

СЕКЦИЯ 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ВЛИЯНИЕ УПРОЩЕНИЙ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

С.А. Кузнецов

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Расчет внутренней изоляции силовых трансформаторов представляет собой сопоставление расчетных воздействий с допустимыми значениями напряженности электрического поля. В процессе проектирования уровень расчетных воздействий определяют с помощью специализированного программного обеспечения, а допустимые значения - по методикам, основанным на экспериментальном исследовании электрической прочности изоляции [1].

В статье описаны упрощения расчетных моделей главной изоляции силовых трансформаторов, применяемые при расчете её электрической прочности и влияние данных упрощений на точность расчета.

Внутреннюю изоляцию силовых трансформаторов можно условно классифицировать следующим образом: главная изоляция обмоток; изоляция снаружи обмоток до бака; продольная изоляция обмоток; изоляция отводов; изоляция установки ввода.

Проектирование изоляции включает в себя множество итерационных расчетов и представляет собой весьма трудоемкий процесс. Поэтому важным вопросом при проектировании является применение таких упрощений расчетных моделей, которые позволят минимизировать затраты на её создание, но при этом будут обеспечивать необходимую точность.

При проведении расчетов главной изоляции важным является вопрос применения расчетных моделей, обеспечивающих требуемую точность расчета электрического поля с погрешностью не более 5%. Исследования электрических полей, проведенные в [1,2], показали, что допустимо в модели главной изоляции представить только расчетные катушки, вблизи которых требуется определить электрическую прочность масляных каналов, а также дополнительно 1–2 катушки, расположенных рядом с расчетными, при этом сечение остальной части обмотки представить прямоугольником с линейным распределением потенциала по вертикальным его сторонам. Для

обеспечения требуемой точности расчета средних напряженностей достаточно представить часть высоты обмотки, ограничив ее на расстоянии $H = (1,5 \div 2)S_{MO}$ от расчетных катушек, где S_{MO} – наибольшее расстояние между обмотками (рис. 1). При использовании этих рекомендаций погрешность расчета поля по сравнению с крупными моделями не превосходит 1–2%.

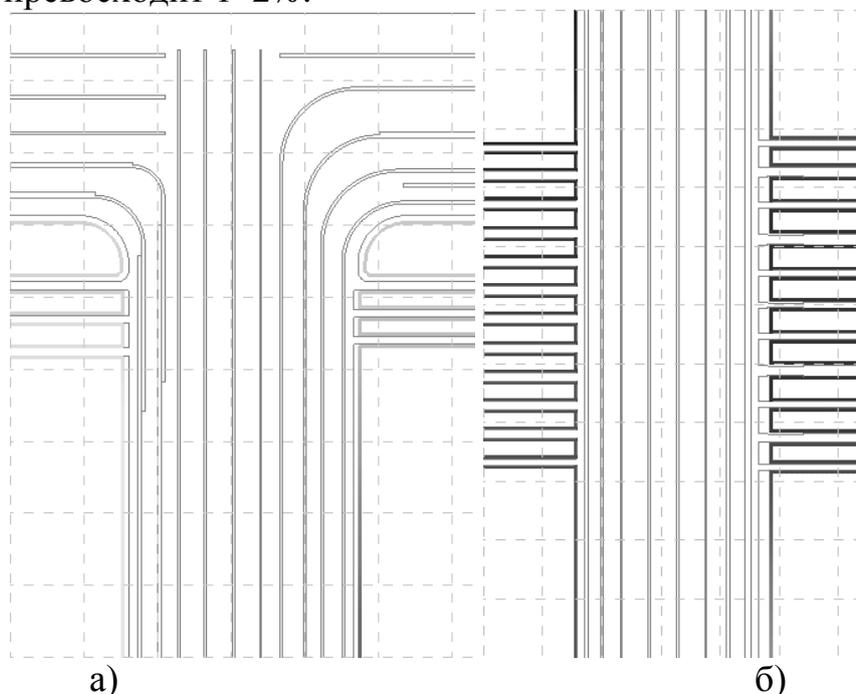


Рис. 1. Фрагменты расчетных моделей главной изоляции: а) Верхняя часть обмоток; б) Середина высоты обмоток

Отдельное место занимает расчет главной изоляции при воздействии грозового импульса. При наличии больших градиентов напряжения между соседними катушками неучет реального распределения напряжения по обмоткам может приводить к серьезным ошибкам в аксиальной составляющей поля и заниженным результатам в оценке воздействующих средних напряженностей в первых масляных каналах. Таким образом, при расчетах необходимо воспроизведение по обмоткам распределения напряжения, полученного из расчета импульсных переходных процессов в обмотках [3].

Значения разностей потенциалов, приложенных к промежуткам главной изоляции, изменяются во времени. При этом имеет место несовпадение моментов времени, при которых достигаются максимальные разности потенциалов для отдельно взятых промежутков. В соответствии с отечественной практикой для трансформаторов классов напряжения от 110 кВ в этом случае для каждого главного промежутка расчет следует проводить для нескольких моментов времени:

- момента времени, при котором достигается максимальная разность потенциалов, приложенная к промежутку;
- моментов времени, соответствующих максимальной разности потенциалов соседних катушек одной обмотки.

Необходимость расчета в последнем случае вызвана тем, что для обмоток вышеуказанных трансформаторов имеют место большие градиенты напряжения между крайними витками катушек, прилегающими к прошивным рейкам, а, следовательно, большие значения тангенциальной напряженности вдоль рейки. Необходимо выполнение дополнительной проверки электрической прочности путем сопоставления допустимой и расчетной тангенциальной напряженности вдоль рейки в промежутке между катушками с максимальной расчетной разностью потенциалов и малым размером масляного канала.

Подводя итоги, можно сформулировать рекомендации по построению расчетной модели для середины обмотки [1]:

1. При расчете главной изоляции середины обмоток в общем случае необходимо воспроизведение реального распределения напряжения по обмоткам.
2. При расчете области середины обмотки в общем случае расчетную обмотку можно представить несколькими катушками, а сечение остальной части обмотки представить прямоугольниками с витковой изоляцией. При этом в модели представляются катушки, вблизи которых требуется рассчитать прочность изоляции, а также дополнительно по 1-2 катушки сверху и снизу расчетных катушек для обеспечения достаточной точности расчета. Для учета реального распределения напряжения по обмотке на вертикальных сторонах прямоугольников необходимо задать линейное изменение напряжения от значений потенциалов катушек, соответствующей верхним частям прямоугольников, до значений потенциалов катушек, соответствующих нижним частям.
3. Исключение из расчетной модели изоляции соседней обмотки при соотношении $S_{MO}/d > 60$, где d – ширина канала между катушками, является оправданным средством упрощения расчетной модели, позволяющим значительно сократить расчетную модель и время ее вычисления без существенного снижения точности определения средних напряженностей на исследуемой обмотке. Исключение толстой изоляции в общем случае нецелесообразно, так как не приводит к значимому сокращению числа конечных элементов и времени расчета.

4. Представление сечения соседней обмотки прямоугольником или экраном не вносит существенной погрешности в расчет средних напряженностей и может быть использовано для упрощения расчетной модели при расчетах области середины обмотки в случае, когда не требуется определение электрической прочности вблизи заменяемой обмотки.
5. Объединение части цилиндров в один блок при размещении последнего в середине промежутка не вносит существенной погрешности в определении средних напряженностей в первом масляном канале. Однако такое упрощение приводит к незначительному снижению числа конечных элементов и в общем случае является неоправданным.
6. Для обеспечения высокой точности расчета средних напряженностей достаточно представить часть обмотки, ограничив ее сверху и снизу на расстоянии $H = (1,5 \div 2)S_{MO}$ от расчетных катушек.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ларин В.С. Исследование и разработка эффективного метода расчета электрической прочности внутренней изоляции силовых трансформаторов // Дис. канд. тех. наук. – Москва: 2007, 145 с.
2. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Состояние и проблемы развития систем проектирования внутренней изоляции трансформаторного оборудования // V Международная конференция «Силовые трансформаторы и системы диагностики». - Москва: 2009.
3. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. - М.: Энергоиздат, 2004. - 617 с.

Научный руководитель: В.М. Игнатович, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

РАБОТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НАСОСНЫХ АГРЕГАТАХ

А.Б. Мукушева

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Асинхронный двигатель является основным источником энергии для всех видов насосов.

На перекачку центробежными насосами чистых и сточных вод в России расходуется 120—130 млрд. кВт ч электроэнергии. Стоимость электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов на водопроводно-канализационных предприятиях при использовании поверхностных вод составляет 40—50%. При использовании подземных вод этот показатель увеличивается до 80%. Несмотря на это созданию экономичных режимов работы насосных установок пока еще уделяется недостаточно внимания. В результате 5—15% энергии нерационально теряются в процессе перекачки чистых и сточных вод. В отдельных случаях этот показатель колеблется в пределах 25—50%.

Длительное время на энергосбережение в отечественных насосных установках не обращалось серьезного внимания. Хотя в СССР периодически и принимались постановления органов власти о рациональном использовании электрической и тепловой энергии, но в насосных установках энергосберегающие технологии широкого распространения не получили. Основными препятствиями к использованию энергосберегающих технологий были: относительная дешевизна энергетических ресурсов и низкая надежность энергосберегающего оборудования.



Рис. 1. Объем электроэнергии, потребляемой электроприводом.

Цель работы: рассмотреть способы энергосбережения при использовании асинхронных двигателей в насосных агрегатах.

Для обеспечения энергосбережения при работе в насосных агрегатах существуют следующие способы:

- применение энергосберегающих асинхронных двигателей;
- использование регулируемого электропривода;
- комплексное применение энергосберегающих асинхронных двигателей и регулируемого электропривода.

Первый способ обеспечения энергосбережения при применении насосных агрегатов – использование специальных энергосберегающих асинхронных двигателей. Эти энергетически эффективные двигатели специально спроектированы, используют более качественные электротехнические стали, позволяющие уменьшить активные потери.

Энергоэффективные двигатели имеют более высокий КПД и уровень надежности, менее чувствительны к колебаниям напряжения сети и имеют более низкий уровень шума и вибрации.

Основной смысл использования регулируемого электропривода в насосных установках заключается в том, чтобы привести в соответствие режим работы насосов с режимом работы водопроводной сети. Водопотребление непрерывно изменяется во времени по вероятностным законам. Чтобы отслеживать эти изменения, необходимо непрерывно регулировать режим работы насосной установки.

Процесс регулирования осложнен несоответствием характеристик центробежных насосов и трубопроводов. Для увеличения подачи воды по трубопроводу напор на насосной станции надо увеличивать, а характеристики центробежных насосов таковы, что при увеличении подачи воды напор, развиваемый насосом, падает. В то же время при уменьшении подачи воды напор насоса следовало бы тоже уменьшить, а он увеличивается. Поэтому в периоды уменьшенного водопотребления системы водоснабжения работают с избыточным напором, который гасится в дросселирующих устройствах или в водоразборной арматуре у потребителя. При этом нерационально расходуется энергия на создание избыточных напоров. Под воздействием избыточных напоров увеличиваются утечки и непроизводительные расходы воды, возникают повышенные механические напряжения в стенках труб.

Несоответствие в режимах работы насосов и трубопроводов может быть устранено изменением частоты вращения рабочих колес насосов. Частота вращения насосов должна регулироваться в соответствии с изменениями водопотребления. При уменьшении частоты вращения насоса уменьшается его подача воды и развиваемый им напор. При увеличении частоты вращения напор увеличивается одновременно с увеличением подачи воды.

Регулированием частоты вращения насоса его рабочие параметры приводятся в соответствие с режимом работы водопроводной сети. Чтобы изменить частоту вращения насоса, его оснащают регулируе-

мым приводом, т. е. регулируемый привод является своего рода исполнительным устройством, изменяющим частоту вращения насоса. Чаще всего используется в насосных установках регулируемый электропривод, с применением асинхронных двигателей.

Значение частоты вращения насоса, с которой он должен работать в тот или иной момент времени, определяется режимом работы насосной установки. Требуемое значение частоты вращения устанавливается системой автоматического управления автоматически в зависимости от многих факторов. К числу факторов, влияющих на частоту вращения насоса, относятся: расход воды в системе, уровень воды в резервуарах, значения статического и динамического противодавления, количество параллельно работающих насосов, количество насосных установок, подающих воду в сеть, и пр.

При комплексном использовании энергосберегающих асинхронных двигателей и регулируемого электропривода получаем наилучшее энергосбережение.

Электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами, расходуется на подъем жидкости и преодоление гидродинамического сопротивления в трубопроводах. Кроме того, часть электроэнергии расходуется в самих насосных агрегатах: на преодоление сил трения в сальниках и подшипниках насосных агрегатов, на нагрев магнитопровода и обмоток в электродвигателе, на его вентиляцию и пр.

Отношение полезно использованной в насосном агрегате электроэнергии к электроэнергии, полученной из электрической сети, характеризуется КПД агрегата. Для современных насосных агрегатов в зависимости от их мощности, назначения и других факторов значение КПД варьируется в пределах от 0,3 до 0,9 [2].

Мощность N , потребляемая водяным насосом, кВт

$$N = 9,81 \cdot \frac{QH}{\eta_H}, \quad (1)$$

где Q - подача насоса, м³ /с, η_H - КПД насоса.

Мощность P , потребляемая насосным агрегатом, кВт

$$P = \frac{N}{\eta_{ЭД}\eta_{ПР}}, \quad (2)$$

где $\eta_{ЭД}$ - КПД электродвигателя, $\eta_{ПР}$ - КПД преобразующего устройств.

Наиболее энергоэффективно применение частотно-регулируемых электромеханических систем при работе их с исполнительными механизмами - насосами. Кроме того, применение этих систем является одним из эффективнейших способов расхода холодной и

горячей воды, а также обеспечивает увеличение срока службы электрооборудования и трубопроводов ввиду отсутствия бросков тока в пусковых режимах. Его применение позволяет производить плавный разгон и остановку мощных насосных агрегатов, исключая появление гидроударов в трубопроводе при запуске в работу нового двигателя. Очень важно, что частотно-регулируемый электропривод позволяет плавно регулировать производительность насоса и, следовательно, значение выходного напора насосной установки.

Применение асинхронного частотно-регулируемого электропривода для управления насосными агрегатами обеспечивает ряд преимуществ:

- экономия электроэнергии за счет оптимизации энергопотребления электропривода при изменении значения регулируемого параметра;
- плавный пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети;
- эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования.

Таким образом, можно сделать вывод, что энергосбережение в насосных агрегатах с асинхронными двигателями возможно осуществить следующими способами: применением регулируемого электропривода для изменения частоты вращения, использованием специально разработанных энергосберегающих асинхронных двигателей. Во втором случае существенно повышается надежность асинхронного двигателя, снижается уровень шума и вибрации и экономические затраты на их обслуживание и ремонт.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладычев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное пособие: в 2 книгах. Книга 1. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 688 с.
2. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках и воздуходушных установках. - М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ван Бо

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, группа 7М350

Электрические машины являются основными элементами любых электрических, энергетических систем, приводов или установок. В условиях современного экономического кризиса большое значение приобретают работы, связанные с повышением качества и технико-экономических показателей выпускаемой электротехнической продукции. Также актуальны задачи по экономии электроэнергии и ресурсов, решение которых заключается в проведении мероприятий по сокращению потребления энергетических ресурсов, рациональному их использованию, а также разработка и выпуск энергосберегающей продукции со сниженной материалоемкостью и уменьшенными габаритами.

Цель работы: рассмотреть возможность использования математической модели оценки влияния электромагнитных нагрузок на показатели качества асинхронных двигателей для их модернизации.

В основе математической модели оценки влияния электромагнитных нагрузок на показатели качества асинхронных двигателей [1] лежит стандартная методика электромагнитного расчета асинхронных двигателей, которая используется при проектировании электрических машин и их серий. Данная методика представляет собой физическую модель асинхронной машины в математической форме на обычном алгебраическом языке, а результаты расчетных экспериментов удовлетворяют допустимой погрешности [2].

Исходными данными математической модели являются основные электрические величины (мощность машины, номинальное линейное напряжение, частота сети, синхронная частота вращения, количество пар полюсов и так далее).

Модернизация асинхронных двигателей, прежде всего, должна быть направлена на поиск более эффективного варианта асинхронного двигателя, который может обеспечить выполнение обозначенных задач лучше других. В современных экономических условиях первоочередными задачами модернизации являются повышение энергетических показателей без снижения уровня качества электротехнической

продукции. Поэтому показатели качества асинхронных двигателей служат ограничениями при поиске лучшего варианта.

Электромагнитные нагрузки играют основную роль в эффективности использования объема активной части машины и от их назначения зависят энергетические показатели электротехнического изделия в целом. Например, чем больше электромагнитные нагрузки, тем больше коэффициент использования объема активной части и повышается коэффициент полезного действия асинхронного двигателя. Поэтому в математической модели изменение электромагнитных нагрузок рассмотрели как ресурсосберегающие варьируемые величины, влияние которых оценили на выходе через показатели качества асинхронных двигателей.

В качестве независимых переменных выбрали изменения длин сердечников статора и ротора, без изменения геометрии поперечного сечения двигателя.

Таким образом, в работе исследовали изменения длин сердечников статора, в сторону уменьшения и увеличения, с учетом изменения электромагнитных нагрузок, а полученные при расчетах показатели качества служат ограничениями.

Математическая модель реализована в программной среде mathCAD. Результаты расчетного эксперимента на примере асинхронного двигателя серии АИР132М4 представлены в таблице 1 – увеличение длин сердечников, в таблице 2 – уменьшение.

Таблица 1
Увеличение длин сердечников асинхронного двигателя

L, %	100	105	110	115
L, м	0,175	0,184	0,193	0,201
cosφ, о.е.	0,890	0,894	0,888	0,884
η, %	0,877	0,875	0,885	0,888
П, о.е.	7,44	7,22	7,81	8,34
МП, о.е.	2,98	2,76	3,23	4,45
ММ, о.е.	3,38	3,23	3,81	3,82
S _H , %	4,14	4,23	3,95	3,33

Таблица 2
Уменьшение длин сердечников асинхронного двигателя

L, %	100	95	90	85
L, м	0,175	0,166	0,158	0,149
cosφ, о.е.	0,890	0,888	0,896	0,900
η, %	0,877	0,876	0,867	0,856
П, о.е.	7,44	7,93	6,72	5,9

МП, о.е.	2,98	2,98	2,24	1,7
ММ, о.е.	3,38	3,45	2,55	1,9
S _н ,%	4,14	3,95	4,80	5,61

Анализ результатов показал тенденцию: а) при увеличении длины сердечника статора электромагнитные нагрузки уменьшились, энергетические показатели улучшились, возрос коэффициент полезного действия; б) при уменьшении длины сердечника статора электромагнитные нагрузки увеличились, а габариты двигателя уменьшились. Значит, предложенная математическая модель может быть использована при модернизации асинхронных двигателей для решения задач по улучшению энергетических показателей или для экономии затрачиваемых на изготовление материалов асинхронных двигателей. Потому, исследование влияния электромагнитных нагрузок на коэффициент полезного действия и материалоемкость асинхронных двигателей своевременны и актуальны при усовершенствовании широко применяемых в промышленности асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ван Бо. Математическая модель оценки влияния электромагнитных нагрузок на показатели качества асинхронных двигателей // XVI Международная научно - практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» - Томск: Изд. ТПУ, 2010.
2. Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. - М.: Энергия, 2002. – 767 с.

Научный руководитель: Т.В. Усачева, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ, РАБОТАЮЩИМ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

В.В. Белякин
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА группа 736Т

Вследствие возрастающей степени автоматизации в промышленности, существует постоянная потребность в дополнительных

средствах автоматического управления, и происходит непрерывное увеличение производственных скоростей и совершенствования методов в целях дальнейшего повышения эффективности различных промышленных предприятий.

В настоящее время электродвигатели являются важными стандартными промышленными изделиями. Эти двигатели рассчитаны на работу с фиксированной скоростью, и в течении многих лет продолжается работа, направленная на оптимизацию регулирования их рабочей скорости. Современная тенденция характеризуется возрастанием применения регулируемых электроприводов. По некоторым данным ежегодный рост мирового рынка продаж электроприводов переменного тока составляет от 3 до 10 % и более.

Наряду с возможностью использования положительных свойств трехфазных электродвигателей переменного тока, основным требованием при проектировании установки часто оказывается наличие плавного регулирования скорости. Также имеется ряд других преимуществ:

- Энергосбережение.
- Плавная работа машины.
- Уменьшение объема технического обслуживания.
- Улучшение условий труда.

Скорость ленточных конвейеров может быть точно согласована с требуемой рабочей скоростью. Например, бутылки на ленточном конвейере разливочной линии производят гораздо меньше шума, если скорость ленты можно уменьшать при скапливании бутылок. Для этого применяются статические преобразователи частоты, который представляет собой электронное устройство, которое обеспечивает плавное регулирование скорости трёхфазных электродвигателей переменного тока путём преобразования фиксированных значений напряжений и частоты питающей сети в изменяемые величины.

Кроме того, использование преобразователей частоты дает дополнительные преимущества цифрового управления приводом:

- Улучшенная повторяемость и повышенная стабильность параметров управления.
- Более простое измерение параметров
- Гибкость функций для конкретных применений.
- Более точное управление в более широком диапазоне.

В последние годы разработаны системы регулирования скорости трехфазных двигателей переменного тока на основе двух разных принципов управления:

- Нормального U/f – регулирования, или скалярного управления.
- Регулирования вектора магнитного потока.

Оба метода имеют свои преимущества, зависящие от конкретных требований к рабочим характеристикам привода (динамики) и точности.

U/f -регулирование имеет ограниченный диапазон регулирования скорости (приблизительно 1:20). При использовании этого метода относительно просто адаптировать преобразователь частоты к электродвигателю, причем регулирование невосприимчиво к мгновенным изменениям нагрузки во всем диапазоне скоростей. Сильной стороной скалярного управления является устойчивость к ступенчатой нагрузке/разгрузке во всем диапазоне скоростей и быстрая реакция на изменения заданной скорости.

Определение допустимого диапазона регулирования напряжения и частоты питающей сети при поддержании на валу двигателя постоянного момента ($\dot{I} = const$).

Для определения допустимого диапазона регулирования мною был взят асинхронный двигатель переменного тока АД80В4УЗ. Данный двигатель общего назначения с короткозамкнутым ротором.

При определении диапазона регулирования при законе U/f среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды не должно превышать $100^\circ\tilde{N}$.

В качестве выходных величин для расчета будут использованы следующие данные: $P_{\text{э1}}, P_{\text{э2}}$ – электрические потери в статоре и роторе соответственно, P_2 – подводимая мощность, s_n – скольжение, ΔV – среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, n – частота вращения, M_n – номинальный момент на валу, I_1 – ток в обмотке статора.

На основании полученных данных строим зависимости тока обмотки статора, температуры обмотки статора, потерь в обмотках статора и ротора от изменения подводимого напряжения и частоты питающей сети.

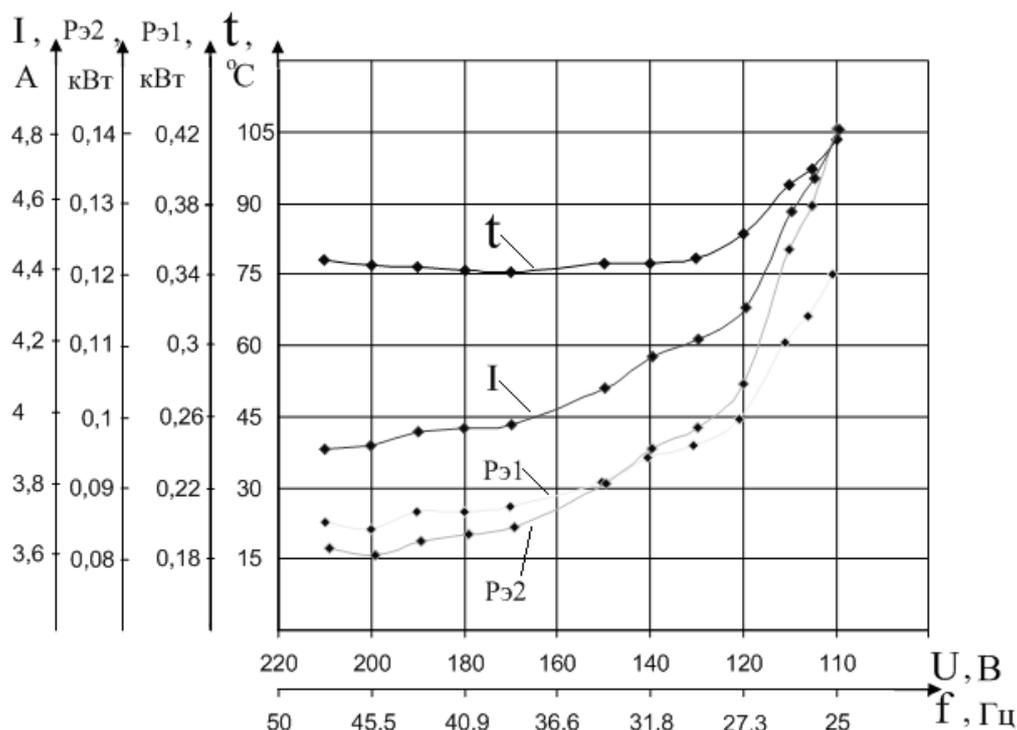


Рис. 1. Основные характеристики электродвигателя

По результатам экспериментов следует, что допустимый диапазон регулирования асинхронным электродвигателем АД80В4УЗ, работающим от преобразователя частоты составил $U/f = 220/50$ до $U/f = 110/25$. Уменьшение данного диапазона регулирования приведёт к увеличению тока и температуры в обмотки статора, что может отрицательно сказаться на работе электродвигателя.

Для расширения диапазона регулирования асинхронного электропривода требуется дополнительные источники вентиляции, которые приведут к удорожанию и усложнению системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник. — М.: Высшая школа, 2002. — 757 с.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие. — М.: Академия, 2004. — 250 с.

Научный руководитель: Е.В. Бейерлейн, ассистент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю.Г. Барвих

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М340

В настоящее время положение в мировой энергетике характеризуется некоторыми особенностями, объясняющее повышенное внимание к надежности работы оборудования энергосистем, и в том числе силовых трансформаторов. Силовой трансформатор является в энергосистеме одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. Внезапный выход из строя трансформатора причиняет особенно большой ущерб, так как при этом убытки связаны не только с необходимостью восстановления трансформатора, но и с перерывом в производстве. В настоящее время доля электрооборудования, выработавшего свой ресурс, составляет от 30% и более, а для силовых трансформаторов доходит до 70% [1]. Нарастание объема изношенного оборудования и отсутствие возможности его восстановления вводит энергетическое обеспечение в зону повышенного риска, технологических отказов и аварий. Надежная работа силового трансформатора определяется техническим состоянием всех его узлов и элементов. Экономическая ситуация, а также общее количество оборудования с длительным сроком службы не позволяют в ближайшие годы провести его замену. Отказ крупного силового трансформатора в работе может привести к аварии в энергосистеме с масштабными последствиями. Одним из главных путей поддержания эксплуатационной надежности является организация эффективного контроля состояния работающего оборудования. Поэтому для поддержания требуемой эксплуатационной надежности трансформаторов очень важным является оценка технического состояния, качественное обслуживание трансформаторов, организация эффективного контроля состояния работающего оборудования, диагностический контроль и точное выявление причин отказов. По таким причинам, как выявление возникающих в работе дефектов, их обнаружение на ранних стадиях развития, своевременное принятие правильных решений по ликвидации дефектов, сокращение времени простоя, продление срока службы оборудования в последние годы контролю и диагностике основного электрооборудования энергосистем уделяется особенно большое внимание.

Цель работы – рассмотреть причины отказов силовых трансформаторов при эксплуатации.

Одним из важных показателей качества технических устройств и систем является надежность, т.е. способность безотказно работать с заданными техническими характеристиками в определенных условиях эксплуатации в течение заданного времени [2]. Эффективность функционирования силовых трансформаторов, обеспечение их безотказности и долговечности связаны с анализом и оценкой показателей надежности. Обеспечение надежной работы трансформаторов необходимо для предотвращения катастрофических последствий, так как выбросы масла или пожары из-за внутренних повреждений трансформаторов [4]. Для избежания таких повреждений трансформаторов требуются усиление прочности бака, соответствующее устройство мембран, предотвращение растекания масла, автоматическое пожаротушение, быстродействующие защитные системы.

На предприятиях электрических сетей доля электрооборудования подстанций прослужившего более 25 лет эксплуатируемых силовых трансформаторов и автотрансформаторов составляет 32%. Внедрение современных средств и методик контроля технического состояния позволит принимать правильные решения о необходимости проведения ревизий и предупредительных ремонтов, а также решений о продолжении сроков эксплуатации оборудования с истекшим сроком службы на базе более точного определения остаточного физического ресурса [1, 3].

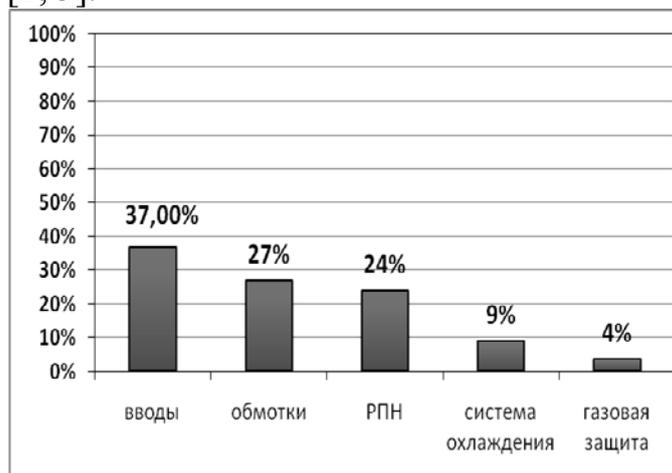


Рис. 1. Распределение технологических нарушений трансформаторов.

Доля технологических нарушений, приходящаяся на силовые трансформаторы, составила около 42%. Таким образом, большая часть технологических нарушений связана с повреждениями маслонаполненных вводов, обмоток и устройств регулирования. На основании анализа технологических нарушений можно сделать вывод, что наи-

большее внимание в ходе эксплуатации трансформаторов следует уделять состоянию вводов, обмоток и устройств РПН.

Оценка технического состояния силовых трансформаторов в эксплуатации ведется по комплексу контролируемых показателей и их нормативам. Для определения технического состояния силовых трансформаторов и оценки остаточного ресурса используют комплексный подход [1]. Оценка технического состояния силового трансформатора его вспомогательных систем и узлов проводится в несколько этапов: подготовительный этап, проведение анализов и обработка полученных результатов.

Наиболее опасными по интенсивности возникновения отказов у силовых трансформаторов являются периоды межсезонья с характерными резкими перепадами температур и изменением электрических нагрузок. Основными причинами отказов в работе трансформаторного оборудования является: износ силовых обмоток, низкое качество технического обслуживания и ремонта, несоблюдения периодичности и объема выполнения профилактических мероприятий, недостаточный уровень исполнения средств оценки технического состояния и диагностики, недостатки эксплуатации. Значительная часть отказов трансформаторов может быть предотвращена путем использования современных методов диагностики технического состояния и комплексного обследования [2]. Основными причинами возникновения внутренних коротких замыканий в трансформаторах являются: загрязнение и увлажнение твердой изоляции и масла, газовыделение из изоляции, повреждение устройства переключения ответвлений под рабочим напряжением и др. В последние годы в энергетике наметилась тенденция к последовательному переходу от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по действительному техническому состоянию электрооборудования. Система технического обслуживания и ремонта силовых трансформаторов по текущему состоянию электрооборудования является наиболее эффективной, однако требует детальной проработки и совершенствования организации технического обслуживания и ремонтов. Одним из способов продления эксплуатации силовых трансформаторов является оценка, диагностика технического состояния силовых трансформаторов. Оценка состояния трансформаторов выполняется с помощью замеров и испытаний. Система диагностики опирается на действующие нормативные документы и обеспечивает не только комплексную оценку технического состояния силовых трансформаторов, но и принятие правильных решений по их дальнейшей эксплуатации [3]. Система диагностики позволяет принимать решения по их дальнейшей эксплуатации

и осуществлять техническую политику перехода к ремонту по фактическому состоянию оборудования в соответствии с правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей. Таким образом, основными причинами отказов в работе трансформаторного оборудования является: износ силовых обмоток, низкое качество технического обслуживания и ремонта, несоблюдения периодичности и объема выполнения профилактических мероприятий, недостаточный уровень исполнения средств оценки технического состояния и диагностики, недостатки эксплуатации. Значительная часть отказов трансформаторов может быть предотвращена путем использования современных методов диагностики технического состояния и комплексного обследования. Для предотвращения отказов силовых трансформаторов предусмотрен ряд мероприятий и действий. Одним из способов продления эксплуатации силовых трансформаторов является точная оценка, диагностика технического состояния трансформаторов. Система диагностики позволяет комплексно оценивать состояние силовых трансформаторов, принимать решения по их дальнейшей эксплуатации, позволяет прогнозировать возможность дальнейшей безаварийной работы силовых трансформаторов в течение определенного промежутка времени. Методы и средства диагностики постоянно совершенствуются.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. – М.: Издательство Академия, 2003. – 383 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: Издательство БХВ-Петербург, 2008. – 702 с.
3. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 391 с.
4. Острейковский В.А. Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2008. – 460 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПАЗА СТАТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

С.А. Терновская
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Проблема снижения энергетических затрат, проблема энерго-сбережения становится все более актуальной на сегодняшний день. Особенно актуальна эта проблема для российской экономики, поскольку в России энергоемкость промышленного производства и социальных услуг оказывается во много раз выше общемировых показателей. Это проблема еще больше обостряется в связи с постоянным увеличением в нашей стране стоимостей энергоносителей: электроэнергии, природного газа, нефтепродуктов и т. д. В себестоимости продукции в России доля энергозатрат часто становится доминирующей. В связи с этим конкурентоспособность отечественной продукции все больше зависит именно от экономного расходования энергетических ресурсов. Подавляющую часть энергоресурсов представляют в настоящее время так называемые невозобновляемые источники энергии в виде органических минеральных топлив. Это природный газ, нефть, уголь, торф и другие виды топлив [1].

Одним из выходов в сложившейся ситуации является рациональное использование энергоресурсов, разработка и выпуск энергосберегающей продукции и продукции, имеющей улучшенные энергетические характеристики. Для повышения энергетических характеристик энергоэффективного асинхронного двигателя существует два пути:

- проектирование энергоэффективного асинхронного двигателя без изменения геометрии поперечного сечения;
- проектирование оптимального энергоэффективного асинхронного двигателя с новыми размерами поперечного сечения.

Целью данной работы является анализ влияния формы паза статора на энергетические характеристики асинхронного двигателя (АД) в рамках оптимального проектирования энергоэффективного асинхронного двигателя с новыми размерами поперечного сечения.

Энергоэффективные двигатели – двигатели, которые совершают больше работы на единицу энергии, чем обычные аналоги, они имеют более высокий КПД, обладают повышенной надежностью, более низ-

кими показателями по шуму и вибрации. Более высокий КПД означает более низкое энергопотребление. Отсюда и второе смысловое название – энергосберегающие двигатели [2].

Проектирование АД с изменением геометрии поперечного сечения возможно за счет изменения формы паза статора и повышения энергоэффективности асинхронного двигателя. Показателями энергоэффективности АД являются:

- коэффициент полезного действия (η) (представляющий отношение полезной мощности двигателя, выраженной в киловаттах, к активной мощности, потребляемой двигателем из сети, выраженной в киловаттах);
- коэффициент мощности ($\cos\varphi$), представляющий отношение потребляемой активной мощности, выраженной в киловаттах, к полной мощности, потребляемой из сети, выраженной в киловольт-амперах [3].

В табл. 1 представлены энергетические показатели и номинальные данные базового и энергоэффективного двигателей. В настоящее время одной из основных тенденций при проектировании регулируемых асинхронных двигателей является повышение коэффициента полезного действия и коэффициента мощности для обеспечения эффективного энергосбережения. Поэтому при выполнении исследований и разработок асинхронных двигателей необходимо создание соответствующих методик для определения их оптимальных параметров, из условия получения максимальных энергетических характеристик. В результате теоретических и экспериментальных исследований важно определить наилучшие абсолютные и удельные энергетические характеристики асинхронного двигателя, исходя из требований, предъявляемых к регулируемому электродвигателю переменного тока [4].

Таблица 1

Номинальные данные и показатели энергоэффективности базового двигателя и энергоэффективного двигателя

	4A160S4	5AM160S4
$P_{2н}$, кВт	15	15
$K_{зап}$	0,753	0,711
$\cos\varphi$	0,86	0,86
η	88,4	89,5

Данные табл. 1 возможно получить и улучшить при изменении формы паза статора (рис. 1).

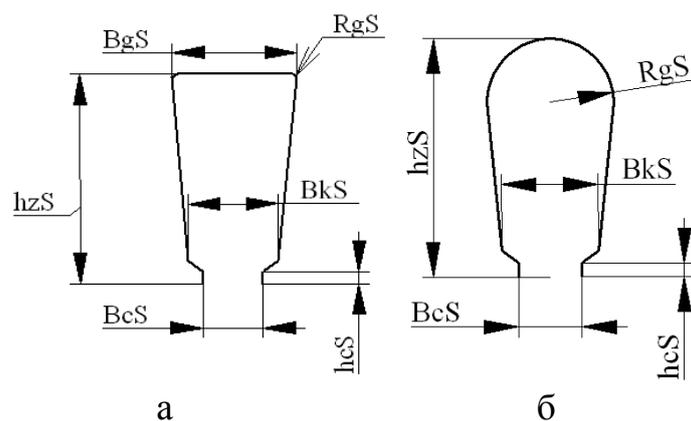


Рис. 1. Формы пазов: а) форма паза статора, применяющаяся в базовых двигателях; б) форма паза статора энергосберегающего двигателя

При изменении формы паза руководствовались следующими требованиями:

- площадь паза должна соответствовать количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции;
- значения индукции в зубах и ярме статора должна находиться в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника [5].

Проведенные исследования позволяют сделать выводы, что спроектированные асинхронные двигатели с измененной формой паза статора обладают следующими преимуществами:

- Более высокий КПД, чем у обычных аналогов.
- Более низкое энергопотребление, в результате снижение эксплуатационных расходов.
- Снижение уровня шума и вибрации.
- Высокая надежность и срок службы.
- Низкая температура обмотки электродвигателя, за счет снижения потерь в АД, в результате продление срока службы изоляции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладычев М.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1. - М.: Теплоэнергетик, 2002. – 688 с.
2. Тютеева П.В. Выбор метода оптимизации энергоэффективных асинхронных двигателей // Современная техника и техноло-

- гии: Материалы XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 488 – 490.
3. Жарикова Т.В., Муравлева О.О. Возможности модернизации асинхронных двигателей для энергосбережения // Современная техника и технологии: Труды XI-ой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 299 – 301.
 4. Муравлев О.П., Муравлева О.О., Вехтер Е.В. Оптимизация энергетических характеристик при модернизации асинхронного двигателя для энергосбережения // Современная техника и технологии: Труды XI-ой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 286 – 288.
 5. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин. - М.: Энергия, 1980. – 496 с.

Научный руководитель: О.О. Муравлева, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ РАССЕЙЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

М.С. Баженов
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Разработка в трансформаторостроении способов исследования поля рассеяния в трансформаторе и создание точных способов анализа распределения поля рассеяния и вызываемых ими электродинамических сил, действующих на обмотки, позволят обеспечить электродинамическую стойкость и надежность силовых трансформаторов. Исследование поля рассеяния трансформаторов имеет целью также обеспечить определенную организацию и локализацию этого поля за счет оптимального размещения обмоток и использования магнитных экранов, что позволяет значительно уменьшить добавочные потери в обмотках и конструктивных деталях трансформатора — стенах бака, прессующих деталях обмоток и остова.

Высокая значимость и недостаточная практическая разработанность проблемы, включающая в себя моделирование и анализ, определяют несомненную новизну и необходимость данного исследова-

ния. Актуальность настоящей работы обусловлена, с одной стороны, большим интересом к возможности уменьшения электрических потерь в обмотках, стенках бака и прессующих элементах силовых трансформаторов на современном этапе развития электротехнической промышленности, с другой стороны, ее недостаточной разработанностью и внедрением в современное электромашиностроение. Рассмотрение вопросов связанных с данной тематикой носит как теоретическую, так и практическую значимость.

Для расчета добавочных потерь в элементах конструкции практически до 90-х годов прошлого столетия применялись полуэмпирические зависимости, что позволяло с достаточной точностью определить потери в элементах типовых конструкций. На сегодняшний день, с учетом развития компьютерных технологий, используют полевые методы расчета. Сначала выполняли расчеты 2-х мерного (плоского и осесимметричного) поля, а в дальнейшем, с развитием ЭВМ и 3-х мерного. Одним из известных и широко распространенных программных продуктов в мире является программа ANSYS, с помощью которой возможен расчет добавочных потерь в элементах конструкции. В программе ANSYS реализован конечно-элементный метод расчета низкочастотных полей.

В настоящее время электромагнитные задачи для электротехнических устройств со сложной геометрией как внешних, так и внутренних границ, характеризуются наличием достаточного количества подобластей модели устройства с различными магнитными и проводящими свойствами решаются численными, как правило, проекционно-сеточными методами, к которым относится и метод конечных элементов.

Данный метод является одной из модификаций проекционных методов (Ритца, Галеркина и т.д.). Суть проекционных методов состоит в попытке аппроксимировать решение дифференциального уравнения конечной линейной комбинацией базисных (пробных) функций (функций формы), т.е. в том, чтобы найти «проекцию» или приближенное решение в конечномерном пространстве для непрерывного решения в бесконечномерном функциональном пространстве. Форма базисной функции и критерий вычисления коэффициентов линейной комбинации определяют проекционный метод.

Дискретная модель непрерывной области строится следующим образом:

1. В области моделирования фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узлами расчетной сети, которой покрывается область моделирования.

2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая и определяется.
3. Область моделирования непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узлы, аппроксимируют форму области и представляют собой расчетную или триангуляционную сеть.
4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином. Они подбираются таким образом, чтобы вдоль границ элемента величина была непрерывна.

Метод конечных элементов основан на аппроксимации непрерывной функции (потенциала, температуры и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, которые называются конечными элементами. В качестве функции элемента чаще всего используется полином. Классификацию конечных элементов можно провести в соответствии с порядком этих полиномов. Рассматриваются три группы элементов: симплекс-, комплекс - и мультиплекс-элементы.

Классическое описание двумерного симплекс-элемента приведено в [4]. Это треугольник с прямолинейными сторонами и тремя узлами, по одному в каждой вершине. Как правило, используется последовательная нумерация узлов против часовой стрелки, начиная от некоторого i -го узла, который выбирается произвольно. Узловые значения скалярной величины ϕ обозначаются через Φ_i, Φ_j и Φ_k , а координаты трех узлов - через $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j), (X_k, Y_k)$, что позволяет определить функции формы через координаты узлов расчетной сети.

Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов являются следующие:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять метод к телам составленным из нескольких материалов.
2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов. Таким образом, методом можно пользоваться не только для областей с «хорошей» формой границы.
3. С помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение смешанных граничных условий.

Так же расчет можно реализовать в универсальном конечно-элементном пакете российского производства ELCUT. С помощью данной программы возможно решение полевых задач в двухмерной постановке. Это ограничение, очевидно, сужает область применения, но дает возможность применять пакет на ранних этапах прикидочных расчетов, когда трехмерное моделирование еще неоправданно сложно.

В дальнейшем процесс исследования будет посвящен сравнению результатов расчета добавочных потерь полученных с помощью программ ELCUT и ANSYS.

Проведение сравнительного анализа планируется осуществить по методике представленной сотрудниками «Украинского научно исследовательского проектно-конструкторского технологического института трансформаторного оборудования» А.С. Трайно и М.В. Остренко в докладе «Сравнительный анализ расчета добавочных потерь в элементах конструкции автотрансформатора мощностью 200 МВА полученных с помощью программ EDMAG-3Dv2 и ANSYS».

В частности необходимо создать расчетные модели для определения добавочных потерь:

- в стенках бака трансформатора.
- в крайнем пакете стержня магнитопровода от магнитного потока, замыкающегося через канал рассеяния обмоток и стержень магнитной системы.
- в нижней ферромагнитной ярмовой балке, имеющей воздушные промежутки для разрыва магнитного потока.
- прессующей пластине, которая представляет собой одну или две пластины из маломагнитного материала.
- стенке верхней ярмовой балки.

Анализ распределения потоков рассеяния по участкам указанным выше позволит выявить зоны, опасные с точки зрения перегрева элементов бака при нагрузках.

В результате проделанной работы и выполненных расчетов в пакетах программ ANSYS и ELCUT можно сравнить полученные модели оценить результаты и выбрать оптимальный вариант решения данной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 6-е изд., стереотипное. - Издательский дом Альянс, 2009. – 528с.

2. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.- 392 с.
3. Васютинский С.Б. Вопросы теории расчета трансформаторов. - Л.: Энергия, 1970. – 423с.
4. Сегерлинд Р. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 389 с.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.2. Руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2005. – 257с.
6. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: УРСС, 2008. – 270с.
7. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. - М.: Энергоиздат, 2004. - 617 с.

Научный руководитель: В.М. Игнатович, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

НИЗКОВОЛЬТНЫЙ ДВУХСКОРОСТНОЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Н.Н. Васильев

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА группа 736Т

Изменение частоты вращения асинхронных электродвигателей позволяет получать наиболее экономичные режимы работы оборудования. Их применение повышает КПД механизмов за счет сокращения промежуточных звеньев кинематической цепи, позволяет изменять скорость на ходу без остановки. Многоскоростные асинхронные электродвигатели (АД) могут быть использованы [1]:

- в приводах машин с мощностью изменяющейся во времени (насосы, транспортеры, воздуходувки);
- в приводах машин, скорость которых изменяется в зависимости от размеров, твердости обрабатываемого материала (металлорежущие и деревообрабатывающие станки);
- в машинах и механизмах для пуска в ход и остановки без резких толчков (подъемники, элеваторы).

Частота вращения ротора асинхронного электродвигателя может регулироваться двумя путями:

- изменением скольжения;
- изменением скорости вращения магнитного поля.

Изменение скорости вращающегося магнитного поля асинхронных двигателей может быть осуществлено двумя способами: изменением частоты сети; изменением числа полюсов обмотки двигателя.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты возможно при наличии специальных преобразователей частоты. Изменения же числа полюсов можно достичь двумя путями. Расположив в пазах статора АД отдельные независимые друг от друга обмотки с различными числами полюсов, можно, подключая к сети ту или другую обмотку, получить соответствующие частоты вращения ротора двигателя. Полезная мощность многоскоростного двигателя с несколькими отдельными обмотками значительно уменьшается по сравнению с мощностью однообмоточного многоскоростного двигателя. Использование пазы в этом случае неполное и сравнение двигателей показывает, что при двухобмоточных схемах затрачивается на 40-50% больше обмоточной меди и на 30-40% больше электротехнической стали [2]. Вторым путем является секционирование одной статорной обмотки. В АД с одной статорной обмоткой изменение частоты вращения двигателя достигается путем определенного пересоединения обмотки, называемого «переключением полюсов обмотки». Многоскоростные двигатели проектируются для различных режимов работы. Наиболее часто встречаются режимы с постоянным моментом и с постоянной мощностью. Регулирование частоты вращения с постоянным моментом обеспечивается при переключении обмотки со звезды на схему двойной звезды. Если до переключения обмотка статора была соединена в треугольник, то после переключения ее на двойную звезду мощность двигателя практически не изменится, а момент уменьшится в два раза из-за увеличения частоты вращения.

В данной выпускной квалификационной работе был рассчитан низковольтный двухскоростной асинхронный электродвигатель при поддержании постоянного момента $R_{ном}=6/7$ кВт при $2p=4/2$ и $n=1500/3000$ об/мин соответственно. Для него был произведен электромагнитный расчет, в котором была определена геометрия двигателя, магнитная цепь, параметры рабочего режима и его потери. Как результат были построены пусковые характеристики для каждой частоты вращения. На рис. 1 и 2 приведены зависимости пускового момента и пускового тока от скольжения при частоте вращения 3000 об/мин – зависимости 1 и 1500 об/мин – зависимости 2.

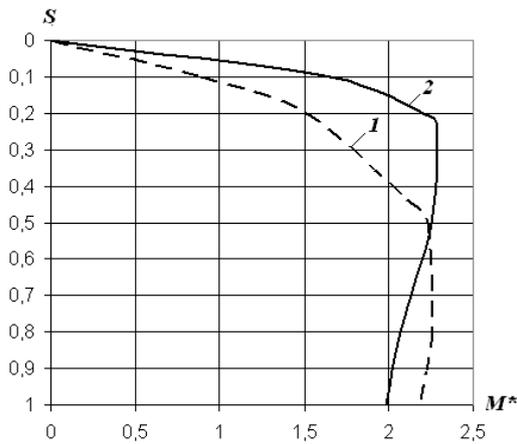


Рис. 1. Пусковые характеристики $M^*=f(S)$

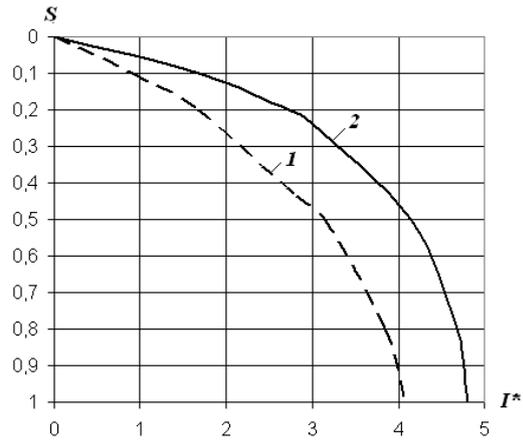


Рис. 2. Пусковые характеристики $I^*=f(S)$

Как видно из получившихся характеристик электродвигатель поддерживает постоянный момент при изменении частоты вращения. Сравнивая номинальные режимы работы можно отметить, что частоте вращения ротора равной 1500 об/мин КПД двигателя выше и составляет $\eta=0.84$, а коэффициент мощности меньше и равен $\cos\varphi=0.86$. При частоте вращения 3000 об/мин эти величины составляют $\eta=0.79$, а $\cos\varphi=0.92$. Схема двухслойной выпятой петлевой обмотки двухскоростного АД с реализацией функции переключения числа пар полюсов представлена на рис. 3.

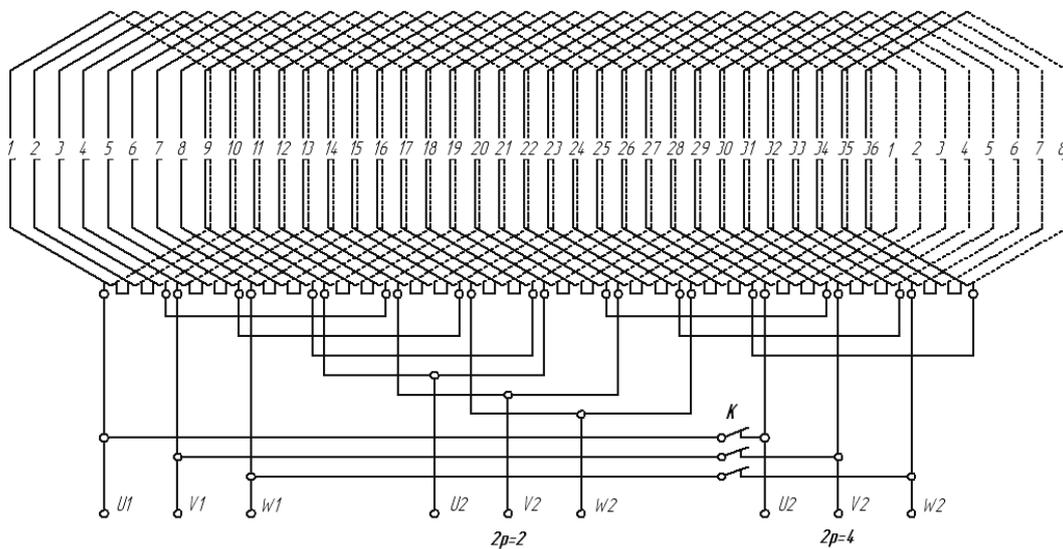


Рис. 3. Развернутая схема фаз двухслойной петлевой обмотки с переключением числа полюсов $2p = 2 / 2p = 4$

Данный вид регулирования скорости отличается рядом положительных показателей. К ним в первую очередь относят экономичность регулирования, так как регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов не сопровождается выделением в роторной цепи

больших потерь энергии скольжения, вызывающих излишний нагрев АД и ухудшающих его КПД, относительно простая схема регулирования, хорошая жесткость и достаточная перегрузочная способность механических характеристик. Однако существенным недостатком является ступенчатость регулирования частоты вращения электродвигателя.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Копылов И.П., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. Шк., 2005. – 767 с.
2. Харитонов А.М. Многоскоростные двигатели в промышленных электродвигателях. – М.: Энергия, 1971 – 96 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2008 – 380 с.

Научный руководитель: П.В. Тютеева, ассистент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ

Ж.И. Сагалбаев

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М340

Одним из важнейших показателей качества электрических машин является их надежность. Под надежностью понимается свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.[1]

Ненадежность работы электродвигателей вызывает у потребителей различные виды расходов на ремонт отказавшего двигателя, восстановление ущерба от потери выпуска продукции, необходимо время на восстановление нормального технологического процесса.

Надежность является комплексным свойством, которое включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [2].

Цель работы – определить причины отказов асинхронных двигателей по данным эксплуатации на нефтехимическом заводе.

Исследование надежности электродвигателей и составляющих ее свойств проводится при эксплуатации изделий или при стендовых испытаниях. При этом исходными данными для анализа надежности являются наработка изделий и количество отказов за время наблюдения, испытаний, эксплуатации.

На крупных промышленных предприятиях, в том числе нефтехимических, обеспечение заданной надежности электрических машин используемых при производстве является одной из наиболее важных целей [3]. Основное электрооборудование на заводе представлено асинхронными электродвигателями взрывозащищенного исполнения (ВАД), применяемых в насосных агрегатах, холодильных установках.

Проведенные исследования показали, что в двигателях отказы вызваны в основном из-за повышенной вибрации, которая приводит к ряду причин выводящих двигатель из строя. Так, например, повышенная вибрация вызывает: сбой в подшипниковом узле, приводит к замене полумуфты на новую, возникает боковое биение. Сбой в подшипниковом узле приводит в свою очередь к ухудшению свойств смазки, нагреванию и полной замене подшипников. Причина повышенной вибрации - скос лап. При обнаружении скоса лап, двигатель отправляется в ремонтный цех, где проходит фрезерование и проходит проверку на исправность. Нередко причиной может быть брак завода, при осмотре двигателей было выявлено не соответствие размеров вала в паспортных данных измеренным. Двигатели были отправлены в токарный цех на подгонку (обточку) валов до необходимых размеров. Имеет место в двигателях обрыв, выгорание обмоток статора. На 100 случаев отказов приходится такой отказ, как выход из рабочего состояния шпоночного паза.

В рисунке 1 приведена диаграмма с данными отказов взрывозащищенных асинхронных двигателей за 2008-2009 годы.

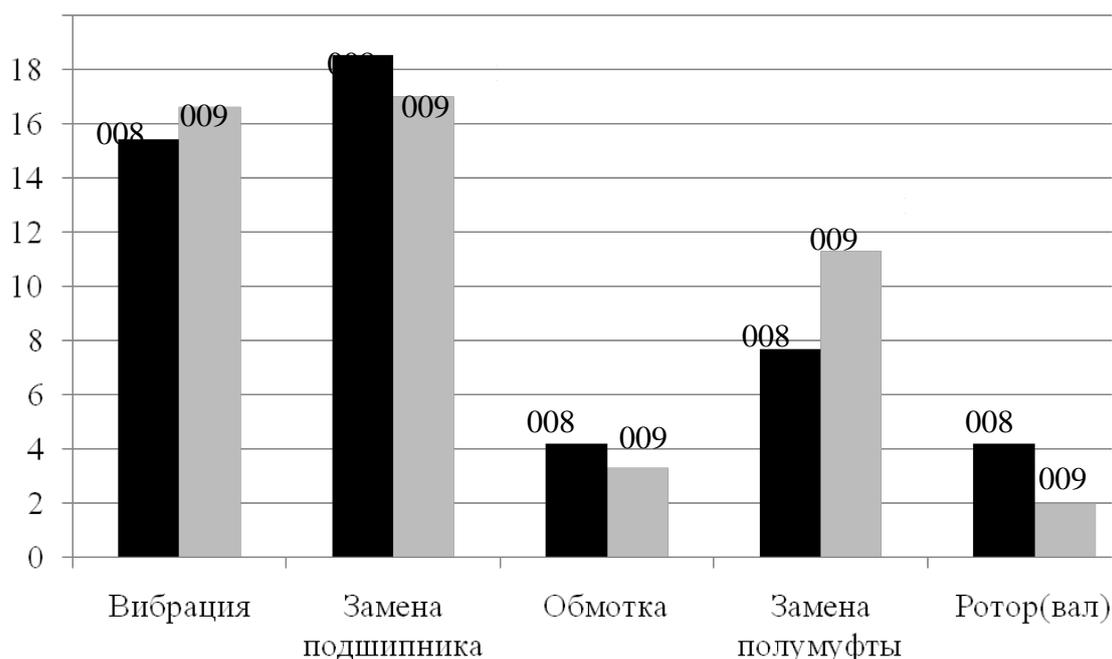


Рис. 1. Количественная оценка отказов двигателей.

Переработанная нефть вторично перерабатывается в специальных колоннах, предварительно охлаждаясь в холодильных установках. В них так же применяются взрывозащищенные асинхронные тихоходные двигатели. Вентиляторы с большими лопастями в остановленном режиме под влиянием ветра могут свободно вращаться. При запуске возникает пусковое сопротивление, которое определяется электрическими характеристиками и свободным вращением вентилятора. Вследствие этого увеличивается время запуска, что при больших значениях приводит к выгоранию контактных шпилек, которое приводит к короткому замыканию.

При повышенной вибрации двигателей уязвимыми для выхода из строя являются также вал ротора и подшипниковый узел. При осмотре ряда из них наблюдалось необходимость центровки выхода насоса с валом двигателя.

По данным собранным на нефтехимическом заводе можно сказать, что максимум отказов приходился на 2008-2009 года, вследствие брака, полученного с завода-изготовителя.

Анализ отказов АД по причине поломки обмотки статора в ремонтных цехах выявил, что неисправности во внутренней полости статора и обмотки связаны с попаданием смазки подшипников. Последнее возможно по нескольким причинам:

- персонал использует для пополнения подшипников низкокачественные марки смазок с низкой температурой каплепадения, либо химически несовместимые с заводской

смазкой, что вызывает разложение смеси смазок и ее вытекание;

- переполнение подшипников смазкой под давлением шприца выжимает смазку внутрь станины;
- возможно выбрасывание смазки при увеличении зазора лабиринтных уплотнений в результате их износа.

Причинами отказов нередко является ошибки персонала при эксплуатации АД. Так, например, несколько двигателей было выведено из строя вследствие применения несовместимых марок смазки для подшипников. Перемещиваясь в подшипнике, они разлагаются, превращаясь в жидкую массу, что привело в свою очередь к выходу из строя подшипникового узла.

Неисправность приборов применяемых для слежения за состоянием двигателя, также приводит к сокращению срока службы или полному выходу из строя последнего

На основании анализа отказов асинхронных двигателей на нефтехимическом заводе можно сделать вывод о необходимости следующих мероприятий:

- повышения интенсивности и уровня планово-предупредительных ремонтов;
- необходимо повышение уровня подготовки технического персонала;
- повышение уровня слежения за состоянием электрических приборов, использующихся при мониторинге асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: высш.шк., 1988. – 232 с.
2. Надежность асинхронных электродвигателей / Б.Н. Ванеев, В.Д. Главный, В.М. Гостищев, Л.И. Сердюк. – К.: Техніка, 1983. – 143 с.
3. Захарченко П.И., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М. Обеспечение надежности асинхронных двигателей. –Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

СПОСОБЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

А.К. Тулендинова
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М340

На перекачку центробежными насосами чистых и сточных вод в России расходуется 120 – 130 млрд кВт·ч электроэнергии. Для перекачки воды и других жидкостей потребляют до 40–50 % всей вырабатываемой электроэнергии. Работа этих систем отличается неравномерным потреблением воды, тепловой энергии, воздуха в течение суток в зависимости от погодных условий, времени года [1].

Цель работы – рассмотреть способы энергосбережения для насосных агрегатов.

Для проведения сравнительного анализа энергоэффективности различных способов управления насосными агрегатами рекомендуется использование понятия потенциала энергосбережения – максимальные потери энергии (механической, тепловой, электрической), которые можно полностью или частично вернуть в энерготехнологический цикл с помощью соответствующих энергосберегающих мероприятий. Применительно к системам водоснабжения и водоотведения для разработки таких мероприятий следует рассмотреть следующие причины возникновения потенциала энергосбережения и его составных частей:

- применение насосов с низким КПД;
- подбор насосного оборудования по пиковой нагрузке, вероятность появления которой в году весьма незначительна, что приводит к длительной работе оборудования в области низких значений КПД;
- несоответствие фактических и расчетных режимов работы системы «насос - трубопровод».

Таким образом, энергосбережение возможно при правильном подборе оборудования. К основному оборудованию насосного агрегата относятся насосы и приводы насосов. Обычно насосы оснащаются нерегулируемым электроприводом. Регулирование подачи осуществляется при этом практически единственным способом — дросселированием на стороне нагнетания.

Однако большинство систем имеют вероятностный график водоснабжения. Существующие системы с нерегулируемым электроприводом не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощ-

ности при уменьшении расхода воды, а также обуславливают при этом существенный рост давления (напора) в системе, что приводит к утечкам воды и неблагоприятно сказывается на работе технологического оборудования и сетей водоснабжения.

Сравним частотно-регулируемый привод как наиболее эффективный способ регулирования с дросселированием. Мощность, потребляемая насосом, определяется по формуле

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot g \cdot \rho}{\eta}, \quad (1)$$

где P - мощность, Вт;
 Q - подача, м³/с;
 H - напор, м;
 g - ускорение свободного падения, м/с²;
 ρ - плотность жидкой среды, кг/м³;
 η - КПД насоса.

На рис. 1 показаны характеристики производительности центробежного насоса при дроссельном и частотном регулировании.

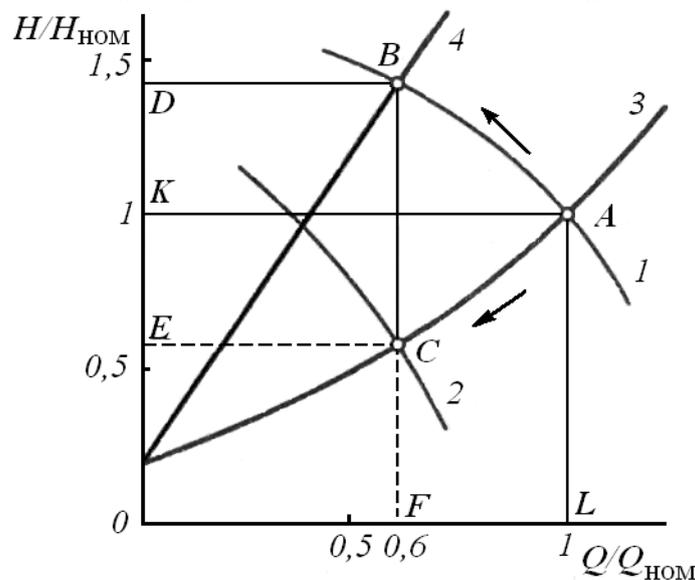


Рис. 1. Характеристики производительности центробежного насоса при дроссельном и частотном регулировании

Кривая 1 характеризует работу нерегулируемого электропривода на номинальной частоте вращения, кривая 3 характеризует работу магистрали при полностью открытой заслонке. Значения расхода и напора воды приведены на рис. 1 в относительных единицах при использовании в качестве базовых величин номинального расхода $Q_{НОМ}$ и номинального напора $H_{НОМ}$. При номинальном расходе и напоре насос работает в точке А, а мощность, потребляемая насосом, пропор-

циональна площади прямоугольника $0KAL$. С уменьшением расхода при нерегулируемом электроприводе (на рис. 1 для примера показан расход воды, составляющий $0,6N_{ном}$) за счет дроссельного регулирования происходит изменение сопротивления магистрали (кривая 4), насос работает в точке В кривой 1, что приводит к возрастанию напора, который становится больше номинального, а мощность насоса, пропорциональная площади прямоугольника $0DBF$, несущественно отличается от мощности, потребляемой при номинальном расходе, следовательно, и энергопотребление при уменьшенном расходе изменяется незначительно или практически не изменяется. На то обстоятельство, что при дроссельном регулировании расхода (подачи) воды возрастает напор (давление) в системе и практически не удается снизить энергопотребление, следует обратить особое внимание [2].

Дополнительным аргументом в пользу необходимости внедрения на насосных станциях энергосберегающих технологий являются существенные потери (утечки) воды в системе водоснабжения, чему способствует повышение давления (напора) в системе при дроссельном регулировании насосов [2].

Исходя из выше изложенного, можно прийти к выводу, что наиболее экономичным и эффективным является регулируемый привод. Далее рассмотрим типы регулируемых электроприводов их достоинства и недостатки.

В связи с возрастанием цен на энергоносители, в частности на электроэнергию, и ограниченными возможностями увеличения мощности энергогенерирующих установок проблема энергосбережения, в том числе снижения электропотребления, приобретает особую актуальность.

Основным типом регулируемого электропривода, является частотно-регулируемый асинхронный электропривод—система «полупроводниковый преобразователь частоты—асинхронный двигатель» (ППЧ— АД). Однако наряду с этим электроприводом в некоторых случаях для решения отдельных производственных задач и энергосбережения находит применение система «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель» (ТПН—АД), обеспечивающая регулирование первой гармоники напряжения, подводимого к статору.

В эксплуатации также находятся электроприводы на основе асинхронных двигателей с фазовым ротором, регулируемые за счет изменения добавочных сопротивлений в роторных цепях — «устройство реостатного регулирования — асинхронный двигатель с фазовым ротором» (УРР—АДФР) [2]. Однако этот способ регулирования свя-

зан со значительными потерями энергии при регулировании скорости вращения и поэтому малоэкономичен. Если, например, скорость двигателя снижена вдвое по сравнению с номинальной, то примерно половина всей потребляемой из сети мощности теряется в регулировочных резисторах, следовательно снижается КПД.

Частотный способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является самым экономичным в сравнении с другими известными способами. Возможность регулирования скорости АД изменением частоты следует из выражения скорости идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\delta} \cdot f_1, \quad (2)$$

где f_1 – частота напряжения обмотки статора;
 δ – число пар полюсов двигателя.

Частотное регулирование скорости вращения вала асинхронного двигателя осуществляется путём изменения частоты и амплитуды трёхфазного напряжения, поступающего на электродвигатель. Таким образом, меняя параметры питающего напряжения (частотное управление), можно делать скорость вращения двигателя как ниже, так и выше номинальной. Во второй зоне (частота выше номинальной) максимальный момент на валу обратно пропорционален скорости вращения.

Преимущества применения частотно-регулируемого электропривода:

- экономия электроэнергии от 30 до 60%.
- исключение гидроударов, что позволяет резко увеличить срок службы трубопроводов и запорной арматуры.
- отсутствие больших пусковых токов, полная защита электродвигателей насосных агрегатов, работа электродвигателей и пусковой аппаратуры с пониженной нагрузкой, что значительно увеличивает срок службы электродвигателей.
- значительная экономия воды за счёт оптимизации давления в сетях и уменьшения разрывов трубопроводов.
- возможность полностью автоматизировать насосные станции.

Так же возможно применение специального энергосберегающего асинхронного двигателя. Эти энергетически эффективные двигатели специально спроектированы, используют более качественные электротехнические стали, позволяющие уменьшить активные потери.

Энергоэффективные двигатели имеют более высокий КПД и уровень надежности, менее чувствительны к колебаниям напряжения сети и имеют более низкий уровень шума и вибрации.

Таким образом, в насосных агрегатах необходимо использовать регулируемые электроприводы для изменения частоты вращения, а так же применять специально разработанные энергосберегающие асинхронные двигатели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. - 360 с.
2. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. Заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004.– 256 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА КОММУТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ИСКРЕНИЯ

А.О. Ларин

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

На сегодняшний день в сфере железнодорожного транспорта эксплуатируются электровозы, оснащенные тяговыми электродвигателями (ТЭД) постоянного тока (ТЛ2К1, НБ-514 б, НБ-410, НБ-412, НБ-418 и т. д.). Применение двигателей постоянного тока обусловлено их регулировочными способностями, однако, надежность этих двигателей относительно невысока. Наименее надежным элементом является коллекторно-щеточный узел (КЩУ).

В процессе эксплуатации ТЭД на сегодняшний день отсутствует информация об уровне искрения на коллекторе двигателя, а этот фактор определяет его коммутационный ресурс. По данным статистики при искрении менее 1 балла двигатель проходит в среднем 2 млн. км,

при интенсивности искрения 1 ¼ балла – примерно 1.2 млн. км, а при 1 ½ балла – лишь около 300 тыс. км.

В качестве датчика искрения используется устройство контроля искрения УКИ, разработанное на кафедре ЭМА НИ ТПУ. Работа УКИ даёт приборную оценку бальности искрения коллекторных тяговых электродвигателей, измеряя ток коммутации, который протекает по разрезной щётке.

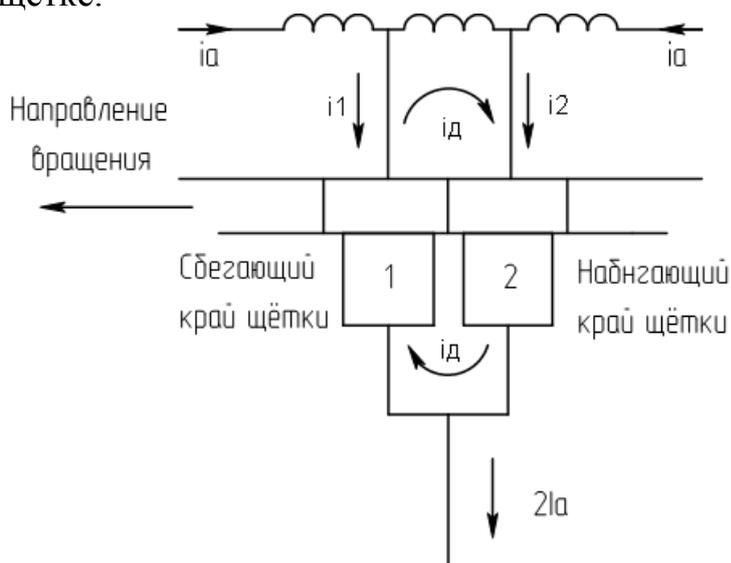
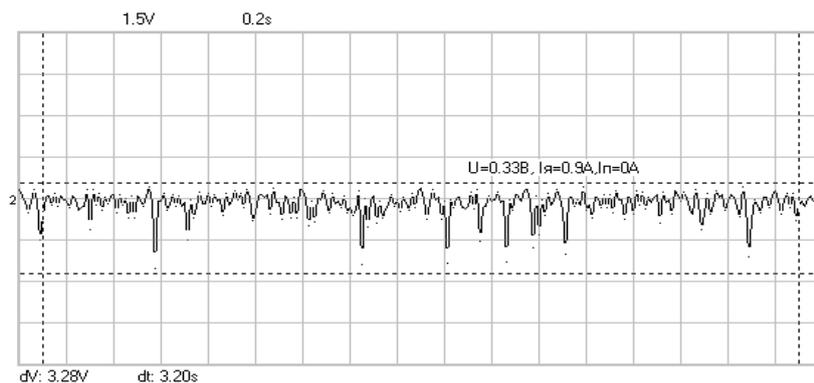


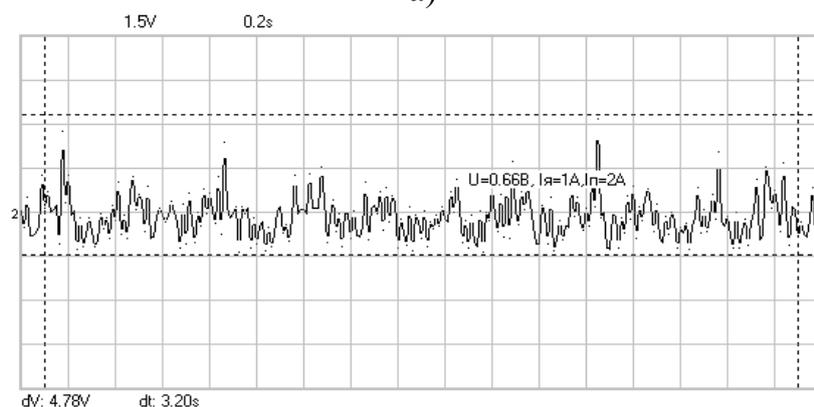
Рис. 1. Схема протекания токов секции при использовании разрезной щётки.

При работе электрической машины через коллектор и разрезные щетки 1 и 2, которые изолированы друг от друга протекает ток якоря i_a . Между самими щетками протекает добавочный ток i_d , который регистрируется посредством измерения его трансформатором тока. Далее сигнал снимается с добавочного сопротивления, оцифровывается, и обрабатывается системой обработки.

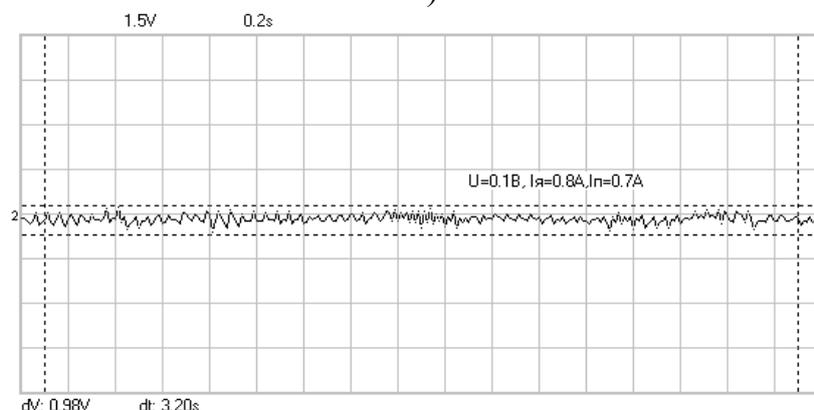
Характер сигнала УКИ представляет собой сложную форму знакопеременной кривой. Предварительные исследования показали, что вид этой кривой зависит от характера коммутации испытуемого двигателя (ускоренный, замедленный или прямолинейный).



а)



б)



в)

Рис. 2. Сигналы с УКИ: а) Отклонение амплитуды в отрицательную область, б) отклонение амплитуды в положительную область, в) нормальная коммутация.

Регулировать характер коммутации в ТЭД можно изменением величины второго зазора дополнительного полюса электрической машины, то есть настройкой магнитной системы машины. Такая настройка должна обеспечить нормативный ресурс ТЭД.

В настоящее время приборов настройки магнитной системы нет и ТЭД по статистике ОАО «РЖД» в 90% случаев выходят из строя при пробегах менее 600 тыс. км.

На кафедре ЭМА НИ ТПУ было разработано программное обеспечение для отображения, поступающего с УКИ, сигнала на дисплее. На данный момент это программное обеспечение позволяет лишь судить о наличии искрения и определить тип коммутации ТЭД.

Исследования данного программного обеспечения в дальнейшем позволят определять степень искрения и создать методику настройки магнитной системы электрических машин постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Авилов В.Д., Беляев В.П., Исмаилов Ш.К. Диагностирование и настройка коммутации тяговых и других коллекторных электрических машин, Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: 2002. - 134 с.
2. Карасев М.Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.
3. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. Госэнергоиздат, 1957.
4. Шенфер К.И. Динамомшины постоянного тока. Госэнергоиздат, 1932.

Научный руководитель: О.Л. Рапопорт, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.К. Мукантаев

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Трехфазные асинхронные двигатели общего назначения являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения. Это объясняется простотой конструкции и высокой надежностью при условии правильной эксплуатации.

Целью работы является анализ причин отказов асинхронных двигателей при эксплуатации.

Для определения характера и причин отказов электродвигателей за последние годы проводился систематический сбор и изучение материалов эксплуатации значительного количества асинхронных двигателей в различных отраслях народного хозяйства.

На основе этих данных, оказалось, что в подавляющем большинстве случаев (85-95%) отказы происходят из-за повреждения обмотки статора и из-за повреждения подшипникового узла 5-8% (рис. 1.). В свою очередь повреждения обмотки статора делятся на: межвитковые замыкания – 93%, пробой межфазной изоляции – 5%, пробой пазовой изоляции – 2% [1,2].

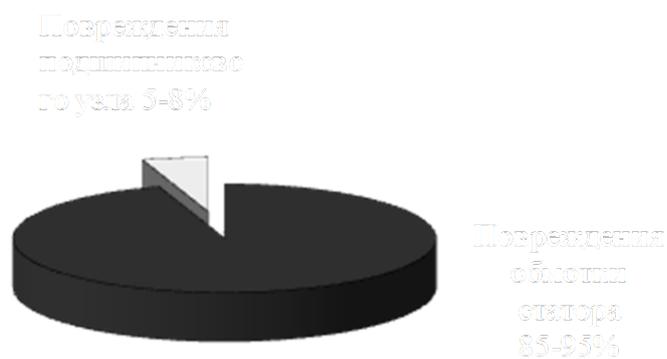


Рис. 1. Виды отказов асинхронных двигателей

Причины отказов можно дифференцировать следующим образом: технологические составляют примерно 35%, эксплуатационные (в основном из-за неудовлетворительной защиты электродвигателей) – 50% и конструкционные - 15% (рис. 2.) [1,2].

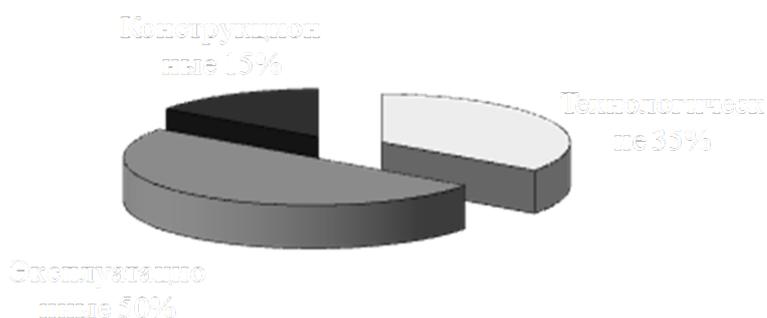


Рис. 2. Причины отказов

Рассмотрим и проанализируем подробнее основные причины, приводящие к отказам асинхронных двигателей [1,2].

Низкое качество проектирования. При исследовании отказов электродвигателей можно обнаружить определенную группу повреждений, обусловленных дефектами проектирования. В большинстве случаев эти дефекты связаны с излишним использованием активных и конструктивных материалов.

Так высокий коэффициент заполнения пазов, относящийся к способу повышения использования машины, подразумевает увеличение объема проводников в пазу, за счет применения более тонкой изоляции, увеличения плотности укладки, упорядочивания расположения проводников в пазу. Данные действия заставляют прилагать значительные усилия при укладке обмотки, что неизбежно приводит к местным повреждениям изоляции и витковым замыканиям на испытательном стенде или в процессе эксплуатации. Поэтому в процессе проектирования машины, а тем более серии машин, выбор коэффициента заполнения должен быть обоснован для каждого типа изоляции экспериментальным материалом, подтверждающим доступность данного коэффициента заполнения для витковой изоляции.

Малый запас теплостойкой изоляции при перегрузке может привести к существенному снижению срока службы изоляции. Решением может послужить некоторый температурный запас выбранный на стадии проектирования двигателя.

Низкое качество материалов и комплектующих изделий. Причиной межвитковых замыканий в обмотках статоров асинхронных двигателей нередко является низкое качество изоляции обмоточных проводов. Значительно снижает нагревостойкость и срок службы обмоток из эмалированного провода пропитка не подходящим для этой цели лаками. Также довольно частым дефектом является повышенная жесткость обмоточного провода, затрудняющая процесс обмотки. Значительные усилия при укладке и отгибе лобовых частей приводят к повреждению изоляции.

Дефекты технологии производства. Дефекты, в процессе изготовления двигателей, могут быть вызваны различными причинами: нарушениями технологического процесса, несоответствием станков, приспособлений и инструмента предъявляемым требованиям, недостаточной квалификацией рабочих, низким уровнем производственной культуры и т.п.

Неправильное применение двигателей. Условия применения асинхронных двигателей разнообразны. Поэтому существуют различные исполнения и модификации двигателей для удовлетворения специфических требований, связанных с особенностями нагрузок, окружающей среды и режимов работы. Однако, отказ защиты не следует

относить к надежности электрических машин, но необходимо помнить о важной роли надежной защиты. Так, на промышленных и сельскохозяйственных предприятиях с низким уровнем квалификации обслуживающего персонала отказы асинхронных двигателей из-за неправильной работы или отказа защиты достигают 40%.

Так как большинство отказов асинхронных двигателей связано с неисправностями обмотки статора, основное внимание должно быть обращено на повышение качества обмоточных работ. Однако имеются и другие слабые звенья дающие заметный процент брака и существенно снижающие показатели надежности. Одним из таких звеньев является подшипниковый узел. Следует упомянуть также о случаях небрежной укладки в пакеты и слабой прессы активной стали, значительной неравномерности воздушного зазора и некачественной балансировки ротора.

Одним из способов повышения качества и надежности асинхронных двигателей является повышение качества проектирования. Для этого могут применяться различные расчетные методы оценки показателей надежности, позволяющие на стадии разработки определить возможность выполнения требуемых уровней показателей надежности, обосновать структурную схему изделия, определить необходимые уровни показателей надежности для комплектующих изделий, агрегатов, узлов, элементов и деталей.

Для проведения расчетов показателей безотказности (основного свойства надежности) изделий применяют методы структурных схем, логических схем и схемно-функциональный метод.

Самым простым методом является метод структурных схем, заключающийся в том, что реальное изделие отображается в виде структурной схемы событий безотказной работы составных частей.

С точки зрения надежности обмотка статора и подшипниковый узел представляют собой систему, все элементы которой соединены логически последовательно и не имеют резервирования [3].

В следствии чего, используем теорему умножения вероятностей для независимых событий и получаем следующую формулу для определения вероятности безотказной работы асинхронного двигателя при последовательном соединении составных частей:

$$P = \prod_{i=1}^N P_i, \quad (1)$$

где P_i - вероятность безотказной работы i -ой составной части; N – количество составных частей.

Рассмотрев наиболее вероятные причины отказов асинхронных двигателей при эксплуатации, можно сделать вывод о том, что повышение качества, надежности и эффективности эксплуатации является комплексной задачей, которая должна учитываться и реализовываться рядом конкретных действий на всех стадиях жизни асинхронного двигателя: проектирования, производства и эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
2. Захарченко П.И., Ширнин Е.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М. Обеспечение надежности асинхронных двигателей. – Донецк: УКРНИИВЭ, 1998. – 324 с.
3. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. – М.: Олита, 2003. – 472 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Углянюк

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, группа 7М350

Во второй половине первого десятилетия XXI в. Международные комитеты по экологии и энергосбережению (IEC, IEA, ACEEE) и их инициативы (SEEEEM, MEPS, Nema Premium Plan, ECCP) приобрели значительное влияние. Анализ докладов международных конференций, посвященных энергоэффективности, позволяет утверждать, что рекомендательные нормы высокой энергоэффективности в ближайшее время перерастут в законодательные акты. Российские предприятия элетромашиностроения должны быть к этому готовы.

Европа и Россия, весьма отстают на пути разработки энергоэффективных двигателей. Среди фирм, их производящих, нет отечественных предприятий. Россия пока не присоединилась и к странам, поддерживающим минимально допустимый уровень КПД [(MEPS)]. Вот несколько стран-участниц MEPS: США, Канада, Китай, Австралия, Израиль, причем в США и Канаде обязательный уровень КПД со-

гласно ЕАСТ примерно соответствует энергоэффективности ie_2 по ИЕС 60034-30 [1].

Важно подчеркнуть, что проблема энергосбережения для России особенно актуальна. Так, потенциал энергосбережения России по данным Минпромэнерго и Гринпис оценивается в 360-430 млн.т условного топлива в год. Это составляет 30% внутреннего потребления энергии в стране. Потенциал энергосбережения России сравним с объемом всей экспортируемой нами нефти и нефтепродуктов. При этом Российская экономика является одной из самых энергоемких в мире. По данным Международного энергетического агентства, энергоемкость ВВП России в 11 раз выше, чем Германии, в 6 раз выше, чем в Канаде, в 4 раза больше, чем Польше. Россия потребляет более 5% всей мировой энергии, около 1000 ТВт/ч в год. Электродвигатели потребляют около 60% всей электроэнергии. Для России это около 600 ТВт/ч в год. Внедрением энергоэффективных двигателей в России (без учета эффекта от регулируемого электропривода) можно сэкономить около 6 ТВт/ч в год или более 12 млрд. руб.

Без преувеличения разработка энергоэффективных асинхронных двигателей (АД), призванных снизить энергоёмкость экономики РФ и реализовать потенциал энергосбережения – проблема государственного масштаба.

Учитывая современные тенденции, наиболее эффективным является использование энергоэффективных двигателей в составе частотно-регулируемых приводов. Это дает снижение массы, габаритов, стоимости, надежности, улучшение динамических характеристик и наивысший КПД.

Целью данной работы является оценка показателей энергоэффективности при модернизации асинхронных двигателей.

В настоящее время одной из основных тенденций при проектировании энергоэффективных АД является повышение коэффициента полезного действия и коэффициента мощности для обеспечения эффективного энергосбережения. Поэтому при выполнении исследований и разработок в области модернизации и оптимизации асинхронных двигателей необходимо создание специальных методик для определения их оптимальных параметров, из условия получения максимальных показателей энергоэффективности (КПД и $\cos\varphi$), и расчета динамических характеристик (время пуска, нагрев обмоток и т.д.). В результате теоретических исследований важно определить наилучшие абсолютные и удельные энергетические характеристик АД.

Увеличение массы активных материалов при их модернизации дает возможность улучшить энергетические показатели АД. Для

обеспечения эффективного энергосбережения при проектировании энергоэффективного электродвигателя возможны следующие способы: совершенствование АД без изменения поперечного сечения; совершенствование АД с изменением поперечной геометрии статора и ротора; применение двух подходов одновременно: изменение поперечной геометрии статора и ротора и изменение их активной длины.

Совершенствование и оптимизация АД с изменением геометрии статора и ротора возможно даст большой эффект, спроектированный электродвигатель будет иметь лучшие энергетические и динамические характеристики. Однако при этом финансовые затраты на его модернизацию и переоборудование производства для его выпуска составляет значительные суммы. Поэтому на первом этапе рассмотрим мероприятия которые не требуют больших финансовых затрат, но при этом позволяют обеспечить реальное энергосбережение.

Одним из таких мероприятий можно считать совершенствование АД без изменения поперечного сечения. Именно увеличение длины активной части статора и ротора позволит нам обеспечить высокие показатели энергоэффективности.

Была произведена модернизация АД с короткозамкнутым ротором за счет изменения его активной длины. В качестве базового двигателя взят асинхронный двигатель АИР112М2 мощностью 7,5 кВт. Для нахождения оптимальной длины были проведены расчеты базового и измененных двигателей, без изменения геометрии поперечного сечения, с заданной мощностью ($P_{2н}$).

Однако изменение только длины сердечников статора и ротора, несмотря на некоторое увеличение КПД, не является наиболее эффективным путем совершенствования АД. Более рациональным является изменение длины сердечников статора и ротора и изменение обмоточных данных двигателя (число витков обмотки W и сечение провода обмотки статора $q_{з\phi}$).

Для решения задачи изменения обмоточных данных АД были оставлены без изменения наружный диаметр сердечника статора (D_a), размеры пазов статора и ротора. В качестве варьируемых величин были приняты число эффективных проводников в пазу статора (u_n) и поперечное сечение провода обмотки статора (S), при этом ограничивающими факторами являлись коэффициент заполнения паза ($k_z = 0,7 \div 0,75$) и плотность тока в статоре ($J = (5 \div 6) \times 10^6$ А/м²). [2]. Значения длины сердечника статора принимались в диапазоне $l = 100 \div 130\%$. Диапазон изменения витков обмотки статора принимался равный $W = 60 \div 110\%$. У базового двигателя значение $W = 108$ витков и $k_H = 0,875$.

На рис. 1 представлен график изменения значения КПД при изменении обмоточных данных и активной длины двигателя. При изменении количества витков обмотки статора, в сторону уменьшения, происходит резкое падение значений КПД до 0,805 и 0,819 у двигателей с длиной 100% и 105% соответственно.

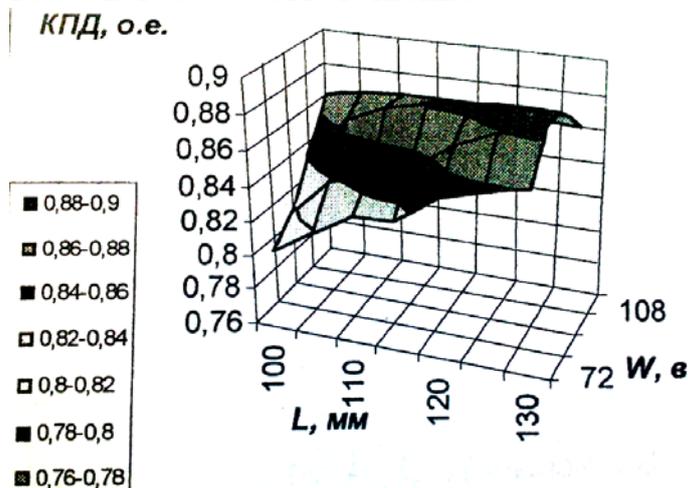


Рис. 1. Зависимость КПД от изменения длины и числа витков

Двигатели в диапазоне изменения длины $l = 110 \div 130\%$ имеют значения КПД выше, чем у базового двигателя, например при $W = 96$ $\eta_n = 0,876, 0,885$ и $W = 84$ $l = 125 \div 130\%$ имеют $\eta_n = 0,876, 0,885$. Увеличение количества витков выше базового также приводит к снижению величины η_n . Исходя из вышесказанного, целесообразно рассматривать двигатели с длиной в диапазоне $110 \div 130\%$, и при снижении количества витков обмотки статора на 10%, что соответствует $W = 96$ витков.

Итак, подводя итоги, следует отметить, что наибольшее значение КПД и $\cos\varphi$ можно получить, модернизируя АД путем увеличения длины сердечников статора и ротора и изменения обмоточных данных.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кобелев А.С. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий // Электротехника. - 2008. - №5. - С. 11-23.
2. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др., Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М: Энергия, 1980. – 488с.

Научный руководитель: О.О. Муравлева, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Т.Т. Балтынов

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Введение

Силовые трансформаторы – это электрические аппараты, для производства которых требуются дорогостоящие материалы: электрическая медь, высококачественная холоднокатаная электротехническая сталь, трансформаторное масло высокой степени очистки и др.

Суммарная мощность силовых трансформаторов при многократной трансформации электрической энергии в 5-6 раз превышает генераторную мощность. Вероятность аварий силовых трансформаторов сегодня оказывается достаточно высокой, что нежелательно из-за следующих соображений:

- потери объекта, как материальной ценности или потребности больших инвестиций на восстановление оборудования;
- вероятности «эффекта домино», когда аварийный процесс затрагивает соседнее оборудование и окружающую среду;
- перерывом в электроснабжении потребителей.

Последнее обстоятельство в условиях рыночной экономики может сопровождаться значительным ущербом, что в итоге может превысить экономические потери от первых двух причин.

Таким образом, можно утверждать, что любые исследования и разработки, направленные на повышение надежности эксплуатации стареющего трансформаторного оборудования, являются актуальными.

Целью работы является рассмотрение причин отказов силовых трансформаторов при эксплуатации.

Классификация отказов высоковольтных электроэнергетических маслонаполненных аппаратов

Комплексная диагностика повреждений силовых трансформаторов с использованием ряда параметров и математическая обработка результатов измерений позволяют прогнозировать серьезные повреждения в эксплуатации, связанные с потерей осевой и радиальной устойчивости обмоток, скручиванием и повреждением регулировочной обмотки, полеганием витков и др. [1].

Естественно, что надежность работы сетей, электростанций и энергосистем в значительной степени зависит от надежности масло-

наполненного оборудования (силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, вводов, трансформаторов тока и напряжения), тем более, что значительная часть трансформаторов отработала определенный стандартом срок службы – 25 лет [2], а техническое перевооружение трансформаторов в силу сложившихся условий идет крайне медленно в 1993 г. оно составило 1,1%, а в 1999 г. только 0,5%.

Перед эксплуатационными службами встают вопросы обоснования продления срока службы длительно работающего электрооборудования с точки зрения снижения вероятности риска его повреждения.

Для анализа причин отказов при работе трансформаторов в первую очередь необходима следующая информация:

- распределение повреждений по основным узлам трансформаторов разных классов напряжений;
- характеристики тяжести повреждений;
- частота повреждений в зависимости от срока службы трансформаторов;
- причины и последствия повреждений.

Таблица 1
Распределение повреждений силовых трансформаторов

Узел	%	Класс напряжения, кВ					Всего
		35	110	220	330	500	
Обмотки	30	13	7	8	0	16	
Магнитопровод	0	0	1,5	8	0	0,5	
Система Охлаждения	3	5	6	15	14	5	
РПН	2	18	19	8	24	13,5	
Вводы	13	23	32	23	34	22	
Течь масла	7	10	15	23	19	11	
Упуск масла	30	22	18,5	15	9	23	
Вандализм	15	9	1	0	0	9	
Итого	100	100	100	100	100	100	

В таблице 2 приведено распределение повреждений силовых трансформаторов по узлам в зависимости от продолжительности их эксплуатации.

Таблица 2

Распределение повреждений силовых трансформаторов по узлам с указанием продолжительности их эксплуатации

Узел	Число повреждений по продолжительности их эксплуатации					Всего
	10 лет	10-20 лет	20-30 лет	30-40 лет	>40 лет	
Обмотки	23	25	23	28	12	111
Магнитопровод	0	0	1	0	0	1
Система Охлаждения	2	14	13	1	0	30
РПН	12	28	21	10	0	71
Вводы	15	37	38	31	9	130
Течь масла	12	16	19	11	3	61
Упуск масла	12	22	22	14	5	75
Вандализм	3	6	10	1	1	21
Итого	79	148	147	96	30	500

Как следует из таблицы 1, наибольшую повреждаемость имеют высоковольтные вводы – 22%, устройства РПН – 13,5%. Значительная доля отказов приходится на течи (11%) и упуск трансформаторного масла (23%).

Из таблицы 2 видно, что повреждения обмоток имеют место у трансформаторов с любыми сроками эксплуатации. Для РПН наибольшее число повреждений у трансформаторов со сроками эксплуатации 10-30 лет, для высоковольтных вводов – после 10 лет эксплуатации. Однако эти данные не позволяют сделать оценку зависимости повреждаемости от срока эксплуатации [3].

На рисунках 1 и 2 представлены распределения повреждений для силовых трансформаторов напряжения 35 и 220 кВ по узлам.

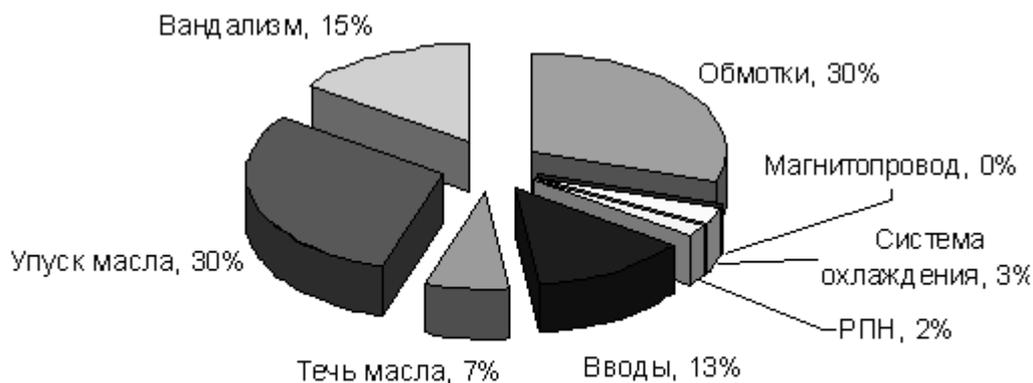


Рис.1. Причины повреждений по узлам силовых трансформаторов напряжением 35 кВ

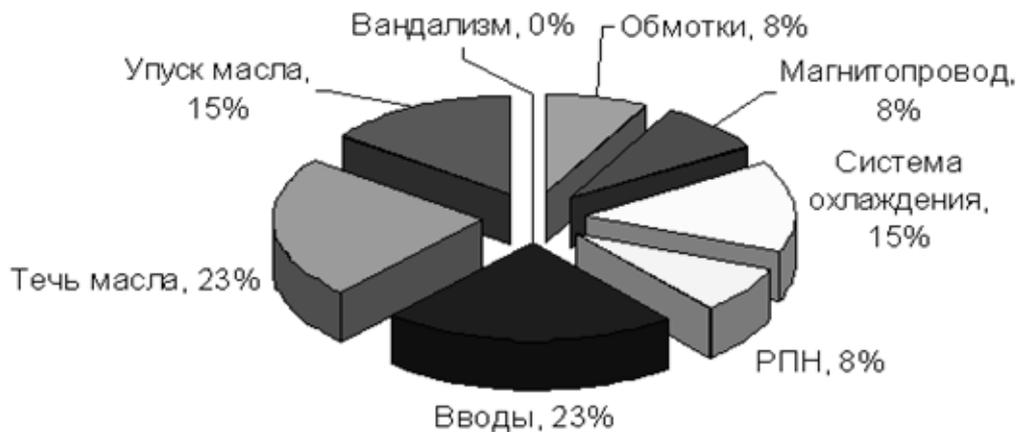


Рис.2. Причины повреждений по узлам силовых трансформаторов напряжением 330 кВ

Таким образом, из рисунков 1 и 2 видно, что причины повреждений зависят от класса напряжения трансформаторов. Так для трансформатора напряжения 35 кВ наибольшее значение имеют отказ обмоток и упуск масла, а для трансформатора 330 кВ наибольшее значение имеют отказ вводов и упуск масла.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений. — М.: Мир, 1989. — 512 с.
2. ГОСТ 11677 – 85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Издательство стандартов.
3. Ванин Б.Н., Львов Ю.Н., Неклепаев Б.Н. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. – 2001. - №9. – С. 53-58.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

СИЛЫ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Р.М. Рашидов
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, группа 7М350

При эксплуатации трансформаторов возникают режимы, сопровождающиеся существенным увеличением тока в обмотках: короткие замыкания (КЗ), единичные и многократные перегрузки, включение в сеть и др.

Особо опасны в этом смысле короткие замыкания, хотя в ряде случаев больших значений могут достигать и токи включения. Силовые трансформаторы должны быть спроектированы и изготовлены так, чтобы выдерживать без повреждений при внешних коротких замыканиях на любом регулировочном ответвлении обмоток, соответствующих режимам работы трансформатора, как электродинамические (механические), так и термические воздействия при КЗ. Стойкость трансформаторов при КЗ обеспечивается расчетами, проверяется и подтверждается испытаниями. Как правило, расчеты и испытания должны соответствовать наиболее опасному внешнему КЗ на вводах трансформатора (обычно — это трехфазные КЗ, хотя могут быть и другие, например, однофазные в мощных энергосистемах, несинхронные включению генераторов в сеть и т. д.).

Механические силы, действующие на обмотки, зависят от конструкции обмоток, размещения витков и токов, протекающих в обмотках. [2]

Основными этапами обеспечения стойкости трансформатора при КЗ являются:

расчеты тока КЗ и ударных токов;

- расчеты магнитного поля;
- определение электродинамических сил, действующих в обмотках, витках (осевых, радиальных, тангенциальных);
- нахождение распределения механических напряжений и деформаций под действием этих сил;
- анализ прочности и устойчивости обмоток, их элементов, и оптимизация конструкции.

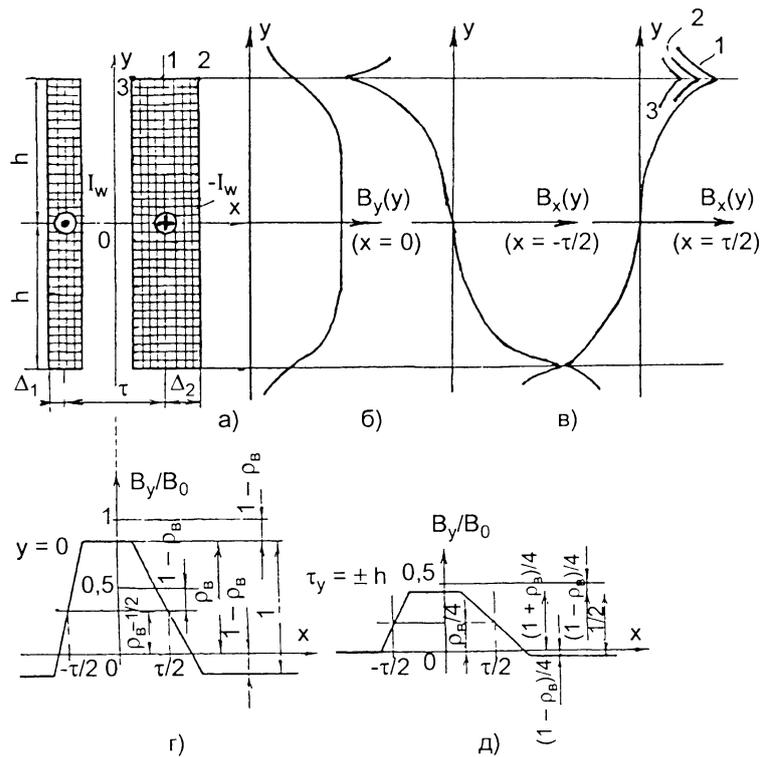


Рис. 1. Осевая и радиальная составляющая индукции двухобмоточного трансформатора для характерных точек поля рассеяния обмоток: а) сечение обмоток, б) график осевой составляющей индукции вдоль канала рассеяния, в) графики распределения радиальной индукции по середине радиального размера обмоток НН и ВН (как правило, на обмотке НН, ближайшей с сердечнику, радиальная индукция больше, чем на обмотке ВН), г) и д) графики распределения осевой составляющей индукции вдоль радиуса в середине высоты обмоток и на торцах. При оценке индукции в характерных точках $B_0 = \mu_0 I_w / 2h$. Радиальная индукция $B_x/B_0 = \alpha/2\pi$, где для точки 1 $\alpha = \ln \tau / \Delta_2 + 1$, для точки 2 $\alpha = \ln[(\tau + \Delta_2)/2 \Delta_2] + 1$, для точки 3 $\alpha = \ln[(\tau + \Delta_2)/2 \Delta_2] + 1$. [4] рекомендуемой силы прессовки обмоток P_0 .

Как видно из рис. 1, максимальное поле сосредоточено в канале рассеяния между обмотками [3]. Анализируя магнитное поле реального трансформатора, прежде всего, проводят построение кривой изменения МДС (удельных ампервитков) вдоль радиуса на середине высоты обмоток, которая для двухобмоточного трансформатора имеет вид трапеции с максимумом МДС в канале между обмотками — канале рассеяния. Кривая осевой составляющей индукции B_y в первом приближении повторяет эту трапецию. Осевая составляющая индукции в большом объеме канала рассеяния остается примерно одинаковой, снижаясь только к торцам обмотки. На уровне торцов обмоток кривая индукции вдоль радиуса также имеет вид, близкий к трапеции, значе-

ния индукции при этом примерно вдвое ниже, чем на середине высоты.

Расчет силового трансформатора по [3] не дает полноценного и всестороннего представления о силах, действующих в обмотках и витках силового трансформатора. Силы эти представлены по упрощенной схеме, 2-3 векторами, что мало для полного анализа ситуации (тангенциальная сила здесь не представлена вообще, а в энергетике не мал процент выхода трансформаторов из строя вследствие «закручивания» обмоток вокруг своей оси под действием как раз этой силы). Для прояснения ситуации возможен анализ вариаций обмоток, а так же конфигураций конструкции. Для этих целей используются различные пакеты САД приложений, такие как MathCAD, Multiphysics, Ansys. Причем первый пакет используется для расчета геометрии конструкции, а вторые два - для проверки достоверности результатов, полученных с помощью первого пакета.

Как показывает анализ аварий трансформаторов в эксплуатации и повреждений при испытаниях на стойкость при КЗ, осевые силы представляют одну из главных причин повреждений трансформаторов. Осевые силы, которые возникают в трансформаторах, возрастают с увеличением их мощности. В частности, для трансформаторов предельной мощности максимальная интегральная сила в обмотке достигает многих сотен тонн (тысяч килоньютонов кН), примерная оценка такова: осевая сила в тоннах соответствует мощности трансформатора в МВ•А. Осевые силы, действующие на каждую катушку (виток), вызывают изгиб проводников в пролете между дистанцирующими прокладками. Каждый проводник можно рассматривать как балку, защемленную между прокладками, на которую действует равномерно распределенная по расчетной длине балки ($\pi D/cn - bn$) осевая сила $20.5 I_k V_x$, где D — средний диаметр концентри (т. е. катушки), cn — число столбов прокладок по окружности катушки, bn — ширина дистанцирующей прокладки, $20.5 I_k$ — амплитуда тока провода, V_x — радиальная составляющая индукции магнитного поля. Максимальное механическое напряжение изгиба в проводе рассчитывают для той катушки, где максимальна индукция V_x .

Суммируясь по виткам и катушкам вдоль обмотки, осевые силы создают силы на торцах обмотки (опорах) и механические напряжения сжатия в витковой изоляции и изоляционных дистанцирующих прокладках, которые могут привести к потере осевой устойчивости проводов, к полеганию проводов. [5] Эти силы могут разрушить концевую изоляцию обмоток, изогнуть прессующее кольцо, повредить (вывернуть, изогнуть) прессующие винты, домкраты, деформировать

прессующие балки. (рис. 2.) Основной задачей расчета осевых сил является определение

- сил на верхних и нижних опорах обмоток $R_{\text{верх}}$ и $R_{\text{низ}}$;
- максимальной осевой силы в обмотке R_{max} и вызываемого ею максимального давления в прокладках;

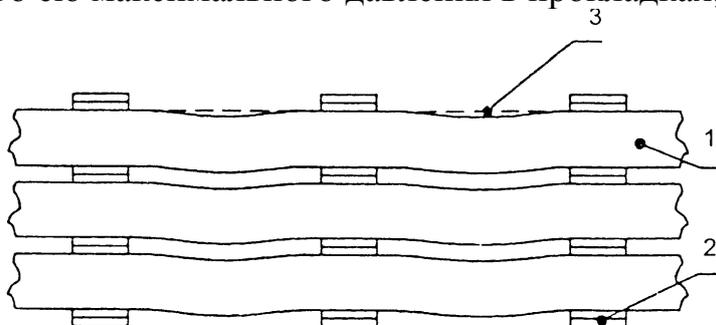


Рис. 2. Прогиб проводников в пролете между столбами прокладок под действием изгибающих осевых сил: 1 — проводники, 2 — прокладки, 3 — прогиб.

Потеря устойчивости обмоток — одна из самых частых причин аварий трансформаторов в эксплуатации и при испытаниях на стойкость при КЗ. Характерная деформация потери радиальной устойчивости — волна радиальных деформаций вдоль почти всей высоты обмотки там, где максимальна осевая индукция магнитного поля рассеяния. Деформированная при потере устойчивости каждая катушка почти по всему периметру «обжимает» расположенный внутри нее стержень или обмотку, а в одном месте она имеет несимметричный выброс, волну, (в зарубежной литературе для такой деформации встречался образный термин «лепесток маргаритки»).

Широкое внедрение динамических расчетов в практике проектирования трансформаторов только еще начинается, и статические расчеты сохраняют свою актуальность [5]. Одним из самых важных затруднений при использовании динамических расчетов осевых сил представляется то, что этот расчет должен органически сочетаться с механическим расчетом обмоток и прессующих конструкций также при действии динамических нагрузок (а не статических, как это сейчас принято), а такие расчеты пока еще при проектировании трансформаторов развиты недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 0380.ru/?Характерные_0D%0Aповреждения_transformatorov
2. www.voasw.ru/index.php?show_aux_page=25

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976. - 544 с.
4. Лурье А.И. Об определении максимального тока при включении цепи RL на переменное напряжение // Электричество. - №12.
5. Зенова В.П., Иванова Н.С., Лурье С.И., Мильман Л.И. Электродинамическая устойчивость наружных обмоток трансформаторов больших мощностей // Электричество. - 1971. - №10.
6. Бунин А.Г., Конторович Л.Н., Виногреев М.Ю. Расчет распределения токов и напряжений в обмотках трансформаторов // Электротехника. — 1977. — № 4.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.В. Борисенко
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Прогнозируемый рост суммарной мощности генерирующего оборудования неизбежно приведет к необходимости увеличения удельных параметров, повышению качества и долговечности современных электрических машин. Реальной возможностью реализации этих требований является разработка и внедрение новых электроизоляционных материалов и систем электромашинной изоляции в целях повышения удельной мощности электрических машин за счет снижения геометрических размеров и улучшения эксплуатационных характеристик соответствующих систем изоляции.

Анализ динамики изменения толщины корпусной изоляции статорных обмоток электрических машин в течение прошедшего столетия показывает, что геометрические размеры изоляции снизились достаточно существенно (более чем в 5 раз), обеспечив тем самым рост удельной мощности современных электрических машин в десятки раз. Такой прогресс достигнут за счет кардинального изменения электроизоляционных материалов, используемых при производстве систем электромашинной изоляции: от старых термопластичных до современных терморезистивных материалов с различным содержанием природной слюды. Слюда, обладающая высокой электрической прочностью, короностойкостью и стойкостью к механическому износу в результате трения, является одним из лучших из существующих неорга-

нических диэлектриков, наиболее адекватно отвечающих условиям эксплуатации диэлектриков в электрических машинах. За последние 45 лет содержание слюды в изоляции статорных обмоток электрических машин возросло практически в 3 раза (с 25 в 1960 г. до 67% 2005 г.), обеспечив существенное улучшение электрических характеристик (электрической прочности, диэлектрических потерь, долговечности) электромашиной изоляции.

Развитие конструкций турбо- и гидрогенераторов, а также высоковольтных электродвигателей идет по пути увеличения единичной мощности. В связи с этим повышаются требования к существующим электроизоляционным материалам и более четко выявляются недостатки ранее применявшихся материалов и систем изоляции.

На всех этапах развития электромашиностроения одной из самых сложных конструктивных задач была разработка качественной изоляции статорной обмотки, которая оказывает наибольшее влияние на обеспечение надежности электрической машины.

В любой электрической машине активная зона, в которой собственно и происходит преобразование энергии, состоит из проводниковых, магнитопроводящих и изоляционных материалов. Первые две группы – неизбежные составляющие процесса преобразования, изоляция служит для их надежного разделения. Но именно она в значительной мере определяет, с одной стороны, уровень удельных затрат на создание электрической машины, а, с другой, - надежность ее работы. Это особенно касается мощных турбо- и гидрогенераторов с высокими номинальными напряжениями от 10,5 кВ и выше.

Проводниковые и магнитопроводящие материалы для электрических машин несколько десятилетий не претерпевают заметных изменений. Поэтому весь прогресс в энергетическом электромашиностроении осуществляется исключительно благодаря усовершенствованию высоковольтных изоляционных систем, а также внедрению новых технологий переработки материальных ресурсов.

В последние десятилетия изоляция высоковольтных электрических машин получила дальнейшее развитие в связи с появлением новых прогрессивных диэлектрических материалов и совершенствованием технологии изготовления самой изоляции.

Эффективность электроизоляционных материалов реализуется через системы изоляции электрической машины. Они в большой мере определяют эксплуатационные, энергетические характеристики, долговечность и надежность электрических машин. Повышение качества изоляции позволяет увеличить электрические, физико-механические, тепловые нагрузки, т.е. удельные характеристики электрической ма-

шины. В итоге достигается относительное сокращение расхода электротехнической стали, черных и цветных металлов, обмоточной меди на единицу мощности электрической машины. Расчеты показывают, что за счет снижения толщины изоляции на 15-20% мощность электрических машин может быть повышена в тех же габаритах на 4-10%, что соответствует снижению расхода черных и цветных металлов на 3-8%. Повышение допустимого перегрева электрической обмотки на 200 С позволяет увеличить мощность электрической машины на 13-15%, т.е. на 10-12% снизить их материалоемкость. От качества электроизоляционных материалов также во многом зависит степень механизации и автоматизации обмоточно-изолирующих работ, длительность технологического цикла изготовления изоляции.

К высоковольтным электрическим машинам относят турбо- и гидрогенераторы, электродвигатели с номинальным напряжением от 6 кВ и выше.

Основными частями статора электрической машины являются сердечник и обмотка. В зависимости от конструкции машины статорная обмотка может быть стержневой и катушечной. Прямолинейный участок обмотки, уложенный в сердечник, называется пазовым; остальная часть обмотки, выступающая из него, - лобовой.

В конструкции стержней турбо- и гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей применяют обмоточные провода прямоугольного сечения со стекловолоконной изоляцией, наиболее широко – марок ПСД и ПЭТВСД. Токпроводящая жила провода изготавливается из медной проволоки прямоугольного сечения, изолированной термостойкой эмалью и двумя слоями стеклянных нитей с пропиткой термостойким лаком.

В настоящее время для замены этих проводов выпускаются новые обмоточные провода марки ПЭТСО с утоненной эмалево-стекловолоконной изоляцией и повышенным значением пробивного напряжения. Изоляция провода хорошо совместима с эпоксидными связующими и пропиточными составами.

Для повышения электрической прочности витковой изоляции для конструкций с катушечными обмотками разработаны и широко применяются слюдяные ленты элмикафол 52801, состоящие из полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-Э и слюдяной бумаги.

Для улучшения качества обмоточных проводов необходимо проводить следующие мероприятия:

- повышать чистоту меди, обеспечивающую увеличение электропроводности;

- заменять технологии волочения прямоугольной проволоки на прецезионную прокатку, исключаящую наличие мелких дефектов на поверхности проволоки, в которых концентрируется повышенная локальная напряженность электрического поля;
- заменять «мокрый отжиг», не обеспечивающий чистоту поверхности и отсутствие окисленности, на отжиг в защитной газовой среде[1].

Задачей является проектирование высоковольтного асинхронного двигателя для вентилятора шахтного оборудования. Технические требования на проектирование двигателя: номинальная мощность 200 кВт; число полюсов $2p=4$; номинальное напряжение $U_n=6$ кВ; соединение фаз – звезда.

Потребность в высоковольтном двигателе обусловлена следующими факторами:

1. Наличие сети линейного напряжения 6 кВ;
2. Повышение надежности высоковольтного двигателя с жесткой катушечной обмоткой по сравнению с низковольтными двигателями, имеющими всыпную обмотку.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пак В.М., Трубочев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин / Под ред. В.М. Пака. – М.: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.

Научный руководитель: В.С. Баклин, доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЧАСТОТУ ВРАЩЕНИЯ

А.Ю. Берг

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

При возрастающей популярности бесколлекторных и асинхронных тяговых электродвигателей с полупроводниковыми преобразователями в последние годы всё же сохраняется научный интерес к коллекторным тяговым электродвигателям (ТЭД) постоянного тока. В

основном изучаются такие проблемы, как коммутация, которая бесспорно является главной проблемой коллекторных ТЭД.

Положительными свойствами двигателей постоянного тока, способствующими их довольно широкому распространению, является, во-первых, возможность получения практически любых частот вращения, хорошие массогабаритные показатели; во-вторых, большой пусковой момент и сравнительно высокий КПД. Эти двигатели особенно широко применяются в электрическом транспорте там, где необходимы плавное регулирование частоты вращения и большой пусковой момент.

В настоящее время, при высокой тенденции развития полупроводниковых приборов (преобразователи частоты), позволяющих плавно изменять частоту питающего напряжения, в качестве электрической тяги в транспорте стали применять асинхронные двигатели, которые отличаются от двигателей постоянного тока (ДПТ) своей простотой конструкции. Однако цена таких приборов соизмерима с ценой электровоза с ДПТ. Всё это говорит о том, что двигатели постоянного тока будут использоваться достаточно долго.

В настоящее время на сети железных дорог эксплуатируется более 70 тыс. ТЭД на электровозах различных типов.

- 36% двигатели НБ-418К6;
- 38% двигатели ТЛ-2К1.
- 78% ТЛ-2К1 находятся за пределами установленных сроков службы (25 лет).

Около 95% ТЭД имеют срок службы более 15 лет, это означает, что все ТЭД уже восстанавливались в объёме среднего и капитального ремонтов.

В эксплуатации электровозов с ДПТ существует проблема подбора ТЭД после ремонта. Необходимо подобрать ТЭД с близкими значениями частот вращения, при этом колёсные пары должны иметь одинаковый износ. Практика депо показывает, что у всех ТЭД частоты вращения разные. Следствием этого является повышенный износ колёсных пар, боксование.

Известно, что качество проведения ремонтов влияет на некоторые параметры ТЭД, от которых зависит частота вращения.

Таблица 1

дата вид ремонта	направле- ние вра- щения	частоты вращения ТЭД (об/мин)								разность х-к %
		Д 1	Д 2	Д 3	Д 4	Д 5	Д 6	Д 7	Д 8	
29.09.09. ТР-3	в право	802	806	818	824	815	813	817	822	2,5
	в лево	805	802	805	816	814	800	822	805	2,8

В таблице 1 сведены данные о частотах вращения двигателей (Д1-Д8) после ремонта.

Методика подбора ТЭД на электровозах в настоящее время есть, но она основана на субъективном опыте специалистов депо, а универсальной научно-обоснованной методики подбора ТЭД не существует.

ГОСТ 2582-81 допускает отклонение частоты вращения ТЭД $\pm 3\%$ от номинального значения, а разность между частотой вращения в одну и другую стороны должна быть не более 4% .

Однако, результаты математической обработки многочисленных данных при испытаниях в депо «Тайга» показали, что износ локомотива повышается по причине комплектации электровозов тяговыми электродвигателями с различными частотами вращения.

Поэтому исследование влияния отклонений параметров ТЭД на частоту вращения является актуальным. Результатом данного исследования станет универсальная научно – обоснованная методика подбора ТЭД на электровозы.

К параметрам ТЭД постоянного тока относятся:

- активное и индуктивное сопротивление машины;
- индуктивное сопротивление рассеяния.

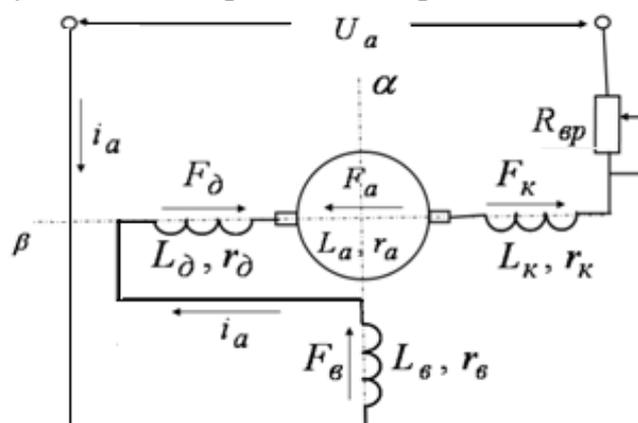


Рис. 1. Схема математической модели машины постоянного тока.

На рис. 1 обозначены: U – напряжение, приложенное к зажимам машины; L_a и r_a – индуктивность и омическое сопротивление обмотки

якоря; L_d и g_d – индуктивность и омическое сопротивление обмотки добавочных полюсов; L_k и g_k – индуктивность и омическое сопротивление компенсационной обмотки; i_a – ток в цепи якоря; $R_{вр}$ – регулировочное сопротивление тока возбуждения; L_v и g_v – индуктивность и омическое сопротивление обмотки возбуждения. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения F_v направлена по продольной оси α . Поперечная ось β является геометрической нейтралью. Омическое сопротивление цепи обмоток якоря:

$$r_{a\beta} = r_a + r_k + r_d + r_v; \quad (1)$$

$$L_{a\beta} = (L_a + L_k + L_d) + 2 \cdot (m_{k\delta} - m_{ak} - m_{a\delta}); \quad (2)$$

Уравнение равновесия напряжения машины постоянного тока последовательного возбуждения имеет вид:

$$U = i_a \cdot r_{a\beta} + \frac{d\Psi_a}{dt} + \frac{d\Psi_v}{dt} = i_a \cdot r_{a\beta} - e_a - e_v; \quad (3)$$

Потокоцепления машины постоянного тока последовательного возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_a &= L_{a\beta} \cdot i_a; \\ \Psi_v &= L_v \cdot i_a; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Вышеуказанные параметры могут иметь отклонения, которые в свою очередь влияют на картину основного магнитного потока и на сам поток, а следовательно и на частоту вращения якоря ДПТ.

$$n = C_k \cdot \frac{U - I_a \cdot \sum R}{\Phi} \quad (5)$$

К отклонениям этих параметров приводит ряд следующих факторов, а именно:

- положение щёток относительно линии геом. нейтрали;
- сопротивление обмоток возбуждения (ОВ);
- коммутационная реакция якоря;
- величина воздушного зазора.

Таким образом, можно сделать вывод, что на частоту вращения влияют факторы, перечисленные выше. Эти факторы зависят прежде всего от качества ремонта ТЭД в локомотивном ремонтном депо.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бочаров В.И., Захаров В.И., Коломейцев Л.Ф. Тяговые электродвигатели электровозов. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с.

2. Исмаилов Ш. К. Повышение коммутационной устойчивости электродвигателей. www.zdt-magazine.ru
3. Тяговый электродвигатель и вспомогательные машины. Тяговый электродвигатель ТЛ-2К1; техническое обслуживание тяговых электродвигателей ТЛ-2К1. poezdvl.com
4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. - Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
5. Электрическая тяга на рубеже веков / Под ред. А.Л. Лисицына.- М.: Интекст, 2000. — 256 с.
6. Железнодорожный транспорт на современном этапе. Задачи и пути их решения / Под ред. А.Е. Семечкина. - М.: Интекст, 2008. — 288 с.

Научный руководитель: О.Л. Рапопорт, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

С.Н. Супрун

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

Были рассмотрены положительные качества синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов, приведены основные положительные свойства и недостатки таких магнитов, краткие сведения о магнитно-твердых материалах и стабильности их свойств, о технологии их изготовления на основе неодим-железо-бор, которые обладают наилучшими магнитными свойствами:

$$(B_r \neq 1,2 \div 1,2 \quad , \quad c \neq 100 \div 900 \quad / \quad , \quad W_{K \max} = 75 \div 135 \quad / \quad ^3).$$

Магнитная проницаемость редкоземельных магнитов, как и ферритов, близка к магнитной проницаемости воздуха ($\mu = (1,1 \div 1,3)\mu_0$). Все это обусловило повышенный интерес, который проявляется к ним в последнее время.

Было проведено сравнительное исследование влияния двух видов низкотемпературного отжига на качества постоянных магнитов: 1) изотермической обработки (ИТО) и 2) термоциклической обработки (ТЦО). Показано, что коэрцитивная сила спеченных магнитов Nd-Fe-B под воздействием ТЦО в интервале от комнатной температуры до 550°C увеличивается по сравнению с Hс, полученной после ИТО при

550°C. При быстром охлаждении магнитов от 650°C до комнатной температуры напряжения накапливаются. В свою очередь эти напряжения являются движущей силой релаксационных процессов на границе раздела, которые способствуют установлению когерентной связи в результате отжига при 500-550°C. Наилучшие свойства имеют спеченные магниты, приготовленные из частично дегидрированного сплава [1].

Было изучено, что повышенная влажность окислительной среды может оказывать существенное влияние на диффузионный массоперенос в окалине, способствовать созданию электрохимических условий гальванических пар между различными компонентами покрытия и подложки, а также приводить к образованию летучих продуктов окисления. Именно этими причинами следует объяснить результаты исследования коррозионных свойств покрытий на магнитах Nd-Fe-B. На исходных образцах без покрытий при окислении не образуется защитной плёнки, на них наблюдается монотонная убыль массы, т.е. подтверждается факт деградации сплава Nd-Fe-B во влажной среде. На магнитах с диффузионным цинковым покрытием окисление характеризуется стабильно невысоким привесом, что позволяет сделать вывод о их достаточно высокой коррозионной стойкости. Все остальные исследования покрытия характеризуются немонотонным характером окисления, при этом в зависимости от времени окисления наблюдается как привес, так и убыль массы образцов Nd-Fe-B с защитными покрытиями.

Таким образом, проведённые исследования коррозионной стойкости магнитов Nd-Fe-B с защитными покрытиями во влажной атмосфере позволяют заключить, что диффузионные цинковые и цинк-алюминиевые покрытия могут быть рекомендованы для защиты магнитов при их эксплуатации во влажной атмосфере [2].

При изучении естественного старения со временем постоянных магнитов из сплавов типа ЮНДК, феррита бария и Nd-Fe-B, учтено влияние температуры на долговечность постоянных магнитов. Магниты из Nd-Fe-B имеют очень большой разброс изменения "В" со временем, связанный с тем фактом, что частные фирмы, изготавливающие магниты из этого магнитотвердого материала (МТМ), в основном не имеют технических условий на МТМ и магниты из него, то есть технология их изготовления и их магнитные параметры нестабильны и время от времени изменяются. Для установившейся технологии изготовления МТМ и магнитов из него (имеются утверждённые технические условия) проверена долговечность при комнатной температуре

в течение 13,5 лет. Изменения “В” за это время не превышают $\pm 2,0\%$ [3].

Также рассматривались проблемы создания прямого (безредукторного) электропривода для трубопроводной запорной арматуры. Показаны приоритеты применения электрического привода на базе вентильного двигателя для запорной аппаратуры по сравнению с редукторным электроприводом, а также описывается вариант его построения [4].

В результате проделанной работы можно сделать вывод:

Выбраны для синхронных машин с постоянными магнитами магниты на основе Nd-Fe-B, которые обладают наилучшими магнитными свойствами:

$$(B_T \neq 1,0 \div 1,2 \quad , \quad c \neq 100 \div 900 \quad / \quad , \quad W_{K_{max}} = 75 \div 135 \quad / \quad ^3).$$

Магнитная проницаемость редкоземельных магнитов, как и ферритов, близка к магнитной проницаемости воздуха ($\mu_m = (1,1 + 1,3)\mu_0$).

Постоянные магниты на основе Nd-Fe-B должны иметь защитные покрытия цинковые и цинк - алюминиевые для защиты магнитов при их эксплуатации во влажной атмосфере.

Ряд качеств вентильных двигателей с постоянными высокоэнергетическими магнитами делает привлекательным их использование в безредукторных электроприводах, в том числе трубопроводной арматуры. Во-первых, это способность вентильных двигателей развивать существенные крутящие моменты на низких скоростях вращения. Во-вторых, высокие энергетические показатели: КПД и $\cos\varphi$, лучше массогабаритные показатели. В-третьих, электропривод на базе вентильного двигателя с такими магнитами обладает остаточным фиксирующим моментом в отключенном состоянии (до 30 % от номинального крутящего момента).

Недостатки: относительная высокая стоимость, по сравнению с обычными частотно-регулируемыми АД.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Попов А.Г., Пузанова Т.З., Гавико В.С., Василенко Д.Ю., Вяткин В.П. Особенности формирования высококоэрцитивного состояния в спеченных магнитах Nd-Fe-B-Ga при термоциклической обработке // Физика металлов и металловедение. - 2006. - №6

2. Змий В.И., Ковалевский М.Ю., Карцев Н.Ф., Рыжова Т.П. Защита постоянных магнитов Nd-Fe-B от коррозии во влажных средах // Техника машиностроения. - 2006. - №2
3. Каневский Е.И., Казина Г.А., Колпакова Н.Ф., Нечепуренко И.С., Орлова Т.С. Долговечность постоянных магнитов //Электронная техника, сер.1, СВЧ – техника. – 2008. - №1
4. Антропов А.Т. Безредукторный электропривод трубопроводной арматуры // Журнал интеллектуальных технологий «Itech». - 2008 ноябрь.

Научный руководитель: В.С. Баклин, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОРЦЕВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Р.Р. Васбеев

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М340

В автономных импульсных устройствах с использованием емкостного накопителя энергии всегда должен первичный источник. Как правило, в качестве первичного источника используют, вращающиеся электрические машины. В условиях ограничения мощности привода в автономных устройствах электрическую машину следует рассматривать как некоторый инерционный накопитель энергии. Обычно для этих целей применяют синхронный генератор традиционной конструкции с маховиками для увеличения запаса кинетической энергии ротора, что приводит к увеличению транспортной массы источника. С целью снижения массы источника целесообразно применять машины нетрадиционной торцевой конструкции. В этих машинах функции индуктора и маховика совмещены в двухпакетном роторе. Схема такой конструкции представлена на рисунке 1.

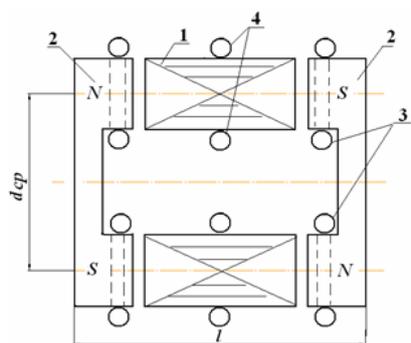


Рис. 1. Конструктивная схема активной части торцевого высоковольтного генератора

Статор генератора представляет ряд аксиальных зубцовых вставок 1, шихтованных из электротехнической стали. С целью увеличения электрической прочности элементов машины вставки изолированы друг от друга. На изоляционных каркасах вставок уложены слоевые обмотки якоря 4. Статор располагается между дисками двухпакетного ротора. Диски-индукторы 2 с укрепленными на их полюсных выступах обмотками возбуждения 3, расположены с торцов статора.

Для оценки массы, габаритов и энергетических возможностей торцевых электрических машин проведены расчеты высоковольтных трёхфазных генераторов мощностью $P = 60$ кВт с напряжением $U = 100$ кВ, наиболее характерных для автономных передвижных устройств. Расчеты проведены по методике, изложенной в [2]. В проводимых расчетах во всех случаях величины мощности, напряжения и активной длины машины оставались постоянными, а варьировались только средний диаметр пакета ротора от 0,35 м до 0,50 м и частота вращения с 1500 об/мин до 3000 об/мин при числе полюсов $2p=4$.

Кинетическая энергия ротора определялась по формуле:

$$W_k = m_u \left(\frac{d_{cp} \Omega}{4} \right)^2, \text{ Дж}$$

где d_{cp} - средний диаметр витого пакета ротора

Ω - угловая частота вращения, которая определяется как:

m_u - суммарная инерционная масса ротора.

Удельная масса рассчитывалась по формуле:

$$\rho_m = \frac{m_n}{d_{cp}^2 l}, \text{ кг/м}^3$$

где l – осевая длина машины;

m_n - полная масса машины.

На рисунке 2 представлены зависимости осевой длины генератора от изменения среднего диаметра при разных частотах вращения.

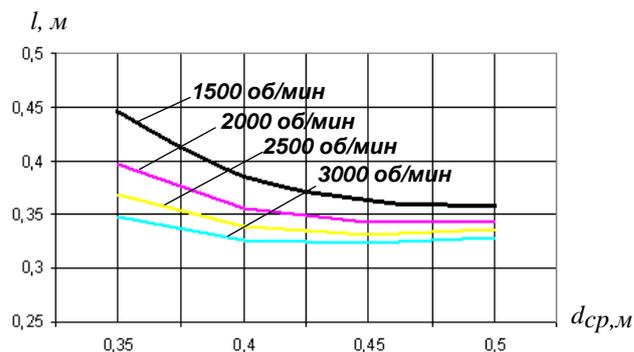


Рис. 2. Зависимости осевой длины торцевого генератора l от диаметра dcp и частоты вращения n.

Логично заключить, что при постоянных ЭДС, потоке и активной длине с увеличением частоты вращения увеличивается частота ЭДС. При этом при условии, что выходное напряжение генератора не должно измениться, необходимо уменьшить число витков обмотки якоря. С уменьшением числа витков обмотки якоря уменьшается длина зубцовой вставки статора и соответственно уменьшается осевая длина торцевого генератора.

Частота вращения существенно влияет на массу активных материалов статора. Влияние частоты вращения на массу меди и активной стали якоря (статора) представлено на рисунках 3а и 3б. Уменьшение массы активной стали магнитопровода статора и меди якорной обмотки обусловлено уменьшением осевой длины зубцовых вставок торцевого генератора.

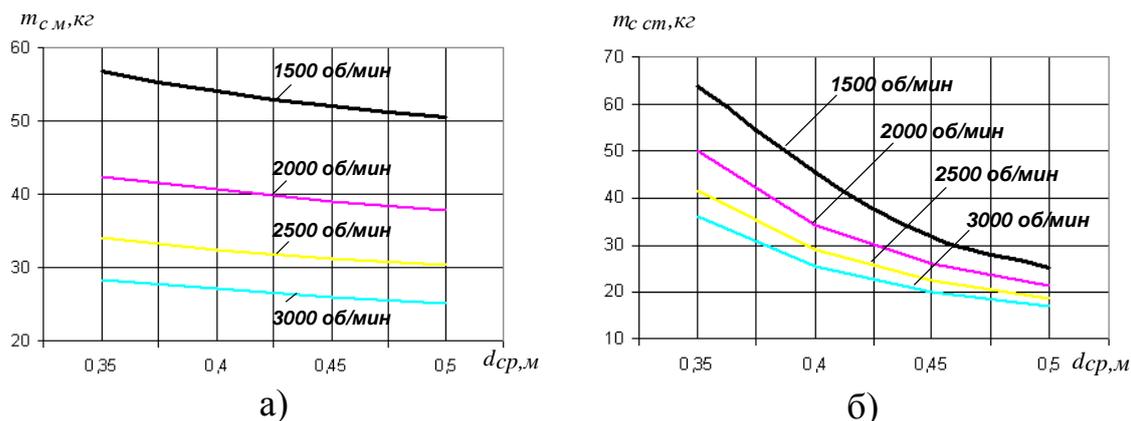


Рис. 3. Зависимость массы меди статора (а) и массы стали (б) от диаметра dcp и частоты вращения n.

Частота вращения не влияет на массу активных материалов ротора при заданных константах расчета. Как показано на рисунках 5а и 5б.

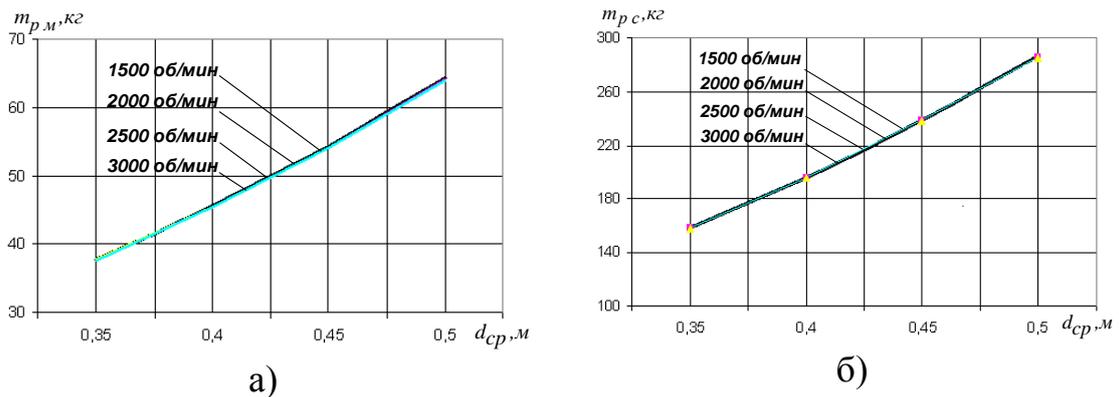


Рис. 5. Зависимость массы меди ротора (а) и массы стали (б) от диаметра d_{cp} .

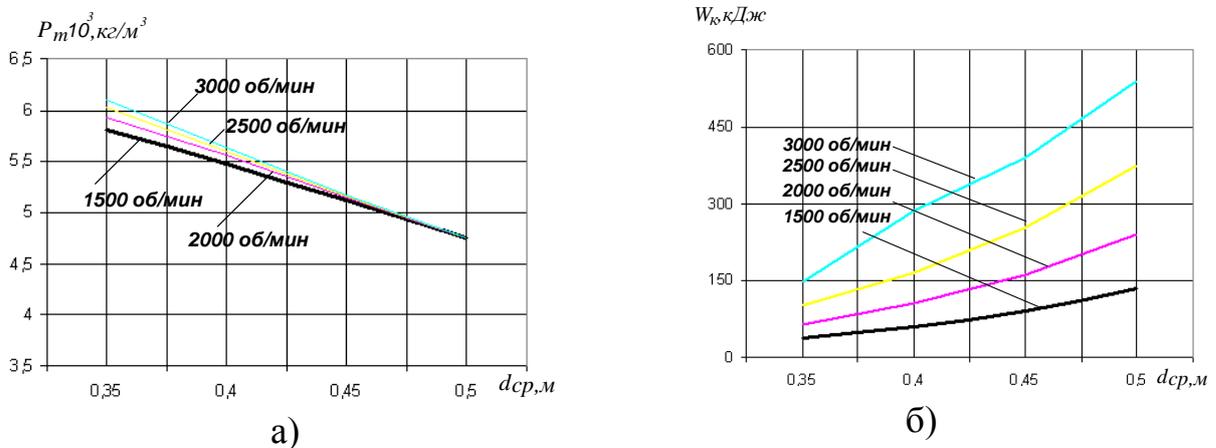


Рис. 6 . Зависимость удельной массы (а) и запаса кинетической энергии ротора (б) от диаметра d_{cp} и частоты вращения n .

Выводы.

1. Увеличение среднего диаметра двухиндукторного ротора торцевой машины при неизменных значениях мощности, напряжении и активной длине приводит к уменьшению её удельной массы. Однако при этом увеличивается расход активных материалов.
2. С целью увеличения запаса кинетической энергии ротора генератор следует выполнять с малой осевой длиной, но с большим диаметром и большой частотой вращения, если этому не препятствует механическая прочность машины.
3. Увеличение частоты положительно сказывается на энергетических и массогабаритных показателях генератора. С увеличением частоты уменьшаются все массогабаритные показатели и увеличиваются энергетические.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Попов В.И., Автономный высоковольтный комплекс. Патент Российской Федерации на полезную модель № 57532, реестр полезных моделей РФ, 10.10.2006.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. Учеб. для вузов / Под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр. И доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

Научный руководитель: В.И.Попов, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ И УГЛА СДВИГА ПОЛЮСОВ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л.Н. Мартынов
Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М350

При разработке гибридных электродвигателей важно оценить влияние параметров и угла сдвига полюсов магнитоэлектрической части ротора относительно полюсов синхронно-реактивной части на эквивалентные индуктивные сопротивления синхронного гибридного двигателя.

Для решения вопроса о влиянии угла сдвига полюсов и параметров на эквивалентные индуктивные сопротивления гибридного двигателя рассмотрим уравнение равновесия напряжений фазы обмотки статора при общепринятых допущениях

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d \cdot x_d + j\dot{I}_q \cdot x_q + j\dot{I}_{d1} \cdot x_{d1} + j\dot{I}_{q1} \cdot x_{q1} + \dot{I} \cdot r, \quad (1)$$

где \dot{U} - фазное напряжение;

E_0 - ЭДС, наводимая потоком полюсов магнитоэлектрической части ротора в фазе обмотки статора в генераторном режиме при холостом ходе;

x_{d1}, x_d, x_{q1}, x_q - индуктивные синхронные сопротивления по продольной и поперечной осям в зонах расположения роторов магнитоэлектрической машины и СРД;

r - активное сопротивление фазы обмотки статора;

I_{d1} , I_d , I_{q1} , I_q - проекции тока статора на оси d1, d и q1, q .

Уравнению (1) соответствует векторная диаграмма, изображенная на рисунке 1 ($r=0$).

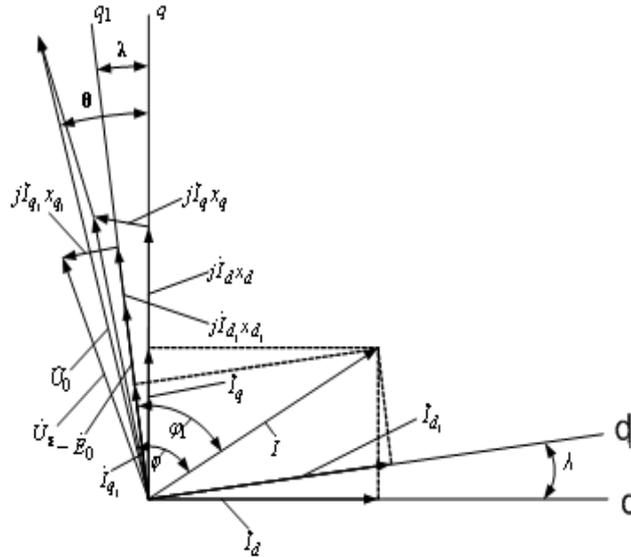


Рис. 1. Векторная диаграмма гибридного двигателя

В качестве осей эквивалентной системы выберем оси d и q, совпадающие с продольной и поперечной осью ротора СРД.

За положительное направление при отсчете углов примем направление против часовой стрелки.

Пусть оси d1 и q1, связанные с магнитоэлектрической частью ротора сдвинуты на угол λ относительно осей d и q.

Выразим токи I_{d1} и I_{q1} через токи эквивалентной системы I_d и I_q :

$$\begin{cases} I_{d1} = I_d \cos \lambda + I_q \sin \lambda, \\ I_{q1} = I_q \cos \lambda - I_d \sin \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

Запишем уравнение (1) в осях d и q:

$$\begin{cases} U \sin \theta - E_0 \sin \lambda = I_q (x_q + x_{q1} \cos^2 \lambda + x_{d1} \sin^2 \lambda) \\ + I_d [(x_{d1} - x_{q1}) \sin \lambda \cdot \cos \lambda - r] \\ U \cos \theta = E_0 \cos \lambda + I_d \cdot x_d + I_{d1} \cdot x_{d1} \cos \lambda \\ - I_{q1} \cdot x_{q1} \sin \lambda + I_q \cdot r. \end{cases} \quad (3)$$

Подставляем в (3) соответствующие значения токов из (2):

$$\begin{cases} U \sin \theta - E_0 \sin \lambda = I_q (x_q + x_{q1} \cos^2 \lambda + x_{d1} \sin^2 \lambda) \\ + I_d [(x_{d1} - x_{q1}) \sin \lambda \cdot \cos \lambda - r] \\ U \cos \theta - E_0 \cos \lambda = I_d (x_d + x_{d1} \cos^2 \lambda + x_{q1} \sin^2 \lambda) \\ + I_q [(x_{d1} - x_{q1}) \sin \lambda \cdot \cos \lambda + r] \end{cases} \quad (4)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} x_{d\dot{y}} &= x_d + x_{d1} \cos^2 \lambda + x_{q1} \sin^2 \lambda, \\ x_{q\dot{y}} &= x_q + x_{q1} \cos^2 \lambda + x_{d1} \sin^2 \lambda, \\ x_{\dot{y}} &= (x_{d1} - x_{q1}) \sin \lambda \cdot \cos \lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

Для наглядности представления и удобства сравнения результатов выразим параметры гибридного двигателя в относительных единицах, приняв при этом за базисное сопротивление синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d СРД:

$$\begin{aligned} x^*_{d\dot{y}} &= \frac{x_{d\dot{y}}}{x_d} = 1 + \frac{x_{d1}}{x_d} \cos^2 \lambda + \frac{x_{q1}}{x_d} \sin^2 \lambda, \\ x^*_{q\dot{y}} &= \frac{x_{q\dot{y}}}{x_d} = \frac{x_q}{x_d} + \frac{x_{q1}}{x_d} \cos^2 \lambda + \frac{x_{d1}}{x_d} \sin^2 \lambda, \\ x^*_{\dot{y}} &= \frac{x_{\dot{y}}}{x_d} = \frac{x_{d1} - x_{q1}}{x_d} \sin \lambda \cdot \cos \lambda. \end{aligned}$$

На рисунке 2 представлена зависимость $x_{d\dot{y}}/x_{q\dot{y}}$ в функции от отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям x_d/x_q синхронно-реактивной части двигателя. При этом другие независимые величины принимали значения: $\lambda = -\pi/2$, $x_{q1}/x_{d1} = 4$.

Результаты анализа рисунка 2 показывают, что с ростом x_d/x_q растет отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений гибридного двигателя $x_{d\dot{y}}/x_{q\dot{y}}$.

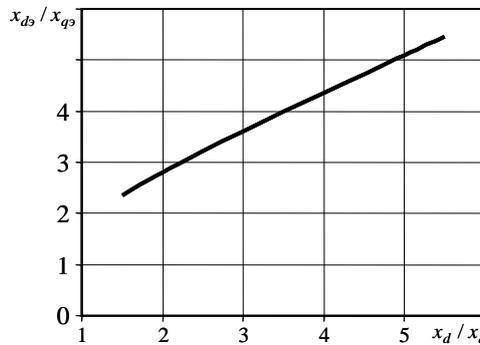


Рис. 2. Зависимость $x_{d\dot{y}}/x_{q\dot{y}}$ от x_d/x_q

На рисунке 3 представлена зависимость $x_{d\dot{y}}/x_{q\dot{y}}$ в функции от отношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной

осям x_{q1}/x_{d1} магнитоэлектрической части ротора двигателя. При этом другие независимые величины принимали следующие значения:

$\lambda = -\pi/2$, $x_d/x_q = 6$. Результаты анализа рисунка 3 оказывают, что с ростом явнополюсности магнитоэлектрической части x_{q1}/x_{d1} отношение x_{d3}/x_{q3} растет.

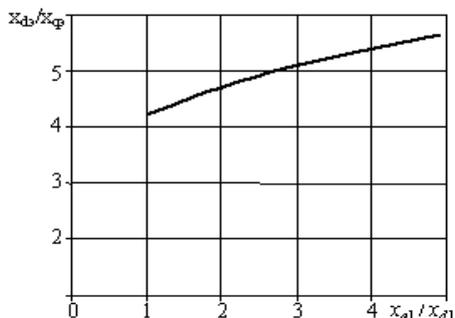


Рис. 3. Зависимость x_{d3}/x_{q3} от x_{q1}/x_{d1}

Таким образом, в гибридном двигателе существует такой угол сдвига $\lambda = -90^\circ$, при котором отношение эквивалентных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям наибольшее. Причем, значение x_{d3}/x_{q3} при оптимальном угле сдвига тем больше, чем больше отношения индуктивных сопротивлений x_d/x_q и x_{q1}/x_{d1} .

Научный руководитель: А.И. Верхотуров, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.

ФОРСИРОВАННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЗАРЯДКИ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

П.С. Есин

Томский политехнический университет
ЭЛТИ, ЭМА, группа 7М340

Одним из способов увеличения коэффициента полезного действия (КПД) зарядки емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) является регулирование напряжения в течение зарядного цикла [1, 2].

В указанной литературе приведено решение задачи по отысканию оптимальной формы кривой изменения зарядного напряжения, при которой потери в омических сопротивлениях цепи оказываются минимальными в условиях форсированного времени зарядки. Показано, что минимальным потерям соответствует линейное во времени нарастание напряжения U_c на ЕНЭ

$$U_{\tilde{n}} = (U_{\tilde{n}i} - U_{\tilde{n}i}) \frac{t}{T_3} + U_{\tilde{n}i},$$

где $U_{\text{сн}}$ – напряжение на накопительном конденсаторе в конце заряда;

$U_{\text{с0}}$ – начальное напряжение на конденсатор;

T_3 – постоянная времени цепи заряда;

t – время заряда.

арядный ток при этом

$$i_{\zeta} = \tilde{N}_i \frac{dU_{\tilde{n}}}{dt} = C_i \frac{U_{\tilde{n}i} - U_{\tilde{n}i}}{T_3}$$

должен оставаться неизменным в течение всего времени зарядки ($C_{\text{н}}$ – емкость накопительного конденсатора).

Питающее напряжение

$$U = i_{\zeta} R + U_{\tilde{n}} = (U_{\tilde{n}i} - U_{\tilde{n}i}) \frac{\tilde{N}_i R + t}{T_3} + U_{\tilde{n}i}$$

изменяется также по линейному закону (R – сопротивление зарядной цепи).

В качестве источника переменного зарядного напряжения предлагается использовать ненасыщенный высоковольтный электромашинный генератор с форсированным самовозбуждением (рисунок 1) [3]. Форсированное самовозбуждение ненасыщенного электромашинного генератора даёт возможность получать напряжение на его выходе, быстро нарастающее по линейному закону. Изменение зарядного напряжения по линейному закону на конденсаторе ЕНЭ позволяет заряжать его постоянным по величине током, исключить его броски. При этом в зарядных цепях нет необходимости устанавливать токоограничивающие сопротивления, на которых рассеивается значительная энергия при зарядке.

На обмотку возбуждения (ОВ) от постоянного источника подается мизерное напряжение с тем, чтобы обеспечить в генераторе небольшой поток возбуждения (1-3% от номинального), что соответствует небольшому напряжению генератора U_0 . От этого напряжения генератора конденсатор накопителя зарядится только до напряжения $U_{\text{с0}}$. Затем при открытии тиристора Т на ОВ подается напряжение от обмотки самовозбуждения, расположенной на якоре генератора. Подаваемое напряжение от обмотки самовозбуждения должно быть выше, чем начальное напряжение U_0 , но той же полярности. Скачок напряжения будет равен $K_i L$. При этом клапан В закрывается. Начинается процесс форсированного самовозбуждения генератора (рису-

нок 1). Поскольку генератор является ненасыщенным, то напряжение будет нарастать по линейному закону.

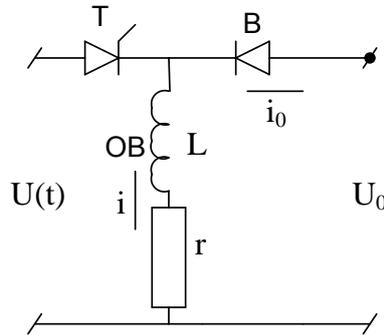


Рис. 1. Электрическая схема питания обмотки возбуждения

Закон изменения форсированного напряжения $U(t)$ на зажимах цепи r, L определяется из условия, что ток форсировки должен меняться по линейному закону, то есть $i = K_i t$, где K_i – скорость нарастания тока.

Переходный процесс при этом описывается уравнением:

$$U(t) = ir + L \frac{di}{dt}$$

Если $i = K_i t$, то $\frac{di}{dt} = K_i$ и, следовательно,

$$U(t) = K_i r t + K_i L$$

Таким образом, чтобы ток в цепи r, L нарастал по линейному закону $i = K_i t$, необходимо, чтобы при включении цепи на напряжение $U(t)$ был осуществлён скачок напряжения равный $K_i L$, а затем это напряжение должно меняться по линейному закону $K_i r t$.

Если до начала форсировки в цепи ОВ с параметрами r, L протекал начальный ток i_0 под действием напряжения U_0 , то ток в цепи должен изменяться по закону $i = i_0 + K_i t_{\delta}$ (начало форсировки: $t_{\delta} = 0$; $i = i_0$). При этом напряжение должно изменяться по закону $U(t) = U_0 + K_i r t + K_i L$.

Следует отметить, что величина времени форсированной зарядки зависит только от величины ёмкости C и допустимого зарядного тока вентилей i_{δ} .

$$t_{\delta} = t_{\zeta} = \frac{U_{c1} - U_{\bar{n}0}}{i_{\delta}} C$$

Моделирование процесса форсированного возбуждения генератора было выполнено на ПК в пакете MathCAD.

Решение уравнения (в качестве примера):

$$\begin{aligned}
 K_i &:= 6 & U_{сн} &:= 60000 & U(t) &:= \begin{cases} K_i \cdot L & \text{if } t = 0 \\ K_i \cdot (r \cdot t + L) & \text{if } 0 < t \leq t_\phi \end{cases} \\
 r &:= 2 & U_{c0} &:= 1800 \\
 L &:= 0.4 & i_D &:= 0.4 & i(t) &:= \begin{cases} i_0 & \text{if } 0 \leq t < 2 \\ K_i \cdot t & \text{if } 2 \leq t \leq 2 + t_\phi \end{cases} \\
 i_0 &:= 12 & C &:= 20 \cdot 10^{-6} \\
 t_\phi &:= \frac{U_{сн} - U_{c0}}{i_D} \cdot C \\
 t_\phi &= 2.91
 \end{aligned}$$

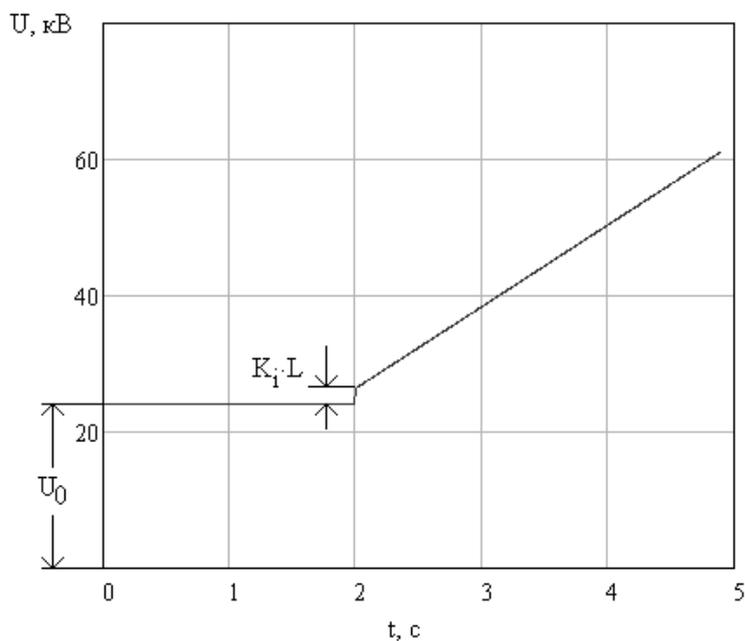


Рис. 2. Зависимость $U=f(t)$

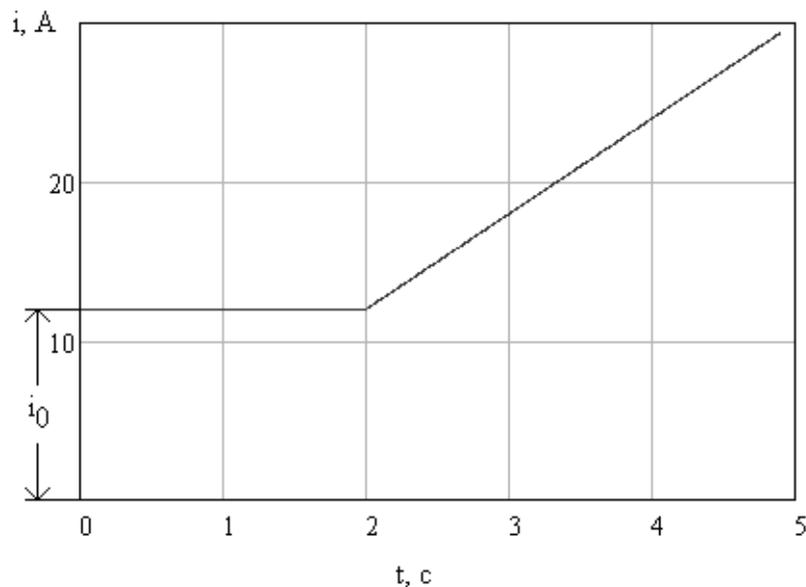


Рис. 3. Зависимость $i=f(t)$

Исследования показали, что:

1. Изменение параметров ёмкости влияет только на величину форсировочного времени зарядки t_f .
2. Изменение параметров ОВ влияет на величину начального напряжения U_0 .
3. Изменение величины индуктивности ОВ влияет на скачок напряжения в цепи ОВ и скорость нарастания напряжения $U(t)$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Волков И.В., Вакуленко В.И. Источники электропитания лазеров. – Киев: Техника, 1976. - 175 с.
2. Милях А.И. и др. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей – Киев: 1974.
3. Попов В.И. Автономный высоковольтный комплекс. Патент на полезную модель РФ. № 57532.

Научный руководитель: В.И. Попов, к.т.н., доцент, ЭМА, ЭЛТИ, ТПУ.