

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

П.И. Семичевский, А.А. Грибанов, Е.В. Кобозев

В статье рассмотрено решение задачи выбора оптимальных технологий пропитки и сушки изоляции электродвигателей, эксплуатирующихся в заданных условиях. Выбраны технические и экономические критерии эффективности, которые использованы для постановки задач оптимизации. Обосновано использование методы штрафных функций для решения задачи оптимизации режимов работы установок по пропитке и сушке электродвигателей. Описан алгоритм оптимизации сочетания технологий пропитки и сушки изоляции с условиями эксплуатации электродвигателей.

The article deals with the task of selecting the insulation impregnation and drying optimal technology of operated in specified circumstances electric motors. The technical and economic performance criteria that are used to optimize the objectives have been selected. Using the penalty function method for solving the problem of optimizing the mix of technologies impregnation and drying conditions of electric motors isolation have been described.

В условиях рыночной экономики на эффективность работы сельскохозяйственного предприятия оказывают влияние различные факторы. Среди технических факторов, влияющие на основные экономические показатели, такие как конкурентность, рентабельность и прибыль, следует выделить надежность используемого электрооборудования. Она в свою очередь зависит от того, какие методы и технологии используются для ее обеспечения.

Наиболее распространенным электродвигателем в сельскохозяйственном производстве, являются трехфазные асинхронные двигатели. Их надежность все еще остается недостаточно высокой. Связано это с тем, что ввиду высокой цены на электродвигатели специального исполнения для работы в условиях сельского хозяйства на предприятиях агропромышленного комплекса большую часть составляют электродвигатели общепромышленного исполнения, не имеющие соответствующего условиям уровня защиты от действия окружающей среды [1]. Поэтому вопрос выбора и использования более эффективных методов повышения надежности приобретает особую остроту.

Среди всех элементов конструкции асинхронного двигателя наибольшему воздействию отрицательных факторов окружающей среды и условий эксплуатации подвергается изоляция обмоток статора. Основными мероприятиями, способствующими повышению уровня надежности этого элемента

как во время ремонта, так и во время технического обслуживания являются сушка и пропитка обмоток изоляционными лаками и компаундами. Поэтому имеется необходимость использования на специализированных ремонтных предприятиях и участках по обслуживанию электрооборудования наиболее эффективных технологий пропитки и сушки. Однако использование таких технологий не всегда оправдано по экономическим причинам, так как даже в пределах одного сельскохозяйственного предприятия условия эксплуатации электродвигателей, задействованных в различных технологических процессах, отличается очень сильно. Поэтому актуальным является решение задач оптимизации использования технологий и подбора режимов работы технологических установок для пропитки и сушки изоляции применительно к определенным условиям эксплуатации.

Любая задача оптимизации не может быть решена без наличия хотя бы одного критерия эффективности. В работе [2] проведен детальный анализ взаимоотношений и интересов лиц, осуществляющих ремонт и эксплуатацию электродвигателя. Эксплуатирующая электродвигатели организация заинтересована в максимизации срока безотказной работы электродвигателю $T_{сл}$, в минимизации суммарных затрат на эксплуатацию и ремонт электродвигателя Z_{Σ} , а также в минимизации срока ремонта двигателя $T_{рем}$.

Ремонтное предприятие заинтересовано в минимизации себестоимости ремонта $C_{рем}$ и срока ремонта двигателя $T_{рем}$. Из приведенных здесь критериев эффективности для характеристики качества ремонта и обслуживания электродвигателя можно использовать лишь $T_{сл}$. Очевидно, что значения этого параметра будут изменяться в довольно широких пределах, по которым нельзя однозначно судить об эффективности восстановительных мероприятий, так как необходимо учитывать воздействие на двигатель большого числа других факторов, в частности, условий эксплуатации. Поэтому необходимо выработать другой показатель, по которому можно оценивать качество восстановления диэлектрических свойств электроизоляционных конструкций.

В работе [2] для оценки качества ремонта предложен обобщенный диагностический параметр ψ . Этот параметр может быть получен при использовании контроля качества метода волновых затухающих колебаний в обмотки статора электродвигателя [2-4]. Поскольку значение параметра зависит от конструктивных особенностей асинхронного двигателя [4], то наиболее удобным оказывается использование номинированных модификаций этого параметра [2]:

$$\bar{\Psi}_{ij} = \frac{\Delta\Psi_{ij}}{\Psi_{\max}}, \quad (1)$$

$$\tilde{\Psi}_k = \frac{\Psi_k}{\Psi_{V\max.k}}, \quad (2)$$

где $\Delta\Psi_{ij}$ – разностный диагностический параметр, определяемый как разность значений диагностического параметра в конце и начале j -го этапа i -й технологии; Ψ_{\max} – максимально возможное значение диагностического параметра для данного двигателя, наблюдаемое на этапе пропитки; $\Psi_{V\max.k}$ – максимально возможное значение диагностического параметра для k -го двигателя по окончании технологического процесса пропитки и сушки; Ψ_k – текущее значение диагностического параметра k -го двигателя при эксплуатации.

С учетом сформулированных критериев эффективности для нахождения оптимальных режимов работы установок по пропитки и сушки имеем две функции цели:

$$Z_{реж.т} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\bar{\Psi}_m \rightarrow \max, \quad (4)$$

где m – номер этапа технологического процесса.

При объединении функций цели получаем многокритериальную задачу оптимизации. Поскольку задачу оптимизации в таком виде решить сложно, необходимо свести ее к однокритериальной, выбрав за основной один из критериев эффективности, а остальные представить в виде ограничений. В результате получим следующие постановки задач оптимизации:

$$\min Z_{реж.т}, \bar{\Psi}_{m.зад} \leq \bar{\Psi}_m; \quad (5)$$

$$\max \bar{\Psi}_m, Z_{реж.т} \geq Z_{реж.т}. \quad (6)$$

Выбор способа решения задачи оптимизации опирается на вид математических зависимостей между критериями эффективности и параметрами технологического процесса пропитки и сушки изоляции. На основе обработки многочисленных экспериментальных данных в работе [2] получены модели второго порядка для различных методов пропитки и сушки. Поэтому для решения задачи оптимизации необходимо выбрать эффективный метод нелинейного программирования.

На основе анализа литературных источников [2, 5-9] для решения поставленной задачи был выбран метод штрафных функций, как наиболее простой среди методов нелинейного программирования. Основная его идея состоит в преобразовании задачи минимизации (максимизации) функции $\Xi = f(\bar{s})$ (где \bar{s} – вектор входных переменных) с соответствующими ограничениями, наложенными на \bar{s} , в задачу поиска минимума (максимума) без ограничений функции [7]

$$\xi = f(\bar{s}) \pm \aleph(\bar{s}). \quad (7)$$

В данном выражении функция $\aleph(\bar{s})$ является штрафной. Смысл ее заключается в том, чтобы при нарушении ограничений она уменьшала значение функции ξ , тем самым «штрафую» ее. В этом случае максимум ξ будет находиться внутри области ограничений. При этом функция $\aleph(\bar{s})$, удовлетворяющая этому условию, может быть не единственной [7].

Решим задачу максимизации $\bar{\Psi}_m(\bar{u})$ при ограничении $Z_{реж.т.зад}(\bar{u}) - Z_{реж.т}(\bar{u}) \geq 0$ (здесь \bar{u} – вектор параметров пропитки или

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

сушки двигателя). Выберем наиболее удобный для использования при решении поставленных задач вид функции $\aleph(\bar{u})$ [6, 7]:

$$\aleph(u) = \frac{r}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}) - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u})}, \quad (8)$$

где r – параметр штрафной функции.

При этом функция $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r)$ примет вид:

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r) = \bar{\Psi}'_m(\bar{u}) - \frac{r}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}) - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u})}. \quad (9)$$

При значениях составляющих вектора \bar{u} , для которых $3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}) - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}) \geq 0$, $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r)$ принимает значения, которые меньше соответствующих значений $\bar{\Psi}'_m(\bar{u})$. Полагая значение r достаточно малым с целью снижения влияния $\aleph(\bar{s})$ в точке минимума, мы сможем сделать точку максимума функции $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r)$ без ограничений совпадающей с точкой максимума функцией $\bar{\Psi}'_m(\bar{u})$ с ограничениями [2, 7]. Пусть \bar{u}^* – вектор, соответствующий максимуму функции $\bar{\Psi}'_m(\bar{u})$. Поскольку $\bar{\Psi}'_m(\bar{u})$ – непрерывная функция и $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u})$ для всех допустимых точек, то, задав достаточно малое значение, можно найти допустимую точку, описываемую вектором \bar{u}' , такую, что

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}') > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) + \frac{\varpi}{2}. \quad (10)$$

Основываясь на том, что r_k – стремящаяся к нулю убывающая последовательность, можно найти значение K , что для $k \geq K$ справедливо неравенство:

$$r_k \leq \left\{ \frac{\varpi}{2} \cdot \min \left[\frac{1}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}') - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}')} \right] \right\}. \quad (11)$$

Так как $\aleph(\bar{u}) > 0$, то из определения функции $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r)$, получим

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) \geq \max \bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r_k) = \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k). \quad (13)$$

На основе анализа выражения (13) можно сделать вывод, что, поскольку, \bar{u}_k^* максимизирует функцию $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}, r_k)$, в любой точке множества U_2 , в частности в точке, описы-

ваемой вектором \bar{u}_k^* , функция будет принимать значение, меньше чем $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k)$.

Поэтому, поскольку $r_k < r_k$, мы сможем записать:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) &= \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*) - \\ &- \frac{r_k}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}_k^*) - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}_k^*)} > \\ > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*) - \frac{r_k}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}_k^*) - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}_k^*)}, \end{aligned} \quad (14)$$

и тогда:

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) < \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k). \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) > \\ > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k). \end{aligned} \quad (16)$$

Поскольку значение \bar{u}_k^* максимизирует функцию $\bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k)$, то

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) < \bar{\Psi}'_m(\bar{u}', r_k) = \\ = \bar{\Psi}'_m(\bar{u}') - \frac{r_k}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}') - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}')}. \end{aligned} \quad (17)$$

Проанализировав выражения (16) и (17), получим следующие неравенство:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}', r_k) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}') - \\ - \frac{r_k}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}') - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}')}. \end{aligned} \quad (18)$$

При этом из (11) следует, что

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}') - \frac{r_k}{3_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}') - 3_{\text{реж.т}}(\bar{u}')} \leq \\ \leq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}') + \frac{\varpi}{2}, \end{aligned} \quad (19)$$

а из (10) следует, что

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) \geq \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) > \\ > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) + \frac{\varpi}{2} + \frac{\varpi}{2}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) - \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) > \varpi. \quad (21)$$

Исходя из того, что ϖ может быть выбрано произвольно малым, можно найти такое значение k , при котором будет выполняться

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) > \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*) + \varpi. \quad (22)$$

При $k \rightarrow \infty (r_k \rightarrow 0)$, получим

$$\lim_{r_k \rightarrow 0} \bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*, r_k) = \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*).$$

Таким образом, при $r_k \rightarrow 0$ можно записать:

$$\bar{\Psi}'_m(\bar{u}_k^*) \rightarrow \bar{\Psi}'_m(\bar{u}^*), \quad (23)$$

$$\frac{r_k}{Z_{\text{реж.т.зад}}(\bar{u}_k^*) - Z_{\text{реж.т}}(\bar{u}_k^*)} \rightarrow 0. \quad (24)$$

Отметим, что данное условие необходимо, чтобы обеспечить максимальное значение функции именно в нужной точке.

Аналогично может быть и решена задача минимизации затрат на реализацию режимов пропитки и сушки.

В случае, когда физическая система переводиться из одного состояния в другое посредством приложения управляющий воздействием или намечается последовательность преобразований при поиске экстремума функции, возникает необходимость принятия решений [5]. В случае поиска оптимального сочетания технологий, применяемых на различных этапах процесса восстановления изоляции электродвигателя, процесс принятия решений можно разбить на три шага: выбор метода сушки до пропитки; выбор метода пропитки и выбор метода сушки после пропитки.

При решении нашей задачи возникает сложность, связанная с тем, что параметр состояния системы является векторным, и при этом возрастает количество возможных вариантов технологий и значений векторного параметра состояний системы. Однако некоторое упрощение задачи было достигнуто уже на этапе ее постановки, так как количество критериев оптимизации сокращены до одного, а на значения остальных наложены ограничения. Еще одним упрощением задачи является то, что поиск оптимального сочетания методов сушки до и после пропитки и самой пропитки производится для конкретного метода пропитки, при этом все остальное из рассмотрения исключается. Кроме того, для решения поставленных задач укажем также на некоторые математические преобразования. Поскольку невозможно определить $\tilde{\Psi}$ в ходе осуществления технологических операций, необходимо производить преобразования, позволяющие использовать для решения задачи вместо $\tilde{\Psi}$ параметр $\bar{\Psi}'_m$, описанные в [2].

Теперь рассмотрим задачу оптимизации технологий пропитки и сушки изоляции применительно к условиям эксплуатации. По аналогии с предыдущим случаем будем использовать следующие постановки задач оптимизации:

$$\min Z_\Sigma, \tilde{\Psi}_{\text{зад}} \leq \tilde{\Psi}; \quad (25)$$

$$\max \tilde{\Psi}, Z_{\Sigma\text{зад}} \geq Z_\Sigma. \quad (26)$$

Поскольку число вариантов сочетаний условий эксплуатации и технологии пропитки и сушки невелико, то для разработки алгоритма оптимизации, приведенного на рис.1 использовался метод сплошного перебора вариантов, как наиболее простой по реализации процедур сравнения. Он заключается в последовательном отборе вариантов, удовлетворяющих поставленным условиям.

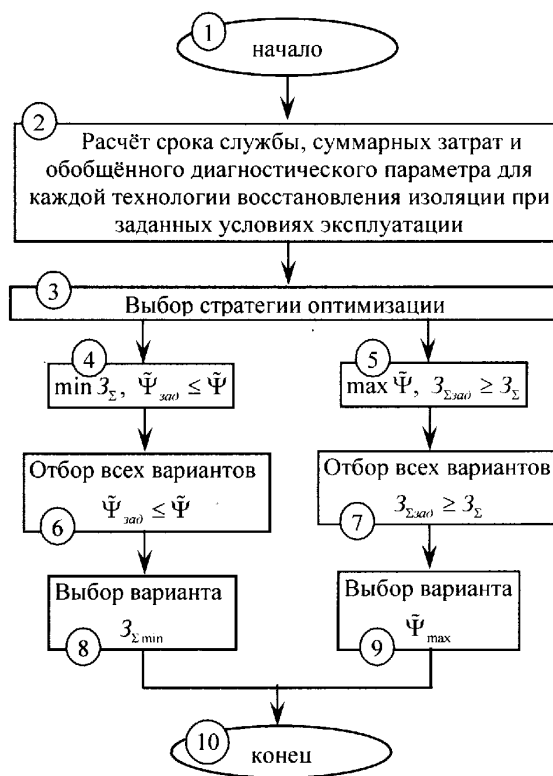


Рисунок 1 – Алгоритм оптимизации сочетания технологий пропитки и сушки изоляции с условиями эксплуатации электродвигателей

На первом этапе рассчитываются значения срока службы, суммарных затрат и обобщенного диагностического параметра, характеризующих то, насколько эффективно использование каждой из технологий восстановления изоляции в заданных условиях эксплуатации (блок 2). В качестве математиче-

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ского аппарата можно использовать регрессионные модели срока службы в зависимости от интегральных характеристик эксплуатации и значения обобщенного диагностического параметра, полученного по окончании ремонта, описаны в [2].

Для дальнейшего решения задачи оптимизации производится выбор стратегии оптимизации, который обусловлен практической необходимостью выбора технологии (блок 3).

В случае выбора стратегии минимизации суммарных затрат на ремонт и эксплуатации при ограничении срока службы (блок 4) производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения минимального срока службы (блок 6). Из оставшихся выбирается вариант с минимальным значением суммарных затрат (блок 8).

В случае выбора стратегии максимизации срока службы при ограничении значений суммарных затрат на ремонт и эксплуатацию (блок 5) производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения суммарных затрат (блок 7). Из оставшихся выбирается вариант с максимальным значением срока службы (блок 9).

Использование предлагаемой методики оптимизации на практике позволит существенно повысить экономическую эффективность работы предприятий по ремонту электродвигателей за счет сокращения затрат на реализацию режимов работы технологических установок. Кроме того, может быть повышена эффективность работы сельскохозяйственных предприятий за счет возможного сокращения затрат на ремонт и эксплуатацию электродвигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомутов, С. О. Электровакуумная пропитка и сушка электродвигателей [Текст] / С.О. Хомутов, А.А. Грибанов. – Новосибирск: Наука, 2006. – 325 с.
2. Грибанов, А. А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе: Дисс. ...канд. техн. наук / Грибанов Алексей Александрович. – Барнаул, 2001. – 168 с.
3. Сташко, В. И. Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использования метода затухающих колебаний в обмотке: Дисс. ...канд. техн. наук / Сташко Василий Иванович. – Барнаул, 2002. – 124 с.
4. Левачев, А. В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток: Дисс. ... канд. техн. наук / Левачев Андрей Владимирович. – Барнаул, 2002. – 144 с.
5. Дягтерев, Ю. И. Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов [Текст] / Ю.И. Дягтерев. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.
6. Бейко, И. В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации [Текст] / И.В. Бейко, Б.Н. Бубликов, П.Н. Зинько. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 512 с.
7. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс. [Текст] / Б. Банди. – пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.: ил.
8. Демиденко, Е. З. Оптимизация и регрессия [Текст] / Е.З. Демиденко. – М.: Наука, 1989. – 296 с.
9. Евтушенко, Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации [Текст] / Ю.Г. Евтушенко. – М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит-ры, 1982. – 432 с.