

СССР — МПС

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

инженер **БЕЗРУЧЕНКО В. Н.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕТЛЕВЫХ
И ЛЯГУШЕЧЬИХ ОБМОТОК ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

(специальность № 435, электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта)

А В Т О Р Е Ф Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск, 1968 год

36422

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена на Днепропетровском электровозостроительном заводе и в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент К. Г. КУЧМА.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Е. М. СИНЕЛЬНИКОВ, кандидат технических наук, доцент
Г. Я. КОРЕПАНОВ.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт электровозостроения.

Автореферат разослан «18 июля» 1968 г.

Защита диссертации состоится «6 сентября» 1968 г.
на заседании Совета ~~Днепропетровского института инженеров~~
жел

г. Днепропетровс

С диссертацией мо:

Ученый секретарь со:

омедант

НТБ
ДНУЖТ

СССР — МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

инженер БЕЗРУЧЕНКО В. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕТЛЕВЫХ
И ЛЯГУШЕЧЬИХ ОБМОТОК ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

(специальность № 435, электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск, 1968 год

3642a

НТБ
ДНУЖТ

Ленинский план электрификации нашей страны тесно связан с созданием развитой электротехнической промышленности, которая в исторически короткие сроки освоила сложное многономенклатурное производство электрических машин, трансформаторов, аппаратуры и т. п.

Советская электропромышленность обеспечила страну всем необходимым электрооборудованием для развития народного хозяйства на основе электрификации, в том числе и реконструкцию железнодорожного транспорта, ведущим звеном которой является внедрение электрической тяги. В свою очередь неуклонный подъем железнодорожного транспорта способствовал развитию всего народного хозяйства страны.

Путь, пройденный железнодорожным транспортом за годы Советской власти—это путь непрерывного технического прогресса, в результате которого около 95% грузооборота осуществляется сейчас электровозами, а также тепловозами с электропередачей.

Еще большие задачи по развитию электротехнической промышленности, в том числе по обеспечению ею выпуска передового электроподвижного состава для железнодорожного транспорта, поставлены в программе КПСС и в решениях XXIII съезда партии. В этих исторических документах выдвигаются требования об увеличении мощности и повышении надежности работы регулируемых электроприводов вообще и, в частности, тяговых электродвигателей электровозов, что поставило перед отраслью электровозостроения ряд неотложных задач.

Известно, что основную определяющую роль в надежности всего электровоза в целом играют тяговые электродвигатели, в качестве которых в основном применяются электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, обладающие наилучшей регулировочной способностью.

Отечественное тяговое электромашиностроение началось с конца двадцатых — начала тридцатых годов разработкой серии тяговых электродвигателей. При этом, наряду с решением ряда других вопросов, пришлось уделить особое внимание повышению их коммутационной надежности.

Необходимость обеспечения все возрастающего объема перевозок требовала повышения скорости движения поездов и их весовых норм, а это, в свою очередь, ставило новые задачи по освоению производства электровозов и тяговых двигателей повышенной мощности с высокими технико-экономическими показателями.

К числу вопросов, возникающих в связи с ростом мощности и стремлением одновременно к лучшему использованию активных материалов, относится также весьма актуальный вопрос о применении для данного типа машин тех или иных обмоток якорей.

Недостаточно обоснованное применение того или иного типа обмоток может привести к излишнему усложнению машины, снижению ее технико-экономических показателей и, что самое главное, к снижению надежности в эксплуатации. Необходимость повышения надежности работы электрических машин обуславливает актуальность исследования свойств различных типов их обмоток.

Первые отечественные электровозы были оборудованы тяговыми электродвигателями с волновыми обмотками.

В послевоенный период на электровозах начали применяться электродвигатели с петлевыми обмотками, в настоящее время двигатели с такими обмотками применяются на всех выпускаемых электровозах. Существует мнение, что в машинах большой мощности целесообразно применять смешанные (лягушечьи) обмотки.

Настоящая диссертационная работа посвящена вопросу сопоставления на основе экспериментальных и теоретических исследований электромашины с лягушечьей и петлевой обмотками мощностью до 1000 квт с целью выявления целесообразности применения той или иной обмотки.

Экспериментальная часть работы выполнена на испытательных стендах Днепропетровского электровозостроительного завода. Работа включает в себя пять основных разделов глав.

Глава I посвящена рассмотрению состояния вопроса и предпосылок для сопоставления свойств различных типов якорных обмоток.

Успехи отечественного электромашиностроения достигнуты на основе многочисленных научных исследований, выполненных по общим и специальным вопросам М. П. Костенко, В. Т. Касьяновым, А. Е. Алексеевым, Е. М. Синельниковым,

И. М. Постниковым и другими, а в области тяговых электродвигателей—А. Е. Алексеевым, А. Б. Иоффе, М. Д. Находкиным, В. С. Хвостовым, М. Ф. Карасевым, В. Е. Скобелевым и другими.

В последние 10—15 лет большую актуальность приобрел вопрос о сложных обмотках, что потребовало расширения их теоретического и экспериментального исследования, которому посвятили свои работы П. М. Ипатов, В. В. Фетисов, И. Н. Рабинович, М. Н. Курочкин, В. П. Толкунов и др.

Наряду с этими работами проведено некоторое количество работ и по изучению коммутационных свойств различных типов якорных обмоток, однако определенных рекомендаций о применении тех или иных типов обмоток (это в первую очередь относится к петлевым или лягушечьим обмоткам) в крупных машинах постоянного тока не дано, в связи с чем существуют разные мнения и предложения по этому вопросу.

Вопрос о сравнительных преимуществах и недостатках лягушечьих и петлевых обмоток с точки зрения электромагнитных, коммутационных, конструктивных, технологических, экономических и ремонтных факторов весьма сложен. Из всех перечисленных факторов, повидимому, важнейшим является коммутационный, определяющий надежность работы машины. С этой точки зрения лягушечья обмотка, обладающая полным числом уравнивательных соединений, казалось бы имеет бесспорные преимущества, однако ее «уравниватели» обладают значительной индуктивностью. Устойчивая же работа машины во многом зависит от эффективности уравнивательных соединений. Проведение сравнительных исследований у машин большой мощности с различными типами обмоток связано с рядом трудностей, в том числе производственного и материального характеров. В то же время актуальность этого вопроса очевидна, о чем свидетельствует большой интерес, проявляемый к нему со стороны проектно-конструкторских организаций, вынужденных часто принимать решения по выбору типов обмоток без достаточных обоснований.

Поэтому нами была поставлена задача провести возможно более полное сравнительное исследование свойств простой петлевой и лягушечьей обмоток в машинах большой мощности с целью выработки рекомендаций по их применению у крупных электромашин постоянного тока, к категории которых относятся и тяговые электродвигатели.

Экспериментальные исследования были выполнены на компенсированной машине МПЭ12—34/6, 743 квт, 900 в, 825 а, 1000 об/мин, для которой были изготовлены соответствующим образом препарированные два якоря: с петлевой и лягушечьей обмотками.

Это позволило провести исследования в одной и той же магнитной системе, с одним и тем же щеточным аппаратом при двух вариантах якорей, отличающихся только типами обмоток.

В главе II освещаются современные представления о критериях коммутационной надежности обмоток различных типов и приводятся некоторые полученные нами экспериментальные данные, характеризующие степень соответствия опыту этих критериев.

Как известно, коммутация представляет собой совокупность сложных процессов, поэтому точный и строгий анализ ее представляет большие трудности. Классическая теория прямолинейной коммутации Арнольда не смогла ответить на целый ряд вопросов, а предложенный Рихтером критерий коммутационной надежности, как показали работы многих исследователей, не отвечал действительности. Большое количество выполненных автором опытов по осциллографированию токов коммутации в якорях с обмотками разных типов показало, что в коммутируемых секциях кривые токов не похожи на кривые соответствующие классической теории прямолинейной коммутации.

В. С. Хвостов на основании условий принятых Дрейфусом о равенстве отданной и полученной секцией энергии в процессе коммутации предложил оценивать качество коммутации по уровню энергии, выделяющейся на 1 см длины края щетки. Для проверки этого критерия автором был проведен опыт, при котором из бракетов исследуемой машины последовательно удалялось по одной щетке и снимались зоны безыскровой работы при оставшихся щетках на якорях с обоими типами обмоток. Этот эксперимент позволил перейти к величине плотности тока под щеткой и установить, что существует оптимальная величина плотности тока, при которой ширина зоны безыскровой работы максимальна. У машины МПЭ12—34/6 по длине коллектора в бракете установлено 6 щеток. Оказалось, что максимальная ширина зоны безыскровой работы обеспечивается при 5-и щетках, при 6-и и 4-х щетках величина зон практически одинакова и на 10—25%

меньше, чем при 5-и щетках, а дальнейшее уменьшение числа щеток приводит к сужению зоны. Такое явление может быть объяснено воздействием взаимосвязанных факторов — плотности тока и ростом температуры контакта — на количество контактных точек и образование устойчивого контакта.

В диссертации приведены осциллограммы, иллюстрирующие протекание коммутационного процесса со ступенью малого тока. При этом оказывается, что не всегда ее отсутствие приводит к искрению на коллекторе. Повидимому, необходим также учет особенностей конкретных якорных обмоток и неидентичности условий коммутации секций, что, совместно с исследованием свойств щеточного контакта, нашло свое выражение в работах М. Ф. Карасева.

Исходя из аналитических основ теории коммутации и придавая большое значение индивидуальным свойствам различных обмоток, Дрейфус разработал теорию коммутации, из которой следует, что можно не делать чрезмерно точных предположений относительно формы кривой переходного тока, а принимать за основу среднепрямойную коммутацию. Однако в работах Дрейфуса отсутствуют какие бы то ни было экспериментальные материалы, подтверждающие правильность этой теории. Экспериментальные исследования, проведенные автором, подтвердили ее справедливость.

При исследовании вопроса об уравнивательных соединениях в простых петлевых обмотках установлено, что для обеспечения безыскровой работы при случайном отрыве края щетки от коллектора необходимо располагать безындуктивные уравниватели со стороны коллектора. При этом полное число уравнивателей не всегда является обязательным: при четырех, как у исследуемой машины, коллекторных пластинах на паз достаточно иметь два уравнивателя на паз, выполненных через одну коллекторную пластину так, чтобы общая пластина для крайних секций смежных пазов была без уравнивателя. Для проверки роли уравнивательных соединений были сняты зоны безыскровой работы на одном и том же якоре до установки уравнивателей и после их установки. В последнем случае зона безыскровой работы при различных нагрузках оказалась в 2,5—5 раз шире.

В главе III приведено описание экспериментальных исследований коммутационных свойств лягушечьей и петлевой обмоток.

У обоих якорей (с петлевой и лягушечьей обмотками) были препарированы головки секций одного паза, в разрезы впаяны манганиновые шунты, от которых изолированные проводники через просверленное в валу якоря отверстие выводились из машины и присоединялись к кольцам специального токосъемника. Аналогично выводились и измерительные провода, присоединенные к двум соседним коллекторным пластинам для осциллографирования межламельного напряжения. Падение напряжения на шунтах составило 20—25 мВ, т. е. величину, которая не вносила погрешностей в измерения.

При проведении экспериментов выяснилось, что для осциллографирования токов коммутлируемых секций не могут применяться шлейфовые осциллографы из-за большой инерционности их оптикомеханических систем, что наглядно проиллюстрировано полученными осциллограммами.

Вся экспериментальная часть работы по осциллографированию токов коммутации выполнена при помощи электронного осциллографа С1—20, ждущая развертка которого запускалась от фотодиода, получавшего, в свою очередь, световой импульс через узкую щель в диске, насаженном на вал машины.

Сопоставление зон безыскровой работы якорей с петлевой и лягушечьей обмотками выявило, что они практически идентичны. Зоны снимались со щетками ЭГ—4 и ЭГ—74. При этом оказалось, что у щеток ЭГ—74 наблюдается тенденция к сужению безыскровых зон по сравнению со щетками ЭГ—4.

Осциллограммы токов коммутации у обоих типов обмоток показали, что формы токов коммутации различных секций паза, на первый взгляд, хаотичны, отличаются друг от друга, а щетки все время работают с неравномерной плотностью тока. Однако, как нами установлено, формы кривых токов коммутации не выражают случайные функции, а определяются индуктивностью и взаимоиндуктивностью короткозамкнутых секций в данный промежуток времени, когда состояние контакта щетка-коллектор остается неизменным.

При проведении графического суммирования кривых токов коммутации отдельных секций (какую бы хаотическую форму они не имели) выяснилось, что суммарные кривые токов слоев имеют плавную форму и практически прямолинейны в своей средней части, т. е. в той части, которая соответствует одновременному нахождению в короткозамкнутом состоянии всех секций слоя одного паза. Произведенное ав-

тсром суммирование мгновенных токов в коммутируемых одновременно секциях показало, что скорость изменения этой суммы является постоянной. Таким образом экспериментально подтверждено, что коммутация токов в крупной машине постоянного тока независимо от типа обмотки соответствует разработанной Дрейфусом теории среднепрямойлинейной коммутации и отвечает условию

$$\Sigma \frac{di_k}{dt} = \text{const.}$$

Дальнейший анализ осциллограмм токов коммутации, полученных при различных режимах работы, и проведение их графического суммирования позволили выявить, что при повышении скорости вращения машины происходит относительное увеличение скорости изменения полного тока паза, причем последнее обгоняет повышение скорости вращения. Это явление связано с изменением «эффективной» ширины щетки, которая зависит от скорости вращения. Проведенные при различных скоростях вращения эксперименты позволили построить кривые изменения «эффективной» ширины щетки и скорости (или периода) коммутации тока паза в зависимости от числа оборотов якоря.

Анализ положения на плоскости зигзагообразной суммарной линии токов коммутации Σi_k показал, что результирующий коммутируемый щеткой объем тока может быть или теоретически равен нулю, чего практически ни разу не получено, или отличным от нуля, вызывая дополнительное намагничивающее или размагничивающее действие в междуполосном пространстве.

При осциллографировании процессов коммутации в лягушечей обмотке было обнаружено, что после окончания собственно коммутации возникают колебания тока в секциях обеих составляющих (петлевой и волновой) обмотки. Эти колебания противоположны по характеру у петлевой и волновой секций и изменяются на обратные при изменении режима работы машины (при ее реверсировании или переводе из генераторного режима в двигательный и наоборот). Колебания продолжаются один период с частотой около 570 гц, а их амплитуда достигает примерно половины величины тока параллельной ветви каждой составляющей лягушечей обмотки. Колебания не были вызваны никаким искусственным расстройством коммутации и, в свою очередь, не приводили

к последнему. Эти колебания тока происходят помимо щеток во внутренних контурах, шунтирующих каждую секцию лягушечей обмотки.

Простые петлевые обмотки не имеют таких шунтирующих каждую секцию контуров, поэтому подобные колебания тока помимо щеток у них невозможны.

Глава IV посвящена сравнительному анализу коммутационных свойств лягушечей и петлевой обмоток.

Анализ проводится на основе сопоставления демпфирующих свойств обоих типов обмоток. Секция, заканчивающая коммутацию, магнитно связана с секциями, замкнутыми щетками той же и противоположной полярности. Эта связь может быть охарактеризована взаимоиндуктивностью контуров.

При случайном нарушении коммутации в каждом пазу накапливается какая-то избыточная энергия. Часть этой энергии трансформируясь превращается в тепловую в активном сопротивлении демпфирующих секций. Оставшаяся часть — выделяется под щеткой и может вызывать искрение. Решив ряд уравнений, можно показать, что она равна

$$W_1 = W_0 - W_2 = W_0 \left(1 - \frac{M^2}{L^2}\right) = W_0 (1 - K^2),$$

где W_0 — избыточная энергия, накопленная при нарушении коммутации,

K — энергия, теряемая в демпфирующих секциях,

W_2 — коэффициент связи.

По величине $(1 - K^2)$ можно сравнивать коммутационные свойства сопоставляемых обмоток. Так как коэффициент связи представляет собой отношение взаимоиндуктивности секции к ее индуктивности, то для его определения необходимо найти отношения сумм соответствующих коэффициентов удельной магнитной проводимости.

Определенную сложность при этом представляет то обстоятельство, что должны быть сопоставлены двухслойная петлевая и четырехслойная, состоящая из двух составляющих, лягушечья обмотки. При этом, у последней оказалось необходимым учитывать направление вращения якоря в связи с различной последовательностью коммутации ее секций.

Ввиду неравенства удельных магнитных проводимостей взаимоиндукции обоих составляющих лягушечей обмотки и

необходимости сравнения ее с петлевой, возникла необходимость ввести понятие об «эквивалентном коммутируемом элементе», состоящем из петлевой и волновой секций, оканчивающих коммутацию под одной щеткой. Эквивалентный коммутируемый элемент правомерно сравнивать с секцией простой петлевой обмотки. Представилось возможным определить эквивалентные индуктивность и взаимсиндуктивность эквивалентного коммутируемого элемента лягушечьей обмотки, а, значит, и определить ее коэффициент связи, который можно сравнивать с коэффициентом связи двухслойной петлевой обмотки.

В результате аналитического сопоставления выявлено, что лягушечья обмотка несимметрична в коммутационном отношении при различном направлении вращения, причем у исследуемой машины более благоприятными оказались условия коммутации при направлении вращения по часовой стрелке со стороны коллектора. Этот вывод подтверждается снятыми на нескольких машинах зонами безыскровой работы. Поэтому, в случае проектирования неререверсивных машин с лягушечьими обмотками необходимо предусматривать выполнение такой укладки обмотки, которая обеспечивает максимальный коэффициент связи для данного направления вращения. Петлевая обмотка имеет несколько худшие демпфирующие свойства, чем лягушечья. Сопоставление величины $(1-K^2)$ для обоих направлений лягушечьей обмотки и петлевой обмотки с соответствующими зонами безыскровой работы дало основание полагать, что величина $(1-K^2)$ может служить критерием лишь качественной, но не количественной оценки коммутационной напряженности.

При осциллографировании токов коммутации в лягушечьей обмотке было обнаружено, что после окончания процесса коммутации происходят колебания тока в секциях. При анализе этих колебаний в основу рассмотрения причин их возникновения был положен эквивалентный коммутируемый элемент, по одной стороне петлевой и волновой секций которого лежат в одном пазу, а две другие стороны—влево и вправо от этого паза на расстоянии шага петлевой и шага волновой секций.

Э. д. с. в эквивалентном коммутируемом элементе от внешних полей должна быть равна нулю, но естественно ожидать наличие в шунтирующих рассматриваемую секцию контурах э. д. с. взаимоиндукции в связи с изменением полей

других коммутируемых секций. Ввиду различия в порядке коммутации секций лягушечьей обмотки в зависимости от направления вращения при дальнейшем рассмотрении принято одно (по часовой стрелке) направление вращения. Одновременно во внимание принималось выявленное экспериментально наличие коммутации прямолинейной в среднем. С учетом этих обстоятельств определились направленные встречно э. д. с. взаимоиנדукции в петлевой и волновой секциях эквивалентного коммутируемого элемента. Разность этих э. д. с., вызывающая колебания тока и увеличенная в P раз, т. к. замкнутое на себя кольцо в якоре лягушечьей обмотки состоит из P последовательно соединенных эквивалентных элементов, равна:

$$e_k = p(e_v - e_n) = p(M_{41} + M_{43} - M_{21} - M_{23}) \sum_1^4 \frac{di_k}{dt}$$

Решение дифференциального уравнения после определения параметров цепи показало весьма близкое совпадение значений колебаний тока с данными эксперимента. В тот момент, когда в контуре исчезает э. д. с. взаимоиנדукции, происходит уменьшение тока и обусловленного им магнитного потока, создающего э. д. с. самоиндукции. Процесс продолжается за счет электромагнитной энергии в данных контурах. Магнитный поток в рассматриваемом контуре при этом затухает более медленно, чем ток, т. к. контур может быть представлен как катушка с железным сердечником. Это обуславливает уменьшение тока с постоянной времени, учитывающей динамическую индуктивность.

Колеблющийся ток параллельной ветви может быть представлен, как состоящий из переменной и постоянной составляющих. После того, как переменная составляющая уменьшаясь стала равна нулю, она изменяет свой знак, как за счет магнитной энергии, накопленной в смежных контурах при его спаде, так и за счет коэрцитивной силы.

Такой колебательный процесс мог бы продолжаться еще длительное время постепенно затухая, т. к. по мере удаления от щетки данная секция и шунтирующий ее контур получали бы все меньше импульсы энергии от закончивших коммутацию секций. Однако, через время, равное времени перемещения секции от добавочного полюса к главному, в контур вносится основное магнитное поле машины, в секции индуктируется основная э. д. с. и колебания тока практически

прекращаются. Возрастание, а затем падание тока в цепи связано с потерями энергии, которая превращается в тепло в активном сопротивлении цепи и может быть определена интегрированием переменной составляющей тока параллельной ветви. Эти потери энергии, при прочих равных условиях, увеличивают нагрев секций лягушечьей обмотки по сравнению с петлевой.

В главе V проводятся технико-экономические сопоставления тяговых электродвигателей большой мощности при различных напряжениях и типах обмоток якоря.

Геометрические параметры, весовые и стоимостные показатели тесно связаны с величиной напряжения машины и выбранным типом обмотки. Проведенный анализ показывает, что стоимость изоляции якоря может составлять более 70% стоимости изоляции всей машины, которая, в свою очередь, составляет более 70% стоимости всех материалов. Одновременно установлено, что рост стоимости изоляции якоря может несколько обгонять рост напряжения поэтому изменение стоимости двигателей при различных напряжениях в значительной степени зависит от изменения стоимости изоляции.

Проведенные сопоставления лягушечьей и петлевой обмоток по величине коэффициента заполнения паза, по экспериментальным характеристикам потерь холостого хода и характеристикам холостого хода выявили лучшие соотношения у петлевой обмотки. Ввиду меньшего объема изоляции в пазу петлевой обмотки, при изготовлении якоря с этой обмоткой был выполнен специальный штамп паза якоря, отличный от штампа паза лягушечьей обмотки по высоте.

При сопоставлении стоимости и расхода материалов обеих обмоток учитывалось наличие у петлевой обмотки уравнительных соединений, выполненных в соответствии с данными в работе рекомендациями.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В настоящей работе выполнено теоретическое и, повидимому впервые, экспериментальное сопоставление свойств лягушечьей и петлевой обмоток в магнитной системе одной и той же крупной электрической машины, специально подготовленной для этих целей.

2. Подтверждена для крупных машин постоянного тока разработанная Дрейфусом теория коммутации прямолиней-

ной в среднем, математическим выражением которой является

$$\Sigma \frac{di_k}{dt} = \text{const},$$

где i_k — ток коммутируемой секции.

При этом установлено, что процесс изменения тока в секциях обоих типов сопоставляемых обмоток в период коммутации является нелинейным и детерминированным, определяемым индуктивными связями между секциями, когда состояние контакта щетка — коллектор остается неизменным.

3. Лягушечья обмотка неравноценна в коммутационном отношении при различном направлении вращения, что является отрицательным фактором для тяговых электродвигателей. Однако, у нереверсивных машин с лягушечьими обмотками можно достичь большего коэффициента связи для заданного направления вращения путем соответствующего конструктивного исполнения укладки обмотки. Разработан метод, позволяющий проводить аналитическое сопоставление двухслойных петлевых и четырехслойных лягушечьих обмоток.

Отмечено, что лягушечья обмотка имеет несколько лучшие демпфирующие свойства (большой коэффициент связи) по сравнению с сопоставимой простой петлевой обмоткой. Рекомендации соответствующего раздела настоящей работы могут быть использованы при проектировании новых машин.

4. Установлено, что после окончания процесса собственно коммутации в секциях лягушечьей обмотки возникают колебания тока. Повидимому впервые установлено, что колебания тока происходят помимо щеток во внутренних контурах, шунтирующих каждую секцию обмотки. Они продолжают до момента входа секции в зону поля главных полюсов, а их амплитуда достигает значения около половины тока параллельной ветви каждой составляющей (петлевой или волновой) лягушечьей обмотки. Частота таких колебаний у исследованной машины составляла примерно 570 гц при скорости вращения 1000 об/мин.

Причиной колебаний тока является наличие в шунтирующих данную секцию контурах э. д. с. взаиминдукции в связи с изменением полей других, продолжающих коммутироваться, секций.

5. Выявлено, что у крупных машин постоянного тока существует оптимальная плотность тока в щеточном контакте,

при которой обеспечивается максимальная ширина зоны безыскровой работы. Снижение или повышение плотности тока относительно оптимальной величины приводит к сужению зоны безыскровой работы.

На основании этого для исследованной машины дана рекомендация по уменьшению числа щеток в паре, по сравнению с ранее применявшимся.

6. При повышении скорости вращения машины уменьшается «эффективная» ширина щеток из-за ухудшения их контакта с коллектором, что приводит к увеличению средней скорости изменения тока паза $\sum \frac{di_k}{dt}$, причем это увеличение происходит быстрее повышения скорости вращения.

7. С условием коммутации прямолинейной в среднем связан результирующий коммутируемый объем тока, который, как показали исследования, никогда не равен нулю, вызывая, тем самым, при различных режимах работы намагничивающее или размагничивающее действие в междуполосном пространстве.

8. В машинах с простыми петлевыми обмотками при нечетном числе пазов на пару полюсов и четном числе коллекторных пластин на паз достаточно иметь половинное число уравнивателей, присоединенных через одну коллекторную пластину так, чтобы общая для крайних секций смежных пазов пластина не имела бы уравнивателя.

9. По расходу и стоимости материалов обе сопоставляемые обмотки при напряжении до 1000 в практически равноценны. Однако, как известно, трудоемкость изготовления и ремонта лягушечьих обмоток более высока.

При повышении напряжения разница в стоимости материалов обеих обмоток увеличивается, ухудшая экономические показатели лягушечьей обмотки по сравнению с простой петлевой.

10. Сопоставление коммутационных свойств, технологических и ремонтных особенностей, опыта эксплуатации и экономических показателей позволяют сделать вывод о том, что лягушечьи обмотки не имеют существенных преимуществ перед простыми петлевыми обмотками. Поэтому, лягушечьи обмотки не могут быть рекомендованы для применения в тяговых электродвигателях, а также в других машинах постоянного тока мощностью до 1000 квт.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. **Безрученко В. Н.** Расчет вылетов лобовых частей обмоток якорей коллекторных машин, «Вестник электропромышленности», 1958, № 6.
2. **Безрученко В. Н.** Техничко-экономические показатели тяговых двигателей постоянного тока в зависимости от номинального напряжения, «Электромеханика» 1958, № 8.
3. **Безрученко В. Н.** О выполнении уравнительных соединений, «Электромеханика», 1960, № 10.
4. **Безрученко В. Н., Магидсон В. В.** К вопросу о сравнении лягушечьей и петлевой обмоток в якорях электрических машин постоянного тока, труды ДИИТ, 1966, вып. 66.
5. **Магидсон В. В., Поляков Н. Г., Безрученко В. Н.** Исследование коммутации и определение перегрузочной способности машин постоянного тока в переходных режимах работы, «Электромеханика», 1967, № 7.
6. **Безрученко В. Н.** Некоторые результаты исследований коммутации электромашин постоянного тока, труды ДИИТ, 1968, вып. 77
7. **Безрученко В. Н.** Экспериментальное подтверждение теории коммутации прямолинейной в среднем, «Электромеханика», 1968, № 4.

Днепропетровск, типография завода им. Петровского. 1392—209.
Объем 1 п. л.: 14.VI-1968 г. БТ 01728.