

## КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ДОСТОВЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

С.О. Хомутов

*Статья посвящена обобщению результатов научно-исследовательских работ в области эксплуатационной надежности электрических машин, выполненных в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова в период с 2000 по 2010 годы. Актуальность проведенных исследований обусловлена низкой эффективностью производства продукции в сельском хозяйстве. Выполненный анализ бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента сельхозпредприятий позволил выделить проблему обеспечения безотказной работы электрооборудования, решение которой определяется надлежащей организацией системы повышения его надежности с применением современных технических средств.*

*Ключевые слова: электродвигатель, надежность, диагностика, изоляция.*

На сегодняшний день продолжает оставаться актуальным вопрос повышения надежности электродвигателя (ЭД), как основного потребителя электроэнергии в сельском хозяйстве. В процессе эксплуатации электродвигателей общепромышленного назначения, составляющих более половины всего парка двигателей, на интенсивность старения изоляции, как наиболее «слабого» и уязвимого элемента конструкции, влияют различные факторы: окружающая среда, режимы работы двигателя, техническое обслуживание и ремонт. В итоге, как правило, происходит ускоренное старение изоляции, результатом которого является выход ее из строя, и, как следствие, значительное сокращение реального срока службы электродвигателя по сравнению с заложенным заводом-изготовителем.

Так, выполненные в течение достаточно большого времени, начиная с 70-х годов прошлого века, на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края и ряда других регионов России исследования показали, что от общего числа отказов элементов конструкции двигателя повреждения обмоток составляют более 80 % при значительной доле выхода двигателей из строя в результате межвитковых замыканий в обмотке статора. В общем случае, из-за нарушения изоляции по-прежнему прекращают свою работу около 75 % электродвигателей, а экономический ущерб от выхода из строя одного двигателя достигает 20 тыс. руб. и более при стоимости нового – 1-8 тыс. руб. (в ценах 2009 года).

Диаграмма распределения причин отказов приведена на рисунке 1.

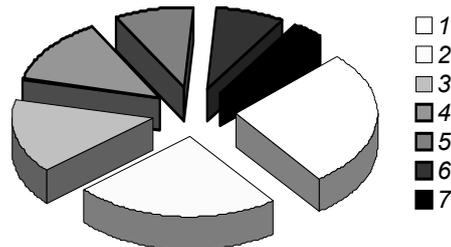


Рисунок 1 – Диаграмма распределения причин отказов:

- 1 – замыкания в результате увлажнения;
- 2 – обрыв фаз;
- 3 – длительные перегрузки;
- 4 – заклинивания;
- 5 – перегрев;
- 6 – разрушение подшипников;
- 7 – прочее.

Таким образом, существует проблемная ситуация, заключающаяся в необходимости увеличения срока службы электродвигателей в неблагоприятных условиях сельского хозяйства и отсутствии соответствующей данным условиям системы повышения их надежности, которая охватывала бы все стадии эксплуатации и ремонта двигателя, а также включала в себя специальный комплекс мероприятий, позволяющий проводить диагностику и необходимые восстановительные работы с минимальным участием обслуживающего и ремонтного персонала.

Значительный вклад в развитие науки о надежности электрооборудования и электрических систем, в т. ч. в условиях сельскохозяйственного производства, внесли видные советские и российские ученые А. А. Воробь-

## КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ДОСТОВЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

ев, Ю. Н. Вершинин, С. Н. Койков, Г. С. Кучинский, Н. В. Александров, Т. Ю. Баженова, В. А. Баев, Б. В. Кулаковский, П. М. Хазановский, Л. Т. Пономарев, А. В. Хвальковский, И. Е. Иерусалимов, В. В. Маслов, Л. М. Бернштейн, Н. А. Козырев, О. Д. Гольдберг, Ю. П. Похолков, З. Г. Каганов, И. А. Будзко, В. Н. Андрианов, И. И. Мартыненко, Г. И. Назаров, В. Ю. Гессен, Н. М. Зуль, С. П. Лебедев, А. А. Пястолов, Р. М. Славин, Г. П. Ерошенко, В. Н. Ванурин, А. В. Мозгалевский, В. П. Таран, А. В. Лыков, П. С. Куц, И. Ф. Пикус, А. Е. Немировский, А. М. Худогонов, В. А. Буторин, О. И. Хомутов и др.

Можно констатировать, что работы по изучению и обеспечению надежности электрических машин, выполняемые у нас в стране и за рубежом, уже сейчас имеют конкретный практический выход, что позволяет снизить аварийность электродвигателей. Вместе с тем, несмотря на определенные успехи в этом направлении, проблема низкой эксплуатационной надежности двигателей, связанная с отсутствием теоретического обоснования комплексной оценки их состояния, а также научно подтвержденных подходов к ускорению процессов разрушения связующего при удалении обмоток, пропитки и сушки изоляции в ходе обслуживания и ремонта, продолжает оставаться актуальной. Требуют дальнейшего развития теория прогнозирования состояния двигателей с учетом многофакторного характера воздействий, работы по созданию методов планирования сроков и объемов ремонта электродвигателей. Разобщенность выполняемых в данных направлениях исследований, безусловно, снижает тот эффект, который получен от внедрения уже законченных научно-исследовательских работ, т. е. необходимость научного обобщения и системного подхода к развитию теоретических и научно-технических основ в области повышения надежности электрооборудования очевидна.

Таким образом, целью проведенных исследований является создание системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепло-массопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности сельскохозяйственного производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала.

В качестве объекта исследования выступают процессы изменения свойств изоляции

обмоток в результате ее старения и восстановления. Предметом научного исследования является получение новых закономерностей протекания процессов изменения свойств электрической изоляции, позволяющих осуществлять ее комплексную диагностику и эффективное восстановление в ходе эксплуатации и ремонта.

В ходе научно-исследовательских работ для определения характера и причин отказов электродвигателей проводилось систематическое изучение условий эксплуатации значительного количества двигателей в различных отраслях сельского хозяйства. На основе анализа статистических данных об аварийности двигателей построены диаграммы срока службы и соотношения отказов электродвигателей для различных технологических процессов (рисунок 2), а также подтвержден ранее сделанный вывод о том, что значительную долю составляют отказы, вызванные старением изоляции обмоток под воздействием влаги, агрессивных газов, тепловых и механических нагрузок [1].

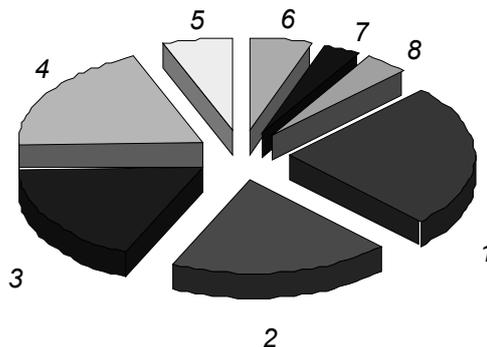


Рисунок 2 – Диаграмма соотношения отказов:  
1 – кормоприготовление; 2 – уборка навоза;  
3 – доение; 4 – вентиляция; 5 – водоснабжение;  
6 – металлообработка; 7 – зерноочистка;  
8 – обработка молока.

В рамках выполненной работы, одной из важнейших задач системного анализа являлось определение перспективных направлений исследования. Установлено, что, поскольку наносимый предприятиям ущерб в результате отказа двигателей связан не только с их заменой или ремонтом, но и с браком и невыпуском сельхозпродукции, требуются действенные меры по определению момента выхода электродвигателей из строя. При этом доказано, что состояние изоляции ЭД после ее обслуживания и ремонта зависит от того, какие использовались методы разрушения связующего, пропитки и суш-

ки, а также с каким качеством выполнялись отдельные технологические операции.

Первые исследования, посвященные моделированию процессов эксплуатации технических элементов, были предприняты в прошлом веке математиками А. К. Эрлангом, А. Т. Пуассоном, которые дали ему название – теория массового обслуживания. Позднее, в нашей стране, данная теория активно исследовалась учеными К. М. Марковым, В. Б. Гнеденко,

И. Н. Коваленко, А. Я. Хинчиным. Результаты, полученные этими учеными, были положены в основу выполненной работы, позволившей в итоге осуществлять гибкое планирование сроков и объема ремонта электродвигателей на основе их диагностики [2]. В результате проведенного теоретического исследования определены схемы и основные показатели функционирования систем организации ремонта электродвигателей (рисунок 3).

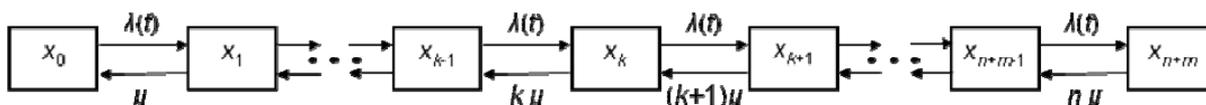


Рисунок 3 – Размеченный граф процессов выхода из строя и восстановления электрических двигателей определенного типа, находящихся в эксплуатации на момент времени  $t$ :  
 $X_k$  – в системе ремонта имеется  $k$  заявок ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ), обслуживаемых  $k$  линиями;  
 $X_{n+r}$  – в системе имеется  $n + r$  заявок ( $r = 1, 2, \dots, m$ ):  $n$  из них обслуживаются и  $r$  заявок находятся в очереди;  
 $\lambda(t)$  – интенсивность потока отказов электродвигателей;  $\mu$  – интенсивность потока восстановлений ЭД

С учетом вышеизложенного в процессе исследования были выполнены:

- 1) теоретическое обоснование и разработка методов и технических средств диагностики электрических двигателей в условиях эксплуатации и ремонта с последующим прогнозом их состояния на перспективу;
- 2) исследование процессов теплопереноса и их влияния на повышение качества пропиточных работ с оценкой результатов их выполнения на основе использования метода достоверной пооперационной диагностики;
- 3) количественная оценка степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции ЭД;
- 4) создание методики оптимизации, позволяющей выявлять целесообразные режимы и объем восстановительных мероприятий;
- 5) разработка математического аппарата прогнозирования наработки до очередной диагностики, позволяющего ответить на вопросы о сроках ремонта ЭД.

В результате предложена структура системы повышения надежности двигателей, обеспечивающая достижение поставленных целей путем комплексного решения задач диагностики, прогнозирования и восстановления изоляции на протяжении всего срока службы ЭД по заранее намеченным графикам [3].

Диагностику изоляции, позволяющую установить реальное состояние двигателя, и прогнозирование наработки до очередного контроля ее состояния  $T_{\text{диаг. } i}$  необходимо проводить на протяжении всего срока службы электродвигателя. Данный цикл, показанный на рисунке 4, повторяется до тех пор, пока по результатам

диагностики не потребуются проведения мероприятий по восстановлению изоляции обмоток.

В свою очередь, в рамках организационно-технического обеспечения ремонта после проведения технологических операций по восстановлению электрической изоляции необходимы диагностика и прогнозирование изменения состояния изоляции обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики.

Таким образом, прежде чем говорить о повышении качества пропиточно-сушильных работ, необходимо решить вопрос о достоверности диагностики двигателей как в процессе их эксплуатации, так и в ходе ремонта.

Результаты выполненного анализа методов и технических средств диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе легли в основу проведения теоретических исследований зависимости гармонического состава напряженности магнитного поля ЭД от степени развития дефектов [2].

Для построения математической модели магнитного поля в воздушном зазоре двигателя в работе были рассмотрены модели электрической машины, одна из которых состоит из двух коаксиальных цилиндров, выполненных из магнитного материала (цилиндры разделены воздушным зазором  $\delta$ , а внутренний радиус  $R$  цилиндра, соответствующего статору, равен единице). При известных распределениях линейной токовой нагрузки  $A(a)$  вдоль окружности воздушного зазора и линий магнитной индукции в радиальном направлении, может быть найдена зависимость (1) для напряженности магнитного поля в любой точке воздушного зазора с координатой  $a$ .

КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ДОСТОВЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

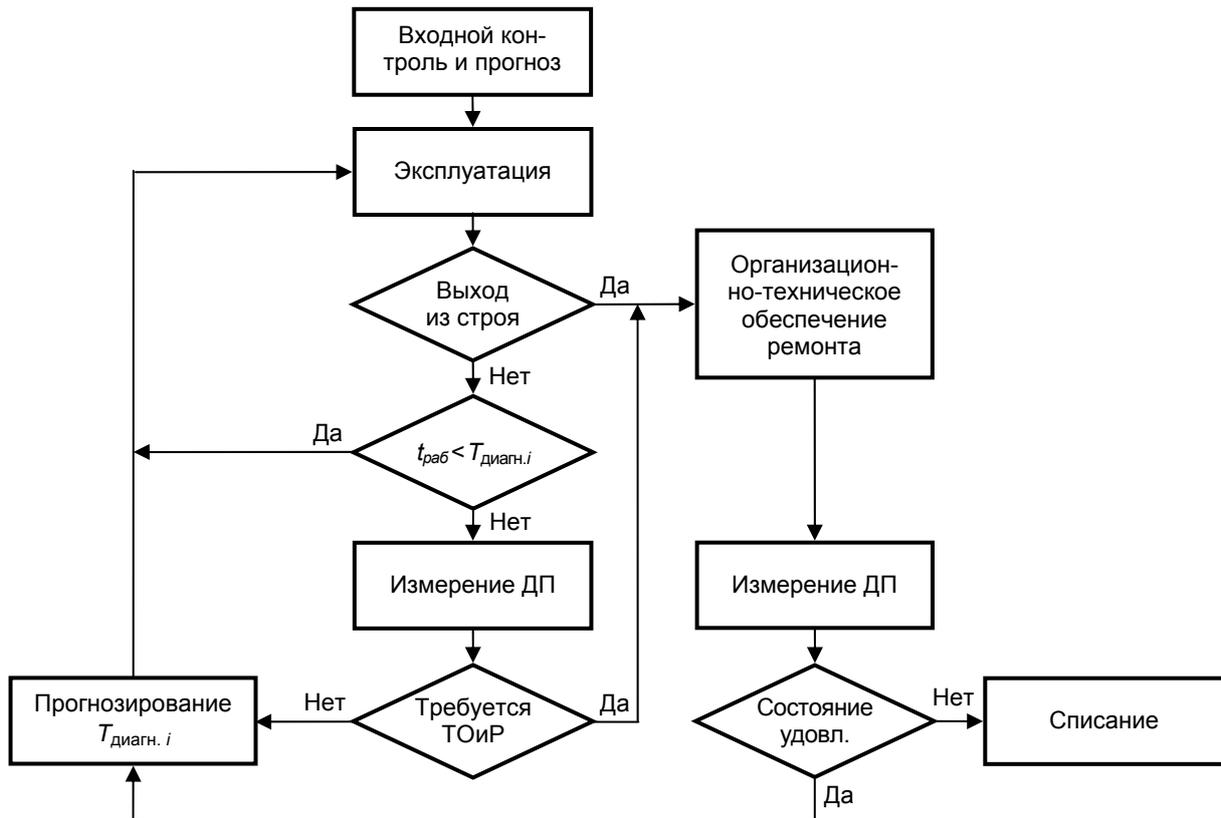


Рисунок 4 – Предлагаемая блок-схема процесса принятия решения о проведении ремонта ЭД

$$H_r(\alpha) = \frac{2Ni}{\pi\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \frac{\sin v N \frac{\alpha_1}{2}}{N \sin v \frac{\alpha_1}{2}} \times \cos v \left[ \alpha - (N-1) \frac{\alpha_1}{2} \right], \quad (1)$$

где  $i$  – протекающий по обмотке ток;  $N$  – число витков группы;  $v$  – номер гармоники;  $\alpha_y$  – шаг обмотки;  $\alpha_1$  – угол между группами витков.

Тогда зависимость для напряженности магнитного поля, созданного  $m$ -фазной обмоткой, когда токи в группе витков имеют амплитуду  $\sqrt{2}I$ , частоту  $\omega$  и сдвинуты друг относительно друга на угол  $(2/m)\pi$ , примет вид (2).

$$H_m(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{Ni}{\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \frac{\sin Nv \frac{\alpha_1}{2}}{N \sin v \frac{\alpha_1}{2}} \times \left\{ \frac{\sin(v+1)\pi}{\sin[(v+1)/m]\pi} \sin[(\omega t + v\alpha) - \frac{m-1}{2}(v+1)\frac{2\pi}{m}] + \frac{\sin(v-1)\pi}{\sin[(v-1)/m]\pi} \times \sin\left[\omega t - v\alpha + \frac{m-1}{2}(v-1)\frac{2\pi}{m}\right] \right\}. \quad (2)$$

Полученные в результате использования данного выражения математические модели магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя позволили установить, что амплитуды гармонических составляющих напряженности поля зависят от конструктивных особенностей рассматриваемой электрической машины и в значительной мере определяются различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы. Указанные несимметрии нарушают характер поля, вызывая спектр пространственных гармоник.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили сделанные выводы.

Так, в частности, зная, что появление спектра гармоник напряженности магнитного поля в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем по отношению к корпусу двигателя магнитном поле, установлено, что наличие статического эксцентриситета ротора вызывает появление во внешнем магнитном поле (ВМП) электрических машин четных гармоник, изменение амплитуд которых в процессе эксплуатации может служить диагностическим признаком выработки подшипников (рисунок 5).

В свою очередь, наличие во ВМП ЭД гармоник кратных трем является диагностиче-

ским признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора (рисунок 6). При этом анализ спектра напряженности внешнего магнитного поля электрического двигателя дает возможность получить достоверную информацию не только о виде дефекта, но и о степени его развития.

В качестве практической реализации полученных теоретических зависимостей был предложен метод диагностики электродвигателей на основе связи процессов развития дефектов и изменений гармонического состава спектра внешнего магнитного поля двигателей, а также диагностический параметр для оценки характера дефектов

$$K_{HI} = \frac{\sqrt{\sum_{H \geq 2} H_H^2}}{H_1},$$

где  $H_v$  – амплитуды гармоник спектра напряженности магнитного поля ЭД.

Разработанный при непосредственном участии автора метод диагностики не требует большого числа операций, обеспечивает высокую достоверность получаемой информации, наглядность и простоту реализации при работе электродвигателей под нагрузкой.

Особого внимания в контексте рассматриваемого вопроса заслуживает разработанный нами метод волновых затухающих колебаний (ВЗК), позволяющий осуществлять пооперационную диагностику и контроль качества восстановления электрической изоляции [4]. Другими словами, предложенные методы позволяют осуществлять диагностику электродвигателей как в условиях непосредственного использования, так и ремонта.

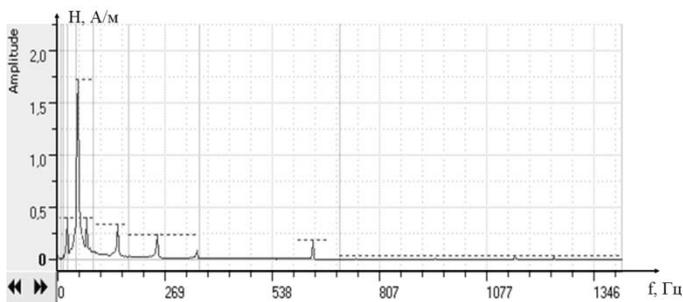
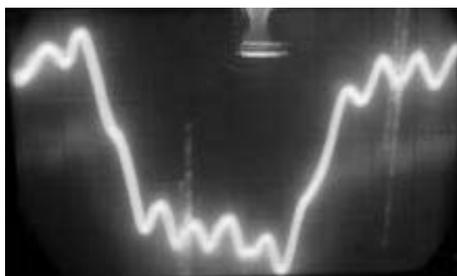


Рисунок 5 – Осциллограмма напряженности ВМП ЭД и ее спектральный состав при эксцентриситете вала ротора

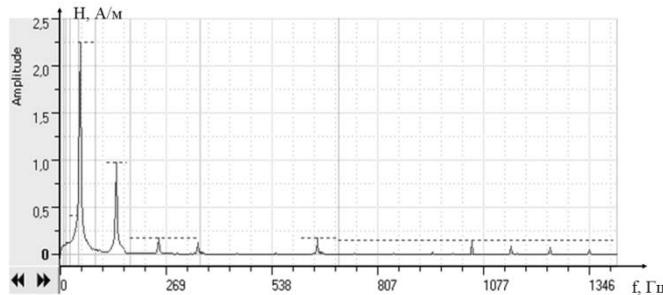


Рисунок 6 – Осциллограмма напряженности ВМП ЭД и ее спектральный состав при межвитковом замыкании

Для нахождения оптимальной структуры диагностического параметра по методу ВЗК были рассмотрены факторы, влияющие на затухающий колебательный процесс, возникающий в обмотке после подачи на нее типового единичного сигнала.

Полученная в ходе теоретических исследований математическая модель волновых затухающих колебаний в обмотке с учетом конструктивных параметров электроизоляционной системы позволила установить

связь между параметрами ВЗК и параметрами схемы замещения обмотки двигателя

$$U = U_k + \frac{U_k}{\sin \varphi} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi); \quad (3)$$

$$U_k = \frac{(R_{об} + R_в) \cdot R_k \cdot (-U_{ex} \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R}} + U_{ex})}{R_{об} \cdot R_в + R_{об} \cdot R_k + R_в \cdot R_k},$$

где  $U_k$  – напряжение обмотки относительно корпуса;  $R_{об}$  – активное сопротивление обмотки;  $R_в$  – межвитковое сопротивление;  $R_k$  –

## КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ДОСТОВЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

сопротивление изоляции относительно корпуса;  $C$  и  $R$  – соответственно выходные емкость и сопротивление генератора импульсов;  $U_{вх}$  – входное напряжение;  $\delta$  – коэффициент затухания;  $t$  – время затухания;  $\omega$  и  $\varphi$  – частота и фаза колебания соответственно.

В результате предложен обобщенный диагностический параметр (ОДП), значение которого может быть измерено на любом этапе технологического процесса восстановления изоляции, однако будет присуще лишь конкретной марке двигателя с определенным уровнем дефектности

$$\Psi = \frac{T}{\ln(A_1 / A_2)}, \quad (4)$$

где  $A_1$  – амплитуда первого полупериода;  $A_2$  – амплитуда второго;  $T$  – период колебаний.

Таким образом, разработанная модель волнового затухающего процесса позволяет определять значения обобщенного диагностического параметра для любого, в т. ч. «идеального» (эталонного) состояния изоляции каждого типа электродвигателей [4].

В свою очередь, проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил адекватность разработанных математических моделей, связывающих значения параметров схемы замещения со значениями

параметров, определяющих конструкцию изоляции двигателя:

$$R_k = \frac{\rho_{куз} \cdot \sum_{i=1}^f \delta_{ki}}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n \cdot l_{паз} \cdot \psi}; \quad R_e = \frac{\rho_{виз} \cdot \sum_{i=1}^g \delta_{ei}}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \psi};$$

$$R_{об} = \frac{\rho \cdot l_{cp} \cdot n_e}{s_{эл} \cdot n_{эл} \cdot a},$$

где  $n$  – число проводников, прилегающих к пазу;  $l_{паз}$  – длина сердечника;  $\delta_{ei}$  и  $\delta_{ki}$  – толщина  $i$ -го слоя витковой и корпусной изоляции;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;  $l_{cp}$  – длина витка;  $n_e$  – количество витков;  $s_{эл}$  – сечение эффективного проводника;  $n_{эл}$  – число элементарных проводников;  $a$  – число ветвей обмотки;  $r_1$  – радиус без изоляции.

В результате предложены методы диагностики, которые в комплексе позволяют оценивать состояние электродвигателя как в процессе эксплуатации, так и в ходе обслуживания и ремонта (рисунок 7).

Созданные технические устройства диагностики двигателей на предприятиях АПК в 2007 году удостоены премии Алтайского края в области науки и техники. Расчет экономического эффекта от внедрения разработанных методов и средств диагностики позволил определить срок окупаемости, равный 1-1,5 года.



Рисунок 7 – Структура использования разработанных методов диагностики

## КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ДОСТОВЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Выполненный комплекс исследований был бы неполным без построения эффективной методики планирования ремонтов двигателей, что в современной экономической ситуации возможно только на основе анализа данных об их текущем состоянии, интенсивностях отказов и производительности ремонтной базы с использованием упомянутой ранее теории массового обслуживания.

На основе анализа динамики изменения технического состояния изоляции электродвигателя оказалось возможным построить математическую модель системы организации ремонта ЭД, позволяющую находить зависимости между показателями эксплуатации парка двигателей, интенсивностями их отказов и имеющимся объемом средств на ремонт [2].

Выполненный в работе анализ способов ремонта электродвигателей при наличии или отсутствии на предприятии собственной ремонтной базы позволил осуществить оптимизацию параметров системы организации ремонта двигателей на основе функции затрат

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k S_{M,i} + A + Z_{\text{раб}} + \sum_{i=1}^k Y_{\text{пр},i} \cdot t_{\text{пр},i} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{обсл}}$$

где  $k$  – количество вышедших из строя двигателей за период времени  $t$ ;  $S_M$  – стоимость материалов, расходуемых на ремонт одного электродвигателя;  $A$  – постоянные затраты на текущее содержание мастерской и амортизационные отчисления;  $Z_{\text{раб}}$  – заработная плата рабочих;  $Y_{\text{пр},i}$  – убытки от простоя  $i$ -го ЭД в единицу времени;  $t_{\text{пр}}$  – длительность простоя электродвигателей;  $Z_{\text{пр}}$  – транспортные расходы;  $Z_{\text{обсл}}$  – затраты на ежегодное обслуживание.

Разработанная методика оптимизации дала возможность создавать для сельскохозяйственного предприятия оптимальный график вывода двигателей в ремонт с точки зрения снижения суммарных затрат на проведение восстановительных мероприятий и убытков от простоя оборудования, т. е. находить баланс между величиной затрат на их ремонт и рентабельностью работы всего парка ЭД.

Таким образом, использование с учетом специфики и сезонности работы электродвигателей на предприятиях АПК разработанной методики обеспечивает снижение затрат на эксплуатацию и ремонт ЭД в 1,2-1,3 раза.

Кроме того, в ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее простым и доступным, но в то же время эффективным способом прогнозирования до

полнительной наработки до очередной диагностики ЭД является количественная оценка факторов, отрицательно влияющих на состояние его изоляции, основанная на использовании информационно-логического анализа экспериментальных данных. В итоге, была выдвинута рабочая гипотеза – предполагаемая логическая зависимость наработки  $T_{\text{диагн. } i}$  от факторов эксплуатации

$$T_{\text{диагн. } i} = K_{\text{ни}} \vee v \wedge T \vee t_{\text{раб}} \wedge n \wedge q,$$

где  $v$  и  $T$  – влажность и температура окружающей среды соответственно;  $t_{\text{раб}}$  – время работы электродвигателя;  $n$  – число пусков;  $q$  – наличие примесей в воздухе.

Данная математическая модель позволяет совершать прогнозирование остаточного срока службы ЭД с точностью до 1000 часов, а вероятность точности прогноза составляет 85-90 %, что подтверждается результатами подконтрольной эксплуатации группы двигателей в ряде хозяйств Алтайского края.

Таким образом, результаты выполненных исследований, продиктованных современной ситуацией в области ремонта электрооборудования, показали актуальность поднятой в работе проблемы и позволяют повысить уровень эксплуатационной надежности ЭД на сельскохозяйственных предприятиях различных регионов России.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомутов, С.О. Электротермовакuumная пропитка и сушка электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов. – Новосибирск: Наука, 2006. – 325 с.
2. Хомутов, С.О. Ситуационное планирование ремонтов электродвигателей на основе их электромагнитной диагностики [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – 230 с.
3. Хомутов, С.О. Электротехнологическая система повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства [Текст] / С. О. Хомутов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 3. – С. 173-178.
4. Хомутов, С.О. Повышение надежности работы асинхронных двигателей путем разработки методики и технических средств для определения эталонных значений диагностического параметра их изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2002. – № 1. – С. 26-31.

**Хомутов С.О., к.т.н., доц. каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 8(3852) 36-77-72.**