Оценка достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора

А.Н. Назарычев¹, А.С. Страхов², Е.М. Новоселов², С.Н. Литвинов², А.А. Скоробогатов²
¹ФГАОУДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации
Министерства энергетики Российской Федерации», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
²ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время все большее распространение получают методы диагностирования асинхронных двигателей, связанные со спектральным анализом гармонических сигналов. Важным диагностическим параметром асинхронного электродвигателя, определяемым при помощи гармонического анализа его магнитного поля либо фазного тока, является величина скольжения, сильное отклонение которой может служить признаком различных неисправностей. Носителями информации о частоте вращения ротора машины, необходимой для расчета скольжения, могут быть ряд гармоник, в частности гармоники 1-го порядка, вызванные эксцентриситетом ротора. Однако в настоящее время не существует критериев для оценки достоверности определения скольжения с применением данных гармоник. В связи с этим актуальным является получение этих критериев и проверка их работоспособности на действующих электродвигателях.

Материалы и методы: С использованием метода спектрального анализа исследованы спектральные функции сигналов с датчиков внешнего магнитного поля, установленных на корпусах асинхронных двигателей, и проведен анализ правильности определения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора 1-го порядка и частоте сети.

Результаты: Определены численные критерии оценки достоверности расчета скольжения асинхронных электродвигателей и проверена правильность их работы на исследуемых асинхронных электродвигателях.

Выводы: Разработанные критерии могут быть использованы для оценки достоверности результатов измерения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора 1-го порядка, существующим как во внешнем магнитном поле, так и в фазном токе двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, спектральный анализ, гармоники эксцентриситета ротора, критерии достоверности определения скольжения, внешнее магнитное поле.

Evaluation of the reliability of the induction motor slip determination by rotor eccentricity harmonics

A.N. Nazarychev¹, A.S. Strakhov², E.M. Novoselov², S.N. Litvinov², A.A. Skorobogatov²
¹Petersburg Power Engineering Institute of Professional Development of the Ministry of Energy
of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russian Federation
²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

Abstract

Background: At present, methods of induction motors diagnosis based on spectral analysis of harmonic signals are becoming more and more widespread. An important diagnostic parameter of the induction motor determined by harmonic analysis of its magnetic field or phase current is the amount of slip, a strong deviation of which can be a sign of different faults. Some harmonics, in particular harmonics of the 1-st order, caused by the rotor eccentricity, provide information about the rotation frequency of the motor rotor required for slip calculation. However, at present there are no criteria for evaluation of slip determination reliability by using these harmonics. The purpose of this work is to formulate these criteria and test them on functioning motors.

Materials and methods: The spectral functions of signals from external magnetic field sensors, mounted on the body of induction motors, have been studied; and analysis of the slip determination correctness in the rotor eccentricity harmonics of the 1-st order and the supply frequency has been conducted by the spectral analysis method.

Results: The numeric criteria for induction motors slip determination reliability evaluation have been obtained and the correctness of their work has been tested on the asynchronous motors under study.

Conclusions: The developed criteria can be used to evaluate slip measurement reliability by the 1-st order rotor eccentricity harmonics, both in external magnetic field and in phase current of the motor.

Key words: induction motor, spectral analysis, rotor eccentricity harmonics, slip determination reliability criteria, external magnetic field.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.3.044-051

Высокая повреждаемость асинхронных двигателей является причиной значительных убытков. Как известно, на долю электродвигателей приходится 25–30 % от общего числа повреждений электрооборудования [1]. При этом практически на любом производстве имеются механизмы, приводом которых являются асинхронные электродвигатели. Отказы электродвигателей в этом случае могут привести не только к останову производства одного из устройств (механизмов), но и к нарушению всего технологического процесса. В связи с этим важной задачей современной электроэнергетики является разработка способов контроля и диагностирования состояния асинхронных электродвигателей.

В настоящее время широкое распространение находят методы контроля состояния узлов машины (обмотки ротора, обмотки статора, подшипников и т. д.), основанные на выявлении в частотных спектрах тока [2–9] или внешнего магнитного поля [10, 11] электродвигателя определенных гармоник, изменение амплитуд которых является диагностическим признаком повреждения того или иного узла.

В свою очередь, значения частот данных гармоник зависят от скольжения машины. Следовательно, большая погрешность измерения скольжения может стать причиной неверного заключения о состоянии контролируемого узла.

Кроме этого, одним из параметров, дающих интегральную оценку состояния асинхронного двигателя, является отклонение скольжения от требуемой величины. Резкое увеличение данного параметра может являться диагностическим признаком появления таких неисправностей, как повреждение короткозамкнутой обмотки ротора или межвитковые замыкания в обмотке статора [11].

С другой стороны, большая величина отклонения скольжения двигателя может быть обусловлена высокими значениями инструментальной и методической погрешностей измерения, а также проведением регистрации сигнала не в установившемся, а в переходном режиме.

Известно, что носителями информации о скольжении двигателя могут быть определенные гармоники (например, гармоники, вызванные эксцентриситетом ротора [12]). Эти гармоники существуют не только в воздушном зазоре машины [10, 13], но и в токе статора [7–9] и даже во внешнем магнитном поле [10, 11].

В [13, 14] представлен метод определения скольжения по гармоникам эксцентриситета ротора (ГЭР) 1-го порядка, существующим в токе статора, в воздушном зазоре двигателя и во внешнем магнитном поле. Сравнение значений скольжений, полученных по ГЭР 1-го порядка, со значениями, полученными по данным тахометрических датчиков (они опреде-

ляют частоту вращения ротора), показало, что не всегда результаты измерения являются достоверными. В реальных условиях применение тахометрических датчиков для измерения частоты вращения ротора, особенно на мощных электродвигателях, сталкивается с рядом трудностей. В связи с этим важной задачей является получение критерия оценки достоверности результатов измерения скольжения по ГЭР 1-го порядка в реальных условиях работы двигателей.

В работе были поставлены и решены следующие задачи:

- определение численного критерия оценки достоверности результатов измерения скольжения по ГЭР 1-го порядка;
- проверка эффективности работы критерия на реальных высоковольтных и низковольтных двигателях при рассмотрении в качестве диагностического сигнала внешнего магнитного поля.

Для ГЭР 1-го порядка точные значения скольжения могут быть определены по выражениям [13]:

$$\begin{aligned} s_{ГДЭ.Т}^{1+} &= 1 - \frac{p \cdot f_{ГДЭ.Т}^{1+} - f_{с.Т}}{f_{с.Т}}, \\ s_{ГЭР.Т}^{1-} &= 1 - \frac{p \cdot f_{с.Т} - f_{ГДЭ.Т}^{1-}}{f_{с.Т}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где p – число пар полюсов двигателя; $f_{ГЭР.Т}^{1+}$ – точное значение частот ГЭР 1-го порядка; $f_{с.Т}$ – точное значение частоты сети.

Измеренные значения скольжений по ГЭР 1-го порядка составляют:

$$\begin{aligned} s_{ГДЭ.изм}^{1+} &= 1 + p - \frac{p \cdot f_{ГДЭ.Т}^{1+} \pm \Delta f_{ГДЭ}^{1+}}{f_{с.м} \pm \Delta f_c}, \\ s_{ГДЭ.изм}^{1-} &= 1 - p + \frac{p \cdot f_{ГДЭ.Т}^{1-} \pm \Delta f_{ГДЭ}^{1-}}{f_{с.Т} \pm \Delta f_c}. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих выражениях погрешности определения частоты сети Δf_c и частот ГЭР 1-го порядка $\Delta f_{ГЭР}^{1\pm}$ с применением метода автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС) [14] могут быть определены по выражениям:

$$\begin{cases} \Delta f_c = \frac{f_{с.изм}}{2(T_{зап} F_d - i_c + 1)}, \\ \Delta f_{ГЭР}^{1-} = \frac{f_{ГЭР.изм}^{1-}}{2(T_{зап} F_d - i_{ГЭР}^{1-} + 1)}, \\ \Delta f_{ГЭР}^{1+} = \frac{f_{ГЭР.изм}^{1+}}{2(T_{зап} F_d - i_{ГЭР}^{1+} + 1)}, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{зап}$ – время записи сигнала; F_d – частота дискретизации; i_c – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении частоты сети; $i_{ГЭР}^{1\pm}$ – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при опреде-

лении большей из двух частот ГЭР 1-го порядка ($f_{ГЭР}^{1+}$); $i_{ГЭР}^{1-}$ – количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении меньшей из двух частот ГЭР 1-го порядка ($f_{ГЭР}^{1-}$).

Согласно (2), наибольшие погрешности определения скольжения по каждой из частот ГЭР 1-го порядка возникают, когда погрешности определения частот ГЭР складываются, а погрешности определения частоты сети вычитаются. С учетом этого факта формулы для нахождения данных параметров имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta s_{ГЭР.макс}^{1+} = \Delta s_{ГЭР.3}^{1+} = \rho \frac{f_{ГЭР.Т}^{1+} \Delta f_c + f_{с.Т} \Delta f_{ГЭР}^{1+}}{f_{с.Т} f_{с.Т} - \Delta f_c}, \\ \Delta s_{ГЭР.макс}^{1-} = \rho \frac{f_{ГЭР.Т}^{1-} \Delta f_c + f_{с.Т} \Delta f_{ГЭР}^{1-}}{f_{с.Т} f_{с.Т} - \Delta f_c}. \end{cases} \quad (4)$$

Очевидно, что максимально возможная разность между значениями скольжений, определенных по частотам ГЭР 1-го порядка, может быть оценена как сумма двух погрешностей, определяемых по выражениям (4). После математических преобразований с учетом того, что сумма частот ГЭР 1-го порядка всегда равна удвоенному значению частоты сети

$$f_{ГЭР.Т}^{1+} + f_{ГЭР.Т}^{1-} = 2f_{с.Т}, \quad (5)$$

получим окончательное выражение для определения максимально возможной разности скольжений, определенных по частотам $f_{ГЭР}^{1-}$ и $f_{ГЭР}^{1+}$:

$$\begin{aligned} \Delta s_{ГЭР.макс}^{1+} &= \Delta s_{ГЭР.макс}^{1+} - \Delta s_{ГЭР.макс}^{1-} = \\ &= \frac{\rho}{f_{с.Т} - \Delta f_c} (\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{ГЭР}^{1+} + \Delta f_{ГЭР}^{1-}). \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда итоговое выражение для оценки достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} |s_{ГЭР.изм}^{1+} - s_{ГЭР.изм}^{1-}| &\leq \left[\Delta s_{ГЭР.макс}^{1+} = \right. \\ &= \left. \frac{\rho (\Delta f_c \cdot 2 + \Delta f_{ГЭР}^{1+} + \Delta f_{ГЭР}^{1-})}{f_{с.Т} - \Delta f_c} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

В левой части выражения (7) рассчитывается разность между скольжениями, измеренными по частотам ГЭР 1-го порядка в ходе контроля, а в правой – максимально допустимая разность между этими скольжениями. При этом значения погрешностей определения частот рассчитываются по выражению (3), а точное значение частоты сети при достаточно больших величинах произведения частоты дискретизации F_d и времени записи сигнала

$T_{зап}$ (порядка 1000 и более) и малой величине допустимого отклонения частоты сети от номинального в нормальном режиме ($\pm 0,2$ Гц) можно принять равным 50 Гц.

В установившемся режиме скольжение даже неисправного двигателя не может превышать удвоенной величины номинального скольжения машины:

$$s_{изм} \leq 2 \cdot s_{ном}. \quad (8)$$

Поэтому неравенство (8) принято в качестве дополнительного критерия для оценки достоверности определения скольжения.

Проверка эффективности работы критерия проводилась на реальных высоковольтных и низковольтных двигателях. В качестве диагностического сигнала было использовано внешнее магнитное поле. Для вычисления скольжения была разработана специальная программа в программном комплексе Matlab. В ней производится определение частот ГЭР 1-го порядка, а по их значениям рассчитываются и сравниваются величины скольжений. В дальнейшем происходит сравнение величин разности определения скольжений с максимально возможной разностью скольжений, определенных по частотам $f_{ГЭР}^{1-}$ и $f_{ГЭР}^{1+}$.

В случае с асинхронными двигателями 0,4 кВ фосфатных насосов, установленных на одной из ТЭЦ г. Иваново, для подтверждения правильности расчета скольжений по ГЭР 1-го порядка производилось определение скольжения другим методом. В нем с помощью тахометрического датчика измерялась частота вращения вала ротора машины, а по амплитудному спектру зарегистрированного сигнала с датчика внешнего магнитного поля определялось точное значение частоты сети. Далее по формуле

$$s_{изм}^{ЭТ} = \frac{\left| n_{изм} - \frac{f_{с.изм}}{\rho} \right|}{\frac{f_{с.изм}}{\rho}} \quad (9)$$

рассчитывалось значение скольжения, принимаемого в качестве эталонного.

Правильность полученных результатов первоначально определялась по двум критериям – выражениям (6) и (7). Далее путем сравнения значений скольжений, полученных по ГЭР 1-го порядка, с эталонным значением скольжения делалось заключение об эффективности работы предлагаемых критериев оценки достоверности результатов измерения скольжения по ГЭР 1-го порядка. Результаты испытаний асинхронных двигателей приведены в табл. 1. Амплитудные спектры для каждого двигателя приведены на рис. 1–5.

Таблица 1. Результаты расчета скольжения асинхронных двигателей 0,4 кВ

Значение скольжения по ГЭР 1-	Значение скольжения по ГЭР 1+	Величина разности скольжений, $ s_{ГЭР.изм}^{1-} - s_{ГЭР.изм}^{1+} $	Допустимая величина разности скольжений, определенных по ГЭР, $\Delta s_{ГЭР.макс}$	Скорость вращения двигателя	Значение скольжения, определенное с помощью тахометра
0,125062	0,125038	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	1490	0,006666
0,004	0,004	$1,11 \cdot 10^{-16}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	1494	0,004
0,005158	0,005167	$9,11 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	1492	0,005333
0,008155	0,008156	$8,85 \cdot 10^{-7}$	$3,64 \cdot 10^{-5}$	1487,6	0,008267
0,006965	0,006971	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	1489,8	0,0068

Рис. 1. Амплитудный спектр для варианта 1

Рис. 2. Амплитудный спектр для варианта 2

Рис. 3. Амплитудный спектр для варианта 3

Рис. 4. Амплитудный спектр для варианта 4

Рис. 5. Амплитудный спектр для варианта 5

Анализ данных табл. 1 показывает, что из пяти значений скольжений, определенных по методу АВЗС, только одно оказалось неверным (для двигателя №1), так как оно превысило величину номинального скольжения более чем в 2 раза. Причиной этого является то, что ГЭР 1-го порядка слабо проявляется во внешнем магнитном поле двигателя №1 (рис. 1). Анализ полученных данных (рис. 2–5) показывает, что ГЭР 1-го порядка отчетливо присутствуют во внешнем магнитном поле других машин, а результаты расчета скольжения по данным гармоникам достаточно близки к значениям скольжений, определенных с помощью тахометрического датчика (см. табл. 1). При этом предлагаемое условие (7) и дополнительное условие (8) достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора для этих двигателей не были нарушены.

Аналогичные испытания, подтверждающие эффективность оценки достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по критериям (7) и (8), были проведены на высоковольтных двигателях тягодутьевых механизмов собственных нужд одной из ТЭЦ г. Иваново. На данных объектах определение скольжения осуществлялось только по ГЭР 1-го порядка внешнего магнитного поля. Контроль частоты вращения вала ротора с помощью тахометрического датчика не производился, так как результаты испытаний низковольтных двигателей показали эффективность определения скольжения с помощью метода АВЗС. Результаты для одного из двигателей марки ДАМСО-15-12-8 номинальной мощности 570 кВт с числом пар полюсов $p = 4$ и номинальным значением скольжения $s_{ном} = 0,0133$ представлены в табл. 2, а амплитудные спектры в полосе частот от 0 до 100 Гц — на рис. 6–8.

Таблица 2. Результаты расчета скольжения асинхронного двигателя 6 кВ

Интервал времени регистрации сигнала, с	Значение скольжения по ГЭР 1-	Значение скольжения по ГЭР 1+	Величина разности скольжений, $ s_{ГЭР.изм}^{1+} - s_{ГЭР.изм}^{1-} $	Допустимая величина разности скольжений, определенных по ГЭР, $\Delta s_{ГЭР.макс}$
10–20	0,005835	0,005829	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$
20–30	0,005795	0,005886	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$
30–40	0,005658	0,005841	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$

Примечание: курсивом отмечены те строки, где погрешность определения скольжения превышает допустимую

Рис. 6. Амплитудный спектр для интервала 10–20 с

Рис. 7. Амплитудный спектр для интервала 20–30 с

Рис. 8. Амплитудный спектр для интервала 30–40 с

Анализ результатов, полученных на высоковольтных двигателях, показал следующее:

- критерий (8) соблюдался при испытаниях на всех высоковольтных двигателях;
- значения разностей скольжений не выходят за пределы максимально допустимой погрешности, рассчитанной по выражению (6),

за исключением случаев регистрации сигнала в нестационарных режимах. При колебаниях амплитуды сигнала критерий (7) часто не выполняется, а значит, и точность измерения скольжения в области нестационарной нагрузки (интервал времени от 30 до 40 с (рис. 9)) гораздо ниже, чем для областей равномерной нагрузки (интервал времени от 10 до 20 с).

Рис. 9. Форма сигнала, снятого с датчика внешнего магнитного поля, который установлен на корпусе высоковольтного двигателя типа ДАМСО-15-12-8: а – длительность сигнала 62,7 с; б – поведение амплитуд сигнала на отрезке от 32 до 35 с

Заключение

Условие (7) в совокупности с условием (8) может быть использовано в качестве критерия оценки достоверности результатов измерения скольжения по ГЭР 1-го порядка, существующим во внешнем магнитном поле. Следует отметить, что данные критерии могут быть использованы при измерении скольжения по току статора и магнитного поля в зазоре машины.

Список литературы

1. Федоров М.М., Ткаченко А.А. К вопросу построения систем диагностики неисправностей асинхронных электродвигателей // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 59–61.
2. Zouzou S.E., Sahraoui M., Ghoggal A., Guedidi S. Detection of Inter-Turn Short-Circuit and broken Rotor Bars in Induction Motors Using the Partial Relative Indexes: Application on the MCSA // XIX International Conference on Electrical Machines. – Rome, 2010. – P. 1–6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dSPACE.univbiskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/2392/1/C1%2022%20Zouzou%20.pdf>.
3. Ghoggal A., Sahraoui M., Zouzou S. E. Analytical and experimental study of squirrel cage induction motors with rotor bar faults // General Physics and Electrical Applications. – 2008. – Vol. 81. – P. 43–60.
4. Guedidi S., Zouzou S.E., Laala W., Sahraoui M., Yahia K. Broken Bar Fault Diagnosis of Induction Motors Using MCSA and Neural Network // Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), IEEE International Symposium, 2011. – P. 632–637.
5. Tavner P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 543 p.
6. Nazarychev A.N., Novoselov E.M., Skorobogatov A.A. Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Elec-

tric Motors Based on Stator Current Analysis // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 209–215.

7. Guedidi S., Zouzou S.E., Laala W., Sahraoui M., Yahia K. Induction motors broken rotor bars detection using MCSA and neural network: experimental research // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2013. – Vol. 4, № 2. – P. 173–181.

8. Puche R., Pons J., Climente V., Sánchez M. Review Diagnosis Methods of Induction Electrical Machines based on Steady State Current // 11th Spanish Portuguese Conference On Electrical Engineering, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aedie.org/11chliepapers/263-Puche.pdf>.

9. Castelli M., Fossati J. P., Terra J. I., Andrade M., Conde A., Martínez-Iturralde M. Slip Determination Method Using MCSA // EPIM, 8° Encuentro de especialistas en Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. – Montevideo; Uruguay, 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ie.fing.edu.uy/epim2010/myreview/myPapers/p78.pdf>.

10. Henao H., Demian C., Capolino G.-A. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, issue 5. – P. 1272–1279.

11. Gagdon B.C., Hopgood D.J. Fluctuating pulse can reveal ailing motor // Elect. Rev. (Gr. Brit.). – 1975. – P. 37–38.

12. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

13. Мочалов С.Б., Новоселов Е.М., Литвинов С.Н., Скоробогатов А.А. Экспериментальное доказательство оптимизации процесса спектрального анализа сигнала с применением алгоритма автокоррекции времени записи // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 40–44.

14. Назарычев А.Н., Новоселов Е.М., Глотова Н.В., Скоробогатов А.А. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 260–266.

References

1. Fedorov, M.M., Tkachenko, A.A. K voprosu postroeniya sistem diagnostiki neispravnostey asinkhronnykh elektrodvigatelyey [On induction motor fault diagnostics system design]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2006, no. 2, pp. 59–61.
2. Zouzou, S.E., Sahraoui, M., Ghoggal, A., Guedidi, S. Detection of Inter-Turn Short-Circuit and broken Rotor Bars in Induction Motors Using the Partial Relative Indexes: Application on the MCSA. XIX International Conference on Electrical Machines. Rome, 2010, pp. 1–6. Available at: <http://dspace.univbskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/2392/1/CI%2022%20Zouzou%20.pdf>
3. Ghoggal, A., Sahraoui, M., Zouzou, S.E. Analytical and experimental study of squirrel cage induction motors with rotor bar faults. *General Physics and Electrical Applications*, 2008, vol. 81, pp. 43–60.
4. Guedidi, S., Zouzou, S.E., Laala, W., Sahraoui, M., Yahia, K. Broken Bar Fault Diagnosis of Induction Motors Using MCSA and Neural Network. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, IEEE International Symposium, 2011, pp. 632–637.
5. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. London, The Institution of Engineering and Technology, 2008. 543 p.
6. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A. Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 209–215.
7. Guedidi, S., Zouzou, S.E., Laala, W., Sahraoui, M., Yahia, K. Induction motors broken rotor bars detection using MCSA and neural network: experimental research. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 173–181.
8. Puche, R., Pons, J., Climente, V., Sánchez, M. Review Diagnosis Methods of Induction Electrical Machines based on Steady State Current. 11th Spanish Portuguese Conference On Electrical Engineering, 2009. Available at: <http://www.aedie.org/11chlie-papers/263-Puche.pdf>
9. Castelli, M., Fossati, J.P., Terra, J.I., Andrade, M., Conde, A. Martínez-Iturralde M. Slip Determination Method Using MCSA. EPIM, 8° Encuentro de especialistas en Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. – Montevideo; Uruguay, 2010. Available at: <http://ie.fing.edu.uy/epim2010/myreview/myPapers/p78.pdf>.
10. Henao, H., Demian, C., Capolino, G.-A. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux senso. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, issue 5, pp. 1272–1279.
11. Gagdon, B.C., Hopgood, D.J. Fluctuating pulse can reveal ailing motor. *Elect. Rev. (Gr. Brit.)*, 1975, pp. 37–38.
12. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in induction motors]. Moscow, Energiya, 1981. 352 p.
13. Mochalov, S.B., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Skorobogatov, A.A. Eksperimental'noe dokazatel'stvo optimizatsii protsessa spektral'nogo analiza signala s primeneniem algoritma avtokorreksii vremeni zapisi [Experimental confirmation of signal spectral analysis optimization by using a recording time automation correction algorithm]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 40–44.
14. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Glotova, N.V., Skorobogatov, A.A. Analiz primeneniya garmonik dinamicheskogo eksstsentrisiteta rotora dlya kontrolya skol'zheniya elektrodvigatelya [Analysis of rotor dynamic eccentricity harmonics application to controlling motor slip]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Collected works of Ivanovo State Power Engineering University «Power engineering system operation improvement»]. Moscow, Energoatomizdat, 2009, issue IX, pp. 260–266.

Назарычев Александр Николаевич,

ФГАОУДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства энергетики Российской Федерации»,
доктор технических наук, ректор,
e-mail: nazarychev@mail.ru

Страхов Александр Станиславович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: sstrakhov57@mail.ru

Новоселов Евгений Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
e-mail: captain.udgin@gmail.com

Литвинов Сергей Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
e-mail: slit8809@yandex.ru

Скоробогатов Андрей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
e-mail: aaskor20@yandex.ru