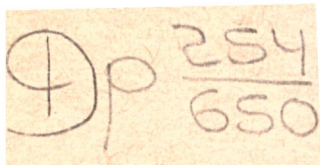


**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
НОВОЧЕРКАССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ**

На правах рукописи

БЕССУДНОВ Е. П.



**Исследование волновых процессов
и разработка методов индикации
и обнаружения мест дефектов
в обмотках электрических машин
постоянного тока при импульсных
испытаниях изоляции**

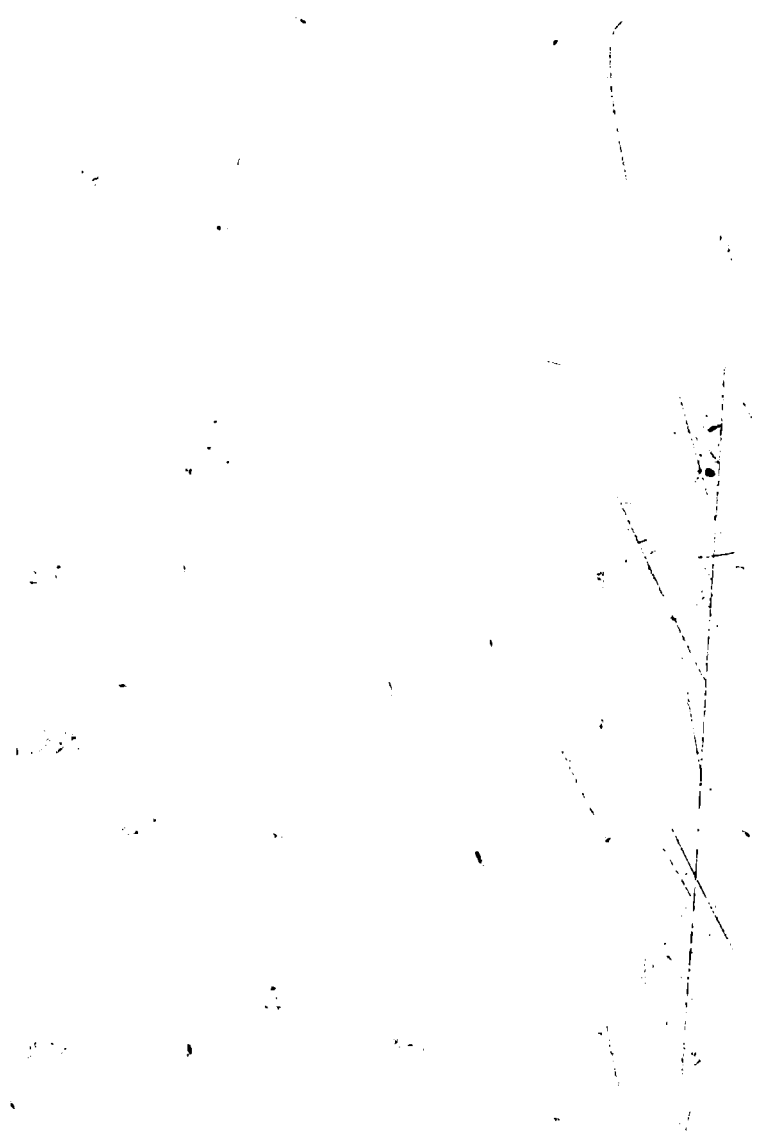
(05.254 — Автоматическое управление и регулирование
в энергетической промышленности)

Диссертация написана на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новочеркасск—1972



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
НОВОЧЕРКАССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

На правах рукописи

БЕССУДНОВ Е. П.

Др 254
650

**Исследование волновых процессов
и разработка методов индикации
и обнаружения мест дефектов
в обмотках электрических машин
постоянного тока при импульсных
испытаниях изоляции**

(05.254 — Автоматическое управление и регулирование
в энергетической промышленности)

Диссертация написана на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новочеркасск—1972

Успешное выполнение решений партии и правительства по опережающему развитию производства электроэнергии в стране позволило широко развернуть электрификацию железнодорожного транспорта, где применяется наибольшее количество электрических машин постоянного тока: как тяговых двигателей, так и вспомогательных электрических машин.

Статистические данные [Л. 1, 4] и данные ВЭлНИИ показывают, что значительная часть повреждений электрических машин происходит вследствие недоброкачественного изготовления их на заводах-изготовителях и ремонтных заводах.

✓ Проведение заводских электрических испытаний изоляции является одним из условий, обеспечивающих высокую надежность машин постоянного тока в эксплуатации.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Применительно к обмоткам якорей электрических машин постоянного тока испытания индуктированным импульсным напряжением, используя, например, разработки М. В. Смирнова (ВЭИ), малоэффективны из-за наличия естественных короткозамкнутых контуров. Поэтому наиболее широкое применение нашел метод бегущей волны. Этот метод испытания применяется при использовании известной импульсной установки типа ИУ-57 (ИУ-2), разработанной в ЦНИИ МПС Н. Д. Сухопрудским.

Однако установка ИУ-57 не позволяет точно обнаружить место (точку) пробоя корпусной изоляции и витковое замыкание через большое переходное сопротивление в месте дефекта изоляции, особенно в петлевых обмотках якорей с уравнительными соединениями. Разновидности метода бегущей волны — метод переменного направления движения волны, метод сличения волн и мостовые методы — только

устанавливают факт наличия дефекта изоляции, но не позволяют обнаружить точно место дефекта [Л. 4].

Импульсные испытания изоляции обмоток электрических машин неразрывно связаны с волновыми процессами в них, без глубокого знания которых невозможно создать эффективных методов индикации и обнаружения мест дефектов изоляции.

Однако тех сведений о волновых процессах в электрических машинах постоянного тока, которыми располагает практика, недостаточно для разработки наиболее эффективных методов индикации и обнаружения мест дефектов изоляции в их обмотках.

Исходя из недостаточной изученности волновых процессов в обмотках электрических машин постоянного тока и несовершенства известных методов и аппаратуры для испытания изоляции обмоток этих машин, перед данной работой были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать распределение волновых напряжений в обмотках якорей машин постоянного тока при испытаниях изоляции методом бегущей волны.

2. Сделать расчет на аналоговой вычислительной машине волновых напряжений в обмотках якорей с целью обосновать физику их формирования.

3. Исследовать импульсное магнитное поле испытываемой обмотки якоря.

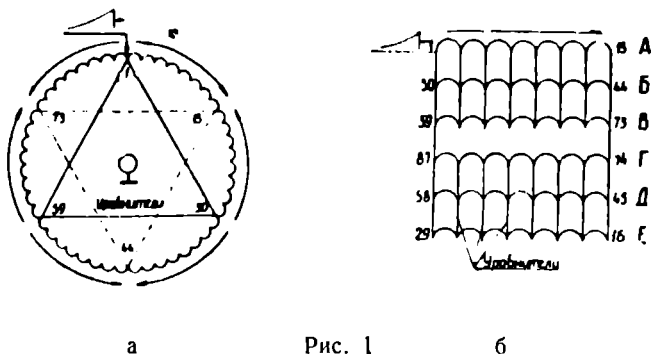
4. Используя результаты проведенных исследований, разработать новые эффективные методы индикации и обнаружения мест дефектов изоляции в обмотках электрических машин постоянного тока.

5. На базе этих методов разработать новую испытательную аппаратуру и внедрить ее в производство.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕТЛЕВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МЕТОДОМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Типичным участком с точки зрения распределения волновых напряжений является часть обмотки якоря, охваченная одним уравнивателем, на начало (конец) которого падает волна напряжения (рис. 1, а, для обмотки якоря тягового двигателя НБ-418К) [Л. 5, 8]. Типичный участок состоит

из двух последовательно соединенных параллельных ветвей (рис. 1, а, б).



а

Рис. 1

б

В обмотках якорей на формирование волновых напряжений сильное влияние оказывают индуктивные связи секций, лежащих в общих пазах. Здесь имеют место типичные индуктивные связи вида: начальная-конечная (рис. 1, б) секции; средняя — средняя секция; и связи соответствующих остальных промежуточных секций разных параллельных ветвей, отстоящих друг от друга на один шаг по пазам. Именно этими индуктивными связями, вытекающими из схемы и конструкции обмоток якорей машин постоянного тока, в основном обусловлен специфический характер распределения продольных междувитковых волновых напряжений $U_{м.в}$ (рис. 2).

Другим существенным моментом, оказывающим значительное влияние на формирование волновых напряжений в обмотках якорей, является шунтирующее действие друг на друга секций, непосредственно соединенных между собой уравнивателями (рис. 1, б).

По указанным выше причинам максимальные испытательные междувитковые напряжения $U_{м.в}$ имеют место на расстоянии $1/4$ и $3/4$ длины типичного участка от начала (конца) его или, что то же самое, в серединах параллельных ветвей (см. рис. 1 и 2).

В средних секциях типичных участков обмотки якоря междувитковые напряжения практически равны нулю (секция 15, рис. 2). Физически это объясняется тем, что волны, распространяющиеся от концов типичного участка, движут-

ся встречено по виткам средней секции (рис. 1, а). Кроме того, индуктированные составляющие междувитковых напряжений средних секций (верхней и нижней сторон секций) также разной полярности.

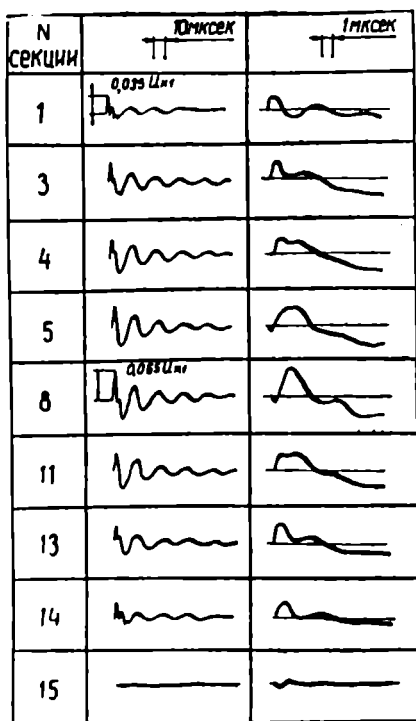


Рис. 2.

Формирование волновых напряжений в обмотках якорей машин постоянного тока не удастся объяснить, пользуясь теорией волновых процессов в длинных линиях с ее законом отражения, которая обычно в своей основе распространяется на обмотки трансформаторов и электрических машин переменного тока [например, Л. 2, 3].

Согласно закону отражения можно записать

$$l_{эл.} = \frac{1}{4} T,$$

где $l_{эл.}$ — электрическая длина обмотки, мкс;

T — период основного колебания напряжения на изолированном конце обмотки, мкс.

Определенные по осциллограммам волновых напряжений относительно корпуса электрические длины $l_{эл.}''$ и $l_{эл.}^{гр}$, соответственно, для начальной точки и гребня падающей волны, частоты собственных колебаний f_c и частоты f , определенные из (1), для исследованных обмоток якорей приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Тип двигателя, якоря	$P_{ч}$	$U_{дв.}$	$l_{эл.}''$	$l_{эл.}^{гр}$	f_c	$f = \frac{1}{4 l_{эл.}}$	
						$f_{н}$	$f_{гр}$
	кВт	В	мкс	мкс	кГц	кГц	кГц
НБ-418	790	950	1,5	3	49	167	84
НБ-412К	775	1600	2	5	31	125	50
НБ-436А (генератор)	30,4	38	0,38	0,45	320	660	555

Как видно, частоты f_c и f для любой точки фронта (f_n и $f_{гр}$) не равны друг другу.

Из анализа форм волновых напряжений относительно корпуса в начале (Н) и конце (К) петлевой обмотки якоря НБ-436А (генератор), приведенных на рис. 3, Н. К., видно, что удвоения напряжения волны, пришедшей к изолированному концу (К) обмотки, не наблюдается (масштабы напряжения и времени на рис. 3, Н. К. одинаковые; $f_c = 320$ кГц). Кроме того, волновое сопротивление Z , то есть сопротивление, уменьшающее амплитуду волны на изолированном конце в 2 раза, не только устраняет колебания, но и значительно искажает основную аperiodическую, составляющую напряжения на конце обмотки (рис. 3, Н, К).

Колебательные затухающие перенапряжения относительно корпуса на изолированном конце обмотки якоря можно объяснить, если рассматривать обмотку как колебательный контур, на который действует ударное возбуждение, обусловленное падающей волной. Причем, обмотка якоря воспринимается как последовательный колебательный контур, характеризующийся основной частотой собственных колебаний f_c [Л. 5].

По указанным выше причинам под волновым сопротив-

лением обмоток якорей понимается сопротивление Z_k , только устраняющее резонансные перенапряжения на изолированном конце и не искажающее основную аperiodическую составляющую напряжения на конце обмотки. Величины сопротивлений Z и Z_k для одной и той же обмотки якоря значительно отличаются.

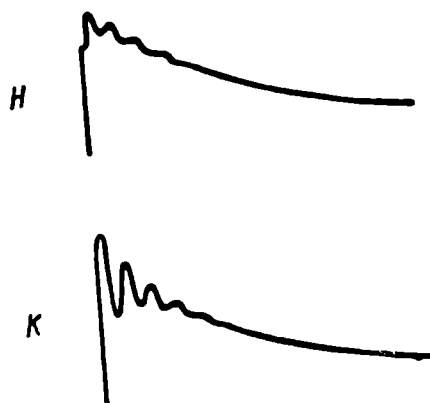


Рис. 3

Пользуясь законом отражения волн, не удастся объяснить формирование первых двух пиков продольных междувитковых напряжений в обмотках якорей электрических машин постоянного тока (рис. 2). Формирование одного из первых пиков $U_{м.в}$ в обмотке якоря следует объяснять за счет деформации фронта бегущей волны, а другой — индуктирован. Для начальных секций (по ходу движения волны) индуктированным является второй пик, а для конечных (не считая средней секции типичного участка) — первый [Л. 5]. По осциллограммам $U_{м.в}$ можно определить коэффициент взаимной индуктивной связи секций, лежащих в общих пазах обмотки якоря, по формуле

$$K_c = \frac{U_{y_z}^{м.в} - 1}{U_1^{м.в}}, \quad (2)$$

где $U_{y_z}^{м.в} - 1$ — амплитуда индуктированного пика (первого

пика) конечной секции (точнее секции, отстоящей от начальной на один шаг по пазам u_z без одной, например, секции 14 на рис. 2).

$U_1^{м.в}$ — амплитуда индуктирующего пика (первого пика) начальной секции (секция 1, рис. 2).

Коэффициент индуктивной связи K_c секций обмоток якорей составляет $0,5 \div 0,6$.

В середине обмотки якоря (рис. 1, б, 2) пики, созданные за счет деформации фронта волны, и индуктированный формируются в одно время, имеют одну полярность и поэтому суммируются (рис. 2), создавая максимальные испытательные напряжения. Величина этих напряжений составляет $5 \div 7\%$ от амплитуды падающей волны.

Формирование максимальных пиков междувитковых напряжений именно в середине обмотки якоря (на расстоянии $1/4$ и $3/4$ длины типичного участка) не удастся объяснить емкостными связями секций разных параллельных ветвей, лежащих в общих пазах. Действительно, емкостные связи могут проявляться, если имеет место электрическое поле между соответствующими секциями. Однако потенциалы относительно корпуса U_k секций с максимальными междувитковыми напряжениями $U_{м.в}$ (в серединах параллельных ветвей) одинаковые, так как волны напряжения приходят к серединам параллельных ветвей в одно время (рис. 1). Поэтому разность потенциалов, а, следовательно, и электрическое поле между указанными секциями практически отсутствуют.

Физика формирования первых двух пиков и характер распределения вдоль обмотки междувитковых напряжений $U_{м.в}$ не зависят от длительности фронта падающей волны. Фронтом волны определяется только величина $U_{м.в}$.

Максимальные межсекционные напряжения $U_{м.с}$ равны амплитуде падающей волны и относятся к паре секций, одна из которых является первой по ходу движения волны, а другая лежит в общем пазу с первой и отстоит от нее по числу секций (пазов) на один шаг по пазам, то есть между первой и последней секциями (рис. 1). Минимальные (практически нулевые) межсекционные напряжения относятся к средним секциям параллельных ветвей (рис. 1, б).

Из-за наличия связей по уравнителям точно установить место пробоя изоляции на корпус практически невозможно

при измерении потенциалов по коллектору относительно корпуса (см. рис. 1, а).

Так как междувитковые напряжения $U_{м.в}$ формируются с учетом шунтирующего влияния друг на друга секций, непосредственно соединенных между собой уравнивателями (рис. 1, б), то чувствительность индикации виткового замыкания, основанной на изменении междувитковых напряжений в обмотке якоря, при больших переходных сопротивлениях в месте дефекта изоляции ограничена сравнительно малой величиной полного сопротивления шунтирующих секций [Л. 5, 8]. Кроме того, эти же условия не позволяют однозначно обнаружить секцию с дефектной витковой изоляцией. Именно этим объясняется недостаточная эффективность испытаний витковой изоляции обмоток якорей методов и устройств, основанных на изменении продольных волновых напряжений: метод сличения волн, метод переменного направления движения волны, мостовые методы и другие.

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА АВМ ВОЛНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ ЯКОРЕЙ

Цель исследований — математическое подтверждение физики формирования волновых напряжений в обмотке якоря [Л. 5, 6].

Расчет на АВМ производился по трем вариантам схемы замещения:

1. Схема замещения, представляющая собой фактически последовательный колебательный контур $L - C$ с потерями (общая схема замещения в виде одного П-звена с сосредоточенными параметрами).

2. Цепная схема замещения с учетом в явной форме реально существующих в обмотке якоря взаимных индуктивных связей M секций, лежащих в общих пазах, структура каждого П-звена которой такая же, как и общей схемы замещения.

3. Цепная схема замещения без учета в явной форме индуктивных связей M .

Волновые параметры обмоток якорей машин постоянного тока L, C, g, R, C_{ϕ} (L — индуктивность; C — емкость относительно корпуса, участвующая в колебательном процессе; C_{ϕ} — фронтовая, входная емкость, участвующая в формировании фронта падающей волны; g — сопротивление, эквивалентное потерям в стали на вихревые токи и актив-

ное сопротивление проводников обмотки с учетом поверхностного эффекта; R — сопротивление, эквивалентное диэлектрическим потерям) определялись сначала для общей схемы замещения, как для последовательного колебательного контура, а затем дробились в соответствии с необходимым числом Π -звеньев цепной схемы замещения (в соответствии с числом пазов одной параллельной ветви, рис. 1, б) [Л. 6].

Структура общей схемы замещения, одного Π -звена: продольная цепочка — последовательное соединение $L - r$; поперечная цепочка — последовательное соединение $C - R$. Входная поперечная цепочка — последовательное соединение $C_{\phi} - R$ — участвует только в формировании фронта падающей волны на вход Π -звена. Параметры L и C определялись исходя из известной частоты собственных колебаний f_c обмотки. Суммарные потери $r + R$ определялись по добротности Q обмотки якоря на частоте собственных колебаний f_c , равной первой резонансной частоте f_{p_1} , по формуле:

$$r + R = \frac{\omega_{p_1} L}{Q}, \quad (3)$$

где $\omega_{p_1} = 2\pi f_{p_1}$ — угловая частота собственных колебаний.

Добротность Q обмотки якоря определялась как для последовательного колебательного контура по отношению напряжения на изолированном конце к напряжению в начале обмотки для синусоидального режима при снятии частотной характеристики (рис. 4), то есть по формуле:

$$Q = \frac{U_k}{U_n}, \quad (4)$$

Частотная характеристика обмотки якоря, представляющая при этом зависимость вида

$$\frac{U_k}{U_n} = Q = F(f), \quad (5)$$

подобна резонансной кривой эквивалентного последовательного колебательного контура с сосредоточенными параметрами в области резонансной частоты f_{p_1} (пунктирная кривая, рис. 4).

Волновой параметр R определялся как потери несовершенного конденсатора при последовательной схеме замещения $C - R$ с учетом экспериментально снятой частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ изоляции от частоты.

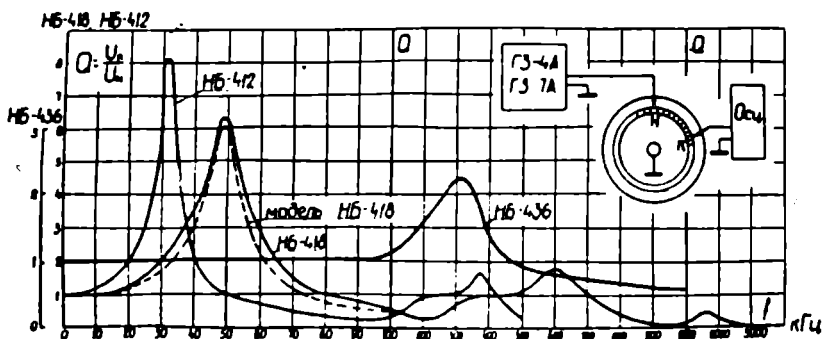


Рис. 4

Расчет всех волновых параметров производился при одной частоте собственных колебаний исследуемой обмотки, равной первой резонансной f_{p1} , так как добротность обмотки якоря на второй f_{p2} и последующих частотах собственных колебаний гораздо ниже, чем на первой. Кроме того, сами частоты f_{p2} и выше на порядок больше, чем f_{p1} (рис. 4).

Фронтальная (входная) емкость $C_{\text{ф}}$ определялась экспериментально методом замещения обмотки якоря емкостью, воспроизводящей при неизменных параметрах разрядной цепи ГИНа фронт падающей волны. Величина этой емкости составляет около 30% полной емкости относительно корпуса петлевой обмотки якоря с уравнительными соединениями.

Удовлетворительное совпадение в области первой резонансной частоты f_{p1} частотных характеристик обмотки якоря и ее физической модели (например, для обмотки якоря тягового двигателя МБ-418, рис. 4), построенной по волновым параметрам, а также удовлетворительные результаты математического моделирования на АВМ волновых напряжений по общей схеме замещения дают основание ут-

верждать, что обмотка якоря при испытании изоляции методом бегущей волны воспринимается как последовательный колебательный контур с потерями.

Сравнение результатов моделирования распределения волновых напряжений вдоль обмотки якоря по цепной схеме замещения с учетом и без учета в явной форме взаимных индуктивных связей M секций, лежащих в общих пазах, показывает, что неучет индуктивных связей M приводит к неверному воспроизведению формы и характера распределения продольных волновых напряжений $U_{м.в}$ [Л. 6]. В частности, приводит к неправильно формированию первых двух пиков междувитковых напряжений: отсутствует индуктированный пик $U_{м.в}$ и колебательная составляющая этих напряжений значительно искажена: не наблюдается гармонических, затухающих колебаний.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕТЛЕВОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МЕТОДОМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Цель исследований — выяснение возможности повышения чувствительности индикации при обнаружении дефектов изоляции ([Л. 7—10]).

Анализировалось поле трех частей якоря: пазовая, лобовая части и над выводами витков у петушков коллектора. Исследование импульсного магнитного поля производилось с помощью миниатюрного индукционного датчика с шихтованным магнитопроводом, имеющим небольшой воздушный зазор порядка 0,5 мм, и электронного осциллографа.

Общая картина импульсного магнитного поля одного типичного участка обмотки якоря НБ-418К, обобщенная на другие типы якорей, приведена на рис. 5 [Л. 7, 8].

Импульсное магнитное поле наиболее интенсивно над теми пазами, в которых лежат секции с максимальными междувитковыми напряжениями ($x = 1/2$ и $3/4$, кривая 1, рис. 5). Результирующее, суммарное поле каждого паза определяется в основном полем верхней и нижней сторон двух секций, лежащих в одном пазу, так как направления движения волн по этим секциям одинаковые. Исключение составляет поле среднего паза ($x = 1/2$) типичного участка, по виткам секции которого волны движутся встречно от концов рассматриваемого участка (кривая 1, рис. 5). Нулевые уровни импульсного магнитного поля между соседними

типичными участками объясняются противоположным направлением движения волны по этим участкам.

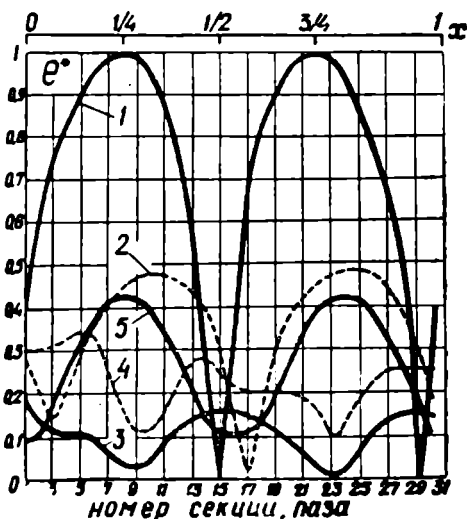


Рис. 5

Подобная картина импульсного поля имеет место и над лобовой частью обмотки якоря (кривая 2, рис. 5). Однако поле лобовой части более сложно, так как оно определяется не только продольным током в исследуемой секции, но и полем рассеяния соответствующей пазовой части, на уровне которой расположен индукционный датчик. Поэтому максимумы и минимумы уровней импульсного магнитного поля лобовой части (кривая 2) несколько смещены (примерно на две секции) относительно соответствующих уровней пазовой части (кривая 1) обмотки якоря. Плотное прилегание соседних секций друг к другу обеспечивает довольно высокий уровень импульсного поля над лобовой частью, несмотря на отсутствие железа (примерно 50% от уровня поля пазовой части, кривые 1, 2, рис. 5). Над выводами витков у петушков коллектора импульсное магнитное поле определяется в основном полем рассеяния соответствующей пазовой части обмотки якоря, так как собственное результирующее поле исследуемой секции слабое из-за значительного удаления друг от друга выводов витков. Конструктивно выводы витков смещены относительно пазовых частей секции

на полшага по пазам, поэтому максимумы и минимумы уровней импульсного магнитного поля над выводами витков у петушков коллектора (кривая 3, рис. 5) смещены на полшага по пазам ($x = 1/4$) по отношению к соответствующим уровням поля пазовой части обмотки якоря (кривая 1). Таким образом, над выводами витков секций с максимальными междувитковыми напряжениями ($x = 1/4$ и $3/4$, рис. 1 и 2) имеют место минимальные, практически нулевые уровни импульсного магнитного поля бездефектной обмотки якоря (кривая 3, рис. 5).

Витковое замыкание в секции с максимальными $U_{м.в.}$ вызывало резкое увеличение уровня импульсного магнитного поля над выводами ее витков (кривая 5, рис. 5). То есть, в данном случае проявляется только поле короткозамкнутого витка, а не результат его размагничивающего действия, имеющий место над пазовой и лобовой частями обмотки якоря. Этот факт позволяет реализовать довольно высокую чувствительность к витковым замыканиям через большие переходные сопротивления. Действительно, поле над пазовой и лобовой частями несколько ослабляется из-за размагничивающего действия тока в короткозамкнутом витке (для лобовой части, кривая 4, рис. 5). Причем, степень этого изменения (уменьшения) определяется полем бездефектной обмотки якоря и величиной переходного сопротивления R_p в месте дефекта изоляции.

Над выводами витков у петушков коллектора степень изменения (увеличения) поля определяется только величиной переходного сопротивления R_p при одинаковых $U_{м.в.}$.

Автором разработан принципиально новый способ измерения уровней импульсных магнитных полей [Л. 7], сущность которого заключается в следующем. Колебательные затухающие импульсы э. д. с., наведенные в индукционный датчик из объекта импульсных испытаний, преобразуются в апериодические с одним переходом напряжения через нуль и со значительно расширенной во времени отрицательной частью путем подачи исходной э. д. с. непосредственно на переход эмиттер-база транзистора (р—п—р) и измеряют отрицательную часть преобразованных импульсов напряжения. Довольно низкое динамическое сопротивление перехода эмиттер-база транзистора демпфирует колебания э. д. с. в датчике и резко уменьшает амплитуду отрицательной ее части, обеспечивая отстройку от электростатической составляющей измеряемого импульсного поля. Значительное расшире-

ние во времени отрицательной части преобразованных импульсов объясняется свойством вторичной обмотки трансформатора (в данном случае индукционного датчика) не содержать постоянной составляющей трансформируемого напряжения при любой нагрузке. То есть как для исходной формы э. д. с. e в датчике, так и для преобразованных импульсов $U_{\text{вх}}$ должно соблюдаться равенство площадей над и под осью времени, или

$$\int_0^{\infty} e \, dt = 0, \quad \int_0^{\infty} U_{\text{вх}} \, dt = 0. \quad (6)$$

На коллекторной нагрузке (микроамперметр магнитоэлектрической системы) транзистора, работающего в режиме насыщенного ключа, образуются импульсы, длительность которых соответствует длительности отрицательной части преобразованных импульсов $U_{\text{вх}}$. С увеличением уровня измеряемого импульсного магнитного поля увеличивается только длительность выходных импульсов $U_{\text{вых}}$.

IV. НОВЫЕ МЕТОДЫ ИНДИКАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ МЕСТ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ

1. Способ обнаружения виткового замыкания в обмотках якорей [Л. 9, 10] заключается в следующем. Импульсное напряжение от ГИНа подается на коллектор относительно корпуса с помощью высоковольтного электрода. Индукционный датчик индикатора фиксируется над лобовой частью секции, отстоящей от условной первой, непосредственно на которую подано импульсное напряжение по коллектору, на полшага по пазам ($x=1/4$ или $3/4$). Воздушным зазором магнитопровода датчик ориентируется вдоль витков. Проворачивая якорь, установленный на козлах, при неизменной ориентации высоковольтного электрода и индукционного датчика друг относительно друга и относительно якоря, наблюдают за показаниями индикатора.

Максимальные и неизменные при провороте якоря на 360° показания индикатора соответствуют отсутствию виткового замыкания в испытываемой обмотке. Постоянство показаний индикатора объясняется тем, что любая секция, находясь под датчиком, характеризуется одним и тем же электромагнитным состоянием: неизменными величинами испы-

тательных напряжений и постоянным уровнем импульсного магнитного поля.

Витковое замыкание вызывает резкие и закономерно повторяющиеся изменения показаний индикатора при провороте якоря на 360° . Резкое уменьшение показаний индикатора соответствует прохождению под датчиком дефектной секции или секций, непосредственно соединенных с нею уравнивателями. Действительно дефектную секцию характеризуют большие перепады между минимальными и максимальными показаниями индикатора, чем для секций, связанных с нею уравнивателями.

2. Способ обнаружения виткового замыкания в обмотках якорей по [Л. 7, 8] обеспечивает более высокую чувствительность к дефектам витковой изоляции с большим переходным сопротивлением.

Методика обнаружения дефектной секции подобна описанной выше. Разница заключается в том, что датчик фиксируется над выводами витков у петушков коллектора и при провороте якоря на 360° общая картина изменения показаний индикатора обратная: бездефектной обмотке соответствуют минимальные (нулевые) показания, а дефектная секция и секции, связанные с нею уравнивателями, воспринимаются по резкому увеличению показаний индикатора.

3. Способ обнаружения места (точки) пробоя изоляции на корпус обмоток якорей [Л. 11] заключается в следующем. Закорачиваются между собой все коллекторные пластины испытываемого якоря. Импульсное напряжение от ГИНа подается на коллектор относительно корпуса. Индукционный датчик индикатора фиксируется над выводами витков произвольной секции у петушков коллектора.

При закорачивании между собою всех коллекторных пластин импульсный ток пробоя протекает к месту пробоя только по одному витку с дефектной корпусной изоляцией. Поэтому, проворачивая якорь на 360° , находят по максимальным показаниям индикатора секцию, расположенную под индукционным датчиком, которая является дефектной.

Далее, индукционный датчик устанавливается над пазом с дефектной секцией, найденным по верхней ее стороне. Перемещая датчик вдоль паза, по резкому изменению показаний индикатора, обусловленному изменением направления тока пробоя, находят место (точку) пробоя.

Аналогично обнаруживается место пробоя изоляции коллектора на корпус. В этом случае индукционный датчик перемещается вдоль шунта, идя от высоковольтного электрода.

V. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБНАРУЖЕНИЕ МЕСТ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ В ВОЛНОВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЕЯ

Физическая сущность волновых процессов в волновых и петлевых обмотках якорей в основных чертах одна и та же.

Однако в силу схемного и конструктивного отличия двух основных видов обмоток якорей машин постоянного тока в волновых процессах и при обнаружении мест дефектов изоляции в волновой обмотке имеют место специфические моменты.

В волновой обмотке не имеет место шунтирующее влияние секций друг на друга, так как отсутствуют уравнивательные соединения. Поэтому для этого типа обмоток якорей можно обеспечить более высокую чувствительность к дефектам типа виткового замыкания, а определять витковое замыкание здесь можно однозначно, не прибегая к методам сравнения.

Индикацию и обнаружение мест дефектов витковой и корпусной изоляции в волновой обмотке якоря можно успешно производить, пользуясь теми же способами [Л. 9, 10, 11], которые применимы к петлевым обмоткам с уравнивательными соединениями.

Однако при обнаружении в волновой обмотке якоря дефекта типа виткового замыкания индукционный датчик индикатора фиксируется над задней лобовой частью, но не над передней и не над выводами витков у петушков коллектора, как для петлевых обмоток якорей [Л. 7, 8]. Необходимость в этом диктуется тем, что короткозамкнутый контур, образующийся при витковом замыкании в многовитковых катушках волновых обмоток, располагается в передней лобовой части под выводами катушек, а, следовательно, чувствительность в этой зоне гораздо ниже.

VI. НОВЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИНДИКАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ МЕСТ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОБМОТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Устройство для обнаружения места (точки) виткового замыкания в секциях разрезного типа обмоток электрических машин, например, якорей [Л. 12, 13] состоит из генератора импульсных напряжений, создающего на объекте испытания

апериодические импульсы с крутым фронтом и частотой следования импульсов 50 имп/с, которые подаются на каждую пару соседних витков проверяемой секции. Индукционный датчик выполнен в виде двух индуктивных катушек, жестко связанных между собой, равномерно намотанных каждая на ферритовом кольце с воздушным зазором, соединенных между собой согласно и расположенных параллельно боковым граням по обе стороны контролируемой секции.

Основные преимущества данного устройства по сравнению с известными следующие: показания индикатора не зависят от нестабильности горения дуги в месте пробоя витковой изоляции; не требуется экранирования датчика и всей измерительной схемы индикатора; показания индикатора практически не зависят от помех, создаваемых в основном электрической дугой в месте дефекта.

2. Сущность способа обнаружения (индикации) виткового замыкания в катушках с малым числом витков (типа полюсных катушек, обмоток статоров вентильного и асинхронного тяговых двигателей) [Л. 14] состоит в формировании на испытываемой катушке, непосредственно подключаемой на выход ГИНа, апериодических импульсов с одним переходом напряжения через нуль, длительность отрицательной нерабочей части которых значительно больше длительности положительной рабочей части, и осуществлении индикации по изменению отрицательной нерабочей части.

3. Обнаружение места (точки) виткового замыкания в однослойных катушках типа полюсных катушек тяговых двигателей осуществляется следующим образом [Л. 15].

Исследуют импульсное магнитное поле испытываемой катушки. Короткозамкнутый контур обнаруживается по его размагничивающему действию (как обычно при известных способах). Далее, ориентируясь датчик воздушным зазором магнитопровода поперек витков проверяемой катушки, перемещают его по периметру короткозамкнутого контура и по резкому увеличению показаний индикатора находят место (точку) виткового замыкания. В месте дефекта витковой изоляции ток меняет свое пространственное направление: протекает поперек витков, то есть переходит с одного витка на другой. Причем, направления основного разрядного тока ГИНа и тока в короткозамкнутом контуре в месте (точке) виткового замыкания одинаковые. Импульсное магнитное поле этих токов измеряется индикатором.

4. Появляющиеся в настоящее время новые виды тяговых

двигателей электровозов, например, такие как вентильный тяговый двигатель, имеющие обмотку неявнополюсного ротора в основном аналогичную соответствующей обмотке синхронной электрической машины, требуют разработки новых методов обнаружения дефектов изоляции в силу существенных с точки зрения индикации конструктивных особенностей исполнения обмотки ротора, обусловленных наличием короткозамкнутой демпферной обмотки.

В реферируемой работе описывается новый способ обнаружения виткового замыкания и пробоя изоляции на корпус в обмотках неявнополюсных роторов (вентильного тягового двигателя и обычных синхронных машин). Основная физическая сущность метода заключается в создании при разряде ГИНа на обмотку ротора с заземленным концом сквозного тока [Л. 2], имеющего вдоль всей обмотки неизменную форму, которая определяется сосредоточенными параметрами разрядной цепи ГИНа: емкостью в ударе (разрядной емкостью) и полной индуктивностью обмотки ротора, и измерении импульсного поля, созданного именно сквозным током, являющимся неизменной по форме составляющей продольного волнового тока. Благодаря этому обеспечивается постоянная чувствительность к витковым замыканиям вдоль всей обмотки ротора, в том числе и по высоте паза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа литературных данных и опыта работы ряда известных испытательных устройств установлено, что применительно к обмоткам электрических машин постоянного тока, особенно к обмоткам якорей, известные испытательные устройства малоэффективны с точки зрения индикации и обнаружения места дефекта витковой и корпусной изоляции.

Из известных методов испытания изоляции наиболее эффективным и практичным по отношению к обмоткам якорей следует считать метод бегущей волны. Однако тех сведений о волновых процессах в якорях, которыми располагал автор до написания данной работы, явно было недостаточно для разработки эффективных методов индикации и обнаружения мест дефектов изоляции этих обмоток. Поэтому были проведены исследования волновых процессов в обмотках якорей, результаты которых приведены ниже.

2. Установлено, что применительно к обмоткам якорей

машин постоянного тока объяснение колебательных перенапряжений на изолированном конце обмотки и формирования первых двух пиков междувитковых напряжений не удается дать, пользуясь законом отражения, заимствованным из теории волновых процессов в длинных линиях.

3. В работе показано, что недостаточная для практики импульсных испытаний чувствительность к витковым замыканиям через большие переходные сопротивления известных методов индикации, основанных на изменении продольных волновых напряжений в испытываемой обмотке, объясняется шунтирующим действием друг на друга секций, непосредственно соединенных уравнивателями.

4. Путем сопоставления частотных характеристик обмотки якоря и ее физической модели показано, что колебательные перенапряжения на изолированном конце обмотки якоря можно объяснить последовательным резонансом в ней.

5. Максимальные междувитковые напряжения составляют 5—7% от амплитуды падающей волны с максимально возможной крутизной фронта и относятся к секциям в серединах параллельных ветвей.

В начальных секциях (по ходу движения волны) первый пик междувитковых напряжений создан за счет деформации фронта бегущей волны, а второй — индуктированной секцией, лежащей в общем пазу с рассматриваемой. При приближении к концу обмотки якоря эти пики меняются местами: первый — индуктирован, а второй — создан фронтом бегущей волны.

6. Путем математического моделирования на АВМ волнового процесса подтверждена физика формирования волновых напряжений в обмотке якоря при испытании изоляции методом бегущей волны, выявленная при экспериментальном исследовании.

Предложен новый способ определения коэффициента индуктивной связи секций по отношению амплитуд индуктированного и индуктирующего пиков междувитковых напряжений.

7. В результате исследования импульсного магнитного поля обмотки якоря при испытании изоляции методом бегущей волны установлено, что обеспечить более эффективную индикацию витковых замыканий, чем эффективность известных методов и устройств, можно, измеряя уровни импульсного магнитного поля над лобовой частью или над выводами витков у петушков коллектора.

Разработан новый способ измерения уровней импульсного магнитного поля, основанный на преобразовании исходных колебательных затухающих импульсов э. д. с. в индукционном датчике в аperiodические импульсы со значительно расширенной отрицательной полуволной и измерении последней. Этот способ используется во всех новых практических разработках реферируемой работы, описываемых ниже.

8. На основе результатов исследования волновых процессов в обмотках якорей разработан ряд новых способов, основанных на измерении импульсного поля объекта испытания и позволяющих точно обнаружить дефект изоляции типа виткового замыкания, конкретное место (точку) пробоя корпусной изоляции пазовой части или коллектора и обрыв цепи.

9. Разработано новое устройство для определения места (точки) виткового замыкания в секциях разрезного типа, состоящее из ГИНа, индукционного датчика в виде двух катушек на ферритовых кольцах с воздушными зазорами и ключевой схемы индикатора. Катушки датчика располагаются по обе стороны испытываемой секции.

10. Предложен новый способ индикации дефекта витковой изоляции в катушках с малым числом витков (типа полюсных катушек тяговых двигателей), основанный на изменении отрицательной части аperiodических импульсов испытательного напряжения. Новый способ обнаружения места (точки) виткового замыкания в однослойных катушках основан на исследовании импульсного магнитного поля катушки, испытываемой аperiodическими импульсами и измерении поля точки замыкания между витками.

11. Применительно к обмотке неявнополюсного ротора с демпферной обмоткой вентильного тягового двигателя разработан принципиально новый способ обнаружения дефектов витковой и корпусной изоляции по измерению импульсного магнитного поля, созданного только одной составляющей продольного волнового тока — сквозным током, неизменным по форме вдоль всей обмотки ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Н. А. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.

2. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Ч. III. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

3. Каганов З. Г. Волновые напряжения в электрических машинах. М., «Энергия», 1970.

4. Испытания витковой изоляции электрических машин. Под общ. ред. Л. Г. Мамиконянца. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

5. Бессуднов Е. П., Дроздов А. Д. Волновые напряжения в обмотках якорей с уравнительными соединениями тяговых двигателей электровозов при испытаниях методом бегущей волны. — «Электромеханика», 1972, № 6.

6. Бессуднов Е. П. Математическое моделирование волновых напряжений в обмотках якорей с уравнительными соединениями электрических машин постоянного тока. — «Электромеханика», 1972, № 2.

7. Бессуднов Е. П. Способ обнаружения витковых замыканий и замыканий на корпус обмоток якорей коллекторных электрических машин с уравнительными соединениями. Авт. свид. № 297008. Бюллетень изобретений, 1971, № 9.

8. Бессуднов Е. П. Индикация витковых замыканий в обмотках якорей с уравнительными соединениями электрических машин постоянного тока. — «Электричество», 1971, № 5

9. Бессуднов Е. П., Ляшко В. А. Способ обнаружения витковых замыканий и замыканий на корпус обмоток якорей коллекторных электрических машин с уравнительными соединениями. Авт. свид. № 205941. Бюллетень изобретений, 1967, № 24.

10. Бессуднов Е. П., Ляшко В. А. Обнаружение витковых замыканий и замыканий на корпус обмоток якорей тяговых двигателей электровозов. — В сб. научн. трудов: «Электро-возостроение», т. 1, Новочеркасск, 1969.

11. Бессуднов Е. П., Топалов О. Н. Способ обнаружения места пробоя изоляции на корпус обмоток якорей коллекторных электрических машин с уравнительными соединениями. Авт. свид. № 291170. Бюллетень изобретений, 1971, № 3.

12. Бессуднов Е. П., Топалов О. Н. Устройство для определения места виткового замыкания. Авт. свид. № 213174. Бюллетень изобретений, 1968, № 10.

13. Бессуднов Е. П., Топалов О. Н. Устройство и метод для определения места виткового замыкания в разрезных

секциях и стержнях обмоток электрических машин. — В сб. научн. трудов: «Электровозостроение», т. XI, Новочеркасск, 1969.

14. **Бессуднов Е. П., Топалов О. Н.** Способ обнаружения виткового замыкания в катушках с малым числом витков. Авт. свид. № 291169. Бюллетень изобретений, 1971, № 3.

15. **Бессуднов Е. П., Топалов О. Н.** Способ определения места виткового замыкания в катушках. Авт. свид. № 241532. Бюллетень изобретений, 1969, № 14.

Разработанные в диссертации способы и устройства внедрены и успешно используются на ряде заводов страны: Новочеркасском и Тбилисском электровозостроительных заводах; Московском электромеханическом ремонтном заводе; Новосибирском, Челябинском, Свердловском, Улан-Удэнском, Запорожском электровозоремонтных заводах, Рижском электромашиностроительном заводе и др.

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is extremely faint and illegible due to low contrast and significant noise. Some faint characters and lines are visible, but they do not form a readable message.

149 2 7A