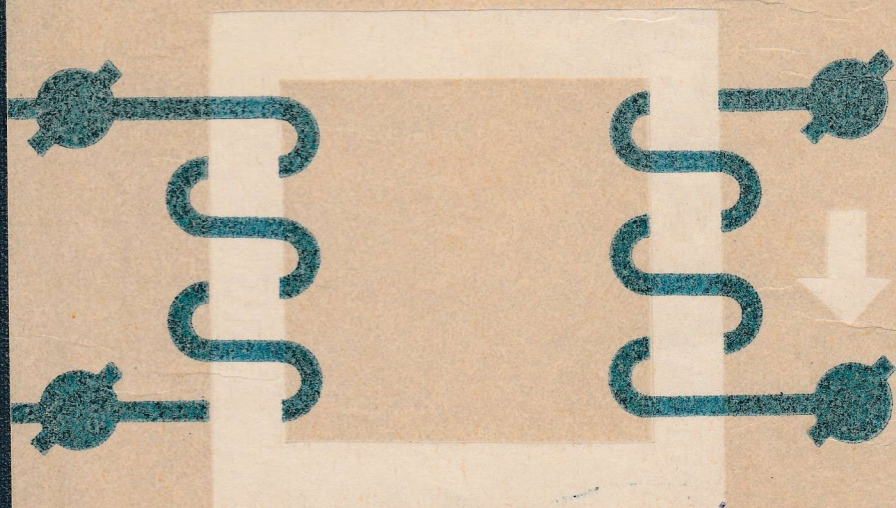


*В. В. Овчаров*

**Эксплуатационные  
режимы работы  
и непрерывная  
диагностика  
электрических  
машин  
в сельско-  
хозяйственном  
производстве**



*В. В. Овчаров*

Эксплуатационные  
режимы работы  
и непрерывная  
диагностика  
электрических  
машин  
в сельско-  
хозяйственном  
производстве

КИЕВ  
ИЗДАТЕЛЬСТВО УСХА  
1990

УДК 631.537

**Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В. В. Овчаров.** - Киев: Изд-во УСХА. 1990.— 168 с.  
ISBN 5-7987-0044-5.

Монография посвящена повышению эксплуатационной надежности электрических машин в сельском хозяйстве. Автором приведен анализ влияния эксплуатационных режимов работы в развитии процессов повреждения и износа изоляции электрических машин, разработаны методы и технические средства непрерывной диагностики электродвигателей в процессе эксплуатации, предложена стратегия раннего предупреждения развития повреждений электрических машин.

Табл. 23. Ил. 67. Прил. 10. Библиогр.: 91 назв.

Рецензент кандидат технических наук, доцент В. И. Просвирнин

0 3703000000-060 Без объявл.  
227(2)—90

ISBN 5-7987-0044-5.

© О.В.Овчаров

## **ВВЕДЕНИЕ**

Эффективность научно-технического прогресса зависит не только от наращивания выпуска новейшей техники, но и лучшего использования основных фондов, увеличения объема продукции с каждой единицы оборудования. Разработка и широкое внедрение систем технической диагностики является одним из важнейших факторов повышения эффективности использования машин и оборудования, резкого сокращения расходов на их эксплуатацию и, следовательно, может рассматриваться как одно из важнейших направлений ускорения научно-технического прогресса.

Вопрос обеспечения надежности вновь создаваемых электрических машин, их безотказность и долговечность является одним из основных в деле модернизации и коренной реконструкции электромашиностроительного комплекса. Ежегодные затраты на ремонт только в сельском хозяйстве достигают сотен миллионов рублей и продолжают увеличиваться по мере накопления числа электрических машин в хозяйствах. Решение этих проблем возможно путем повышения конструкционной надежности и широкого применения систем технической диагностики электрических машин в процессе их эксплуатации. В настоящее же время в сельском хозяйстве эксплуатируются электрические машины без средств диагностики, а следовательно, и без информации об их действительном состоянии.

В последнее время в практику эксплуатации электрических машин стал внедряться планово-предупредительный ремонт, периодичность которого определена среднестатистическими показателями, а не истинными потребностями каждой конкретной электрической машины. Массовое же внедрение систем диагностики позволило бы определять фактическое состояние каждой машины и осуществлять ее ремонт заранее, когда развитие того или иного дефекта достигает определенного уровня. Данная работа посвящена анализу эксплуатационных режимов работы и разработке непрерывно-диагностических методов и средств повышения эксплуатационной надежности электрических машин в сельском хозяйстве.

## 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

### 1.1. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Успешная работа современных сельскохозяйственных предприятий во многом зависит от надежности электрических машин, поскольку электрификация ныне является основой механизации и автоматизации стационарных процессов сельскохозяйственного производства, где эксплуатируется около 20 млн электродвигателей, а установленная мощность сельских трансформаторных подстанций и пунктов превысила 200 млн киловольтампер.

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором получил в отрасли широкое распространение и является самой надежной электрической машиной. Вместе с тем на практике наблюдается сравнительно высокий процент выхода из строя асинхронных двигателей из-за специфических условий и режимов работы, которые не были учтены при проектировании. В отдельных хозяйствах ежегодно приходится заменять 20—25 % электродвигателей [2]. Ущерб по стране достигает 200 млн р. [3].

Статистический материал, собранный за 12 лет по областям юга Украины, показывает, что 5,77 % силовых трансформаторов сельских трансформаторных подстанций ежегодно выходит из строя [4]. Главными причинами неисправностей при этом являются короткие замыкания в сетях (1,35 %), перегрузки (1,36), атмосферные перенапряжения (0,95), снижение качества трансформаторного масла в процессе эксплуатации (0,95), асимметрия токов нагрузки по фазам (0,67 %). Все это говорит о невысоком качестве электрических машин в сельском хозяйстве.

Проблемы надежности электрических машин условно подразделяются на заводскую конструкционную и эксплуатационную. Конструкционная надежность любой электрической машины в целом зависит от ко-

личества и качества применяемых в ней активных и конструкционных материалов, от конструкции машины, качества изготовления и надежности ее основных частей и деталей. На эксплуатационную надежность электрических машин в отрасли оказывает влияние ряд факторов: конструкционная надежность машин; условия окружающей среды при эксплуатации; эксплуатационные режимы работы; правильность применения электрических машин по их исполнению, пусковым и рабочим характеристикам; уровень технического обслуживания и ремонта в процессе эксплуатации.

Повышение эксплуатационной надежности электрических машин — проблема многогранная и требует комплексного решения. В этом направлении наметились следующие пути: совершенствование конструкции электрических машин для сельского хозяйства; модернизация действующих электрических машин; совершенствование устройств защиты от работы в аварийных режимах; внедрение системы планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания; внедрение системы ремонта и технического обслуживания на основе планового диагностирования.

Рассмотрим каждый из них более подробно.

### 1.2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В настоящее время в сельском хозяйстве находится в эксплуатации большое количество электродвигателей общепромышленного исполнения, которые не рассчитаны на работу в условиях повышенной влажности, содержания в атмосфере агрессивных примесей аммиака, сероводорода и других, а также при колебаниях температуры в широких пределах. В результате этого срок службы электродвигателей резко сокращается.

В последние годы созданы асинхронные электродвигатели, специально предназначенные для работы в условиях сельскохозяйственного производства. Их срок безотказной работы увеличен благодаря применению изоляционных материалов более высокого класса нагревостойкости, повышенным пусковым и максимальным моментам и другому.

### 1. Перечень двигателей, поставляемых сельскому хозяйству

Тип двигателя	Высота оси вращения, мм										
	56	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200
Основное исполнение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
С повышенным скольжением 4АС	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+
С повышенным пусковым моментом 4АР	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Многоскоростной	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Влагоморозостойкий 4А...У2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Для сельского хозяйства 4А...СУ1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Химостойкий	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сельскохозяйственный с УВТЗ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Пылезащищенный 4А (УПУЗ)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Для птицеводческих помещений:											
Д (п)	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-
4А (п)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Для привода тепловентиляторов											
ТВ	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-

*Примечание:* в настоящее время поиск конструкций электродвигателей для сельскохозяйственного производства продолжается.

В 1968—1970 гг. были разработаны и освоены (на базе основного исполнения серии А 02, а малых габаритов — на базе серии Д) двигатели сельскохозяйственного исполнения А02СХ, предназначенные для работы в агрессивных средах. Опыт эксплуатации подтвердил более высокую надежность этих двигателей [9].

С переходом электротехнической промышленности на выпуск двигателей серии 4А начали разрабатываться и в этой серии двигатели сельскохозяйственного исполнения. В табл. 1 приведен перечень асинхронных двигателей, выпускаемых электротехнической промышленностью и поставляемых сельскому хозяйству [9].

### 1.3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В сельском хозяйстве наибольшая повреждаемость электродвигателей наблюдается среди тех, которые работают в животноводческих помещениях. Главная причина отказов по данным многочисленных исследований — неблагоприятное воздействие тяжелых условий окружающей среды на изоляцию, основными из которых являются высокая влажность и агрессивность [12].

Выпускаемые промышленностью электродвигатели с влаго- и химостойкой изоляцией составляют около 3 % от общего их количества в сельском хозяйстве. Поэтому для повышения эксплуатационной надежности предлагается модернизация электродвигателей в условиях эксплуатации. Одним из способов защиты электродвигателей от действия влажной, химически активной среды является герметизация обмоток капсулированием.

Для повышения стойкости электродвигателей, особенно на животноводческих фермах, следует капсулировать изоляционную конструкцию эластомерным компаундом. Этот метод отличается легкостью реализации в условиях хозяйств, не требует каких-либо установок, сложных приспособлений и гарантирует ремонтпригодность электродвигателя.

Испытания показали, что сопротивление изоляции капсулированных электродвигателей за время стойлового периода составляло не менее 500—800 мегаОм.

### 1.4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ОТ РАБОТЫ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В УСЛОВИЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от работы с длительными перегрузками в сельском хозяйстве применяют тепловые реле, автоматические выключатели, встроенную температурную защиту.

Тепловые реле применяют серий ТРН, ТРП. Защитные характеристики тепловых реле серии ТРН с температурной компенсацией имеют большие зоны

разброса срабатывания. Например, при кратности тока 1,2 время срабатывания защиты из горячего состояния может колебаться в пределах 25—200 с, а из холодного состояния — от 200 до 700 с. Кроме того, на время срабатывания влияют другие факторы, действие которых носит случайный характер (трение в механизме, различие чувствительности биметаллических пластин и так далее). Тепловые реле недостаточно четко работают при перегрузках менее 20 %; в этих случаях вследствие разброса характеристик невозможно гарантировать их надежность [2]. Этот принципиальный недостаток тепловых реле с биметаллическими элементами полностью устранить за счет улучшения конструкции нельзя. Кроме того, тепловые реле, находясь в разных температурных условиях с электродвигателями, которые они защищают, реагируют только на величину тока и никак не учитывают другие причины перегрева обмоток; защитные характеристики токовых тепловых реле не соответствуют тепловым перегрузочным характеристикам электродвигателей в силу различия постоянных времени нагрева, особенно в повторно-кратковременном режиме работы [5]; в неблагоприятных условиях оказывается защита при соединении обмоток двигателя по схеме треугольник [2]; не обеспечивается защита электродвигателей, заклинённых или незапустившихся при обрыве фазы, так как скорость нагрева реле в этом случае значительно уступает скорости нагрева обмоток электродвигателей при адиабатическом тепловом процессе; тепловые реле мало чувствительны к несимметричным режимам.

Специалистами разработаны новые тепловые реле серии РТТ и РТЛ, которые имеют улучшенные характеристики и более чувствительны к несимметричным режимам. Они обеспечивают отключение электродвигателей в течение 20 мин при перегрузке 20 % [6].

Автоматические выключатели при наличии тепловых расцепителей также предназначены для защиты электродвигателей от длительных перегрузок. При этом защитные характеристики тепловых расцепителей автоматических выключателей аналогичны защитным характеристикам тепловых реле со всеми их достоинствами и недостатками.

В последнее время внедряется новый тип защиты электродвигателей как от длительных перегрузок, так

и других аварийных режимов — встроенная температурная защита, реагирующая на температуру обмоток двигателя [7]. Разработано несколько модификаций устройств защиты типа УВТЗ, работающих совместно с позисторами, встроенными в статорные обмотки двигателей. Опыт применения таких устройств подтвердил их надежность. Однако высокая стоимость, необходимость прокладки дополнительных проводов на каждый электродвигатель и другие причины ограничивают сферу применения этих устройств.

Одним из наиболее опасных аварийных режимов является опрокидывание электродвигателя, при котором последний резко увеличивает потребление энергии (в 2...7 раз) по отношению к номинальному значению тока в зависимости от частоты вращения (вплоть до полной остановки под напряжением). При этом из-за инерционности тепловых реле и тепловых расцепителей автоматических выключателей защита электродвигателей весьма ненадежна.

Не так давно для защиты электродвигателей от работы в режиме опрокидывания и коротких замыканий применялись плавкие предохранители, которые реагировали на двух- трехкратное превышение номинального тока двигателя, т. е. теоретически они были надежными.

В настоящее время для этой же цели широко применяют автоматические выключатели с тепловыми и электромагнитными расцепителями. При этом первые ненадежны, а вторые отстраиваются от пусковых токов и не защищают электродвигатели от работы в режимах опрокидывания, которые особенно характерны для сельскохозяйственного производства. Ряд механизмов, например, дробилки, шнеки, нории, нельзя включать под нагрузкой. Зимой имеют место случаи смерзания подвижных частей. Все это приводит к несостоявшимся либо затяжным пускам в режиме опрокидывания, а затем и к выходу из строя электродвигателей.

Одной из причин опрокидывания электродвигателей в сельском хозяйстве является выпадение фазы, в связи с чем поступают различные предложения о дополнении средствами защиты от неполнофазных режимов [6], в том числе защита по напряжению нулевой последовательности, по минимальному напряжению, по напряжению с применением фильтра об-

ратной последовательности, а также с применением реле тока и фазочувствительные устройства защиты. Применение указанных устройств улучшает в целом защиту электродвигателей от работы в неполнофазном режиме, но высокая стоимость ограничивает их применение.

Одним из нерешенных вопросов является обоснование уставок защит электродвигателей от работы в аварийных режимах. Как было сказано выше, при 20 % перегрузки тепловые реле должны отключать электродвигатель через 20 мин. За всяким отключением следует прерывание технологического процесса, что приводит к значительному ущербу. В то же время работа электродвигателя при небольших перегрузках (до 20—30 % по току) даже в установившемся тепловом режиме не вызывает быстрой порчи изоляции [8]. Поэтому отключение электродвигателей при таких перегрузках весьма спорно и требуется строгое научное обоснование уставок их защиты от работы в аварийных режимах.

Силовые трансформаторы сельских трансформаторных подстанций с высокой стороны защищаются плавкими предохранителями, выбранными из условия защиты трансформатора от коротких замыканий. Поэтому защита силовых трансформаторов от перегрузок может быть осуществлена только с помощью аппаратов теплового действия на низкой стороне, уставки которых также требуют обоснования.

#### **1.5. ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Известны три стратегии обслуживания технических систем [10]: стратегия обслуживания по необходимости, когда плановые профилактические мероприятия не проводятся, а восстановительные работы осуществляют лишь при выходе из строя оборудования; профилактические мероприятия, проводимые в плановые сроки, независимо от технического состояния элементов; профилактические мероприятия, проводимые в плановом порядке с учетом фактического состояния оборудования, определяемого методами технической диагностики.

Богатый опыт промышленности, передовых колхозов и совхозов с укомплектованной эксплуатационной службой, а также зарубежный опыт показывают, что организация технического обслуживания и ремонта электрических машин по первой стратегии в подавляющем большинстве случаев малоэффективна [10]. Наиболее прогрессивная система технического обслуживания и ремонта основана на плано-предупредительном принципе выполнения профилактических (восстановительных) работ [10], когда профилактические мероприятия выполняют в плановом порядке в строго регламентированные сроки. Такая система получила название системы плано-предупредительного ремонта и технического обслуживания (ППР). Система плано-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве (ППРЭсх), повышает эксплуатационную надежность электрических машин. Однако она имеет ряд недостатков, основным из которых является большая трудоемкость ремонта электрооборудования, особенно текущего. Устанавливаемые значения межремонтных периодов применяются к каждой конкретной единице электрических машин, а поэтому ремонты являются регламентным видом воздействий и проводятся периодически в соответствии с заранее составленными графиками. Электротехнический персонал вынужден выполнять большой объем работ для определения технического состояния двигателей зачастую без особой необходимости, поскольку многие из них имеют удовлетворительное техническое состояние. В то же время любые операции разборки и сборки, даже выполненные высококвалифицированными специалистами, снижают надежность и уменьшают срок службы электрических машин, так как при этом нарушаются сопряжения, а в процессе последующей эксплуатации вновь происходит приработка деталей, сопровождающаяся их интенсивным изнашиванием.



## 1.6. ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ РЕМОНТА И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАНОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Важным направлением в дальнейшем совершенствовании системы ППРЭсх является использование стратегии обслуживания, зависящей от технического состояния устройства (стратегии обслуживания по параметру) [10]. Основа построения этой стратегии — методы технической диагностики. Сущность стратегии обслуживания по параметру заключается в дискретном или непрерывном контроле за изменением одного (или нескольких) из параметров устройства, которые определяют его работоспособность, и при достижении этими параметрами критического (с точки зрения надежности) состояния осуществляется предупредительная замена этого устройства или отдельного элемента.

В лаборатории ремонта и эксплуатации силового оборудования Всесоюзного НИИ восстановления изношенных деталей разработана методика планового диагностирования, являющегося нормативной основой управления техническим состоянием электрооборудования в процессе эксплуатации. Техническое состояние в этом случае определяется в процессе планового диагностирования, выполняемого электротехническим персоналом согласно годовому графику через определенные периоды времени. При плановом диагностировании определяется техническое состояние электрических машин и прогнозируется время безотказной работы их узлов и деталей до следующего планового диагностирования. Периодичность диагностирования электродвигателей составляет: в помещениях для содержания крупного рогатого скота — от 2 до 5 мес. (в зависимости от количества отказов, приходящихся на один электродвигатель); в телятниках — от 2 до 5 мес.; в свиарниках — от 1 до 6 мес.; в помещениях для содержания птицы — от 1 до 5 мес.; в ремонтных мастерских, кузницах, помещениях пилорам — от 2 до 8 мес.

В качестве измеряемых параметров при плановом диагностировании асинхронных двигателей приняты токи утечки через корпусную и межфазную изоляцию обмоток при напряжении постоянного тока 1200 и 1800 В, относительное приращение этих токов при по-

вышении напряжения от 1200 до 1800 В, величина несимметрии в фазах обмотки, стабильность при повышении напряжения до 1800 В (отсутствие колебаний и бросков); уровень электрической прочности при подаче высокочастотного напряжения до 1500 В (с целью определения состояния межвитковой изоляции); величина относительного изменения тока в фазе обмотки статора электродвигателя при проворачивании ротора (с целью определения состояния короткозамкнутой обмотки ротора)

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (1)$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — наибольшее и наименьшее значение токов; величина зазора в размерной цепи «вал — корпус» при зажатых и отпущенных болтах крепления подшипниковых щитов (с целью определения состояния подшипниковых узлов); величина параллельного и углового смещения валов (с целью проверки центровки вала электродвигателя и рабочей машины).

Внедрение системы ремонта и технического обслуживания на основе планового диагностирования электрических машин позволит повысить эксплуатационную надежность при снижении затрат на их техническое обслуживание за счет перехода к системе планового контроля технического состояния и проведения профилактических и ремонтных работ только при необходимости [11].

При всей перспективности этого направления оно также не лишено недостатков, главный из которых — отсутствие контроля за техническим состоянием в периоды между плановыми диагностированиями.

## 1.7. ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Проблема повышения надежности электрических машин в сельском хозяйстве приобрела огромное народнохозяйственное значение, она многогранна и требует комплексного решения.

Одним из путей повышения надежности электрических машин в сельском хозяйстве является совершенствование их конструкции. В процессе же эксплуатации неизбежно возникают такие условия и режимы,

на которые машины не рассчитаны при проектировании и поэтому требуются дополнительные организационные и технические решения, обеспечивающие поддержание эксплуатационной надежности электрических машин на требуемом уровне.

В сельском хозяйстве находится в эксплуатации большое количество электродвигателей общепромышленного исполнения, которые не приспособлены к работе в агрессивной среде. Поэтому путь модернизации этих машин в условиях эксплуатации существенно повышает их надежность.

Из-за технологических перегрузок, климатических условий, несовершенства конструкции рабочих сельскохозяйственных машин, несовершенства систем электроснабжения электрические машины в условиях эксплуатации часто подвергаются воздействию аварийных режимов. Совершенствование устройств защиты электрических машин от работы в аварийных режимах в условиях сельскохозяйственного производства — один из путей повышения эксплуатационной надежности электрических машин.

Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве закладывает основы повышения эксплуатационной надежности электрических машин, однако большая трудоемкость работ затрудняет широкое внедрение этой системы в сельскохозяйственное производство.

В настоящее время внедряется система планового диагностирования для получения достоверной информации о техническом состоянии электрических машин в определенный момент их эксплуатации. При этом ремонтные работы выполняются по результатам диагностирования. Однако развитие процессов повреждения электрических машин под воздействием эксплуатационных факторов происходит в периоды между плановыми диагностированиями. Средства же дискретного диагностирования только фиксируют достигнутый уровень развития повреждений, не предупреждают раннее их развитие.

Поэтому необходимо разработать методы и средства непрерывного диагностирования и прогнозирования технического состояния электрических машин в сельском хозяйстве в процессе их эксплуатации.

Для достижения поставленной цели следует про-

анализировать влияние эксплуатационных воздействий на развитие процессов повреждения электрических машин; обосновать методы непрерывного диагностирования и прогнозирования технического состояния электрических машин в процессе их эксплуатации; разработать средства непрерывного диагностирования и прогнозирования технического состояния электрических машин в процессе их эксплуатации.

## 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

### 2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Надежность электрических машин в значительной степени определяется надежностью их обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Последняя работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе длительной эксплуатации электрических машин они подвергаются разнообразным эксплуатационным воздействиям.

Температура окружающей среды в условиях сельского хозяйства является наиболее распространенным фактором, воздействующим на электрические машины, работающие при широких диапазонах колебания как суточных, так и сезонных температур. Большинство силовых трансформаторов сельских трансформаторных подстанций подвержены воздействию температуры воздуха и солнечной радиации, электродвигатели насосных станций в наиболее теплые месяцы года испытывают воздействие высоких температур окружающей среды (до  $+50^{\circ}\text{C}$ ). В зимние месяцы эти агрегаты, в которых, как правило, отсутствует отопление, подвергаются воздействию низких температур (до  $-27^{\circ}\text{C}$ ).

Многие технологические линии и отдельные рабочие машины находятся либо на открытом воздухе, либо в неотапливаемых помещениях и поэтому электродвигатели привода этих машин также подвержены неблагоприятным температурным воздействиям.

Перегрузки электродвигателей нередко связаны с несовершенством рабочих машин и механизмов. Отсутствие средств автоматизации и контроля за нагрузкой кормодробилок, кормораздатчиков является тому примером. Ряд механизмов, например, дробилки, шнеки, норы порой включают под нагрузкой, зимой часто смерзаются подвижные части рабочих машин, они же нередко увеличивают массу за счет прилипа-

ния остатков кормов, навоза и т. д., в результате чего увеличиваются силы трения и маховые моменты. Всевозможные перекосы, износы трущихся частей, ухудшение смазки затрудняют подвижность рабочих органов, увеличивают трение. Все это ведет к перегрузкам двигателей, затяжным пускам, к работе в режиме опрокидывания. Поэтому, несмотря на неполную загруженность электродвигателей в сельском хозяйстве (коэффициент загрузки составляет 0,5—0,8), значительная часть их выходит из строя по причине перегрузок [13].

Особо опасным эксплуатационным воздействием для изоляции электрических машин обладает сверхток. Затяжные пуски, опрокидывания электродвигателей, возникающие при снижении напряжения, неполнофазных режимах, заклиниваниях рабочих машин, приводят к возникновению сверхтоков. Силовые трансформаторы подвержены воздействию токов короткого замыкания в питаемых сетях, пусковых токов электродвигателей в условиях соизмеримой мощности.

В связи с тем, что нагрузки имеют явно выраженный сезонный характер, а мощность отдельных потребителей часто соизмерима с мощностью трансформаторов, при отсутствии регуляторов напряжения и большой протяженности сетей 0,38 кВ напряжение в сельских сетях изменяется в значительных пределах: при питании от государственных систем электроснабжения — от  $0,85U_n$  до  $1,15U_n$ , а при питании от собственных электростанций — от  $0,8U_n$  до  $1,2U_n$ . В моменты пуска двигателей, особенно в условиях соизмеримой мощности, напряжение снижается до  $0,65U_n$  [13]. Кроме того, наблюдается неравномерная нагрузка по фазам, что сопровождается перекосами напряжения. Все это также приводит к тепловым перегрузкам электродвигателей.

Для возникновения такого фактора эксплуатационного воздействия как неполнофазные режимы может быть очень много причин: перегорание одного из предохранителей на шите трансформаторной подстанции, обрыв провода линии электропередачи, повреждение контакта пусковой аппаратуры, повреждение контакта в коробке ввода электродвигателя, повреждение жилы кабеля, окисление алюминиевого провода в местах контакта (особенно в животноводческих по-

мещениях) и так далее [6]. Довольно часто при эксплуатации электродвигателей наблюдается ухудшение условий охлаждения по причине засорения поверхностей электродвигателей продуктами переработки, снятия вентиляторов и т. д.

Изоляция обмоток асинхронных электродвигателей подвергается воздействию коммутационных перенапряжений, которые могут достигать десятикратной (и более) величины по отношению к номинальному напряжению, что является в большинстве случаев непосредственной причиной межвитковых замыканий. Коммутационные перенапряжения, представляя собой существенно случайные явления, имеют статистический характер. Их вероятная величина зависит от числа коммутационных операций, которое, в свою очередь, пропорционально времени работы электрической машины.

Разрушительным фактором эксплуатационного воздействия для изоляционной конструкции электрических машин является вибрация. Действие вибрации на всыпные обмотки выражается в постепенном разрушении пропиточного лака, в результате чего нарушается цементация обмотки и отдельные проводники приобретают некоторую свободу перемещения. Это ведет к разрушению витковой изоляции в точках соприкосновения соседних проводников. Измерение величины вибрационного смещения (удвоенное значение амплитуды колебания) электродвигателей [13] показало, что оно имеет широкий диапазон значений в пределах от 0,005 до 0,9 мм. Частота вибрации большинства корпусов электродвигателей оказалась равной 50 Гц. Особенно характерна вибрация для электродвигателей рабочих машин типа дробилок.

Сильное эксплуатационное воздействие на электрические машины в сельском хозяйстве оказывает влага и химически активные среды. Влага проникает в изоляцию машины главным образом в периоды их нерабочего состояния. Особенно интенсивно этот процесс идет во время остывания машины, так как в этот период давление в порах и капиллярах изоляции несколько ниже атмосферного. Малая вязкость и другие свойства воды способствуют ее прониканию в мельчайшие поры и гидролитическому разрушению изоляционных материалов и расщеплению полимерных цепей. Сопротивление изоляции и ее электрическая проч-

ность снижаются и создаются предпосылки для появления токов утечки.

Вредное действие на изоляцию оказывают химически активные вещества. Загазованность стойловых животноводческих помещений аммиаком, углекислым газом, сероводородом приводит к быстрой порче изоляции электрических машин.

Процессы старения изоляции от различных эксплуатационных воздействий активизируются и прогрессируют. Изоляционные конструкции, прошедшие период приработки и не имеющие больших скрытых дефектов, крайне редко отказывают вследствие внезапного пробоя. Разрушение изоляции происходит постепенно, причем иницирующая роль принадлежит процессам теплового старения. Даже при сравнительно невысоких температурах, когда термоокислительная деструкция незначительна, под действием тепла происходит усыхание, испарение летучих компонентов, уменьшение эластичности изоляции, повышение ее хрупкости. Последнее способствует развитию процессов механического старения. В изоляции появляются трещины и другие дефекты, она расслаивается и разрывается, что создает условия для возникновения ионизационных явлений. Разрушение изоляции происходит неравномерно и завершается пробоем в наиболее слабом месте. Влага и агрессивные среды способствуют ускорению и активизации процессов старения [14].

Таким образом, двигатели в условиях сельскохозяйственного производства испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок, вызванных особенностями рабочей машины; пусковых режимов (длительность, частота); отклонения напряжения на зажимах; изменения условий охлаждения (засорения поверхностей корпусов, работа без вентилятора); коммутационных перенапряжений в питающей сети и возникающих в цепи электродвигателя при пусках и отключениях; толчков, вибраций, ударов со стороны рабочих машин; влажности окружающей среды; агрессивных сред.

Аналогично силовые трансформаторы в условиях сельскохозяйственного производства испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок; пусковых то-

ков электродвигателей; токов короткого замыкания в питаемых сетях; коммутационных перенапряжений в питающих сетях; влажности окружающей среды.

Эксплуатационные воздействия на электрические машины одновременно являются и эксплуатационными воздействиями на силовые кабели и провода. Поэтому они должны рассматриваться совместно.

Силовые кабели и провода испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок; пусковых токов электродвигателей, токов короткого замыкания.

## 2.2. МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ТЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обмотка статора асинхронного электродвигателя, обмотка силового трансформатора являются самыми уязвимыми элементами конструкции электрических машин. В свою очередь, в обмотках электрических машин самым уязвимым элементом является их изоляционная конструкция. Поэтому надежность электрической машины в основном определяется надежностью изоляционной конструкции (изоляции). Анализ работ [14—61] позволяет представить механизм развития процессов повреждения изоляции электрических двигателей в течение эксплуатации. На рис. 1 приведена блок-схема развития повреждений изоляции асинхронных электродвигателей.

Любой асинхронный электродвигатель содержит в себе дефекты изготовления, которые можно разделить на две группы: дефекты проектирования; дефекты технологии производства.

Дефекты проектирования являются общими для всех электродвигателей одного типоразмера. К ним можно отнести высокий коэффициент заполнения пазов; малый запас теплостойкости изоляции; малый воздушный зазор; недостаточную жесткость конструкции.

Дефекты технологии производства носят и общий индивидуальный характер. К ним относятся низкое качество материалов и комплектующих изделий; локальные дефекты изоляции проводников обмотки; несовершенство технологии изготовления секций; несовершенство технологии укладки секций в паз; дефекты

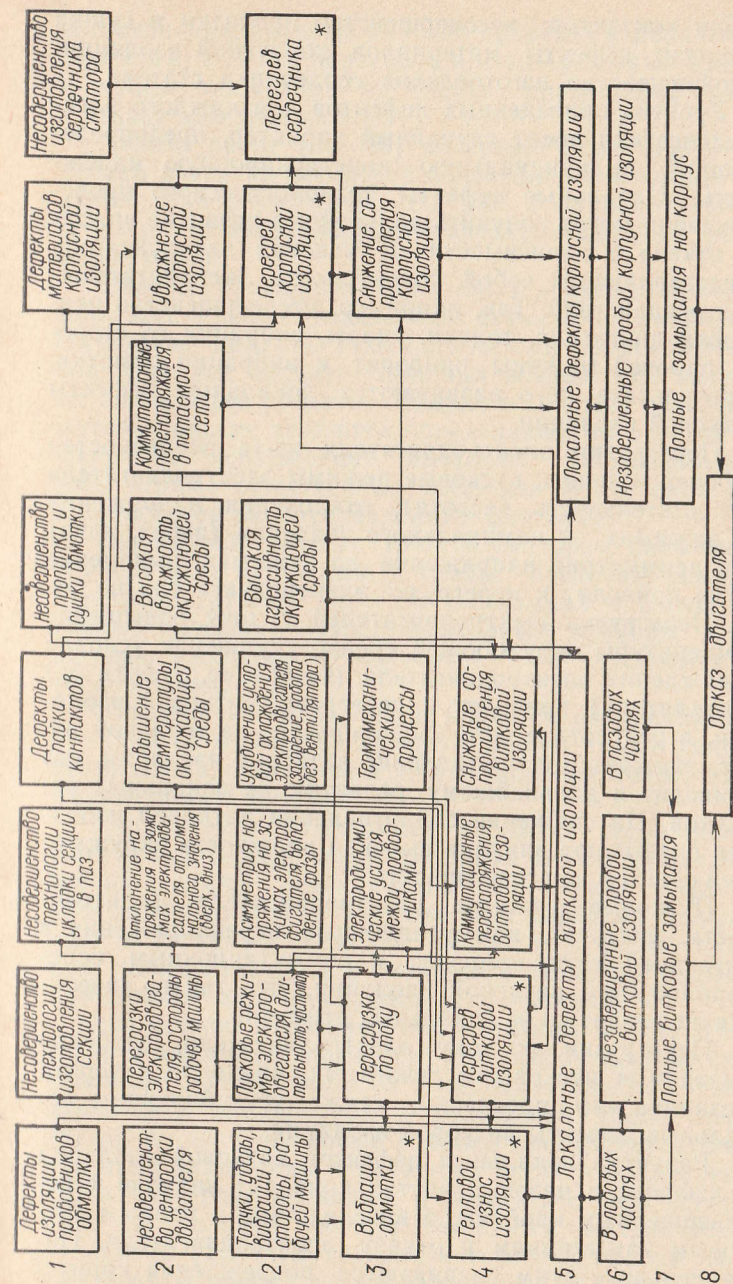


Рис. 1. Блок-схема развития повреждений изоляции асинхронных двигателей:

1 — начальные дефекты технологического происхождения; 2 — эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3—8 — последующие стадии развития дефектов изоляции; \* — диагностические признаки

пайки контактов; несовершенство пропитки и сушки обмотки; дефекты материалов корпусной изоляции; несовершенство изготовления сердечника статора.

Уровень приведенных дефектов для каждого электродвигателя носит случайный характер, определяющий индивидуальную конструкционную надежность. Начальные дефекты технологического происхождения могут получить дальнейшее развитие вплоть до отказа в зависимости от условий эксплуатации, представляющих собой совокупность эксплуатационных воздействий. Так, например, несовершенство центровки двигателя, толчки, удары, вибрации со стороны рабочей машины приводят к вибрации обмотки, в результате чего развиваются локальные дефекты витковой изоляции.

Перегрузки электродвигателя из-за особенностей рабочей машины, пусковые режимы электродвигателя (их длительность, частота), отклонения напряжения на зажиме от номинального значения (вверх, вниз) или асимметрия напряжения на зажимах, выпадение фазы приводят к перегрузке электродвигателя по току. Перегрузка электродвигателей по току, повышение температуры окружающей среды, ухудшение условий охлаждения электродвигателя (засорение, работа без вентилятора) приводят к перегреву витковой изоляции, в результате чего увеличивается ее тепловой износ, снижается сопротивление витковой изоляции, что приводит к дальнейшему развитию ее локальных дефектов. На снижение сопротивления витковой изоляции оказывают влияние высокая влажность окружающей среды и ее агрессивность.

Пусковые режимы электродвигателя (длительность, частота), коммутационные перенапряжения в питающей сети приводят к коммутационным перенапряжениям витковой изоляции, что также способствует развитию ее локальных дефектов.

Перегрузки по току электродвигателя, особенно вызванные пусковыми режимами, приводят к термомеханическим процессам, также усугубляющим локальные дефекты витковой изоляции.

Развитие локальных дефектов витковой изоляции в лобовых и пазовых частях приводит вначале к незавершенным пробоям, а впоследствии к полным витковым замыканиям и отказу электродвигателя. Параллельно с этим развиваются повреждения корпус-

ной изоляции, которые вначале приводят к локальным дефектам, а затем переходят в незавершенные пробои и полные замыкания на корпус, приводящие также к отказу электродвигателя.

Анализ работ [62—83] позволяет представить механизм развития процессов повреждения изоляции силовых трансформаторов. На рис. 2 приведена блок-схема развития повреждений изоляции силовых трансформаторов.

Силовые трансформаторы, как и электродвигатели, содержат в себе определенные дефекты изготовления. Начальные дефекты технологического происхождения под влиянием эксплуатационных воздействий получают дальнейшее развитие. Однако в силовых трансформаторах они не являются определяющими в развитии процессов повреждения изоляции. Определяющую роль играют естественные процессы ее старения под воздействием эксплуатационных факторов.

Перегрузки силовых трансформаторов, повышение температуры окружающей среды, пусковые режимы электродвигателей, короткие замыкания в сетях, питаемых силовыми трансформаторами, приводят к перегреву изоляции, в результате чего ускоряется ее тепловой износ.

Тепловой износ изоляции является определяющим в общем ее износе, на который влияет также увлажнение масла, окисление и другие причины, снижающие механическую прочность.

Механически изношенная изоляция легко разрушается под воздействием вибраций и электродинамических усилий, возникающих при пусках крупных электродвигателей и особенно при коротких замыканиях в питаемых сетях, что приводит к отказу силовых трансформаторов в результате витковых замыканий в обмотках и междуфазных замыканий.

Аналогично электрическим машинам можно представить механизм развития процессов повреждения изоляции силовых кабелей и проводов (рис. 3). Здесь повышение температуры окружающей среды, перегрузки по току, пусковые режимы электродвигателей, короткие замыкания в питаемых сетях также приводят к перегреву изоляции, в результате чего ускоряется ее тепловой износ и снижается механическая прочность. Дефекты технологического происхождения под воздействием теплового износа приводят к ло-

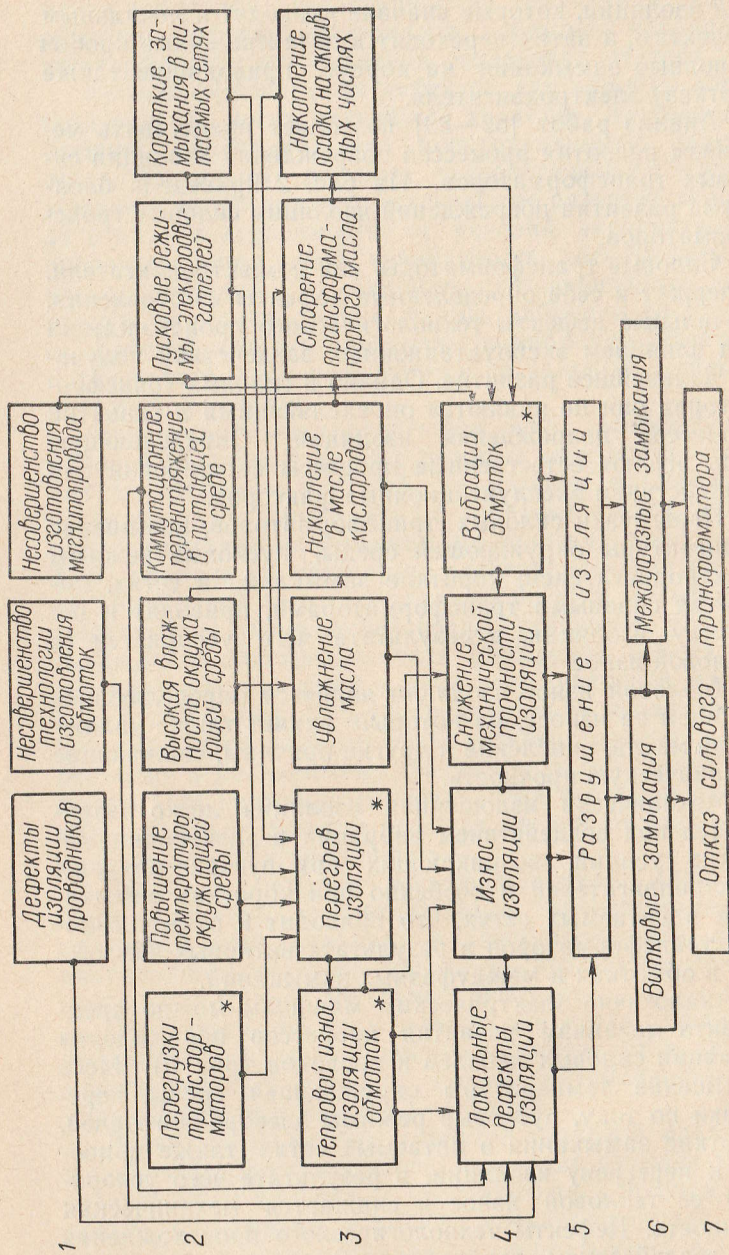


Рис. 2. Блок-схема развития повреждений изоляции силового трансформатора:

1 — начальные дефекты технологического происхождения; 2 — эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3 — последующие стадии развития дефектов изоляции; \* — диагностические признаки

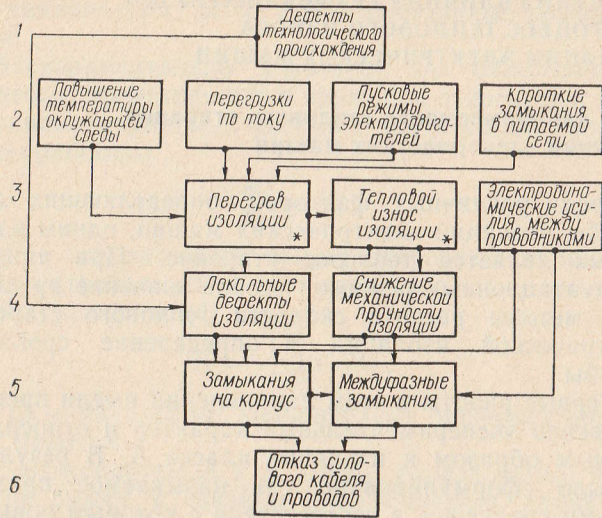


Рис. 3. Блок-схема развития повреждений изоляции силовых кабелей и проводов:

1 — начальные дефекты технологического происхождения; 2 — эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3 — последние стадии развития дефектов изоляции; \* — диагностические признаки

кальным дефектам изоляции. При общем снижении механической прочности под воздействием электродинамических усилий в результате действия токов коротких замыканий локальные дефекты изоляции вызывают замыкания на корпус или междуфазные замыкания, что приводит к отказу силовых кабелей или проводов.

С целью определения диагностических признаков, обоснования параметров диагностирования и критериев оценки интенсивности процессов повреждения изоляции электрических машин в течение их эксплуатации в работе проведен анализ влияния эксплуатационных воздействий на развитие этих процессов.