

УДК 621.311

Экспериментальное доказательство оптимизации процесса спектрального анализа сигнала с применением алгоритма автокоррекции времени записи

С.Б. Мочалов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: slit8809@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Во время проведения исследований, связанных со спектральным анализом сигнала, важным моментом является определение необходимого времени его записи. Данный параметр влияет на точность определения частот его гармонических составляющих. В настоящее время не уделяется достаточного внимания вопросу корректировки времени записи сигнала при сохранении точности определения частот. Неверный выбор данного параметра неизбежно вносит погрешность в конечный результат расчетов. В связи с этим актуальной является задача экспериментального доказательства эффективности использования ранее разработанных метода и алгоритма автокоррекции времени записи сигнала.

Материалы и методы: Исследовано поведение спектральной функции гармонического сигнала, записанного с помощью датчика, расположенного в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя. Значения скольжения электродвигателя определены различными способами с применением среды численных вычислений MATLAB. Данные значения сопоставлены с эталонным, рассчитанным аналитически на основе значений частоты вращения, измеренной оптическим тахометром и частоты сети, измеренной аналоговым частотомером. В качестве методов использованы методы спектрального анализа и экспериментальных исследований.

Результаты: В ходе исследований определены значения частоты вращения и скольжения для двигателя при различных значениях времени записи. Для наглядного представления процесса изменения параметров построены зависимости скольжения от времени записи для всех способов.

Выводы: Применение алгоритма автокоррекции времени записи сигнала позволяет заметно сократить время записи без потери точности определения скольжения. Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность использования алгоритма автокоррекции времени записи сигнала.

Ключевые слова: спектральный анализ, частота дискретизации, время записи сигнала, алгоритм автокоррекции.

Experimental validation of signal spectral analysis optimization after using the recording time automatic correction algorithm

S.B. Mochalov, E.M. Novoselov, S.N. Litvinov, A.A. Skorobogatov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: slit8809@yandex.ru

Abstract

Background: One of the key points of research related to signal spectral analysis is to determine the necessary recording time. This parameter affects the accuracy of determining harmonic components frequency. Little attention has yet been given to the problem of correcting the signal recording time while maintaining the determination accuracy. Errors in choosing the recording time inevitably lead to inaccuracies in the final calculation results. Therefore, it is urgent to validate experimentally the efficiency of the method and algorithm of recording time automatic correction developed by us earlier.

Materials and methods: We have investigated the spectral function of harmonic signal recorded by a sensor located in the air gap of an induction motor. The motor slip values were defined in different ways using the numerical computing environment MATLAB. These values were compared with the reference ones calculated analytically on the basis of the rotary speed values measured by an optical tachometer and the mains frequency measured by an analog frequency meter. The methods used included spectral analysis and experimental research.

Results: Rotary speed and slip values were determined for different recording time lengths. To visualize the process of changing the parameters, we plotted graphs of slip dependence on time for all the methods.

Conclusions: The algorithm of signal recording time automatic correction allowed us to reduce the recording time significantly without decreasing the accuracy of slip measurement. Thus, we experimentally proved the efficiency of the signal recording time automatic correction algorithm.

Key words: spectral analysis, sampling frequency, signal recording time.

С развитием компьютерной техники в электроэнергетике широкое распространение получают методы диагностики электрооборудования, основанные на спектральном анализе сигналов. В частности, можно отметить извест-

ные методы функционального контроля состояния асинхронных электродвигателей, основанные на спектральном анализе вибрации [1], тока статора [2–4] или магнитных полей [5].

Во время проведения спектрального анализа сигнала важным критерием, определяющим точность выявления его частотных составляющих, является время записи данного сигнала [6]. В [7] предложен метод, позволяющий существенно снизить время записи сигнала без потери информативности (точности). Практическая эффективность данного метода (и созданного на его основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС)) рассмотрена на примере задачи определения скольжения по гармоникам магнитного поля воздушного зазора электродвигателя. Для этого на экспериментальном стенде был проведен ряд лабораторных испытаний. Принципиальная схема стенда показана на рис. 1.

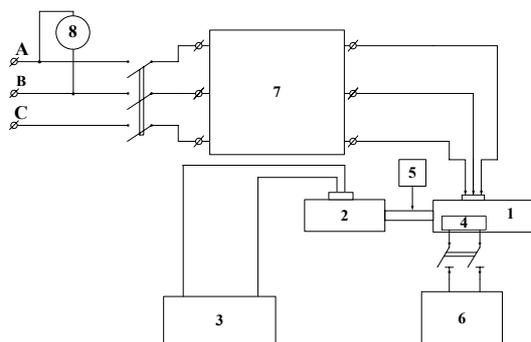


Рис. 1. Принципиальная схема стенда: 1 – асинхронный двигатель ЗВР71-2; 2 – генератор постоянного тока; 3 – переменная нагрузка; 4 – внутренний индуктивный датчик; 5 – оптический тахометр; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – измерительный комплект К-505; 8 – частотомер

Объектом исследований является трехфазный асинхронный электродвигатель ЗВР71-2 с номинальной мощностью $P_{ном} = 250$ Вт 1, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемого двигателя ЗВР71-2

Мощность, Вт	Номинальная частота вращения, об/мин	Число пар полюсов	Число пазов ротора	Число пазов статора
250	2880	1	19	24

В целях создания ступенчатого регулирования нагрузки на валу ротора к двигателю подсоединен генератор постоянного тока 2, работающий в паре с блоком переменной нагрузки 3.

Для регистрации частоты основной гармоники магнитного поля в воздушном зазоре двигателя и гармоник, частоты которых несут информацию о частоте вращения вала ротора, используется внутренний индуктивный датчик (ВИД) 4, который представляет собой три витка провода, намотанные на зубец статора (рис. 2).

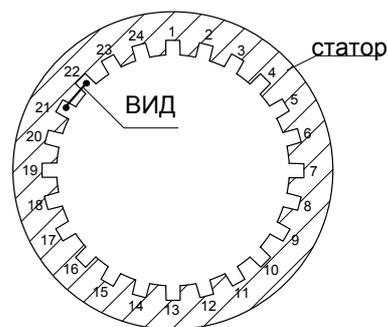


Рис. 2. Расположение внутреннего индуктивного датчика в статоре электродвигателя

Частота вращения вала ротора электродвигателя определяется с помощью оптического тахометра АТ-8 5. Погрешность его измерений составляет 0,05 %. Для измерения частоты сети используется частотомер Ф5043 8, подключенный на линейное напряжение. Погрешность его измерений составляет $\pm 0,1$ % для диапазона 45–55 Гц. Для контроля электрических параметров в цепи двигателя применяется измерительный комплект К-505 7. Сигнал, поступающий с ВИД, оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 6.

Скольжение является очень важной характеристикой, отражающей КПД асинхронного электродвигателя. Например, отклонение этого параметра на 20 % от номинального значения может свидетельствовать о неисправности электродвигателя¹. Согласно ГОСТ 7217-87 (2003)², погрешность при определении величины скольжения не должна превышать 5 %.

Для подтверждения эффективности алгоритма АВЗС на двигателе экспериментального стенда произведены измерения скольжения четырьмя способами:

Способ 1. С помощью оптического тахометра определялось эталонное значение частоты вращения. При определении скольжения использовалось значение частоты питающей сети, полученное с помощью частотомера. Инструментальная погрешность данного способа составляет примерно 4 % при номинальной нагрузке двигателя ($P_{ном}$) и 8 % при нагрузке 0,5 от номинальной ($0,5 P_{ном}$).

Способ 2. По методике, описанной в [8], определялось скольжение по зубцовым гармоническим ротора (ЗГР) первого порядка, существующим в магнитном поле воздушного зазора двигателя. Под ЗГР подразумеваются гармоники, обусловленные зубчатостью ротора и дискретным расположением стержней его обмотки.

Способ 3. По методике, описанной в [9], определялось скольжение по гармоникам эксцентриситета ротора (ГЭР) первого порядка,

¹ ГОСТ 183-74 (2001). Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования.

² ГОСТ 7217-87 (2003). Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.

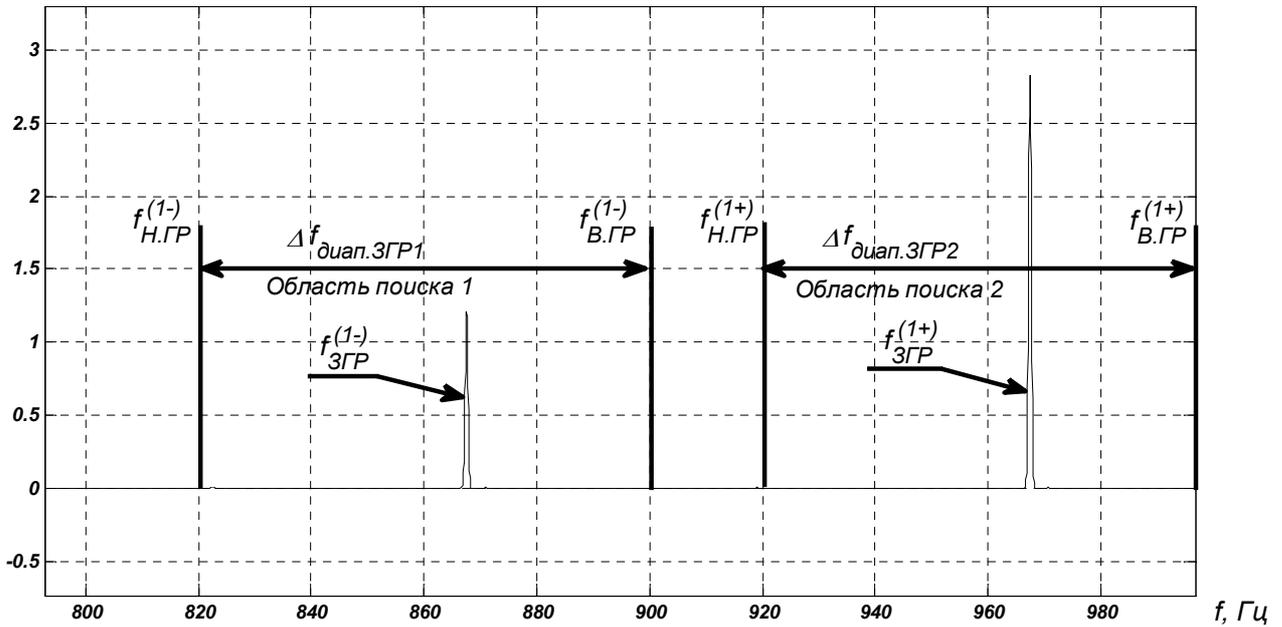
существующим в магнитном поле воздушного зазора двигателя.

Способ 4. Измерялось скольжение по ГЭР первого порядка, существующим в магнитном поле воздушного зазора двигателя, с применением алгоритма АВЗС [7].

В трех последних способах частота сети определялась по сигналу, снимаемому с ВИД, путем его разложения в ряд Фурье. Измерения проводились при различных нагрузках на валу ротора ($0,5 P_{\text{НОМ}}$ и $P_{\text{НОМ}}$) с временем записи сигнала от 1 до 20 с и частотой дискретизации АЦП 10 кГц.

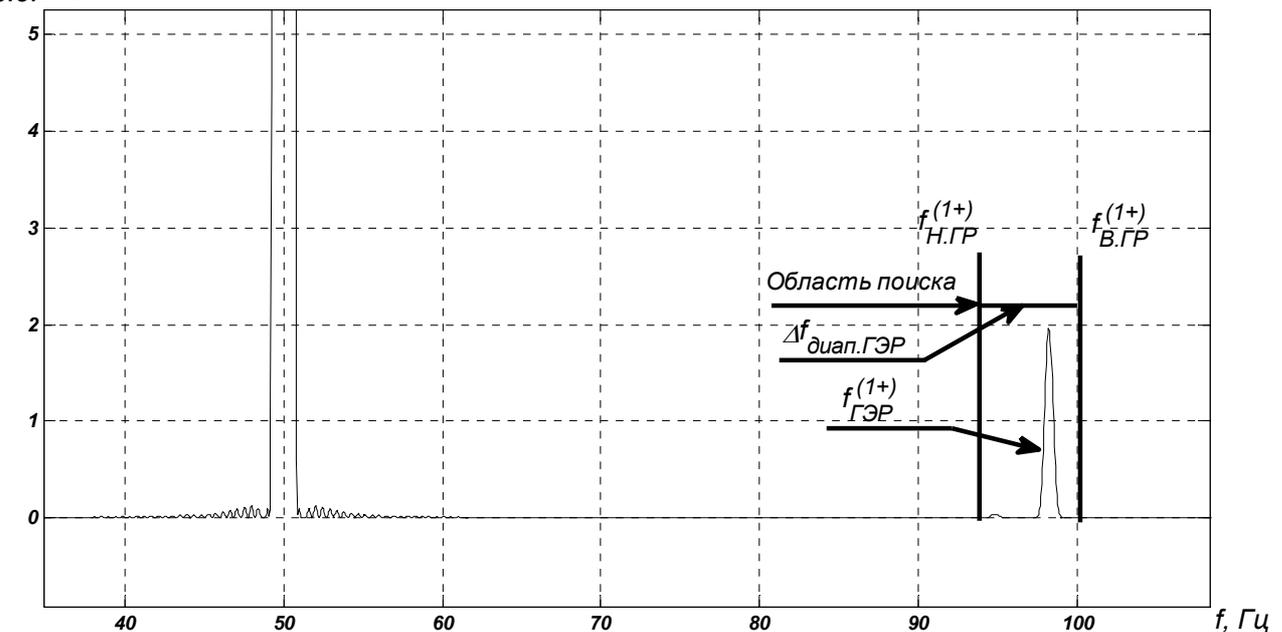
Методы определения скольжения по ЗГР и ГЭР основаны на анализе магнитного поля в воздушном зазоре двигателя.

$A, \text{ о.е. } \times 10^{12}$



а)

$A, \text{ о.е. } \times 10^{11}$



б)

Рис. 3. Области поиска гармонических составляющих сигнала: а – области поиска ЗГР; б – область поиска ГЭР

Частоты ЗГР можно определить по следующему выражению [10, 11]:

$$f_{\text{ЗГР}}^{(v\pm)} = v \frac{Z_p}{p} f_c (1-s) \pm f_c, \quad (1)$$

где Z_p – число стержней обмотки ротора; p – число пар полюсов; f_c – частота сети; s – скольжение; v – порядок гармоники.

Для ЗГР первого порядка формула (1) выглядит следующим образом:

$$f_{\text{ЗГР}}^{(1\pm)} = \frac{Z_p}{p} f_c (1-s) \pm f_c. \quad (2)$$

Определение нужной гармоники осуществляется в области поиска, при этом предполагается, что искомая гармоника имеет в данной области максимальную амплитуду A (рис. 3,а).

Зависимость длины области поиска ЗГР $\Delta f_{\text{диап.ЗГР}}$ от числа пар полюсов p и числа стержневой обмотки ротора Z_p асинхронного двигателя выглядит следующим образом:

$$\Delta f_{\text{диап.ЗГР}} = \frac{Z_p}{p} f_c \cdot 2s_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где $s_{\text{ном}}$ – номинальное значение скольжения.

Скольжение определяется следующим образом. Сначала по формулам (4), (5) рассчитывается его значение по гармоникам $f_{\text{ЗГР}}^{(1-)}$ и $f_{\text{ЗГР}}^{(1+)}$. Итоговое скольжение определяется как среднеарифметическое этих значений:

$$s_{\text{ЗГР}}^{(1-)} = 1 - \frac{f_{\text{ЗГР}}^{(1-)} + f_c}{f_c} \frac{p}{Z_p}; \quad (4)$$

$$s_{\text{ЗГР}}^{(1+)} = 1 - \frac{f_{\text{ЗГР}}^{(1+)} - f_c}{f_c} \frac{p}{Z_p}; \quad (5)$$

$$s = \frac{s_{\text{ЗГР}}^{(1+)} + s_{\text{ЗГР}}^{(1-)}}{2}. \quad (6)$$

Эксцентриситет ротора бывает статическим и динамическим, однако в реальных двигателях всегда присутствуют оба вида эксцентри-

ситета, что является причиной появления во временном спектре магнитного поля воздушного зазора ГЭР первого порядка. Частоты данных гармоник для двигателей с числом пар полюсов, большим 1, определяются по формуле [10]

$$f_{\text{ГЭР}}^{(\pm)} = f_c \left(1 \pm \frac{(1-s)}{p} \right) = f_c \pm f_p, \quad (7)$$

где f_p – частота вращения ротора.

Для двигателей с одной парой полюсов присутствует только гармоника $f_{\text{ГЭР}}^{(+)}$.

Методика определения нужной ГЭР первого порядка аналогична методике определения гармоник ЗГР с учетом длины области поиска ГЭР $\Delta f_{\text{диап.ГЭР}}$ (рис. 3,б).

Результаты измерений значений скольжения с помощью указанных выше четырех способов приведены в табл. 1, 2.

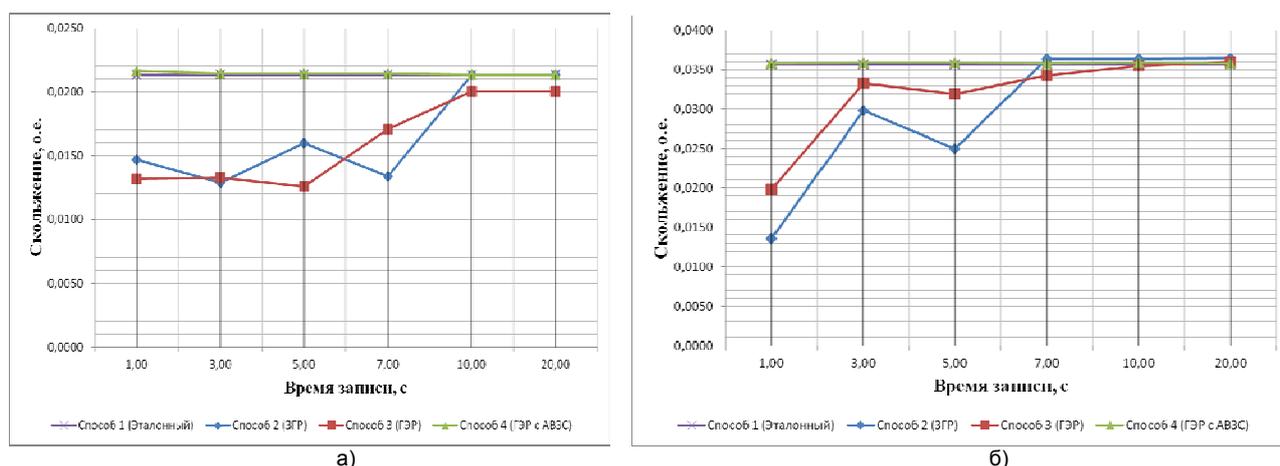
Для наглядного представления данные табл. 1, 2 представлены в графическом виде (рис. 4).

Таблица 1. Значения скольжения и частоты вращения при нагрузке $0,5 P_{\text{ном}}$

Способы	Параметры	Время записи сигнала, с					
		20	10	7	5	3	1
Способ 1 (Эталонный)	Частота вращения ротора, об/мин	2936±1,5					
	Скольжение, о.е	0,0213±0,0017					
Способ 2 (ЗГР)	Частота вращения ротора, об/мин	2936,2	2936,1	2959,9	2952,8	2961,1	2955,9
	Скольжение, о.е	0,0213	0,0213	0,0134	0,016	0,0129	0,0147
Способ 3 (ГЭР)	Частота вращения ротора, об/мин	2940,1	2940,1	2949,5	2962,1	2960,8	2960,3
	Скольжение, о.е	0,02	0,02	0,0171	0,0126	0,0133	0,0132
Способ 4 (ГЭР с АВЗС)	Частота вращения ротора, об/мин	2935,9	2935,9	2935,9	2936	2936	2935,3
	Скольжение, о.е	0,0213	0,0213	0,0214	0,0214	0,0214	0,0216

Таблица 2. Значения скольжения и частоты вращения при нагрузке $P_{\text{ном}}$

Способы	Параметры	Время записи сигнала, с					
		20	10	7	5	3	1
Способ 1 (Эталонный)	Частота вращения ротора, об/мин	2891±1,5					
	Скольжение, о.е	0,0357±0,0014					
Способ 2 (ЗГР)	Частота вращения ротора, об/мин	2890,8	2890,7	2890,9	2924,8	2910,6	2959,2
	Скольжение, о.е	0,0365	0,0364	0,0364	0,0250	0,0298	0,0136
Способ 3 (ГЭР)	Частота вращения ротора, об/мин	2889,9	2891,5	2897,1	2903,9	2900	2940,5
	Скольжение, о.е	0,0360	0,0355	0,0343	0,0320	0,0333	0,0198
Способ 4 (ГЭР с АВЗС)	Частота вращения ротора, об/мин	2890,6	2890,4	2890,5	2890,4	2890,4	2890,6
	Скольжение, о.е	0,0358	0,0359	0,0358	0,0359	0,0359	0,0358

Рис. 4. Определение частоты вращения ротора: при нагрузке $0,5 P_{ном}$ (а), при нагрузке $P_{ном}$ (б)

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Уменьшение времени записи приводит к заметному снижению точности определения скольжения и частоты вращения ротора по ЗГР и ГЭР без применения алгоритма АВЗС. Данный факт особенно заметен при длительностях времени записи сигнала, не превышающих 10 с. Значения погрешностей определения указанных выше параметров значительно превосходят значения инструментальных погрешностей, обусловленные погрешностями измерительных приборов.

2. Уменьшение времени записи вплоть до 1 с не оказало значительного влияния на результат измерения при определении скольжения и частоты вращения ротора по ГЭР с применением алгоритма АВЗС. Значения погрешностей определения указанных выше параметров не превышают значения инструментальных погрешностей.

Заключение

Таким образом, применение алгоритма АВЗС позволяет снизить время записи сигнала без потери его информативности для последующего спектрального анализа. Это было подтверждено экспериментально на основе анализа значений скольжений, полученных различными способами.

Список литературы

1. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
2. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.
3. Петухов В.С. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 1(49). – С. 50–52.
4. Thomson W.T. On-Line Motor Current Signature Analysis Prevents Premature Failure of Large Induction Motor Drives // Maintenance & asset management. – 2009. – No 3. – P. 30–35.

5. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля // А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденев и др. // Вестник АлтГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9–13.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

7. Разработка метода автокоррекции времени записи при спектральном анализе сигналов / С.Н. Литвинов, А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, Е.М. Новоселов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 29–37.

8. Пат. 2441249 Российская Федерация МПК⁶ G 01 R 31/34. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя / А.Ф. Скоробогатов, Н.А. Морозов, А.Н. Назарычев, Д.С. Балин, Е.М. Новоселов, А.А. Скоробогатов. Оpubл. 27.01.2012, Бюл. № 34.

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

10. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах: пер. с англ. / под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

References

1. Barkov, A.V., Barkova, N.A. *Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii* [Vibration diagnostics of electric motors and equipment. Vibration analysis]. Saint-Petersburg, SPbGMTU, 2004. 156 p.
2. Petukhov, V.S., Sokolov, V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelay. Metod spektral'nogo analiza potreblaemogo toka [Electric motor condition diagnostics. Consumption current spectral analysis method]. *Novosti ElektroTehniki*, 2005, no. 1(31), pp. 50–52.
3. Petukhov, V.S. Spektral'nyy analiz moduley vektorov Parka toka i napryazheniya [Spectral analysis of Park's vector modules of current and voltage]. *Novosti ElektroTehniki*, 2008, no. 1(49), pp. 50–52.
4. Thomson, W.T. On-Line Motor Current Signature Analysis Prevents Premature Failure of Large Induction Motor Drives. *Maintenance & asset management*, 2009, no. 3, pp. 30–35.
5. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy O.V., Vedenev, V.N. Diagnostika i prognozirovanie sostoyaniya asinkhronnykh dvigateley na osnove ispol'zovaniya parametrov ikh vneshnego elektromagnitnogo polya [Diagnostics and forecasting of induction motors condition on the basis of their external electromagnetic field parameters analysis]. *Vestnik AltGTU*, 2006, no. 2, pp. 9–13.
6. Sergienko, A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Signal digital processing]. Saint-Petersburg, Piter, 2003. 604 p.
7. Litvinov, S.N., Nazarychev, A.N., Skorobogotov, A.A., Novoselov, E.M. *Razrabotka metoda avtokorreksii vremeni*

zapisi pri spektral'nom analize signalov [Development of recording time autocorrection method in signals spectral analysis]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 29–37.

8. Skorobogatov, A.F., Morozov, N.A., Nazarychev, A.N., Balin, D.S., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A. *Sposob opredeleniya skol'zheniya rotora asinkhronnogo elektrodvigatelya* [Method of determining induction motor slip]. Patent RF, no. 2441249, 2012.

9. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Glotova, N.V., Skorobogatov, A.A. *Analiz primeneniya garmonik dinamicheskogo ekstsentrizmeta rotora dlya kontrolya skol'zheniya*

elektrodvigatelya [Analysis of rotor dynamic eccentricity harmonics application to motor slip control]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [ISPEU collected works «Improving the efficiency of power systems»]. Moscow, Energoatomizdat, 2009, issue IX, pp. 260–266.

10. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Highest harmonics in asynchronous machines]. Moscow, Energiya, 1981. 352 p.

11. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric motors]. Moscow, Energiya, 1980. 928 p.

Скоробогатов Андрей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,

телефон (4932) 26-99-78,

e-mail: askor.20@yandex.ru

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

Новоселов Евгений Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,

телефон (4932) 26-99-78,

e-mail: captain.udgin@gmail.com

Мочалов Сергей Борисович,

Ивановский филиал ОАО ТГК-6 «Ивановская ТЭЦ-2»,
заместитель начальника электроцеха по эксплуатации,

e-mail: s.mochalov@ies-holding.com