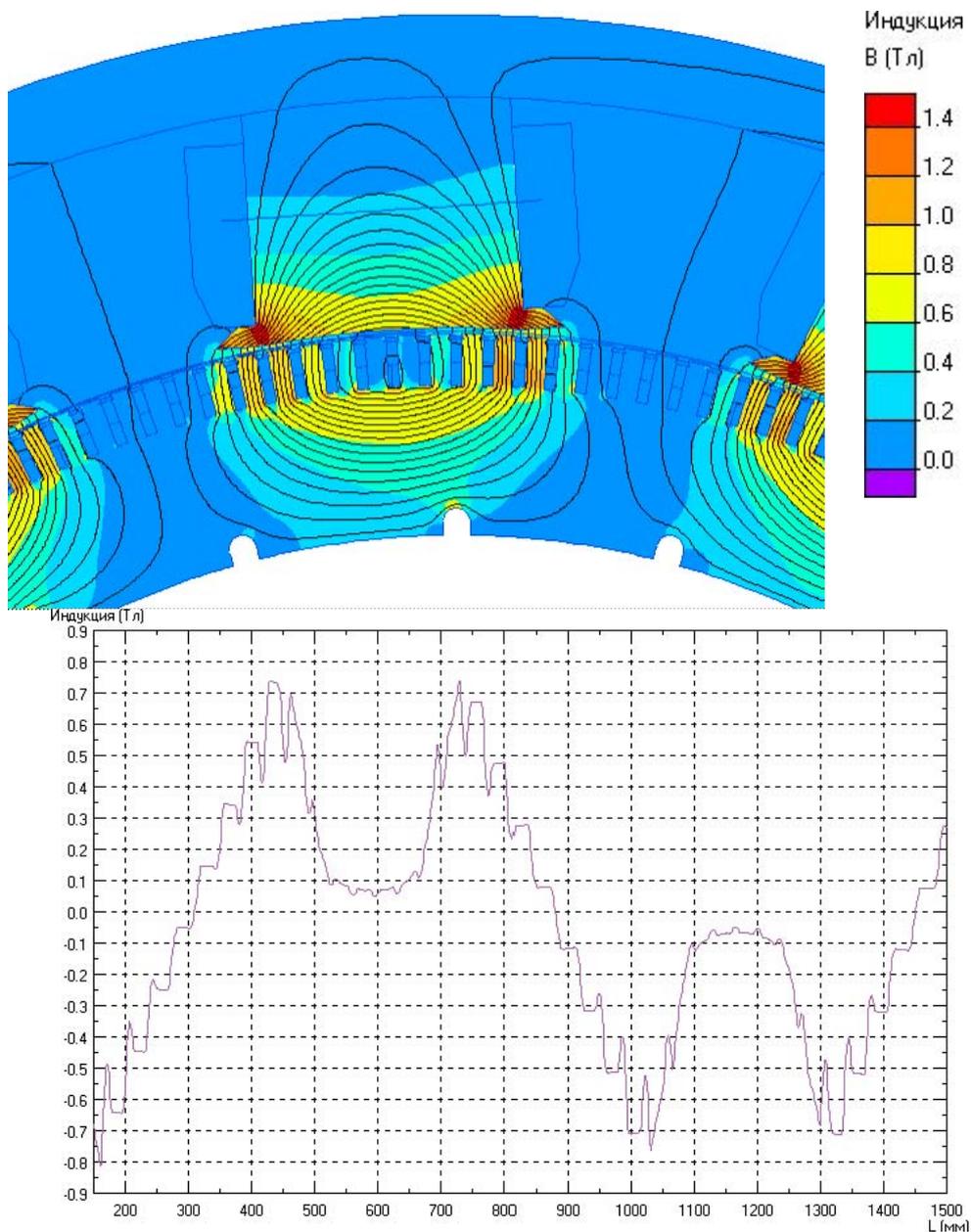


Рис. 3. Поле реакции якоря при его совпадении с нейтралью (осью "q") и распределение при этом индукции в зазоре.

Представлен фрагмент картины распределения магнитной индукции, а также фрагмент графика распределения индукции в зазоре вдоль окружности, отстоящей на 2 мм от наружной поверхности якоря. Линии потока идут поперек сердечника полюса, а посередине волны имеет место провал, вызванный совпадением максимума волны с воздушным межполюсным пространством. На линию распределения индукции в зазоре накладываются зубцовые гармоники. Анализируя представленные картины распределения индукции, следует иметь в виду, что в связи с принятым допущением о равенстве всех элементов магнитной цепи в аксиальном направлении в зоне полюсов и ярма получаются некие фиктивные значения индукции, которые необходимо умножить на коэффициенты, указанные в выражениях (1) и (2).

Аналогичные задачи решались и в двух других случаях: поле реакции якоря совпадает с осью полюсов (осью  $d$ ) при отсутствии поля обмотки возбуждения (рис. 4 для тока нагрузки 1125 А), поле в машине создано только обмоткой возбуждения при отсутствии токов в якоре (рис. 5 для тока возбуждения 60 А). Все расчеты проводились для ряда значений токов, создающих поле, чтобы выявить влияние насыщения.

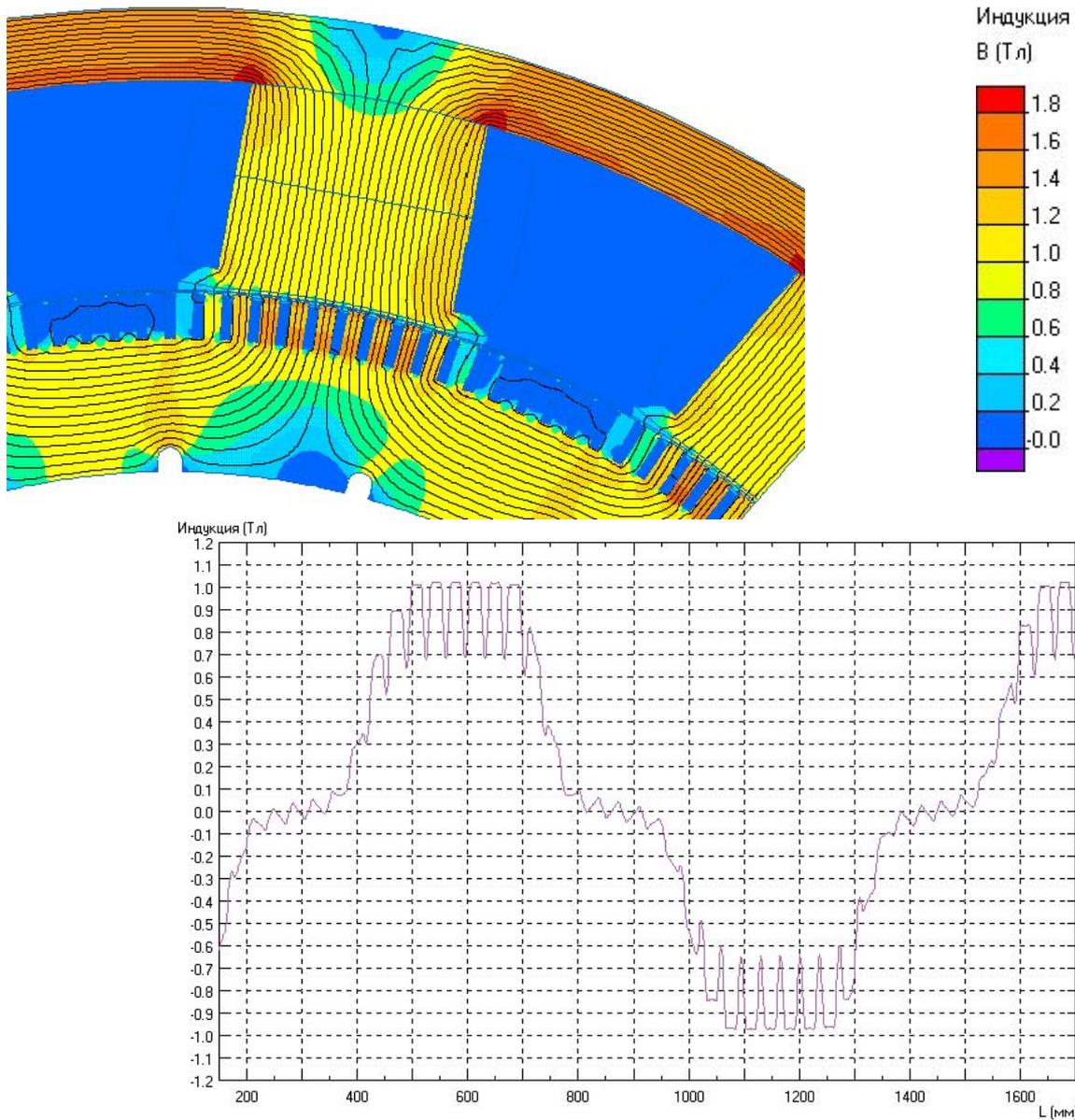


Рис.4. Поле реакции якоря при его совпадении с осью полюса (осью  $d$ ) и распределение при этом индукции в зазоре. Выпрямленный ток нагрузки  $I_B=1125$  А. Поле обмотки возбуждения отсутствует. Линии потока идут по оси сердечника полюса. На линию распределения индукции накладываются зубцовые гармоники.

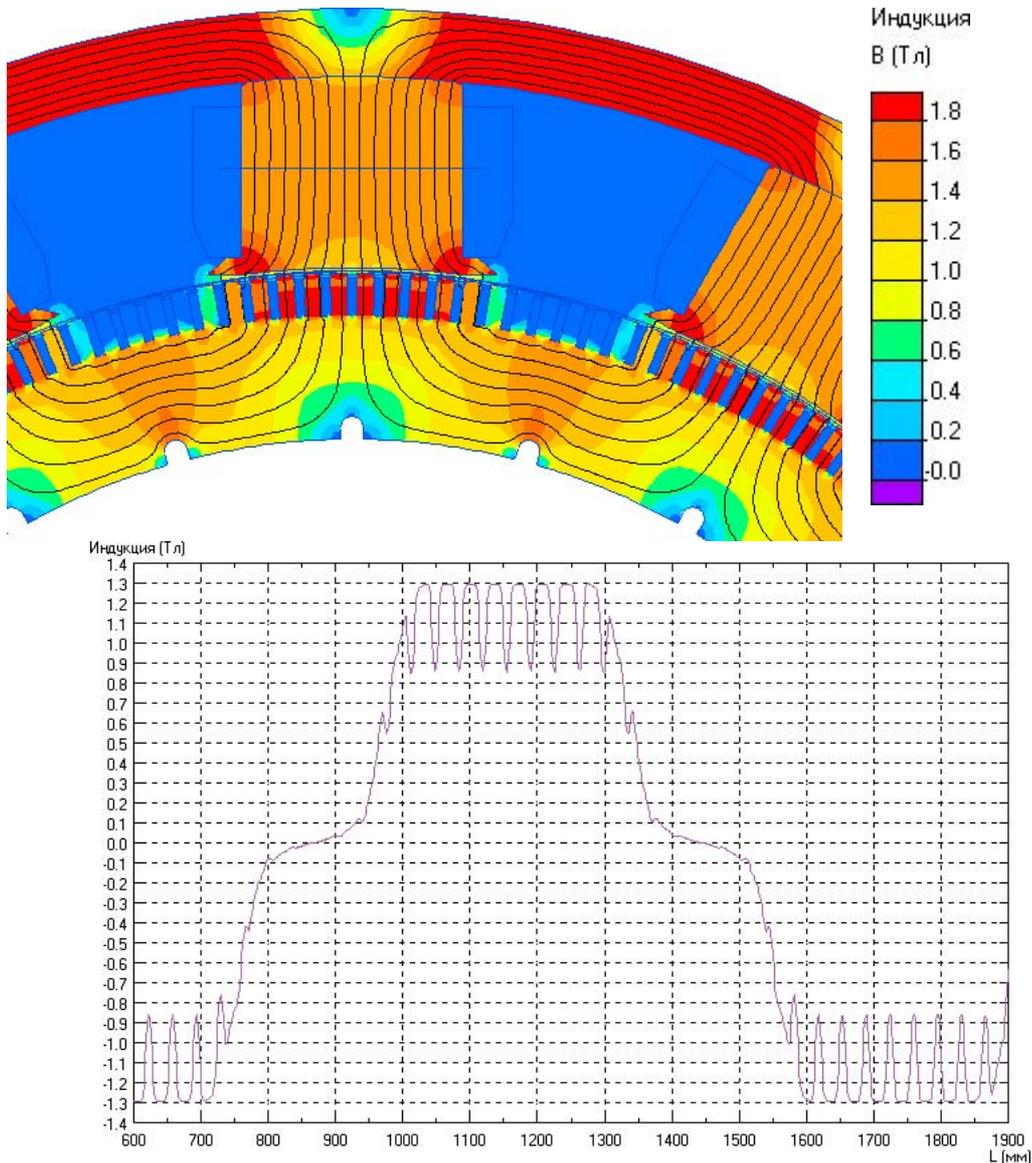


Рис.5. Поле обмотки возбуждения на холостом ходу. Ток возбуждения шунтовой обмотки  $i_f=60\text{A}$ . На линию распределения индукции накладываются зубцовые гармоники.

Необходимо отметить, что при полевых расчетах не учитывается рассеяние со стороны торцов, как сердечника якоря, так и полюсов индуктора. Для учета этого явления потоки рассеяния, полученные из картины поля, увеличивались во столько раз, во сколько суммарное рассеяние, рассчитанное по [3], превышает рассеяние в пределах длины сердечника (коэффициенты увеличения рассеяния за счет торцов соответственно  $K_{Ta}$  и  $K_{Tf}$ ). Так же учитывается дифференциальное рассеяние якоря. При этом предполагается, что сами величины составляющих определены со значительной погрешностью, но соотношения между ними достаточно достоверны. Очевидно, что для такого учета необходимо было рассчитать все составляющие магнитной проводимости для потоков рассеяния.

**Якорь.** Известно, что составляющими рассеяния якоря являются: пазовое рассеяние  $\lambda_{\text{п}}$ , дифференциальное рассеяние  $\lambda_{\text{д}}$ , рассеяние по коронкам зубцов  $\lambda_{\text{к}}$  и лобовое рассеяние  $\lambda_{\text{л}}$ . Приведем их значения, рассчитанные по [3]:

$$\lambda_{\text{п}} = 1.89, \lambda_{\text{д}} = 0.44, \lambda_{\text{к}} = 0.23, \lambda_{\text{л}} = 2.39.$$

Отсюда получаем значение искомого коэффициента:

$$K_{\text{Га}} = 1 + (\lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}}) / (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}}) = 2.33$$

**Индуктор.** В индукторе явнополюсной машины рассеяние состоит из рассеяния между сердечниками полюсов  $\lambda_{\text{м}}$ , между полюсными башмаками  $\lambda_{\text{р}}$  и между торцами полюсов  $\lambda_{\text{т}}$ . Приведем их значения, а также значение коэффициента учета торцевых потоков:

$$\lambda_{\text{м}} = 0.37, \lambda_{\text{р}} = 0.09, \lambda_{\text{т}} = 0.45, K_{\text{Тф}} = 1 + (\lambda_{\text{т}}/2/65) / (\lambda_{\text{м}}/1/53 + \lambda_{\text{р}}) = 1.52$$

Имея поправочные коэффициенты  $K_{\text{Га}}$  и  $K_{\text{Тф}}$ , можно было откорректировать потокосцепления, полученные на основании картины поля.

Результаты этих расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 6.

Таблица 1.

$I_n, \text{ A}$	Параметры возбуждителя, Ом							
	$X_{\text{ад}}$	$X_{\text{ақ}}$	$X_{\text{са}}$	$X_{\text{д}}$	$X_{\text{q}}$	$X_{\text{сф}}$	$X'_{\text{д}}$	$X_{\text{к}}$
225	0.2905	0.1410	0.05667	0.3472	0.1977	0.02673	0.08114	0.08580
450	0.2909	0.1410	0.05677	0.3477	0.1978	0.02676	0.08128	0.09073
675	0.2909	0.1410	0.05679	0.3477	0.1978	0.02676	0.08130	0.09563
900	0.2899	0.1410	0.05677	0.3466	0.1977	0.02667	0.08119	0.1004
1125	0.2866	0.1409	0.05638	0.3429	0.1973	0.02636	0.08053	0.1046
1350	0.2778	0.1408	0.05520	0.3330	0.1960	0.02556	0.07861	0.1072
1575	0.2649	0.1402	0.05335	0.3183	0.1936	0.02464	0.07589	0.1085
1800	0.2510	0.1386	0.05129	0.3023	0.1899	0.02384	0.07306	0.1090
2025	0.2364	0.1363	0.04910	0.2855	0.1854	0.02269	0.06980	0.1084

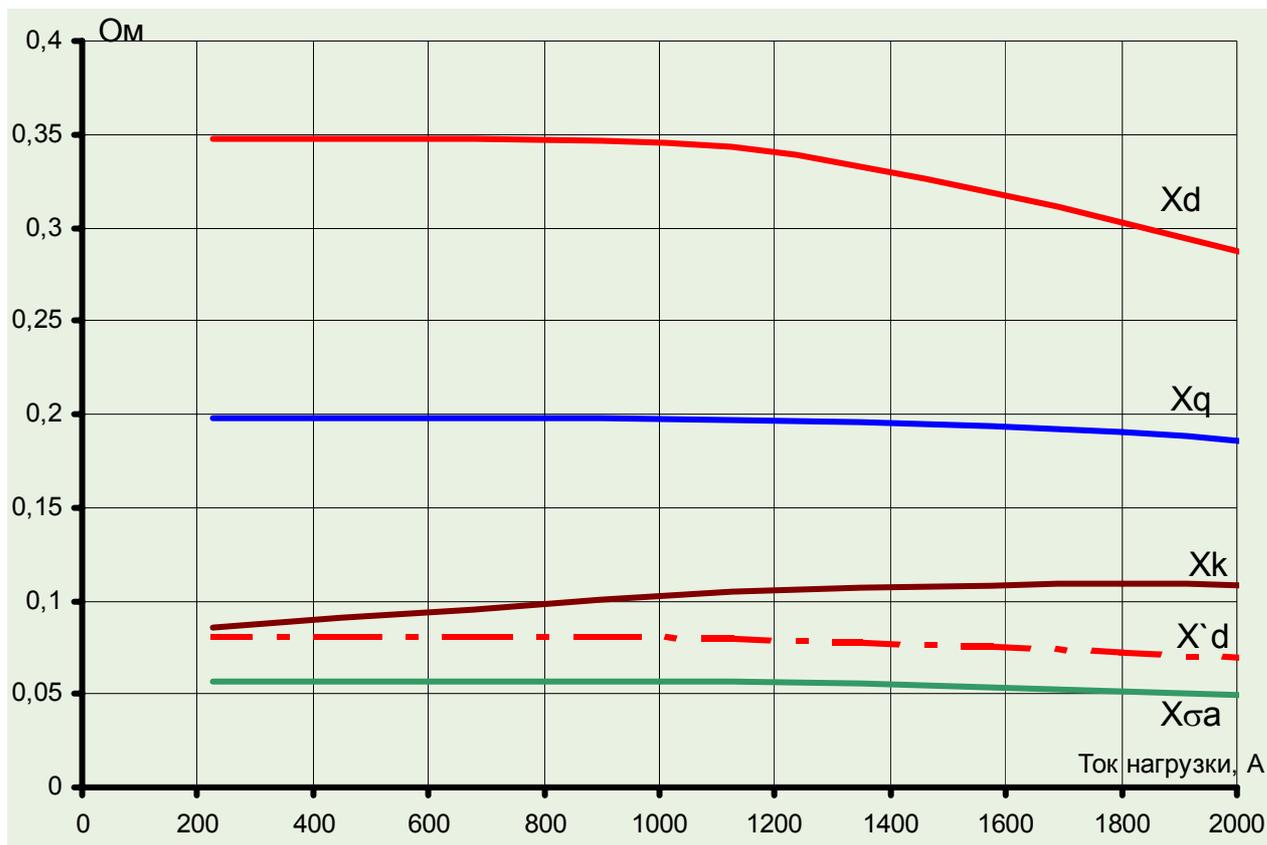


Рис. 6. Параметры возбуждения:

$X_d$ ,  $X_q$  – синхронные сопротивления по продольной и поперечной осям;

$X'_d$  – переходное сопротивление по продольной оси;

$X_{\sigma a}$  – сопротивление рассеяния якоря;

$X_k$  – сопротивление контура коммутации.

Расчеты проводились примерно до двукратных номинальных величин для обеспечения возможности в будущем анализа поведения генератора в переходных режимах при форсировке возбуждения. Из графика (рис. 6) видно, что при росте тока якоря сверх номинального значения (порядка 1000 А) на синхронном сопротивлении по продольной оси начинает сильно сказываться насыщение, но на рассеяние оно не влияет, и потому наиболее главный параметр при работе на выпрямитель, индуктивное сопротивление контура коммутации, остается практически неизменным.

В заключение данного раздела приведем значение активного сопротивления фазы в горячем состоянии. Оно найдено по элементарным формулам и составляет  $r_{a75}=0.014$  Ом. Здесь  $r_{a75}$  – сопротивление фазы при температуре  $+75^{\circ}\text{C}$ .

## 5. Расчет характеристик

Как уже отмечалось выше, необходимо знать две важнейшие характеристики возбудителя:

- характеристику холостого хода  $E_0(i_f)$  при  $I_n = 0$ ;
- нагрузочную характеристику  $U_n(i_f)$  при  $R_n = \text{const}$ .

Необходимо отметить, что здесь имеет место отступление от принятой терминологии. Если в электромашиностроении нагрузочной характеристикой принято называть зависимость  $U_n(i_f)$  при  $I_n = \text{const}$ , то здесь представляет интерес эта же зависимость при  $R_n = \text{const}$ , поскольку при эксплуатации обмотка якоря всегда нагружена именно этим сопротивлением при сравнительно большой индуктивности.

Для расчетов можно воспользоваться соотношениями, полученными в [5]. Применительно к рассматриваемому случаю они имеют следующий вид (подчеркнем, что приведенные соотношения справедливы только для рассматриваемого случая: три фазы, соединенные треугольником, мостовой выпрямитель, работа выпрямителя на постоянное активное сопротивление и бесконечно большую индуктивность):

$$E_0 = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} E$$

$$\Delta U_X = \frac{(m-1)X_k U_n}{2\pi R_n}$$

$$\Delta U_R = \frac{r_a U_n}{\pi R_n} \left( \frac{2\pi}{m} - \frac{\gamma}{2} \right)$$

$$\gamma = \arccos \left[ 1 - \frac{(m-1)X_k U_n}{mER_n\sqrt{2}} \right]$$

$$U_n = E_0 - \Delta U_X - \Delta U_R - n_g \Delta U_g$$

$$X_k = X'_d + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sin 2\gamma}{2\gamma} \right) (X_q - X'_d)$$

$$\Delta U_g = 1 + 0.0004 * \frac{U_n}{R_n}$$

В этих выражениях использованы следующие новые обозначения:

$\Delta U_X, \Delta U_R$  – падения напряжения на индуктивном и активном сопротивлениях фазы;

$\gamma$  – угол коммутации;

$n_g$  – число одновременно работающих последовательных вентилях (при мостовой схеме выпрямителя – 2);

$\Delta U_g$  – падение напряжения на одном вентиле (использовано выражение падения напряжения для примененных диодов типа Д105-630).

Эти семь соотношений образуют замкнутую систему уравнений, которая дает возможность, имея кривую намагничивания  $E(i_f)$  и зависимости параметров  $X'_d$ ,  $X'_q$  от тока, определить все семь имеющихся в системе неизвестных:  $E_0$ ,  $X_k$ ,  $U_n$ ,  $\Delta U_X$ ,  $\Delta U_R$ ,  $\Delta U_g$ ,  $\gamma$ .

Сложность решения такой системы состоит не только, и даже не столько, в том, что некоторые из уравнений являются трансцендентными, а в том, что параметры и угол коммутации являются функциями тока, который как раз через них и выражается. Для решения задачи была составлена программа, в основе которой был сходящийся итерационный процесс. Результаты решения для ряда значений тока возбуждения приведены в табл. 2 и на графике рис. 7.

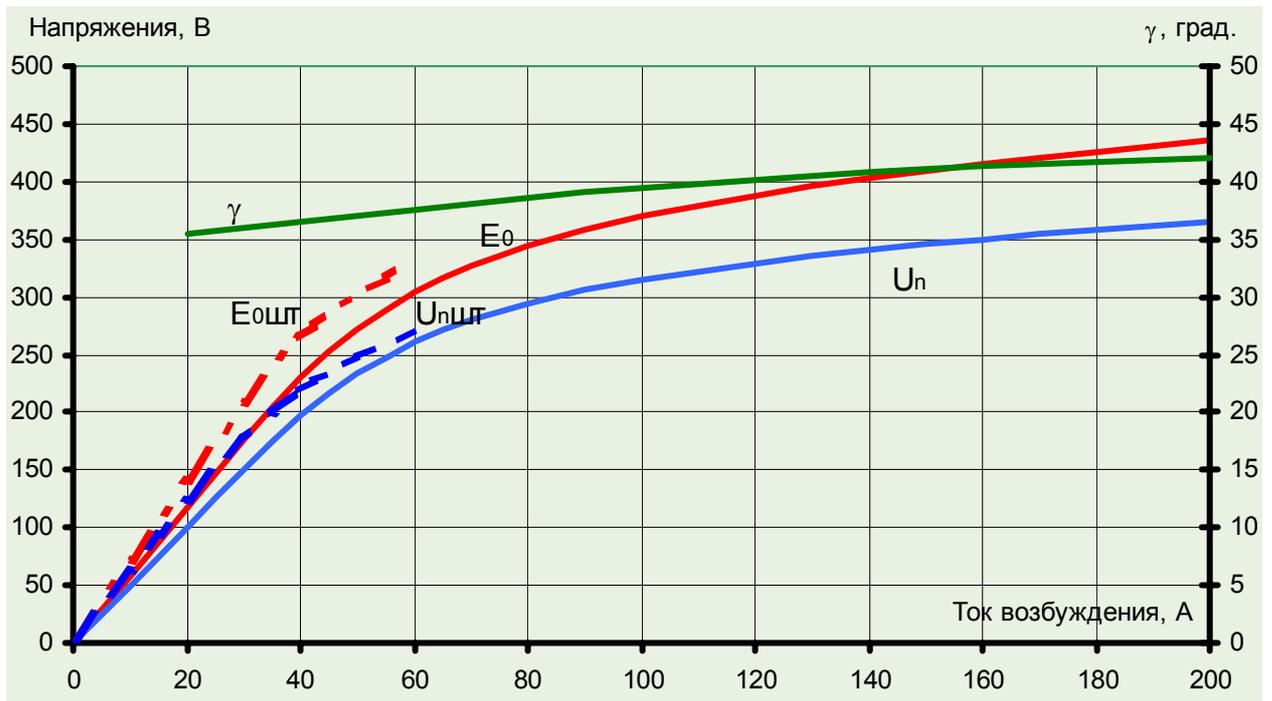


Рис. 7. Характеристики х.х. [ $E_0=f(i_f)$ , красные линии] и нагрузочные характеристики [ $U_n=f(i_f)$ , синие линии] штатного (шт) и переделанного возбудителей. Кривые штатного возбудителя - опытные (показаны пунктиром).  $\gamma$  – угол коммутации.

В этой же таблице и на графике приведены опытные характеристики штатного возбудителя постоянного тока (эти кривые проведены пунктирными линиями и отмечены индексом "шт"). Алгоритм решения системы уравнений представлен на рис. 8.

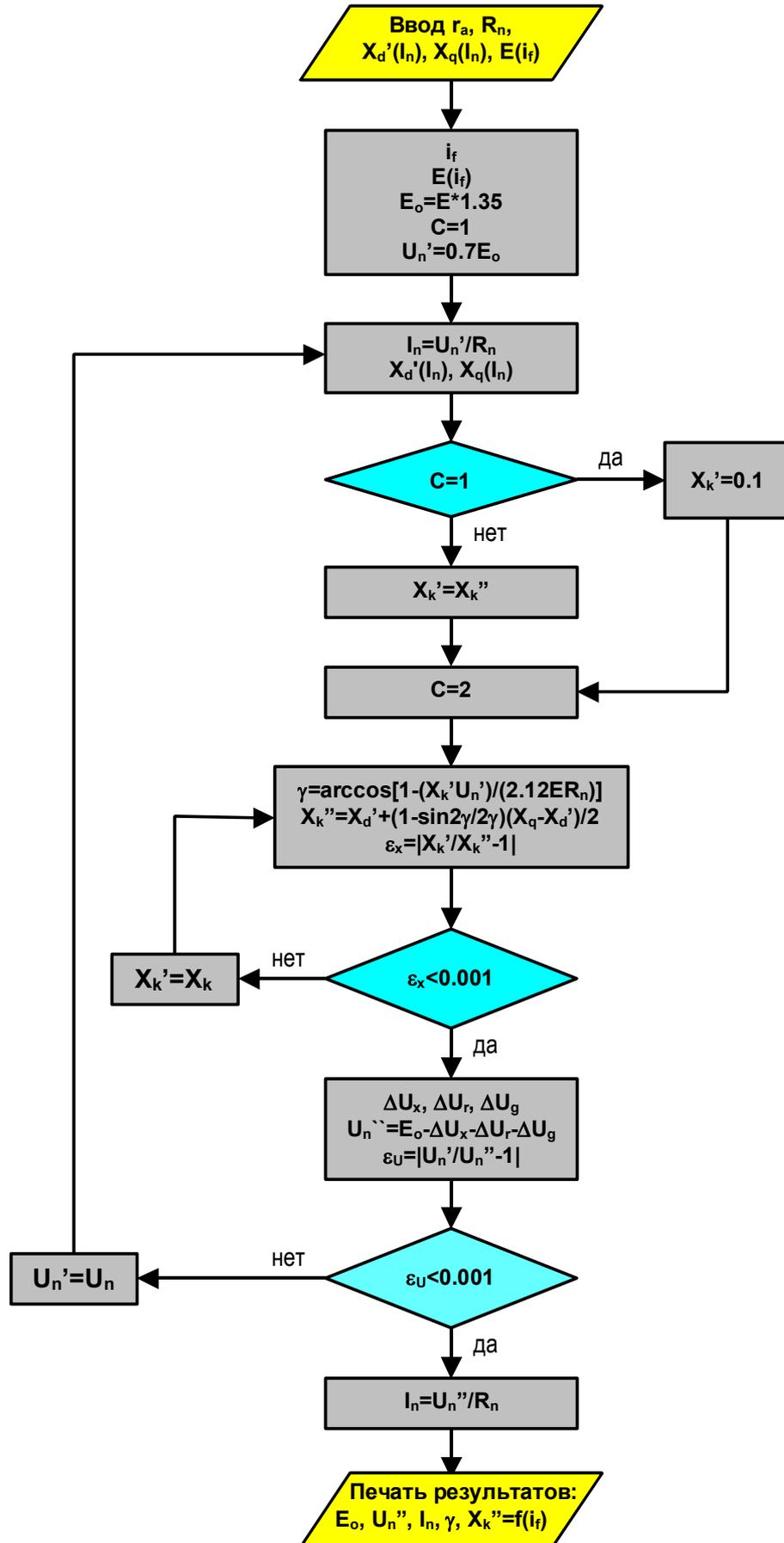


Рис. 8. Алгоритм расчета нагрузочной характеристики

Таблица 2.

$I_f, A$	$E_0, B$	$U_n, B$	$I_n, A$	$\gamma, \text{град}$	$E_0 \text{ шт, B}$	$U_n \text{ шт, B}$
0	0	0	0	38.4	0	0

10	59	49	245	39.0	78	68
20	117	98	490	39.6	140	122
30	174	145	725	40.2	205	172
40	230	192	962	40.9	265	220
<b>50</b>	<b>271</b>	<b>225</b>	<b>1125</b>	<b>41.4</b>	<b>305</b>	<b>250</b>
60	305	252	1260	41.9	332	272
80	344	283	1413	42.9		
100	370	303	1516	43.8		
120	388	318	1591	44.3		
140	403	330	1651	44.5		
160	415	341	1705	44.5		
180	426	350	1752	44.3		
200	436	359	1796	44.1		

Для иллюстрации на рис. 9 представлено распределение магнитного поля в номинальном режиме (выделен в табл. 2 желтым цветом). Для определенности принято, что якорь вращается по часовой стрелке. Видно, что реакция якоря, сдвинутая относительно оси полюсов, подмагничивает сбегающий край полюса и размагничивает набегающий. При этом различие в величинах индукции на противоположных краях полюса превышает 2 раза.

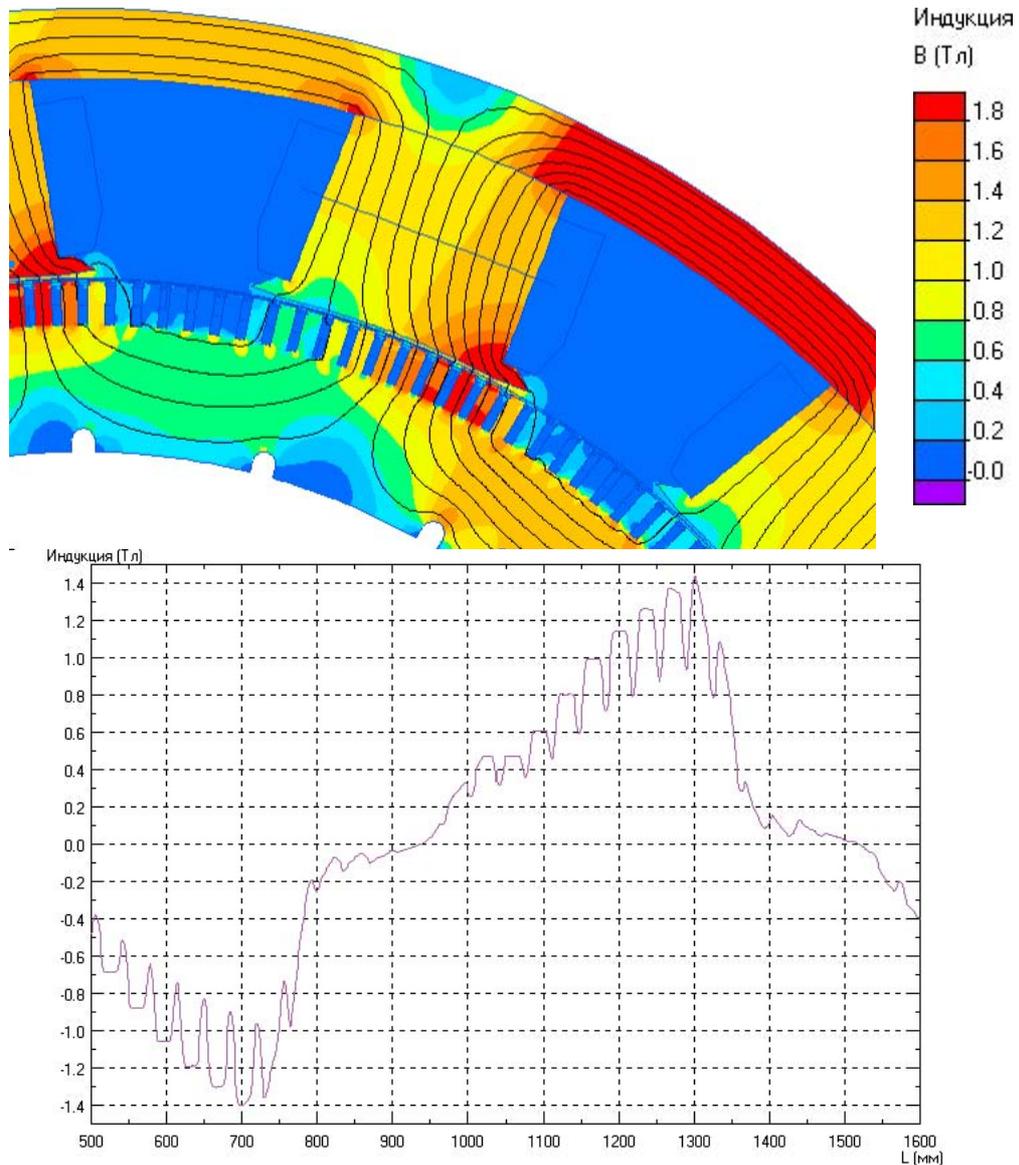


Рис. 9. Магнитное поле в возбудителе в номинальном режиме: выпрямленный ток нагрузки  $I_B=1125$  А, ток возбуждения шунтовой обмотки 50 А. Угол нагрузки (угол  $\Theta$ ) равен 28 эл. град. Направление вращения якоря – по часовой стрелке.

## 6. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что выпрямленное выходное напряжение переделанного возбудителя примерно на 10% меньше, чем у штатного, причем как на холостом ходу, так и под нагрузкой. Это может быть объяснено тем, что ради снижения трудоемкости был принят не самый оптимальный вариант обмотки статора: трехфазная трехзонная. Как было указано выше, переход на 5 фаз или на трехфазную 6-зонную обмотку может исключить этот недостаток, но на данном этапе работ указанные варианты оставлены в резерве.

### ***Литература***

1. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. "Наука", Л., 1988.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.1. Госэнергоиздат, М.-Л., 1972.
3. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. "Энергия", М., 1969.
4. Гандшу В.М. Представление шихтованных сердечников в задачах расчета магнитных полей.
5. Бирюков Ю.А. Бесщеточная система возбуждения синхронных двигателей рудничных приводов. Диссертация. Ленинградский горный институт, Л., 1972.
6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. ПК "ТОР", Санкт-Петербург, 2003.