

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.П. Метельков, М.Ю. Бородин, К.А. Кондаков, К.Е. Нестеров

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения надежности и снижения аварийности асинхронных электроприводов из-за выхода из строя обмотки статора. Целью исследований является выяснение возможностей использования емкостных токов утечки как индикатора состояния изоляции обмотки статора асинхронного двигателя. В работе представлены некоторые результаты исследования токов утечки изоляции обмотки статора, генерируемых прямоугольными импульсами напряжения с частотами 100–2000 Гц. Исследовалась возможность регистрации параметров тока утечки и зависимость этих параметров от амплитуды и частоты импульсов напряжения с целью использования этой информации для определения текущего состояния изоляции. Показано, что при использовании прямоугольных импульсов напряжения можно получить достаточно большие величины токов утечки, что упрощает работу с ними. При этом возможно использование сравнительно простого и дешевого оборудования. Однако для надежного определения амплитуды пиков тока утечки необходим весьма длинный период измерения с большим количеством прошедших импульсов либо оборудование, обеспечивающее весьма высокую разрешающую способность (интервал дискретности порядка 10^{-6} с и меньше). Вместе с тем использованное в проведенных экспериментах оборудование позволяет выделить информационную составляющую, касающуюся эффективных значений емкостных токов утечки, что может быть использовано в целях диагностики состояния изоляции.

Ключевые слова: электрический двигатель, обмотка, изоляция, токи утечки, контроль состояния.

Введение

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором отличается простотой конструкции и высокой надежностью. Среди основных причин выхода этих двигателей из строя одной из главных является нарушение свойств изоляции обмотки статора. Это подтверждается многочисленными исследованиями [1–4]. В источниках приводятся различные данные, характеризующие процент выхода из строя по причинам, связанным с обмоткой статора, – около 25 % [1], около 38 % согласно [3]. В некоторых отраслях этот процент может быть намного выше. Так, доля выходов двигателя из строя по этим причинам для крановых приводов доходит до 68 % [5], а в сельскохозяйственной отрасли даже до 80 % [6].

Таким образом, можно констатировать, что изоляция обмотки статора – это компонент конструкции асинхронного двигателя, который статистически достоверно связан со значительной долей выходов этих двигателей из строя [4]. Этот факт предопределяет актуальность вопросов, связанных с разработкой способов контроля состояния изоляции обмоток электродвигателя. Проблема осложняется еще и тем, что изоляционные материалы имеют свойство стареть с течением времени в ходе эксплуатации. Это старение происходит под действием различных факторов: нагрева, вибраций, влажно-

сти, агрессивной среды, электрического поля [7–9]. Поэтому желательно иметь такие методы мониторинга состояния изоляции, которые позволили бы прогнозировать это состояние. В работе [10] путем математического моделирования показано, что имеется возможность отслеживать старение изоляции по изменению емкостных токов утечки, а в работе [11] это было доказано экспериментально при проведении исследований по ускоренному термическому старению изоляции статора низковольтного асинхронного двигателя. Эти исследования показали, что емкостные токи утечки со временем экспоненциально изменяются по мере старения изоляции, что создает возможности не только отслеживать текущее состояние изоляции, измеряя емкостной ток утечки, но и прогнозировать это состояние.

1. Предмет исследования и постановка задачи

В работе [11] изложены результаты исследования токов утечки, характеризующих состояние изоляции обмотки, которое проводилось с использованием синусоидального напряжения промышленной частоты. Это обуславливало сравнительно невысокие величины производных напряжения (dU/dt), а следовательно, очень малую величину токов утечки, что требует весьма чувствительного оборудования.

В работе [10] предложено использовать для исследования токов утечки прямоугольные импульсы аналогично формируемым инверторами с ШИМ. Это позволяет получить значительно большую амплитуду токов утечки. Однако в этой работе большая часть представленных результатов получена путем моделирования процессов в изоляции, а экспериментальные результаты представлены весьма скудно.

В нашей работе ставилась задача экспериментального исследования возможности регистрации параметров емкостных токов утечки, формируемых прямоугольными импульсами высокой частоты, с целью определения состояния изоляции при использовании достаточно простых технических средств.

2. Схема и оборудование для эксперимента

2.1. Схема экспериментальной установки

На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки. Здесь обозначено: 1 – понижающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – преобразователь частоты SEMIKRON; 4 – плата PCI-6221 *National Instruments*; 5 – блок-формирователь; 6 – источник постоянного напряжения 15 В; 7 – аналого-цифровой преобразователь; R_1 и R_2 – измерительные сопротивления; А, В и С – фазы обмотки двигателя.

Плата PCI-6221 *National Instruments* предназначена для управления ключами инвертора, а также на ней реализован аналого-цифровой преобразователь. Плата PCI-6221 обеспечивает дискретность регистрации сигналов с измерительных сопротивлений 10^{-5} с. Блок-формирователь согласует уровни напряжения сигналов, так как с платы PCI-6221 приходят сигналы уровня 0–5 В, а для управления инвертором требуются уровни напряжения 15 В, соответствующие логической единице.

2.2. Оборудование, использованное для эксперимента

В исследованиях использовался асинхронный двигатель MEZ MOHELNICE 2AP63-4s (120 Вт, 1350 об/мин). Измеренное сопротивление фазы статора 62,2 Ом. Измерительные сопротивления R_1 и R_2 имеют величину 4,4 и 4,5 Ом.

Фиксация результатов экспериментов проводилась с использованием системы *LabView*. Примененный в экспериментальной установке понижающий трансформатор дает возможность использовать две величины коэффициента трансформации. Это позволяет задавать два значения амплитуды импульсов выходного напряжения инвертора U_{test} , отличающиеся в два раза.

Мгновенные значения тока утечки при проведении экспериментов с использованием схемы, показанной на рис. 1, вычислялись по выражению

$$I_y = \Delta U_1 / R_1 - \Delta U_2 / R_2, \quad (1)$$

где ΔU_1 и ΔU_2 – падения напряжения на измерительных сопротивлениях R_1 и R_2 .

3. Результаты эксперимента

3.1. Графики тока утечки

Известны методы диагностирования изоляции обмоток двигателя на основе анализа параметров переходного процесса, возникающего при тестировании обмотки импульсом напряжения [12–19]. Однако предлагаемые варианты методов на основе тестирования обмотки импульсом напряжения требуют достаточно четкого фиксирования параметров переходных процессов, имеющих очень малую длительность.

На рис. 2 приведен график емкостного тока утечки I_y при нарастающем фронте прямоугольного импульса напряжения с амплитудой 15 В, полученный при использовании цифрового осциллографа *Aktakom*. Регистрация зависимостей $I_y(t)$ для диагностических целей с таким высоким разрешением

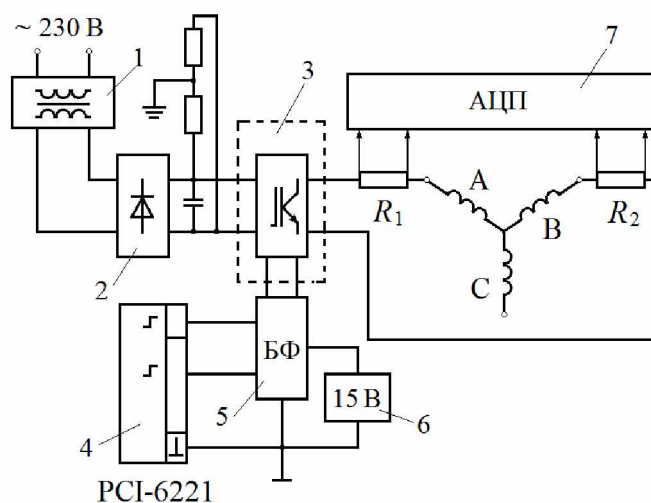


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

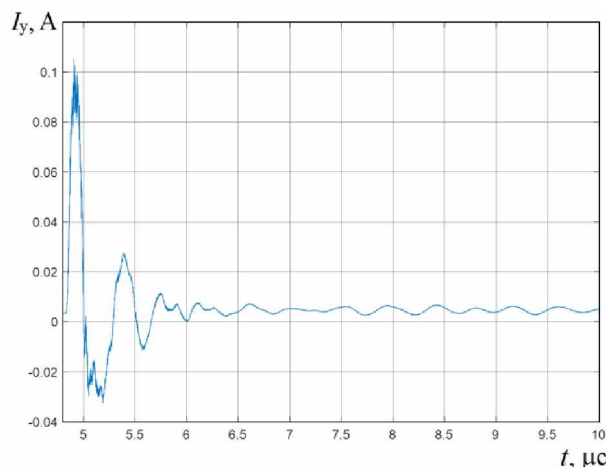


Рис. 2. Ток утечки при нарастающем фронте напряжения

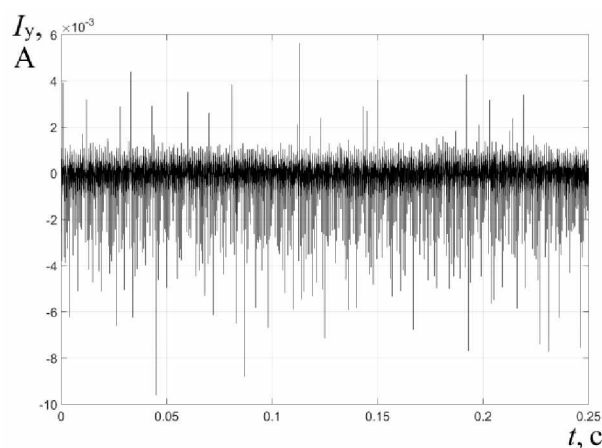


Рис. 3. Ток утечки при 1 кГц за 0,25 с ($U_{test} = 15$ В)

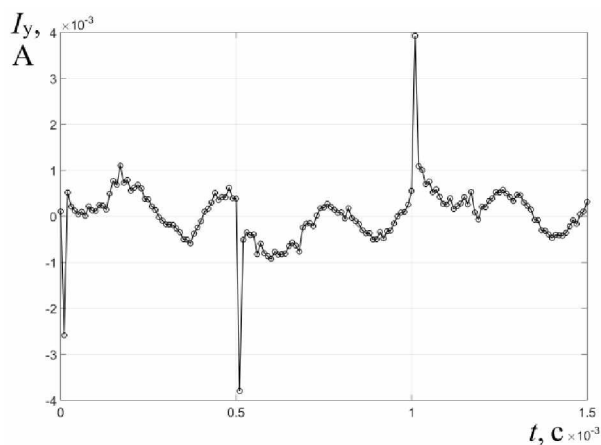


Рис. 4. Ток утечки при 1 кГц за $1,5 \cdot 10^{-3}$ с ($U_{test} = 15$ В)

по времени является весьма трудоемким делом, требующим оборудования с соответствующими техническими характеристиками. Поэтому представляет интерес выяснение возможностей регистрации параметров емкостных токов утечки, генерируемых последовательностью прямоугольных импульсов напряжения, с помощью максимально простого и дешевого оборудования.

На рис. 3 показаны графики токов утечки $I_y(t)$

при частоте импульсов 1 кГц и амплитуде 15 В. Здесь видно, что пиковые значения тока утечки существенно варьируются. Вместе с тем производная напряжения dU/dt , приложенного к обмотке, для всех импульсов одинакова. Следовательно, максимумы тока утечки ($I_{y,max}$) должны также быть одинаковы (или по крайней мере близкими). Причину этого явления можно увидеть на рис. 4, где показан тот же график $I_y(t)$, но

с другим масштабом по времени. Здесь кружками показаны отсчеты – моменты вычисления тока утечки. Интервал времени между отсчетами составляет 10^{-5} с.

Из рис. 4 видно, что каждый «прорисованный» на графике (зарегистрированный) пик I_y образуется лишь тремя точками, расположенными в вершинах треугольника. Следовательно, точка, соответствующая пику на графике $I_y(t)$, в действительности располагается на положительном или отрицательном фронте реального графика $I_y(t)$. Возникает своеобразный «стробоскопический» эффект, маскирующий реальные значения $I_{y,max}$.

Отсюда следует вывод о недостаточной разрешающей способности использованного в эксперименте оборудования. Для более надежной регистрации реальных пиков тока утечки требуется оборудование, обеспечивающее регистрацию сигнала с дискретностью существенно меньшей, чем 10^{-5} с. В качестве частичного решения этой проблемы можно предложить использование регистрации значений $I_y(t)$ в течение более длинного интервала времени. Тогда максимальное зарегистрированное значение I_y будет тем ближе к реальному $I_{y,max}$, чем больше был интервал времени.

3.2. О зависимости тока утечки от частоты и амплитуды

На рис. 5 показан график $I_y(t)$ при низкой частоте импульсов выходного напряжения инвертора (100 Гц). Здесь видно, что при 100 Гц происходит заметный дрейф среднего значения емкостного тока в сторону, совпадающую с полярностью приложенного напряжения. Это может происходить из-за поляризации диэлектрика, а также из-за некоторых технических причин (например, из-за нестабильности выпрямленного напряжения на входе инвертора). Сравнивая графики $I_y(t)$ на рис. 4 и рис. 5, можно сделать вывод о предпочтительности использования достаточно высоких частот импульсов U_{test} в задачах исследования емкостных токов утечки.

На рис. 6 показаны зависимости действующего значения тока утечки ($I_{y,eff}$) от частоты (f), а также усредненные по всем частотам действующие значения при двух амплитудах приложенного напряжения 7,5 и 15 В.

На рис. 6 не прослеживается достоверной связи между частотой импульсов напряжения U_{test} и действующим значением тока утечки, что не позволяет сделать вывод о влиянии частоты и амплитуды на действующее значение тока утечки. Вместе с тем видно, что усредненные действующие

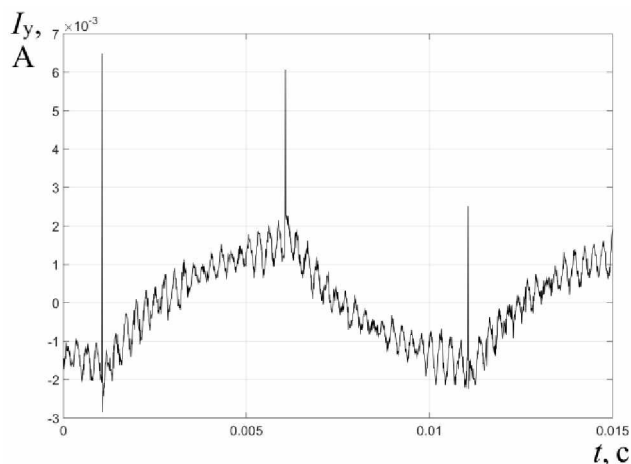


Рис. 5. Ток утечки при 100 Гц ($U_{test} = 15$ В)

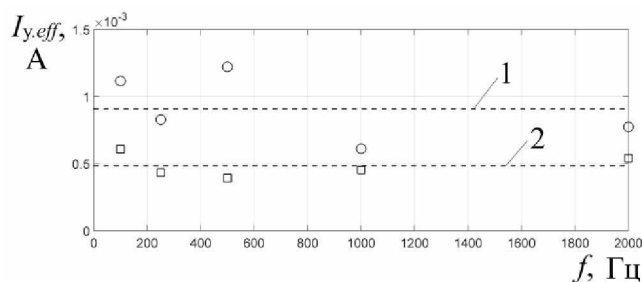


Рис. 6. Зависимости действующего значения тока утечки от частоты при двух амплитудах приложенного напряжения. Обозначено: \circ – 15 В; \square – 7,5 В; усредненные значения: 1 – 15 В; 2 – 7,5 В

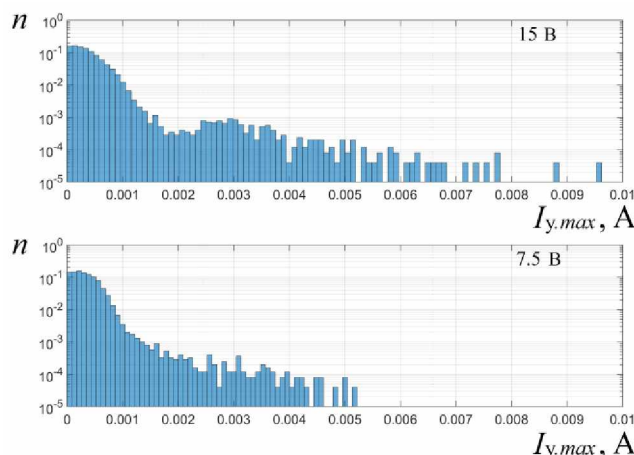


Рис. 7. Гистограмма распределения амплитуд тока утечки (n – относительное количество значений) при частоте 1 кГц для двух амплитуд напряжения 7,5 и 15 В

значения практически точно пропорциональны амплитуде импульсов приложенного напряжения (с погрешностью около 6 %). Это значит, что они несут полезную информационную составляющую, которую можно использовать в диагностических целях. На рис. 7 показаны гистограммы распределения амплитуд тока утечки (количество значений, зарегистрированных при дискретности по времени 10^{-5} с) для двух величин амплитуды U_{test} (7,5 и 15 В) при частоте импульсов 1 кГц. Здесь видно, что наибольшие значения зарегистрированных максимумов тока утечки практически пропорциональны амплитудам импульсов U_{test} (с погрешностью примерно 7,5 %).

Заключение

1. Разрешающая способность использованной платы РС1-6221 (дискретность по времени 10^{-5} с) недостаточна для надежной фиксации пиков тока утечки. Поэтому для этого необходим либо сравнительно длинный период измерения с большим количеством прошедших импульсов, либо оборудование, обеспечивающее более высокую разрешающую способность (дискретность по времени порядка 10^{-6} с и меньше), но такое оборудование существенно дороже.

2. Вместе с тем использованное в проведенных экспериментах оборудование позволяет выделить информационную составляющую, касающуюся эффективных значений емкостных токов утечки, что может быть использовано с целями диагностики состояния изоляции.

Литература

1. Neti, P. A novel high sensitivity differential current transformer for online health monitoring of industrial motor ground-wall insulation / P. Neti, K. Younsi, M. Shah // *Proc. Energy Conversion Congr. and Exposition*, 15–19 Sept. – 2013, Denver, USA. – pp. 2493–2499. DOI: 10.1109/ecce.2013.6647022

2. Siddique, A.S. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors / A.S. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh // *IEEE Trans. Energy Conversion*. – 2005. – Vol. 20. – P. 106–114. DOI: 10.1109/tec.2004.837304

3. Sin, M.L. Induction Machine On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis – A Survey / M.L. Sin, W.L. Soong, N. Ertugrul // *AUPEC 2003, Australasian Universities Power Engineering Conference*, 28 Sept. – 1 Oct. – 2003, Christchurch, New Zealand. – P. 1–6.

4. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors / P. Zhang, Y. Du, T. Habetler, B. Lu // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2011. – Vol. 47. – P. 34–46. DOI: 10.1109/tia.2010.2090839

5. Ведяшкин, М.В. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей / М.В. Ведяшкин, О.П. Муравлев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 117–121.

6. Тонких, В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 181 с.

7. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

8. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair* / G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. – New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. – 252 p. DOI: 10.1002/9781118886663

9. Tanver, P.J. Condition Monitoring Electrical Machines / P.J. Tanver, J. Penman. – Hertfordshire, U.K.: Research Studies Press, 1987. – 282 p.

10. Babel, A.S. Condition-based monitoring and prognostic health management of electric

machine stator winding insulation / A.S. Babel, E.G. Strangas // *Conf. Proc. 21st International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014, Sept. 2–5, 2014, Berlin, Germany.* – P. 1855–1861. DOI: 10.1109/icelmach.2014.6960436

11. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah et al. // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2010. – Vol. 17, no. 5. – P. 1441–1452. DOI: 10.1109/tdei.2010.5595545

12. Сташко, В.И. Моделирование состояния изоляции обмоток асинхронных двигателей сезонно эксплуатируемого оборудования на основе использования показателей волнового переходного процесса / В.И. Сташко, И.Б. Губин // *Ползуновский вестник.* – 2002. – № 1. – С. 51–56.

13. Nussbaumer, P. Exploitation of induction machine's high-frequency behavior for online insulation monitoring / P. Nussbaumer, M. Vogelsberger, T. Wolbank // *9th IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electron. and Drives, Aug 27. – 2013, Valencia, Spain.* – P. 579–585. DOI: 10.1109/demped.2013.6645773

14. Nussbaumer, P. Separation of disturbing influences on induction machine's high-frequency behavior to ensure accurate insulation condition monitoring / P. Nussbaumer, T. Wolbank, M. Vogels-

berger // *28th IEEE. Appl. Power Electron. Conference and Exposition, 17–21 March, 2013, Long Beach, USA.* – P. 1158–1163. DOI: 10.1109/aprec.2013.6520445

15. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // *Ползуновский вестник.* – 2011. – № 2/2. – С. 261–269.

16. Гутков, И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Гутков. – Барнаул, 1997. – 259 с.

17. Сидельников, Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев // *Вестник ПНИИПТ. Геология. Нефтегазовое и горное дело.* – 2013. – № 7. – С. 127–137.

18. Белоусова, Н.В. Опыт тестового диагностирования обмоток электрических машин / Н.В. Белоусова, В.П. Калявин, А.В. Мозгалевский. – Л.: ЛДНТП, 1989. – 24 с.

19. Левачев, А.В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Левачев. – Барнаул, 2002. – 167 с.

Метельков Владимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; v.p.metelkov@urfu.ru.

Бородин Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; m.yu.borodin@urfu.ru.

Кондаков Константин Андреевич, магистрант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; edd.enin@urfu.ru.

Нестеров Константин Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; k.e.nesterov@urfu.ru.

Поступила в редакцию 30 октября 2018 г.

DOI: 10.14529/power190108

USING LEAKAGE CURRENTS TO EVALUATE THE INDUCTION MOTOR INSULATION CONDITION

V.P. Metelkov, v.p.metelkov@urfu.ru,

M.Yu. Borodin, m.yu.borodin@urfu.ru,

K.A. Kondakov, edd.enin@urfu.ru,

K.E. Nesterov, k.e.nesterov@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

The need to improve the reliability and reduce the stator winding-related accident rates of asynchronous electric drives is what makes this topic relevant. The goal hereof is to find how capacitive leakage currents could be used to indicate the condition of the stator winding insulation in an asynchronous motor. The paper

presents some results of studies into the stator winding insulation leakage currents generated by rectangular voltage pulses at 100 to 2000 Hz. The researchers have verified the ability to register leakage current parameters as a function of voltage pulse amplitude and frequency in order to use such data to find the insulation condition. It is shown that rectangular voltage pulses can produce sufficiently large leakage currents for easier use. Even rather simple and low-cost equipment is usable to that end. However, reliable determination of the leakage current peaks amplitude requires a very long measurement with numerous transmitted pulses; alternatively, one could use very high-resolution equipment with a sampling time of 10⁻⁶ s or less. Nevertheless, the equipment used in the tests does extract the data regarding the effective capacitive leakage currents, which could be used to diagnose the insulation.

Keywords: electric motor, winding, insulation, leakage currents, condition monitoring.

References

1. Neti P., Younsi K., Shah M. A Novel High Sensitivity Differential Current Transformer for Online Health Monitoring of Industrial Motor Ground-Wall Insulation. *Proc. Energy Conversion Congr. and Exposition, 15–19 Sept. 2013, Denver, USA*, pp. 2493–2499. DOI: 10.1109/ecce.2013.6647022
2. Siddique A.S., Yadava G.S., Singh B. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2005, vol. 20, pp. 106–114. DOI: 10.1109/tec.2004.837304
3. Sin M.L., Soong W.L., Ertugrul N. Induction Machine On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis – A Survey. *AUPEC 2003, Australasian Universities Power Engineering Conference, 28 Sept. – 1 Oct. 2003, Christchurch, New Zealand*, pp. 1–6.
4. Zhang P., Du Y., Habetler T., Lu B. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, vol.47, pp. 34–46. DOI: 10.1109/tia.2010.2090839
5. Vedyashkin M.V., Muravlev O.P. [Estimation of Parameters of the Stator Windings Failures Distribution Laws during Operation of Crane Asynchronous Motors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2011, vol. 319, no. 4, pp. 117–121. (in Russ.)
6. Tonkikh V.G. *Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley v sel'skom khozyaystve na osnove analiza parametrov ikh vneshnego magnitnogo polya. Dis. kand. tekhn. nauk* [Method for Diagnosing Asynchronous Electric Motors in Agriculture Based on the Analysis of the Parameters of Their External Magnetic field. Cand. sci. diss.]. Barnaul, 2009. 181 p.
7. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* [The Reliability of Electrical Machines]. Moscow, MEI Publ. House, 2006. 432 p.
8. 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. DOI: 10.1002/9781118886663
9. Tanver P.J., Penman J. *Condition Monitoring Electrical Machines*. Hertfordshire, U.K., Research Studies Press, 1987. 282 p.
10. Babel A.S., Strangas E.G. Condition-Based Monitoring and Prognostic Health Management of Electric Machine Stator Winding Insulation. *Conf. Proc. 21st International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014, Sept. 2–5, 2014, Berlin, Germany*, pp. 1855–1861. DOI: 10.1109/icelmach.2014.6960436
11. 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 Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 1441–1452. DOI: 10.1109/tdci.2010.5595545
12. Stashko V.I., Gubin I.B. [Simulation of the Insulation State of the Asynchronous Motors Windings of Seasonally Operated Equipment Based on the Use of Wave Transient Indicators]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2002, no. 1, pp. 51–56. (in Russ.)
13. 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. DOI: 10.1109/demped.2013.6645773
14. 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. DOI: 10.1109/apec.2013.6520445
15. Vorob'ev N.P., Vorob'eva 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 Russ.)
16. Gutov I.A. *Prognozirovaniye sostoyaniya elektrodvigateley na osnove ispol'zovaniya mnogo faktornykh modeley stareniya izolyatsii. Dis. kand. tekhn. nauk* [Predicting the State of Electric Motors Based on the Use of Multivariate Models of Insulation Aging. Cand. sci. diss.]. Barnaul, 1997. 259 p.

17. Sidel'nikov L.G., Afanas'ev D.O. [Review of Methods for Monitoring the Technical Condition of Asynchronous Motors in Operation]. *Vestnik PNIIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* [Bulletin PNIIPU. Geology. Oil, Gas and Mining], 2013, no. 7, pp. 127–137. (in Russ.)

18. 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.

19. Levachev A.V. *Diagnostika izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigateley na osnove ispol'zovaniya parametrov skhemy zameshcheniya obmotok*. Dis. kand. tekhn. nauk [Asynchronous Electric Motors Insulation Diagnostics Based on the Use of Parameters of a Winding Replacement Circuit. Cand. sci. diss.]. Barnaul, 2002. 167 p.

Received 30 October 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

О возможности использования токов утечки для оценки состояния изоляции асинхронного двигателя / В.П. Метельков, М.Ю. Бородин, К.А. Кондаков, К.Е. Нестеров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 67–74. DOI: 10.14529/power190108

FOR CITATION

Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Using Leakage Currents to Evaluate the Induction Motor Insulation Condition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190108