

ISSN 0136—3360

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

5
1981

ИЗДАНИЕ НОВОЧЕРКАССКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

Опубликовано:

[Толкунов В.П., Шевченко В.В., Свило Э.В. Анализ рабочих свойств якорных обмоток методом продольно-поперечной схемы замещения / Известия высших учебных заведений. Электромеханика (ISSN 0136-3360), № 5. - Москва: Издание Новочеркасского ордена Трудового красного знамени Политехнического института имени Серго Орджоникидзе, 1981. - С. 532-537].

Предлагается новый метод исследования рабочих свойств якорных обмоток, так называемый метод продольно-поперечной схемы замещения. С помощью этого метода проанализирован ряд вопросов, относящихся к нахождению величины уравнивающих токов при различных видах асимметрии якорных обмоток.

УДК 621.313.225

АНАЛИЗ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

В. П. Толкунов, В. В. Шевченко, Э. В. Свило

Предлагается новый метод исследования рабочих свойств якорных обмоток, так называемый метод продольно-поперечной схемы замещения. С помощью этого метода проанализирован ряд вопросов, относящихся к нахождению величины уравнивающих токов при различных видах асимметрии якорных обмоток.

ОБМОТКА якоря машины постоянного тока (МПТ) является одним из важнейших ее элементов. От ее правильного проектирования во многом зависит качество и надежность выпускаемых машин. К сожалению, при исследовании обмотки якоря нельзя применить стандартные методы динамического исследования. До настоящего времени наиболее распространенным методом исследования обмотки якоря является построение многоугольника ЭДС. Однако он не учитывает ряда существенных факторов, в том числе влияния уравнивающих соединений, а также наличия высших гармонических в кривой поля. Указанные гармонические оказывают первостепенное влияние на рабочие свойства многоходовых несимметричных обмоток (петлевых и лягушечьих), применение которых дает возможность увеличить предельную мощность крупных машин. Аналитический [1] и графический [2] методы исследования многоходовых обмоток, во-первых, не обладают универсальностью, во-вторых, они не учитывают ряд явлений, например, магнитную асимметрию. В связи с вышеизложенным здесь предлагается новый метод анализа рабочих свойств якорных обмоток, который в дальнейшем будет называться методом продольно-поперечной схемы.

В основе этого метода лежит утверждение о правомерности замены реальной электрической схемы якорной обмотки схемой с двумя узлами. Действительно, из рассмотрения рис. 1, где в качестве примера изображена шестиполюсная машина ($2p=6$) с простой петлевой обмоткой, видно, что в любой замкнутый контур, по которому могут протекать уравнивающие токи, сопротивление скользящего контакта входит четыре раза, при этом направление обхода контура совпадает с направлением тока через контакт два раза и два раза эти направления противоположны. Вторым характерным фактором является то, что при нормальных нагрузках машины наличие уравнивающего тока через контакт практически не влияет на величину напряжения на этом контакте $\Delta U_{\text{ш}}$ (рис. 2).

Таким образом, при работе машины под нагрузкой суммарное падение напряжения на щеточных контактах при обходе контура, об-

разованного уравнительными токами, практически равно нулю и не может влиять на величину этих токов. Исключением являются слу-

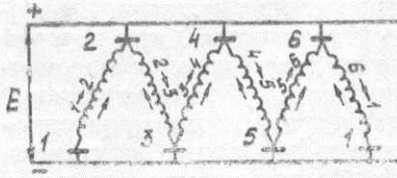


Рис. 1. Схема параллельных ветвей обмотки якоря

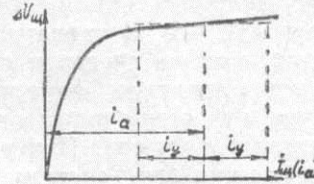


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика щеточного контакта

чаи, когда величина уравнительного тока сравнима с током параллельной ветви i_a (режим, близкий к холостому ходу или крайне большая величина магнитной асимметрии). В эквивалентной схеме (рис. 3), которая в соответствии с вышеизложенным равноценна реальной схеме (рис. 1), все параллельные ветви обмотки разбиваются на $2m$ групп, внутри которых содержится p параллельных ветвей, объединенных уравнивателями. Все ветви, принадлежащие одной группе, располагаются под полюсами одинаковой полярности.

Указанная схема состоит из одинаковых по структуре звеньев, у которых поперечные элементы являются сопротивлениями уравнительных соединений

$$z_y = R_y + jx_y,$$

где z_y , x_y , R_y — соответственно полное, индуктивное и активное сопротивления уравнительного соединения. Продольный элемент имеет сопротивление z_s , равное полному сопротивлению секций, расположенных между двумя соседними уравнительными соединениями,

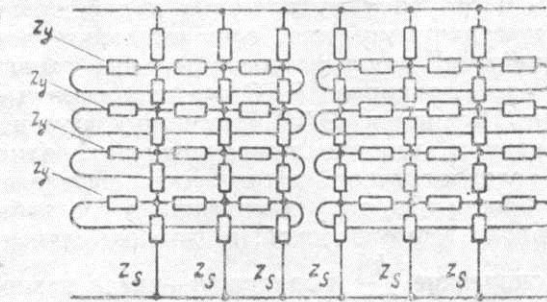


Рис. 3. Расчетная схема замещения обмотки якоря с уравнительными соединениями ($2a=6$)

При полном числе уравнительных соединений $n_y=k$ имеет место $z_s = z'_s$ (где z'_s — полное сопротивление секций; n_y и k — число уравнительных соединений и коллекторных пластин машины). В общем случае

$$z_s = a_1 z'_s, \text{ где } a_1 = \frac{k}{n_y}.$$

Замеры показали, что индуктивные сопротивления x_s , x_y в несколько раз, а иногда и на порядок больше активных R_s , R_y (исключением являются только эвольвентные уравнительные соединения в крупных машинах). Соотношение между z_s и z_y колеблется в значительных пределах в зависимости от a_1 , но даже при $a_1=1$, как правило, имеем $z_s > z_y$.

Рассмотрим вкратце применение указанной методики для решения ряда актуальных задач, относящихся к якорным обмоткам. Конечная цель при решении этих задач, как правило, заключается в нахождении величины уравнительных токов i_y , циркулирующих по

звеньям схемы и порожденных электрической и магнитной асимметрией.

1. Наличие магнитной асимметрии. Указанное явление определяется неравенством величины потоков главных полюсов. Как показано в [3], все встречающиеся на практике случаи магнитной асимметрии можно свести к случаю одиночной асимметрии, при которой НС или магнитное сопротивление одного из главных полюсов отличается от одинаковых значений НС или магнитных сопротивлений остальных полюсов. При этом, пренебрегая насыщением магнитопровода, можно всю систему магнитных потоков разложить на симметричную и дополнительную. В последней фигурирует только поток $\Delta\Phi$, порожденный магнитной асимметрией [3].

Таким образом, для рассматриваемого случая можно определить уравнивающие токи i_r , обусловленные магнитной асимметрией, как токи, циркулирующие в звеньях продольно-поперечной схемы, при условии, что в каждой из $2m$ параллельных ветвей, расположенных под одним полюсом, наводится ΔE , распределенная по синусоидальному закону по продольной оси. Как показали расчеты, для этого случая роль высших гармонических невелика.

2. Наличие электрической асимметрии параллельных ветвей обмотки, обусловленной невыполнением условий симметрии Арнольда.

Такой случай, например, имеет место при рассмотрении широко применяемых в настоящее время в машинах предельной мощности двух- и трехходовых петлевых и лягушечных обмоток, выполняемых несимметричными для осуществления электрической связи между различными ходами (уравнивающие соединения второго рода). При этом по величине ЭДС все параллельные ветви разбиваются на m групп. Величина ЭДС различных групп неодинакова, но ЭДС параллельных ветвей, принадлежащих одной группе, равны. Кроме того, следует учесть дискретность распределения секций обмотки по окружности якоря, порожденную его зубчатым строением. Помимо основной гармонической, в данном случае необходимо учитывать и гармонические $\frac{h}{mp}$ порядка (h — число пазов машины).

3. Неравенство сопротивлений однородных элементов звена. Остановимся на этом пункте более подробно. Неравенство указанных сопротивлений весьма часто встречается на практике по следующим причинам: а) механические неисправности щеточного контакта; б) неудовлетворительные пайки петушков к коллектору; в) неудовлетворительная пайка полусекций в лобовых частях обмотки; г) неудовлетворительное крепление уравнивающих соединений.

Пусть, к примеру, один из продольных элементов схемы изменил свое сопротивление на величину Δz_s . Выделим группу, включающую ветвь с указанным участком, при этом p и m произвольны (рис. 4, а). Пользуясь теоремой о компенсации, будем имитировать падение напряжения на сопротивлении Δz_s поврежденного участка появлением дополнительной ЭДС Δe_p . Зная величину этой ЭДС и пользуясь для рассматриваемого случая схемой (рис. 4, а), можно определить величину уравнивающего тока в любом элементе обмотки.

Однако в схеме замещения крупной многополюсной машины может быть более сотни звеньев, вследствие чего решение системы уравнений, даже с применением ЭВМ, сопряжено со значительными трудностями. Покажем, что растекание уравнивающих токов при этом будет происходить только по небольшому числу секций, расположенных вблизи места приложения Δe_p , что в значительной мере облегчает решение задачи.

Для доказательства этого используем метод последовательного усложнения схем (рис. 4, а, б, в), в котором каждая последующая схема образуется из предыдущей посредством окружения ее кольцом примыкающих контуров. Расчет токов в указанных схемах наиболее целесообразно производить, используя метод контурных токов. Число неизвестных при этом можно значительно сократить, учитывая симметрию звеньев, одинаково расположенных относительно участка, в котором действует ЭДС ΔE_K . При вычислениях целесообразно использовать относительную систему единиц ($i_a = 100$). Ввиду линейности системы ток i_y будет пропорционален величине $n_R = \frac{\Delta z_s}{z_s}$, вследствие чего достаточно определить i_y для одного значения n_R . Варьируемым параметром при вычислениях явилось соотношение $k_s = \frac{z_s}{z_y}$. Это отношение имеет тенденцию увеличиваться с увеличением длины машины.

Схема I-го приближения а)

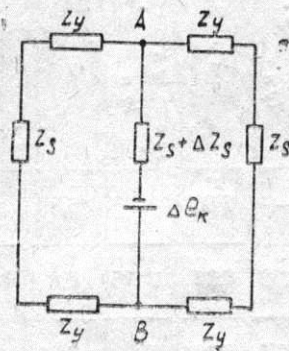


Схема II-го приближения б)

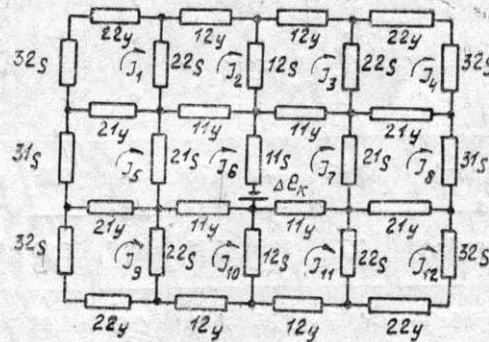


Схема III-го приближения в)

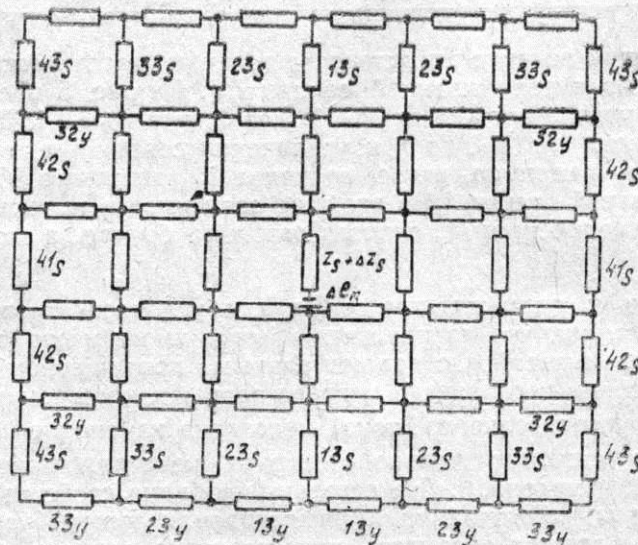


Рис. 4. Схемы для расчета уравнительных токов по методу последовательного приближения

Результаты вычислений сведены в таблицу, из которой следует, что отличие токов, определенных по схемам I и II, составляет 12—15%, II—III—3—4% и, наконец, по схемам III—IV—не более 1,5%. Следовательно, для нахождения i_y с достаточной для практики степенью точности можно воспользоваться схемой III, что значительно упрощает вычисления. Таким образом, токи, обусловленные несимметрией звеньев, локализованы на сравнительно небольшом участке, окружающем поврежденный элемент. Как в секциях, так и в уравнительных соединениях токи резко уменьшаются по мере удаления этих элементов от поврежденных. Особенно это проявляется с увеличением отношения n_R .

Таблица

Ток в поврежденной секции при вычислении по схемам с различным приближением

	$k_s=1$		$k_s=2$		$k_s=3$		$k_s=5$		$k_s=10$	
	i_y	$\frac{i_{yn} - i_{yn-1}}{i_{yn}}, \%$	i_y	$\frac{i_{yn} - i_{yn-1}}{i_{yn}}, \%$	i_y	$\frac{i_{yn} - i_{yn-1}}{i_{yn}}, \%$	i_y	$\frac{i_{yn} - i_{yn-1}}{i_{yn}}, \%$	i_y	$\frac{i_{yn} - i_{yn-1}}{i_{yn}}, \%$
i_{y1} (I пригл.)	3,85	—	4,76	—	5,17	—	5,56	—	5,88	—
i_{y2} (II пригл.)	4,52	14,9	5,44	12,5	5,90	12,32	6,37	12,75	6,82	13,75
i_{y3} (III пригл.)	4,65	2,85	5,59	2,69	6,08	2,97	6,60	2,9	7,13	4,23
i_{y4} (IV пригл.)	4,70	1,0	5,65	1,02	6,15	1,14	6,69	1,34	7,26	1,96

Наибольший интерес представляет величина уравнительного тока непосредственно в поврежденной секции i_{y11} . На рис. 5 представлена зависимость уравнительного тока i_{y11} от k_s при $n_R=0,1$. Так как i_y линейно зависит от n_R , то при увеличении сопротивления поврежденной секции, например, вдвое, величина i_{y11} достигает 50—70% от тока параллельной ветви. Из этой же зависимости вытекает, что i_y возрастает с увеличением k_s сначала довольно быстро, а затем очень медленно.

Переходя к рассмотрению эффекта, обусловленного протеканием тока i_y , отметим, что на практике обычно имеет место асимметрия сопротивлений, связанная с положительным приращением Δz_s (или Δz_y), что приводит к снижению нагрева поврежденной секции. Ввиду локализации уравнительного тока некоторое изменение теплового баланса будет ощутимо только в секциях, непосредственно примыкающих к поврежденной. На остальные рабочие свойства обмотки, включая условия коммутации, рассматриваемая система уравнительных токов не должна оказывать существенного влияния, кроме тех моментов времени, когда секция с неудовлетворительной пайкой в

лобовых соединениях или в петушках непосредственно проходит процесс коммутации.

Немалый практический интерес представляет тот факт, что на структуре схемы на рис. 3 практически не сказывается ходовость обмотки и тем более то, какие хода связывают уравнительные соединения. Это обстоятельство ставит под сомнение необходимость применения уравнительных соединений второго рода. Если этот вывод будет подтвержден последующими исследованиями, в том числе и экспериментальными, то уместно будет поставить вопрос о

возможности замены несимметричных двухходовых обмоток, обладающих целым рядом недостатков [1], симметричными ступенчатыми с $\frac{k}{p}$ — четное число. Уже удалось получить определенные положительные результаты в этом направлении, о чем будет более подробно изложено в следующей статье.

Таким образом, анализ только одного из вопросов, относящегося к якорным обмоткам, осуществленный с помощью продольно-поперечной схемы, дал ряд новых и весьма интересных результатов.

ВЫВОДЫ

1. Продольно-поперечная схема замещения якорных обмоток может быть успешно применена для анализа некоторых вопросов теории этих обмоток.

2. Уравнительные токи, обусловленные повреждением секций (уравнительных соединений), локализованы в небольшом числе звеньев, непосредственно примыкающих к поврежденной секции.

3. На величину уравнительных токов не влияет число ходов обмотки, а также наличие уравнительных соединений второго рода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ипатов П. М. Многоходовые обмотки якорей электрических машин постоянного тока. — М.: Наука, 1965, 62 с.
2. Фетисов В. В. О напряжении между смежными коллекторными пластинами в машине постоянного тока с двухходовыми обмотками. — Электромеханика, 1960, № 6, с. 48—65.
3. Толкунов В. П. Исследование обмоток якоря машины постоянного тока с целью повышения качества их работы. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. 1963, Харьков.
4. Толкунов В. П., Омеляненко В. И., Грановский С. А. К вопросу о влиянии местной электрической асимметрии двухходовой обмотки якоря на процесс возникновения "зебростости" коллектора. Вестник Харьковского политехнического института, № 75, вып. I, 1973, с. 102—106.

Рукопись поступила

7. V. 1980 г.

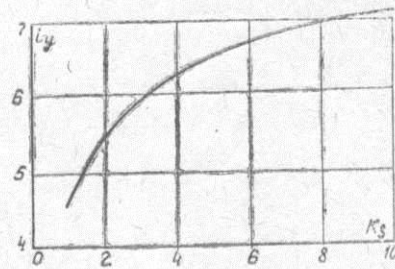


Рис. 5. Кривая $l_y = f(k_s)$ при $nR=0,1$