

## СИСТЕМА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ

В статье изложен подход к построению системы оценки расхода ресурса и прогнозирования состояния изоляции обмоток асинхронных электродвигателей на основе емкостных токов утечки. Подход базируется на основе измерения емкостных токов утечки, создаваемых непрерывной последовательностью прямоугольных импульсов напряжения. Уменьшение величины этих токов свидетельствует об уменьшении остаточного ресурса изоляции обмотки. Эксперименты показывают экспоненциальное уменьшение токов утечки вследствие развития деградиационных процессов в изоляции в долговременном плане. Оценку величины остаточного ресурса предложено выполнять с помощью моделирующей экспоненты, параметры которой восстанавливаются в текущем режиме с помощью методов идентификации параметров, такие как метод наименьших квадратов (МНК) или методы, основанные на Калмановском алгоритме. Преимуществом предлагаемого метода является сравнительная простота используемых технических средств и возможность выполнять оценку остаточного ресурса изоляции обмотки, опираясь только на экспериментально полученные посредством измерения данные. В статье описан алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты. Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса, выраженного в единицах времени, как разности между прогнозируемым временем выхода из строя и текущим моментом времени, где под текущим временем подразумевается время наработки. Приведены результаты моделирования работы предлагаемого алгоритма с идентификацией параметров моделирующей экспоненты на основе МНК. Моделировалась работа алгоритма с интервалом измерений 100 ч при гауссовском законе распределения погрешности измеренных значений тока утечки со средним квадратичным отклонением 20%. Показано, что значения параметров моделирующей экспоненты достаточно хорошо сходятся к истинным значениям при таком уровне зашумления даже без использования предфильтрации последовательности измеренных значений тока утечки.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, обмотка статора, изоляция обмотки, остаточный ресурс, токи утечки, диагностика, оценка состояния изоляции, прогнозирование состояния изоляции, идентификация параметров, метод наименьших квадратов.

### ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели (АД) – самый распространенный тип электродвигателей. При всей надежности таких двигателей, ежегодный выход их из строя достигает 20-25% [1]. В некоторых отраслях усредненный ресурс электродвигателей переменного тока намного меньше нормативного; например, в сельском хозяйстве он меньше в 2,5–3,5 раза [2]. Значительная доля выходов АД из строя связана с повреждением обмоток статора [3, 4]. Это объясняется тем, что изоляция обмотки статора АД выступает в роли «слабого звена», подверженного различного рода неблагоприятным воздействиям, таким как температура, агрессивная среда и т.п. Эти обстоятельства определяют важность проблемы оценки остаточного ресурса изоляции обмотки статора АД.

Одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность изоляции обмотки, является температура. В [5, 6] получено выражение для интервала времени  $T_R$ , в течение которого изоляция достигнет своего предельного состояния вследствие термического старения

$$T_R = k \cdot \exp(B / Q - G), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $k=1$ , если срок службы изоляции измеряется в часах);  $B$  и  $G$  – постоянные;  $Q$  – абсолютная температура.

С использованием выражения (1) можно ввести понятие остаточного термического ресурса изоляции  $R_{res}$  как безразмерной величины, связывающей скорость старения изоляции при температуре, соответствующей номинальному режиму работы ( $v_N$ ) и постоянной величине воздействия других факторов с ее остаточным сроком службы ( $T_{res}$ ) в этом режиме:

$$T_{res} = R_{res} / v_N; \quad (2)$$

$$R_{res} = 1 - \int_0^{t_p} v(t) dt, \quad (3)$$

где  $v$  – мгновенное значение скорости старения изоляции, а  $t_p$  – время работы.

Величина  $R_{res}$  пропорциональна неиспользованному сроку службы изоляции, измеряемому в именованных единицах времени. В начале срока эксплуатации двигателя  $T_{res}$  совпадает с  $T_R$ .

Хотя температура обмотки является важнейшим фактором, определяющим долговечность изоляции, необходимо отметить существование и других факторов, воздействующих на состояние изоляции – вибраций, влажности, агрессивной среды, электрического поля [5, 7–10]. В существующих системах тепловой защиты, в том числе и использующих непосредственное измерение температуры обмотки, сложно обеспечить учет всего многообразия прочих воздействующих факторов. Поэтому представляет интерес получение таких способов контроля текущего состояния изоляции

обмоток, которые по некоторым измеряемым величинам позволяли бы оценивать текущее состояние изоляции обмоток и прогнозировать это состояние.

Существуют работы, где предлагаются подходы к мониторингу состояния и определению остаточного ресурса электродвигателей на основе некоторых комплексных критериев [1, 11–13]. Во многих случаях такие решения требуют целого набора датчиков, а зачастую и сложного математического обеспечения. При этом в некоторых случаях, например в [11], при построении оценочного критерия не учитывается термическое воздействие на изоляцию обмотки машины. Кроме того, такие подходы, как правило, не в состоянии учесть влияние на деградационные процессы в изоляции обмоток работу ШИМ в системе ПЧ-АД и некоторые другие факторы.

Существует также большое количество работ, связанных с экспериментальной оценкой состояния изоляции обмоток электродвигателей. Для этой цели применяются различные методы, такие как измерение тангенса угла диэлектрических потерь, метод на основе частичных разрядов, на основе анализа переходных процессов при подаче импульса напряжения на обмотку и т.д. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки.

Так, тангенс угла диэлектрических потерь позволяет судить о состоянии изоляции, однако этот показатель очень чувствителен к увлажнению изоляции, кроме того, недостатком этого подхода является сложность автоматизации процесса измерения.

Метод частичных разрядов дает возможность получить информацию о наличии различных дефектов в изоляции двигателя на ранней стадии их развития. Однако применение этого метода для низковольтных двигателей проблематично [14]. Кроме того, этот метод имеет низкую помехозащищенность и его сложно автоматизировать.

В ряде работ предлагается диагностирование изоляции обмоток двигателя на основе анализа параметров переходного процесса, возникающего при тестировании обмотки импульсом напряжения [1, 15–20]. Недостатки такого подхода связаны с необходимостью регистрирования параметров переходных процессов, имеющих очень малую длительность. Так, в [16] в качестве интегрального параметра, характеризующего состояние изоляции обмоток статора, предлагается использовать отношение декремента затухания колебаний к периоду затухания переходного процесса, в [1] предлагается судить о состоянии изоляции по амплитудам первого и второго полупериодов и длительности первого и второго периодов колебаний. В [19, 20] предлагается индикатор состояния изоляции обмотки, основанный на анализе амплитудного спектра колебательной составляющей тока после подачи ступенчатого сигнала. При характерных для таких процессов частотах колебаний сигнала (порядка МГц) все эти подходы требуют оборудования, обеспечивающего весьма высокое разрешение по времени. Так, в [19] указывается, что частота измерений сигнала должна быть, по крайней мере, в 20 раз больше максимальной частоты, используемой для расчета индикатора состояния изоляции. Недостатком подобных методов также является проблема достоверного расчета таких показателей процесса, как декремент затухания колебаний и период,

построение амплитудного спектра сигналов в условиях помех. Здесь также возникают сложности и с задачей автоматизации процесса диагностики.

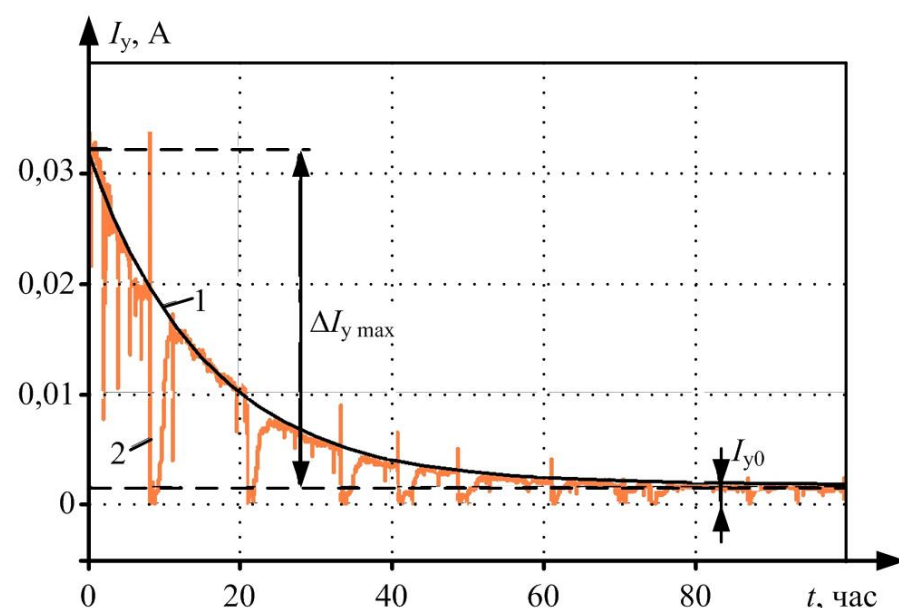
Изложенное выше позволяет сделать вывод об актуальности задачи поиска более простых методов диагностики изоляции обмоток, в том числе и с использованием тестирующих импульсов напряжения, которые бы предъявляли меньшие требования к аппаратуре, математическим методам обработки сигнала и позволяли бы проще осуществить автоматизацию измерений. Одним из таких методов может быть метод на основе не единичного тестирующего импульса, а их последовательности, достаточно длинной для того, чтобы можно было говорить о некоторых средних или среднеквадратичных значениях параметров процессов, которые можно было бы связать с состоянием изоляции обмотки и использовать для ее диагностики [21].

#### СВЯЗЬ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ С СОСТОЯНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ

В экспериментальном исследовании, результаты которого изложены в [22] (K. Younsi, et al., USA, GE), показано, что величина емкостного тока утечки изоляции обмотки электродвигателя тесно связана с процессом старения изоляции. Это было установлено в ходе обстоятельных экспериментов по ускоренному старению изоляции обмотки статора асинхронного двигателя (480 В, 73,5 кВт, 1200 об/мин) с изоляцией обмотки статора класса F.

На **рис. 1** показаны график полного тока утечки (включающего емкостную и резистивную компоненты) по экспериментальным данным из [22] (здесь убран интервал времени, соответствующий приостановке эксперимента) и экспоненциальная аппроксимация огибающей этого графика. Уменьшение со временем тока утечки связано здесь с тем, что при термическом старении изоляции происходит снижение емкостных свойств изоляции [23], что вызывает уменьшение емкостной компоненты тока утечки, составляющей здесь доминирующую часть полного тока. На **рис. 1** четко прослеживается возможность описания временной зависимости графика тока утечки ( $I_y$ ) по мере нарастания деградационных изменений в изоляции аппроксимирующим выражением

$$I_y = \Delta I_{y,\max} e^{-\alpha_y t} + I_{y0}. \quad (4)$$



**Рис. 1.** Аппроксимация полного тока утечки экспонентой (1), наложенная на экспериментальную зависимость для одной из фаз двигателя (2)



АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ  
КАК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА

Зависимость (4) является своего рода моделью процесса старения изоляции, поэтому далее, для краткости, будем называть эту зависимость «моделирующей экспонентой». Выявленный характер зависимости тока утечки в процессе старения изоляции позволяет построить систему мониторинга состояния изоляции на основе контроля превышения измеренной величины  $I_y$  над некоторым уровнем  $I_{y.lim}$ , снижение ниже которого свидетельствует об исчерпании ресурса изоляции. Проблема здесь заключается в сильном зашумлении полезного сигнала вследствие действия помех в информационных каналах и с влиянием на токи утечки параметров окружающей среды. Согласно экспериментальным данным [22], пробой изоляции наступает спустя время, большее, чем 5-6 постоянных времени экспоненты в выражении (1). К этому времени значение экспоненты становится весьма мало, что усложняет проблему определения момента пересечения уровня  $I_{y.lim}$  в условиях помех. Это хорошо прослеживается на **рис. 2**, где показан набор реализаций зашумленного сигнала  $I_y(t)$  с интервалом отсчетов  $\Delta t = 100$  ч после фильтрации с использованием фильтра 1-го порядка с постоянной  $T_f = 4\Delta t$ . Здесь видно, что при разных реализациях зашумленного процесса кривая  $I_y(t)$  пересекает пороговый уровень в существенно разное время. Таким образом, фильтрация и сглаживание сигнала не позволяют надежно решить эту проблему, поэтому представляется целесообразным использовать подходы, связанные с идентификацией параметров моделирующей экспоненты  $I_y(t)$  для последующей оценки величины прогнозируемого времени пересечения порогового уровня ( $t_{lim}$ ). В этом случае появляется возможность прогнозирования остаточного ресурса, выраженного в единицах времени ( $T_R$ ), как разности между прогнозируемым временем  $t_{lim}$  и текущим моментом времени  $t_t$ :

$$T_R = t_{lim} - t_t, \quad (5)$$

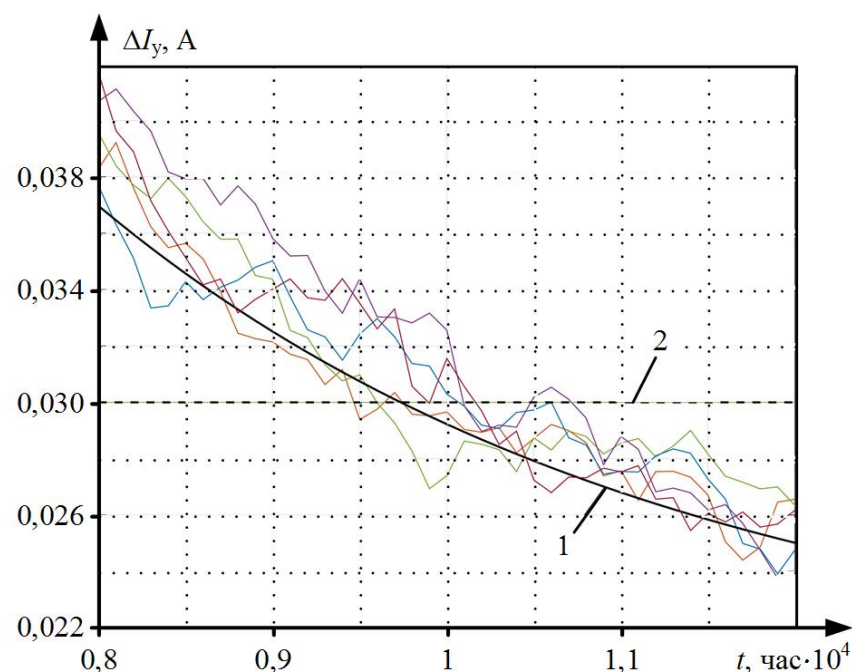
где под текущим временем подразумевается время наработки.

Из формулы (4) можно получить выражение для  $t_{lim}$

$$t_{lim} = \frac{1}{\alpha_y} \ln \frac{\Delta I_{y.max}}{\Delta I_{y.lim}}, \quad (6)$$

где  $\Delta I_{y.lim} = I_{y.lim} - I_{y0}$  – превышение над уровнем установившегося значения тока утечки.

Можно предложить следующий алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты. Здесь будем предполагать, что процессы нагружения двигателя, а также изменения параметров окружающей среды носят стационарный характер на интервалах, превышающих по длительности постоянную времени экспоненты (4). Алгоритм работает с накопленными значениями  $I_y = [I_{y1}, I_{y2}, \dots, I_{yk}]$  и  $t_t = [t_{t1}, t_{t2}, \dots, t_{tk}]$ , где  $k$  – номер последнего измерения. Каждый раз после нового измерения  $I_{yk}$  происходит запоминание очередной пары  $t_{tk}$  и  $I_{yk}$ .



**Рис. 2.** Набор реализаций зашумленного сигнала с фильтром 1-го порядка; 1 – моделирующая экспонента; 2 – уровень  $I_{y.lim}$

Начало обработки зарегистрированных данных с целью идентификации параметров моделирующей экспоненты начинается не сразу после начала измерений, так как при ограниченном количестве точек в условиях существенной случайной составляющей достоверно определить параметры моделирующей экспоненты сложно. Поэтому в начале работы алгоритма выполняется проверка – превышает ли время  $t_{tk}$  некоторое начальное значение  $t_{t.нач}$ , где  $t_{t.нач}$  – время наработки, после которого можно начать идентификацию параметров экспоненты. Расчет  $t_{t.нач}$  может быть выполнен с использованием экспоненты, описывающей деградационные процессы в изоляции при допустимой для данного класса изоляции температуре. Полагаем, что исчерпание ресурса происходит, как следует из экспериментальных результатов [22], при  $t_{tk} > (4...5)/\alpha_{yN}$ , где  $\alpha_{yN}$  – степенной коэффициент экспоненты при работе с допустимой для данного класса изоляции температурой. Если рассчитать характерные времена исчерпания ресурса ( $T_R$ ) по формуле (1), то, принимая эти времена за  $T_R = (4...5)/\alpha_{yN}$ , можно определить  $\alpha_{yN}$  по выражению

$$\alpha_{yN} = (4...5)/T_R. \quad (7)$$

В **таблице** приведены рассчитанные значения  $T_R$  и  $\alpha_{yN}$  для разных классов изоляции.

Величину  $t_{t.нач}$  принимаем равной  $1/\alpha_{yN}$ . При недогрузке привода величина  $\alpha_y$  будет меньше, чем  $\alpha_{yN}$ , однако количество точек  $(t_t, I_y)$ , зарегистрированных за время  $t_{t.нач}$ , зависит только от интервала измерений  $\Delta t$ . Кроме того, в алгоритме предусмотрены проверки для оценки достоверности параметров экспоненты, восстанавливаемых по зарегистрированным данным.

**Значения  $T_R$  и  $\alpha_{yN}$  для различных классов изоляции**

Класс изоляции	$T_R$ , час	$\alpha_{yN} \cdot 10^4$ , час <sup>-1</sup>
A	18583	2,15–2,69
E	21163	1,89–2,36
B	18215	2,20–2,74
F	21440	1,87–2,33
H	22382	1,79–2,00

После считывания массива исходных данных ( $t, I_y$ ) выполняется предфильтрация данных и проводится расчет среднего значения  $I_{y,cp(tr)}$  за предшествующий период, что необходимо для выполнения далее одной из проверок.

На следующем этапе проводится идентификация параметров моделирующей экспоненты. При этом выполняются проверки:

а) должны выполняться условия  $\Delta I_{y,max} > 0$ ,  $\alpha_y > 0$  и  $I_{y0} > 0$ , что следует из очевидных физических соображений (если не выполнено хотя бы одно условие – текущую точку игнорируем);

б) должно выполняться достаточно очевидное условие  $\Delta I_{y,max} + I_{y0} > I_{y,cp(tr)}$ .

После определения параметров моделирующей экспоненты выполняется расчет прогнозируемого времени исчерпания ресурса  $t_{lim}$  и проверка знака разности  $t_{lim} - t_{tk}$ , представляющей собой величину остаточного ресурса. При отрицательной величине этой разности выдается решение о том, что ресурс исчерпан.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 показаны результаты моделирования работы рассмотренного алгоритма в *Matlab/Simulink*. Идентификация параметров моделирующей экспоненты проводилась с использованием МНК. По горизонтали на рис. 3 – время от начала эксплуатации. Пунктирными линиями показаны уровни, соответствующие истинным значениям  $\Delta I_{y,max}$ ,  $\alpha_y$ ,  $I_{y0}$  и соответствующим этим значениям расчетным величинам  $t_{lim}$ . Моделировалась работа алгоритма с интервалом измерений 100 ч без предфильтрации, при гауссовском законе распределения погрешности со средним квадратичным отклонением 20% от величины  $I_y$  по моделирующей экспоненте. Обозначено: 1 –  $\Delta I_{y,lim} = 0,0067 \Delta I_{y,max}$  (о); 2 –  $\Delta I_{y,lim} = 0,0183 \Delta I_{y,max}$  (Δ). На рис. 3 видно, что величины вычисленных параметров моделирующей экспоненты и  $t_{lim}$ , по мере накопления зарегистрированных значений тока утечки, достаточно хорошо сходятся к истинным их величинам.

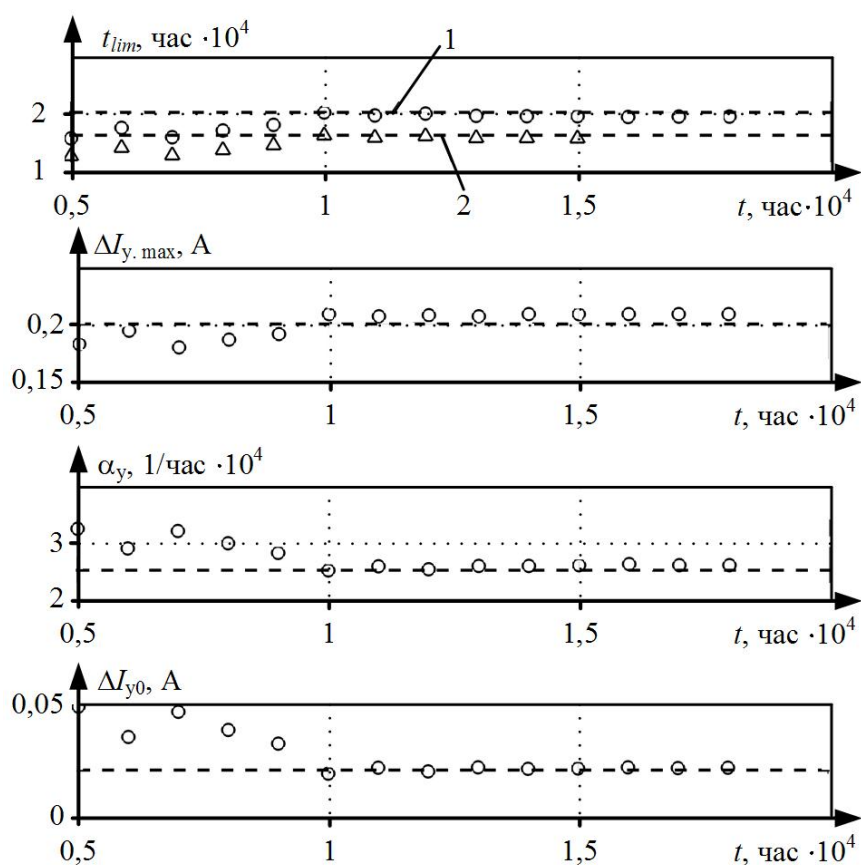


Рис. 3. Результаты моделирования работы алгоритма системы прогнозирования состояния изоляции

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации о емкостных токах утечки.

2. Описан алгоритм работы системы прогнозирования состояния изоляции с использованием информации о емкостных токах утечки на основе идентификации параметров моделирующей экспоненты.

3. Проведено моделирование предложенного алгоритма в *Matlab/Simulink*, подтвердившее его работоспособность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Воробьев Н.П., Воробьева С.Н., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 261–269.
2. Пахомов А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: дис.... д-ра техн. наук: 05.20.02. Краснодар, 2008. 347 с.
3. Engelmann R.H., Middendorf W.H. Handbook of Electric Motors. New York: Marcel Dekker, 1995. 801 p.
4. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / Бабуринов С.В., Жуковский В.Л., Коржев А.А., Кривенко А.В. // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №9. С. 34–38.
5. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. М.: Издат. дом МЭИ, 2006. 432 с.
6. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.
7. Stone G.C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. 252 p.
8. Brancato E.L. Insulation Aging. A Historical and Critical Review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1978. Vol. EI-13, no. 4, pp. 308–317.
9. Farahani M., Gockenbach E., Borsi H., Schäfer K., Kaufhold M. Behavior of Machine Insulation Systems Subjected to Accelerated Thermal Aging Test // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, no. 5, pp. 1364–1372.
10. Tavner P. J., Penman J. Condition Monitoring Electrical Machines. Hertfordshire, U.K.: Research Studies Press, 1987. 282 p.
11. Пат. №121086 РФ, МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство для диагностики электродвигателей переменного тока / А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук. Заявка № 2012116366/28; Опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.
12. Хомутов О.И., Бондаренко Т.Е., Грибанов А.А. Проблема комплексной оценки изменения физико-химических свойств электроизоляционных материалов в реальных условиях эксплуатации электрооборудования // Ползуновский вестник. № 1. 2002. С. 4–9.
13. Пустахайлов С.К. Разработка многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Ставрополь, 2006. 24 с.
14. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127–137.
15. Гутов И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей



- на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Барнаул, 1997. 259 с.
16. Сташко В.И., Губин И.Б. Моделирование состояния изоляции обмоток асинхронных двигателей сезонно эксплуатируемого электрооборудования на основе использования показателей волнового переходного процесса // Ползуновский вестник. № 1. 2002. С. 51–57.
  17. Белоусова Н. В., Калявин В.П., Мозгалеvский А.В. Опыт тестового диагностирования обмоток электрических машин. Л.: ЛДНТП, 1989, 24 с.
  18. Левачев А.В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Барнаул, 2002. 167 с.
  19. Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolbank T. Exploitation of induction machine's high-frequency behavior for online insulation monitoring // 9th Annual. Int. Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Valencia, Spain, 27–30 Aug. 2013, pp. 579–585.
  20. Nussbaumer P., Wolbank T., Vogelsberger M. Separation of disturbing influences on induction machine's high-frequency behavior to ensure accurate insulation condition monitoring // 28th Annual. Appl. Power Electron. Conference and Exposition. Long Beach, USA, 17–21 March 2013, pp. 1158–1163.
  21. Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Method for monitoring the condition of the motor winding insulation // XVII International Scientific Technical Conference «Alternating current electric drives» – ACED 2018. Ekaterinburg, Russia, 26–30 March 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341717.
  22. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J., Krahn J., Weeber K., Whitefield C. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, no. 5, pp. 1441–1452.
  23. Lee S.B., Younsi K., Kliman G.B. An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 4, pp. 737–745.

Поступила в редакцию 08 декабря 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SYSTEM FOR ESTIMATING THE RESIDUAL RESOURCE OF INDUCTION MOTOR WINDING INSULATION BASED ON CAPACITIVE LEAKAGE CURRENTS

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>.

Anatoliy M. Ziuzev

D.Sc. (Engineering). Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Il'ya V. Chernykh

D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of High Voltage Technique, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.v.chernykh@urfu.ru

The article presents an approach to creating a system for estimating resource expenditure and predicting the induction motors windings insulation condition based on capacitive leakage currents. The approach is based on the measurement of capacitive leakage currents created by a continuous sequence of rectangular voltage pulses. A decrease in the magnitude of these currents indicates a decrease in the residual life of the winding insulation. Experiments show an exponential decrease in leakage currents due to the development of insulation degradation processes in the long term. It was proposed to estimate the residual resource value using a modeling exponent, whose parameters are determined in the current time mode using parameter identification methods such as the least squares method (OLS) or methods based on the Kalman algorithm. The advantage of the proposed method is the comparative simplicity of the technical means used and the ability to assess the residual life of the winding insulation relying only on the data experimentally obtained through measurement. The article describes the operation of the algorithm for the prediction of the insulation condition based on the parameters identification of the modeling exponent. The possibility of predicting the residual resource, expressed in units of time, as the difference between the predicted time of failure and the current point in time, where the current time here means the operating time is shown. The results of the proposed algorithm simulation with the identification of a modeling exponent based on OLS are

given. The algorithm was simulated with a measurement interval of 100 hours with a Gaussian distribution law for the error of measured leakage currents with a standard deviation of 20%. It is shown that the values of the modeling exponent parameters agree quite well with the true values at this level of noise even without using prefiltration of the leakage current measured values sequence.

**Keywords:** induction motor, stator winding, winding insulation, residual life, leakage currents, diagnostics, insulation condition monitoring, insulation condition prediction, parameter identification, least squares method.

#### REFERENCES

1. Vorobiev N.P., Vorobieva S.N., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. [Methods and instruments for diagnosing insulation of asynchronous motors]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2011, no. 2/2, pp. 261–269. (in Russian)
2. Pakhomov A.I. *Metody i sredstva diagnostiki izolyatsii asinkhronnykh dvigateley selskokhozyaystvennogo proizvodstva na osnove chastichnykh razryadov*. Dis. doct. tekhn. nauk [Methods and tools for diagnostics of insulation of asynchronous motors of agricultural production on the basis of partial discharges. D.Sc. DISS.]. Krasnodar, 2008. 347 p.
3. Engelmann R.H., Middendorf W.H. *Handbook of Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, 1995. 801 p.

4. Baburin S.V., Zhukovskiy V.L., Korzhev A.A., Krivenko A.V. Modern non-destructive testing and diagnostics methods of mining machines electric drives technical condition. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electrical engineering], 2009, no. 9, pp. 34–38. (in Russian)
5. Kuznetsov N. L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Moscow, MEI Publ. House, 2006. 432 p.
6. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Leningrad: Energiya, 1976. 248 p.
7. Stone G.C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. 252 p.
8. Brancanto E.L. Insulation Aging. A Historical and Critical Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1978, vol. EI-13, no. 4, pp. 308–317.
9. Farahani M., Gockenbach E., Borsi H., Schäfer K., Kaufhold M. Behavior of Machine Insulation Systems Subjected to Accelerated Thermal Aging Test. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 1364–1372.
10. Tavner P.J., Penman J. *Condition Monitoring Electrical Machines*. Hertfordshire, U.K.: Research Studies Press, 1987. 282 p.
11. Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Polishchuk V.I. *Ustroystvo dlya diagnostiki elektrodvigatelay peremennogo toka* [Device for the diagnosis of AC motors]. Patent RF, no. 121086, 2012.
12. Khomutov O.I., Bondarenko T.E., Gribov A.A. [The problem of comprehensive assessment of changes in the physico-chemical properties of electrical insulating materials under actual operating conditions of electrical equipment]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2002, no. 1, pp. 4–9. (In Russian)
13. Pustakhaylov S.K. *Razrabotka mnogokanalnoy sistemy monitoringa asinkhronnykh elektrodvigatelay elektrostantsiy*. Avtoref. kand. diss. [Development of a multichannel monitoring system for asynchronous electric motors of power plants. Abstract of Ph.D. Diss.]. Stavropol, 2006. 24 p.
14. Sidelnikov L.G., Afanasiev D.O. [Review of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors in operation]. *Vestnik PNIIPU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo* [Bulletin PNIIPU. Geology. Oil, gas and mining], 2013, no. 7, pp. 127–137. (In Russian)
15. Gutov I.A. *Prognozirovaniye sostoyaniya elektrodvigatelay na osnove ispolzovaniya mnogo faktornykh modeley stareniya izolyatsii*. Kand. Diss. [Predicting the state of electric motors based on the use of multivariate models of insulation aging. Ph.D. Diss.]. Barnaul, 1997. 259 p.
16. Stashko V.I., Gubin I.B. [Simulation of the insulation state of asynchronous motors windings of seasonally operated equipment based on the use of wave transient indicators]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2002, no. 1, pp. 51–57. (in Russian)
17. Belousova N. V., Kalyavin V.P., Mozgalevskiy A.V. *Opyt testovogo diagnostirovaniya obmotok elektricheskikh mashin* [Experience of test diagnosis of electric machine windings]. Leningrad, LDNTP, 1989. 24 p.
18. Levachev A.V. *Diagnostika izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigatelay na osnove ispolzovaniya parametrov skhemy zameshcheniya obmotok*. Kand. Diss. [Asynchronous electric motors insulation diagnostics based on the use of parameters of a winding replacement circuit. Ph.D. Diss.]. Barnaul, 2002. 167 p.
19. Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolbank T. Exploitation of induction machine's high-frequency behavior for online insulation monitoring. *9th IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electron. and Drives*, Aug 27, 2013, Valencia, Spain, pp. 579–585.
20. Nussbaumer P., Wolbank T., Vogelsberger M. Separation of disturbing influences on induction machine's high-frequency behavior to ensure accurate insulation condition monitoring. *28th IEEE. Appl. Power Electron. Conference and Exposition*, 17–21 March, 2013, Long Beach, USA, pp. 1158–1163.
21. Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Method for monitoring the condition of the motor winding insulation. *XVII International Scientific Technical Conference «Alternating current electric drives» – ACED 2018*. Ekaterinburg, Russia, 26–30 March 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341717.
22. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J., Krahn J., Weeber K., Whitefield C. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 1441–1452.
23. Lee S.B., Younsi K., Kliman G.B. An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 4, pp. 737–745.

Метельков В.П., Зюзев А.М., Черных И.В. Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 53-58. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-53-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-53-58)

Metelkov V.P., Ziuzev A.M., Chernykh I.V. System for Estimating the Residual Resource of Induction Motor Winding Insulation Based on Capacitive Leakage Currents. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 53-58. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-53-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-53-58)