

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии(PhD) по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика»

Юсупова Асель Оразовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЕМКОСТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Предложенная диссертационная работа посвящена совершенствованию системы диагностики эксцентриситета ротора электрических машин на емкостных измерительных преобразователях

Актуальность работы. Вращающиеся электрические машины (ЭМ) в электроэнергетике и промышленном производстве используются для производства электроэнергии и в качестве электропривода. В настоящее время в странах СНГ находится в эксплуатации порядка 20 миллионов ЭМ. И, как показывает практика их эксплуатации, значительная часть из них длительное время работают со статическим эксцентриситетом ротора, превышающим их технологический эксцентриситет.

Как известно эксцентриситет ротора в ЭМ сопровождается неравномерностью воздушного зазора, возникновением в воздушном зазоре дополнительных магнитных полей и как следствие ухудшением электромеханических характеристик и ростом дополнительных потерь электроэнергии. При значительном смещении сердечник ротора зацепляет за сердечник статора. Что сопровождается их разогревом. Сильный разогрев сердечника статора приводит к ускоренному разрушению изоляции обмотки статора и короткому замыканию в ней. В свою очередь разогрев сердечника ротора может привести к разрушению или выплавлению обмотки ротора.

В таких случаях машина требует длительного и дорогостоящего ремонта обмоток статора, а при выплавлении литой обмотки ротора он полностью выходит из строя. Кроме того, во время ремонта обмоток требуется осуществить устранение «затира» сердечника статора со стороны воздушного зазора. Иначе дальнейшая эксплуатация электрических машин приведет к «пожару в стали» сердечника из-за замыкания его листов. Эта операция требует длительного и кропотливого ручного труда.

Своевременное выявление наличия и величины эксцентриситета ротора позволит не только сократить расход потребления электроэнергии, но и предотвратить повреждение электрической машины. Большой вклад в разработку и совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ внесли такие ученые как Геллер Б., Гамата В., Вольдек А.И., Новожилов А.Н., Клецель М.Я., Мануковский А.В., Крюкова Е.В., Мирзоева С.М., Никиян Н.Г., Вейнреб К.Б., Гашимов М.А., Рогачев В.А., Сурков Д.Б., Тонких В.Г., Петухов В.Н., Потапенко А.О. и целый ряд других.

Однако, несмотря на несомненные достижения в этой области устройства по выявлению наличия и величины эксцентриситета ротора до сих пор на производстве они широкого распространения не получили. Одной из причин этого является то, что в качестве источника информации в них обычно использовался ток в обмотках ЭМ или магнитное поле рассеяния этих обмоток. Однако параметры информации с этих источников информации меняются не только от эксцентриситета ротора, но и от колебаний параметров электрической сети в эксплуатационных режимах работы и от времени отключения в режиме выбега. Необходимость отстройки от этого приводит к тому, что чувствительность систем диагностики к эксцентриситету резко снижается.

Этих недостатков лишены системы диагностики, которые получают информацию о перемещении ротора от емкостных измерительных преобразователей (ИП). Однако, все что известно о таких системах диагностики сводится к публикации нескольких конструктивных схем ИП. В связи с этим совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП является актуальным.

Целью работы является совершенствование системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать емкостные ИП пригодные для установки на все типы машин переменного тока;

- разработать граничные условия и программное обеспечение для моделирования параметров емкостных ИП по методу сеток, с помощью которого в свою очередь производится обоснование и разработка «зонного» метода моделирования емкости ИП в зависимости от положения зубцов сердечника ротора при его вращении;

- осуществить выбор информационного признака повреждения для системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ;

- исследовать все факторы, которые способны ограничить чувствительность системы диагностики с емкостным ИП, и разработать измерительную цепь способную снизить влияние этих факторов;

- разработать схемы и обосновать параметры элементов измерительной цепи в виде генератора высокой частоты, измерительного моста и полосно-пропускающего фильтра, а также автономного источника для питания этих элементов стабилизированным постоянным напряжением;

- разработать способ диагностики эксцентриситета ротора и устройство для его реализации, в котором одним из электродов емкостного ИП является вал ЭМ;

- разработать способ диагностики эксцентриситета ротора и устройство для его реализации, в котором одним из электродов емкостного ИП является металлическая фольга на пазовом клине сердечника статора, а другим поверхность сердечника ротора.

Объектом исследования является область диагностирования эксцентриситета ротора ЭМ посвященная совершенствованию систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ на емкостных ИП.

Предмет исследования – совершенствование систем диагностики эксцентриситета ротора ЭМ машин электрической станции путем использования для этого емкостных ИП.

Инструментом в получении материалов исследования являются:

- фундаментальные положения теории конструирования ЭМ;
- фундаментальные положения теории диагностики состояния ЭМ;
- теоретические основы электротехники;
- программирование, физическое моделирование и метод натурального эксперимента.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Путем сопоставления достоинств и недостатков известных технических решений, позволяющих выявлять эксцентриситет ротора, исследованы причины, которые ограничивают их чувствительность.

2. На основе метода сеток предложен новый способ моделирования емкости ИП с произвольной формой электродов и программное обеспечение для его реализации.

3. Разработан «зонный» способ моделирования зависимостей емкости ИП не только от величины эксцентриситета ротора, но от положения его зубцов и полюсов относительно ИП в процессе вращения.

4. Предложено в качестве информационного признака эксцентриситета ротора использовать составляющие емкости ИП, величины которых для анализа их зависимости от величины эксцентриситета ротора и положения его зубцов или полюсов относительно ИП определяются путем разложения этой емкости в ряд Фурье.

5. Разработана новая измерительная цепь системы диагностики, состоящая из измерительного моста и полосно-пропускающего двухступенчатого фильтра с частотой пропускания равной частоте колебаний источника питания в виде высокочастотного генератора.

6. На базе микропроцессорного кварцевого генератора разработан источник высокочастотных колебаний с частотой 100-120кГц имеющий стабильную частоту f_r и амплитуду выходного напряжения U_r , а также полосно-пропускающий двухступенчатый фильтр на гираторах, способный обеспечить стабильность напряжения на его выходе в диапазоне рабочих температур машины.

7. Разработан автономный источник стабилизированного постоянного напряжения для питания элементов системы диагностики, а также методы расчета параметров трансформаторов тока и напряжения, обеспечивающих этот источник электроэнергией от сети питания.

8. Разработан новый способ диагностики эксцентриситета ротора и методика определения порогов срабатывания устройства для реализации этого способа, одним из электродов у емкостного ИП которого является вал

ротора, а частота пропускания f_0 полосно-пропускающего фильтра измерительной цепи принимается равной частоте f_r высокочастотного генератора.

9. Исследованы зависимости емкости ИП на пазовом клине статора от величины эксцентриситета ротора и выявлено, что в асинхронных и синхронных машинах с неявнополюсным ротором в качестве информационного признака повреждения следует использовать постоянную составляющую емкости ИП. При этом в явнополюсной синхронной машине для этих целей можно использовать как постоянную составляющую емкости ИП, так и ее первую гармоническую, причем использование первой гармонической предпочтительнее.

10. Разработан новый способ диагностики эксцентриситета ротора электрической машины и методика определения порогов срабатывания устройства для реализации этого способа, одним из электродов емкостного ИП которого является поверхность сердечника ротора или его полюсов. При этом частота пропускания f_0 полосно-пропускающего фильтра измерительной цепи может приниматься равной как несущей частоте f_r , так и боковым частотам $f_r \pm f_c$, причем для диагностирования машин с явнополюсным ротором использование последнего варианта предпочтительней.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Выявлено, что наиболее перспективными для выявления эксцентриситета ротора ЭМ являются технические решения, в которых в качестве ИП используются емкостные ИП. В связи с чем, результаты диагностики не зависят от колебаний параметров питающей сети и нагрузки, а также от времени отключения ЭМ при диагностировании машины в режиме выбега.

2. Разработанный, на основе методе сеток, метод и программное обеспечение для моделирования емкости ИП с произвольной формой электродов дает возможность рассчитывать ее с погрешностью порядка 4,5%. Что позволяет использовать его для контроля точности разработанного «зонного» метода моделирования параметров емкостного ИП.

3. Разработанный «зонный» метод позволяет с погрешностью расчета порядка 13% моделировать зависимости емкости ИП как от величины эксцентриситета ротора, так и от положения его зубцов и полюсов относительно ИП в процессе вращения.

4. Использование для выявления составляющих емкости ИП метода Фурье позволяет выявить те из них, которые имеют наибольшую величину и в наибольшей степени изменяются в зависимости от эксцентриситета ротора для использования их в качестве информационного признака повреждения.

5. Разработанная на базе измерительного моста и полосно-пропускающего двухступенчатого фильтра измерительная цепь способна обеспечить достаточно надежную защиту системы диагностики от

воздействия внешних электрических и магнитных полей при размещении этих элементов внутри ЭМ.

6. Разработанный на базе микропроцессорного кварцевого генератора источник высокочастотных колебаний и его программное обеспечение позволяют обеспечить нестабильность частоты f_r в пределах $\pm(0,1 - 0,5) \cdot 10^{-6}$ Гц и амплитуды напряжения U_r на его выходе в пределах $\pm 2-5\%$ при изменении температуры окружающей среды от -30 до $+80$ градусов.

7. Разработанный полосно-пропускающий двухступенчатый фильтр на гираторах способен в диапазоне частот 114-127кГц обеспечить колебание амплитуды выходного напряжения в 2-2,5% при колебании температуры окружающей среды в пределах -30 до $+80$ градусов.

8. Разработанный автономный источник питания позволяет обеспечить все элементы системы диагностики стабилизированным напряжением 12В при потребляемом токе до 0,2А.

9. Разработанные методы расчета параметров трансформаторов тока и напряжения, обеспечивающих его электроэнергией от сети питания ЭМ, дают возможность рассчитывать их для широкого диапазона величин выходных напряжений и токов.

10. В разработанном устройстве диагностики эксцентриситета ротора емкостные ИП, одним из электродов которых является вал ротора, размещаются внутри ЭМ, а все остальные элементы системы диагностики в виде единого блока на внешней ее поверхности. Что позволяет отказаться от длинных соединительных проводов и достаточно просто обеспечить защиту элементов системы от воздействия электрических и магнитных полей, более «легкий» температурный режим работы, возможность контроля исправности устройства и его регулировку без разборки этой машины.

11. В разработанном устройстве диагностики эксцентриситета ротора емкостные ИП, одним из электродов которых металлическая фольга на пазовом клине статора, а другим поверхность сердечника ротора или полюсов, измерительная цепь размещаются на пазовом клине ИП, а все остальные элементы системы диагностики в виде единого блока на внешней поверхности ЭМ. Что значительно упрощает конструкцию и установку ИП.

Апробация результатов исследования - основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 17-ой Международной конференции " Сатпаевские чтения " (г.Павлодар) в апреле 2017 года, на 9-ой Международной конференции " Торайгыровские чтения " (г.Павлодар) в ноябре 2017 года; на VIII Международной научно-технической конференции "Технические науки: проблемы и решения" (г. Москва) в феврале 2018 года.

Публикации. По работе опубликовано 11 печатных работ, в том числе в журналах рекомендованных ВАК РК – три, две статьи в журнале «Вестник ОмГТУ» (Россия), а также подана 3 патента на изобретение- 2 из них – в РК, 1 – в РФ. Также две статьи принята к публикации, а именно: в журнале

«Электротехника» (г. Москва, Россия), 2019г., в журнале «Przegląd Elektrotechniczny» (Польша), 2018г., входящем в базу цитирования Scopus .

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения и 2 приложений. Работа изложена на 101 страницах, содержит 61 рисунок и 4 таблицы. Список использованных источников включает 80 наименований.

В первой главе рассмотрены конструкционные особенности электрических машин и виды их повреждений. Анализ конструкционных особенностей вращающихся ЭМ показал, что основными причинами возникновения эксцентриситета ротора являются элементы их конструкции, фиксирующие положение ротора относительно статора, при этом основным признаком возникновения эксцентриситета ротора является смещение вала. Используемое в настоящее время технологическое оборудование и человеческий фактор приводят к тому, что заводы по производству ЭМ выпускают продукцию, имеющую технологический эксцентриситет, величина которого может достигать величины 0,1-0,12. Рассмотрены особенности эксцентриситета ротора, который сопровождается неравномерностью воздушного зазора, возникновением в нем дополнительных магнитных полей, ухудшением эксплуатационных характеристик ЭМ и ростом примерно на 0,45-3,95% потерь электроэнергии. Произведенный анализ известных методов выявления эксцентриситета ротора на выведенной из работы ЭМ или в процессе ее эксплуатации наиболее перспективным является метод, в котором для получения информации о повреждении используются емкостные ИП. В связи с этим результаты диагностирования ЭМ не зависят от колебаний параметров питающей сети, бросков нагрузки и изменений параметров ЭМ и ее режима работы. Емкость ИП используемого в системе диагностики эксцентриситета ротора процессе эксплуатации ЭМ зависит не только от эксцентриситета ротора, но и от формы поверхности сердечника ротора. Поэтому известные методы моделирования емкости не позволяют моделировать параметры такого ИП в процессе вращения ротора.

Во второй главе разработан метод моделирования емкости ИП системы диагностики эксцентриситета ротора, в основе которого лежит метод сеток, позволяет с погрешностью не превышающей 4,5% моделировать ее при произвольной форме электродов. Предложенный «зонный» метод моделирования емкости ИП системы диагностики эксцентриситета ротора позволяет просто и с погрешностью расчета не превышающей 13% моделировать ее зависимость от положения зубцов ротора при его вращении. Выявлен информационный признак эксцентриситета ротора, который может определяться путем анализа спектра гармонических емкости ИП от величины эксцентриситета этого ротора. В асинхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность вала ротора или поверхность ротора с закрытыми или открытыми пазами, в качестве информационного признака повреждения в системе диагностики следует

использовать его постоянную составляющую. В синхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность явнополюсного ротора, в качестве информационного признака повреждения можно использовать как его постоянную составляющую, так первую гармоническую составляющие его емкости. В синхронных машинах, в которых одним из электродов емкостного ИП системы диагностики является поверхность неявнополюсного ротора, в качестве информационного признака повреждения следует выбирать его постоянную составляющую, так как величина первой гармонической составляющей на порядок меньше.

Выявлено, что в наибольшей степени требованиям системы диагностики эксцентриситета ротора ЭМ с ИП, один из электродов которого заземлен, подходит измерительная цепь в виде измерительного моста с полосно-пропускающим фильтром, мост которого питается генератором высокой

В третьей главе для измерительной цепи совершенствуемой системы диагностики доработаны в Павлодарском государственном университете им. С.Торайгырова на кафедре «Электроэнергетика» совместно с к.т.н. А.В.Мануковским кварцевый генератор и его программное обеспечение способны обеспечить в достаточной степени стабильность частоты и амплитуды, а также допустимый уровень гармоник генерируемого сигнала в требуемом диапазоне температур. Выявлено, что двухступенчатый фильтр на гираторах способен обеспечить полосу пропускания в 5кГц при добротности $Q = 60\text{дБ}$ в диапазоне рабочих температур способен от -30 до $+80$ градусов, что является вполне достаточным для реализации системы диагностики. Произведен анализ, в результате которого подобран автономный источник стабилизированного постоянного тока, способный обеспечить питание генератора высокой частоты и двухступенчатого фильтра системы диагностики низковольтных и высоковольтных электрических машин с помощью малогабаритного и дешевого трансформатора напряжения, а также с помощью серийно выпускаемых разъемных, проходных трансформаторов тока типа ТЗРЛ.

Усовершенствована система диагностики эксцентриситета ротора с емкостным ИП, у которого одним из электродов является вал ЭМ, способна контролировать не только перемещение вала, но и направление перемещения. При этом все ее элементы располагаются на внешней поверхности ЭМ, а потому их достаточно просто экранировать от внешнего электрического и электромагнитного поля и обеспечить доступ для контроля работоспособности устройства и выставления порогов срабатывания.

Усовершенствована система диагностики эксцентриситета ротора, один из электродов емкостного ИП которой в виде фольги размещается на пазовых клиньях также контролировать не только перемещение вала, но и направление перемещения. При этом измерительный мост и полосно-пропускающий фильтр размещаются на выступающей части пазового клина, а остальные элементы на внешней поверхности ЭМ. В связи изготовление и установка ИП значительно упрощается.