

УДК 621.313.3

Александр Николаевич Назарычев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: nazarychev@mail.ru

Денис Андреевич Полкошников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: pda37@yandex.ru

Александр Станиславович Страхов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Евгений Михайлович Новоселов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Михаил Алексеевич Захаров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, e-mail: mazoid@gmail.com

Андрей Александрович Скоробогатов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Исследование сигнала внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя в режиме выбега

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время одной из важных научных задач является разработка и совершенствование методов неразрушающего контроля асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации. Одним из перспективных направлений диагностики является использование сигнала внешнего магнитного поля, однако его исследованию в режиме выбега авторами научных публикаций не уделяется должного внимания, несмотря на ряд преимуществ данного сигнала. В связи с этим цель работы, заключающаяся в подтверждении возможности регистрации и исследования сигнала индукции радиальной составляющей внешнего магнитного поля в режиме выбега асинхронного двигателя, является актуальной.

Материалы и методы. Исследования проведены на нескольких экспериментальных стендах, на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателях и на имитационной модели асинхронного электродвигателя, выполненной в программном комплексе Ansys. Для обработки сигналов, а именно построения частотно-временных спектров внешнего магнитного поля в режиме выбега, использована программа на основе оконного преобразования Фурье с применением в качестве оконной функции окна Флэттоп для более точного определения амплитуд гармонических составляющих.

Результаты. В ходе проведенных исследований на экспериментальных стендах установлено, что внешнее магнитное поле двигателя в режиме выбега будет существовать вследствие явления остаточной намагниченности. Доказана возможность моделирования асинхронных двигателей с учетом остаточной намагниченности и подтверждена достоверность полученной модели. Представлены спектры сигналов внешнего магнитного поля на реальных двигателях и имитационных моделях в режиме выбега.

Выводы. Сигнал внешнего магнитного поля в режиме выбега может быть зарегистрирован как на имитационных моделях, так и на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных электродвигателях. В ходе дальнейших исследований планируется проанализировать возможность выявления неисправностей асинхронных двигателей с помощью данного сигнала.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, внешнее магнитное поле, режим выбега, датчик Холла, имитационное моделирование

Alexander Nikolaevich Nazarychev

Saint Petersburg Mining University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electrical Power Engineering and Electrical Mechanics Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: nazarythev@mail.ru

Denis Andreevich Polkoshnikov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electrical Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pda37@yandex.ru

Alexander Stanislavovich Strakhov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: astra-khov90@yandex.ru

Evgeny Mikhailovich Novoselov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Michael Alekseevich Zakharov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mazoid@gmail.com

Andrey Alexandrovich Skorobogatov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Study of the external magnetic field signal of an asynchronous electric motor in run-down mode

Abstract

Background. Currently, one of the important scientific tasks is the development and improvement of methods for non-destructive testing of asynchronous electric motors during operation. One of the promising areas of diagnostics is the use of an external magnetic field signal. However, its study in the run-down mode is not given due attention by the authors of scientific publications, despite a number of advantages of this signal. Therefore, the aim of this research is to confirm the possibility to record and study the signal of the radial component of the induction of the external magnetic field in the run-down mode of an asynchronous motor. So, the aim is relevant.

Materials and methods. The research is carried out using several test benches, real low-voltage and high-voltage asynchronous motors and a simulation model of an asynchronous electric motor designed in the Ansys software package. To process the signals, namely, to construct the frequency-time spectra of the external magnetic field in the run-down mode, the authors have used a program based on the Short Time Fourier Transform using the Flat-top window as a window function to more accurately determine the amplitudes of the harmonic components.

Results. During the research conducted on test benches, it has been found that the external magnetic field of the motor in the run-down mode will exist due to the phenomenon of residual magnetization. The possibility of modeling asynchronous motors considering residual magnetization has been proven and the reliability of the resulting model has been confirmed. The spectra of external magnetic field signals on real motors and simulation models in the run-down mode are presented.

Conclusions. The external magnetic field signal in the run-down mode can be recorded both on simulation models and on real low-voltage and high-voltage asynchronous electric motors. During further research, it is planned to analyze the possibility of identifying faults in asynchronous motors using this signal.

Key words: asynchronous motor, external magnetic field, run-down mode, Hall sensor, simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.046-054

Состояние вопроса. Одним из актуальных вопросов современной электроэнергетики и электротехники является повышение надежности функционирования

асинхронных двигателей (АД), которые являются приводами многих ответственных механизмов в различных отраслях промышленности. В связи с этим большое внимание

уделяется разработке новых и совершенствованию уже существующих методов контроля технического состояния узлов АД в процессе эксплуатации.

Одним из современных направлений контроля технического состояния является анализ внешнего магнитного поля (ВМП) АД (на корпусе). При этом в существующих публикациях, в том числе в работах авторов статьи, рассматриваются вопросы применения в целях диагностики сигналов индукции ВМП как в установившемся режиме работы [1–7], так и при пуске АД [8]. При этом исследованию режима выбега в целях контроля состояния АД не уделяется должного внимания, хотя в ряде работ исследуется возможность применения иных сигналов в режиме выбега [9, 10]. Проведение контроля в режиме выбега имеет ряд неоспоримых преимуществ, связанных с тем, что двигатель отключен от сети. К ним можно отнести отсутствие помех от полей, наводимых током статора на работающем АД, возможность контроля состояния АД без подключения рабочей машины, а также большую безопасность проведения контроля по сравнению с установившимся и особенно пусковым режимом.

Возможность регистрации ВМП в режиме выбега при отключенном АД обусловлена явлением остаточной намагниченности. Поскольку для любого магнитного материала, в том числе электротехнической стали, характерно явление гистерезиса, даже при снятии напряжения с обмотки статора и равенстве тока статора нулю поле двигателя может существовать.

В связи с вышесказанным, целью нашего исследования является подтверждение возможности регистрации и исследования сигнала ВМП в режиме выбега АД. При этом для проведения дальнейших исследований необходимо доказать возможность как моделирования сигнала ВМП в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности в специализированном программном комплексе Ansys, так и регистрации этого сигнала на реальных низковольтных и высоковольтных асинхронных электродвигателях.

Материалы и методы. План исследований был разделен на три отдельных этапа. Первоначально были произведены исследования на двух специальных экспериментальных установках, представленных на рис. 1 и 3 для доказательства влияния остаточной намагниченности на ВМП АД.

В ходе первого эксперимента (рис. 1) два одинаковых АД типа АИР71А6 напряжением 380 В, мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов были соединены друг с другом, при этом один из них подключен к сети переменного напряжения (АД №1). Регистрация индукции радиальной составляющей ВМП осуществлялась с помощью датчика Холла 1, в качестве АЦП использовалась полупрофессиональная звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 2, запись осуществлялась на ноутбук 3, где и производилась обработка результатов эксперимента. Регистрация ВМП осуществлялась в нескольких точках, отмеченных на рис. 2, расстояния измерялись с помощью линейки 4. Основной целью данного эксперимента являлось доказательство увеличения индукции ВМП на корпусе АД №2, ротор которого вращается от АД №1, но при этом отключен от сети.

Во втором эксперименте (рис. 3) ротор АД №2, отключенного от сети, вращался от руки. В данном случае производилась регистрация не только ВМП с помощью датчика Холла (ДХ), но и внутреннего магнитного поля в воздушном зазоре с помощью внутреннего индуктивного датчика (ВИД), который представляет собой два витка провода, намотанного на один из зубцов статора. Целью эксперимента являлось доказательство того, что ВМП не наводится от соседнего электродвигателя АД №1, а возникает именно вследствие явления остаточной намагниченности.

Далее были произведены исследования на имитационной модели АД АИР 71А6 (рис. 4). Основной целью которых было воссоздание сигнала индукции ВМП в режиме выбега. Модель выполнена в программном комплексе Ansys, расчет ВМП осуществлялся на основе метода конечных элементов. Первоначально двигатель в течение 6 секунд работал в установившемся режиме, после чего моделировался режим выбега. Для моделирования явления остаточной намагниченности была задана петля гистерезиса для используемой в АД стали.

Наконец, после проведения исследования на моделях были зарегистрированы сигналы на АИР71А6 в режиме выбега на экспериментальном стенде, а также на нескольких АД на электрических станциях, являющихся приводами дымососов и дутьевых вентиляторов, для доказательства возможности регистрации сигнала ВМП на реальных двигателях. Измерение индукции

ВМП осуществлялось так же, как и в описанных выше экспериментах. Также для более детального исследования были построены частотно-временные спектры (ЧВС) сигналов в режиме выбега. Для их получения использовалась программа,

разработанная в программном комплексе Matlab на основе оконного преобразования Фурье с использованием в качестве оконной функции окна Флэттоп, чтобы можно было более точно оценить амплитуды гармоник в сигналах ВМП.

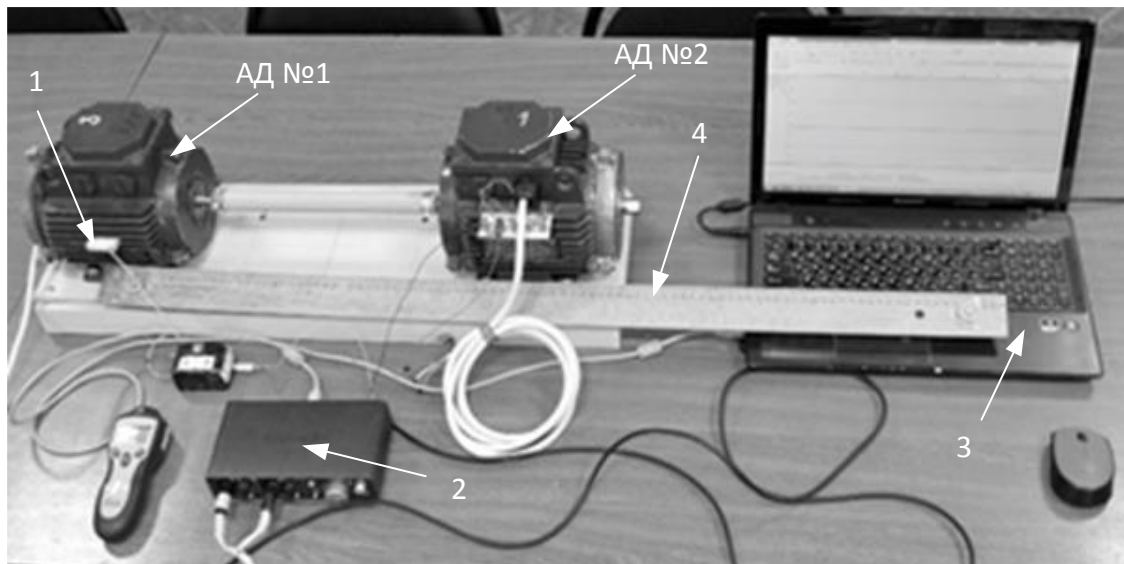


Рис. 1. Фотография первого экспериментального стенда для доказательства влияния остаточной намагниченности на сигнал ВМП АД типа АИР 71А6

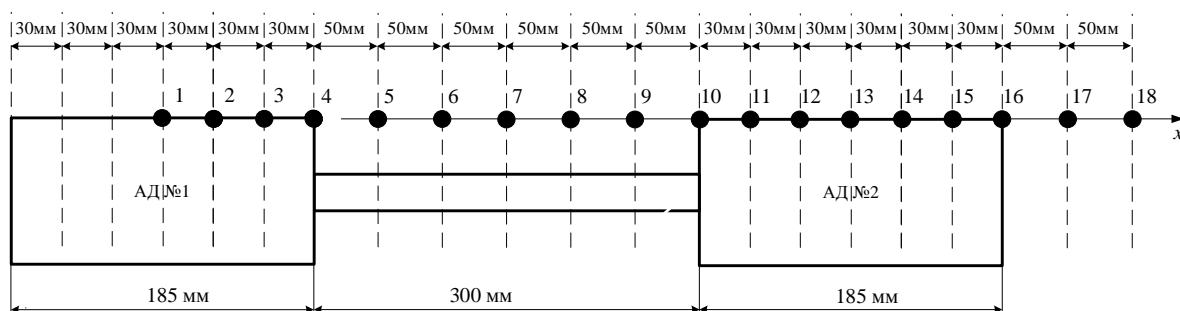


Рис. 2. Точки измерения магнитного поля в ходе первого эксперимента

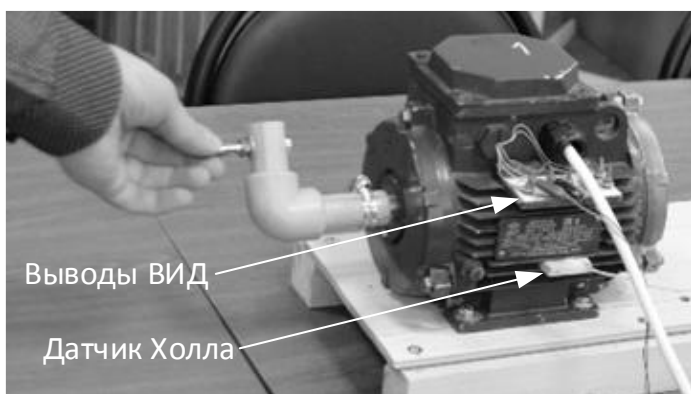


Рис. 3. Фотография второго экспериментального стенда для доказательства влияния остаточной намагниченности на магнитное поле АД типа АИР 71А6

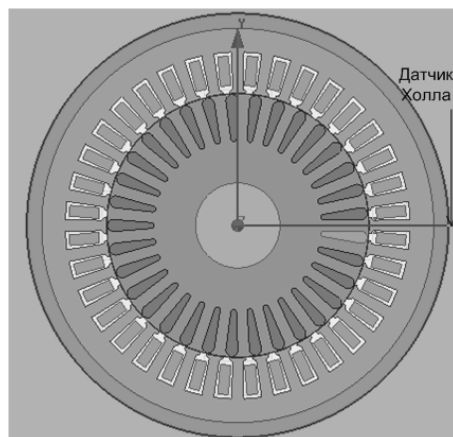


Рис. 4. Компьютерная модель АД типа АИР 71А6

Результаты. Результаты первого эксперимента на двух соединенных электродвигателях, а именно значения индукции магнитного поля в рассматриваемых 18 точках (см. рис. 2), представлены в таблице и на рис. 5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Наибольшие значения индукции получаются на корпусе АД №1 (точки 1–4), на который подается напряжение, при удалении от него индукция становится практически равной нулю. Однако на корпусе АД №2 значение индукции также возрастает, хотя он и не подключен к сети. Это подтверждает тот факт, что источником внешнего магнитного поля является остаточная намагниченность АД и она может быть зарегистрирована с помощью датчика Холла.

Результаты второго эксперимента представлены на рис. 6. Был произведен анализ внутреннего магнитного поля по сигналу, зарегистрированному с помощью ВИД, и индукции ВМП по сигналу с датчика

Холла. Анализ полученных результатов (рис. 6) показывает, что для АД, находящегося в состоянии покоя, индукция внутреннего и внешнего магнитных полей значительно ниже по сравнению с вращающимся ротором АД. Это подтверждает тот факт, что источником магнитного поля является именно остаточная индукция сердечника ротора самого АД.

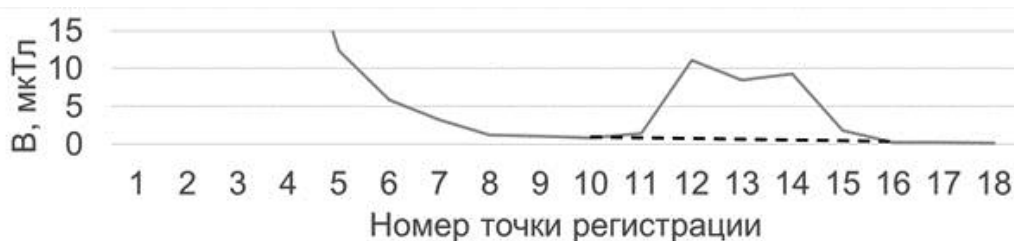
После этого были проанализированы ЧВС сигнала ВМП на асинхронном двигателе типа АИР71А6 и на его имитационной модели в программном комплексе Ansys с учетом остаточной намагниченности. Полученные спектры ВМП представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Амплитуды гармоник можно оценить по представленной справа цветовой шкале. Анализ полученных результатов показывает, что как на математической модели, так и на реальном двигателе в спектре можно отчетливо увидеть основную гармонику сигнала, частота которой в процессе выбега определяется скоростью вращения асинхронного электродвигателя.

Значения индукции магнитного поля в указанных на рис. 2 точках

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Индукция магнитного поля, мкТл	1292	1922	193,2	33,12	12,38	5,86	3,29	1,22	1,12
Номер точки	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Индукция магнитного поля, мкТл	0,84	1,45	11,14	8,51	9,35	1,8	0,27	0,24	0,2



а)

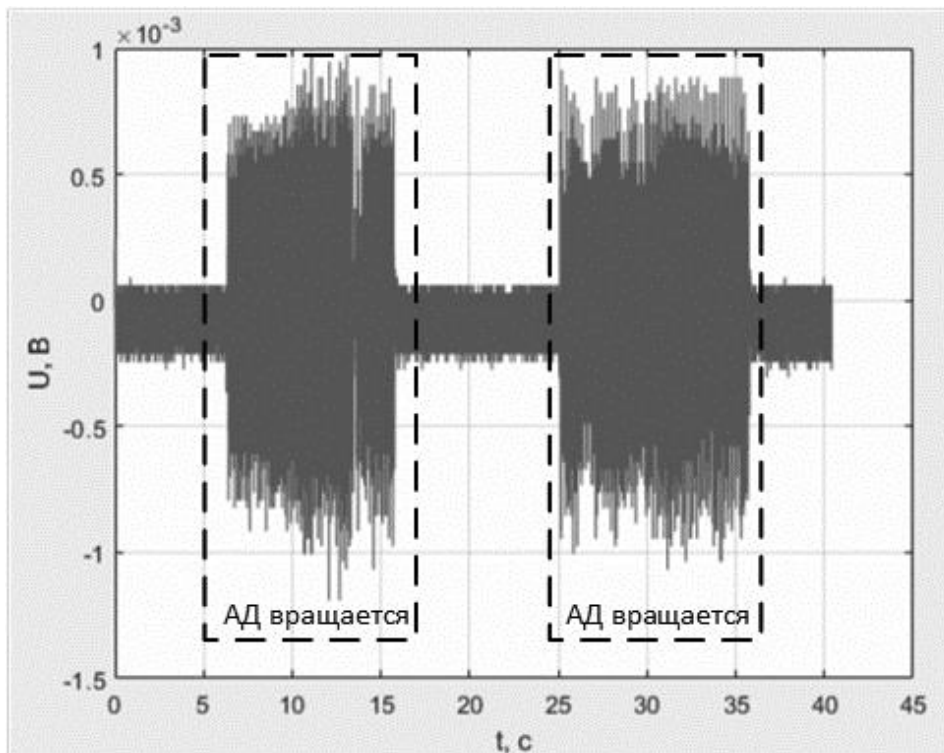


б)

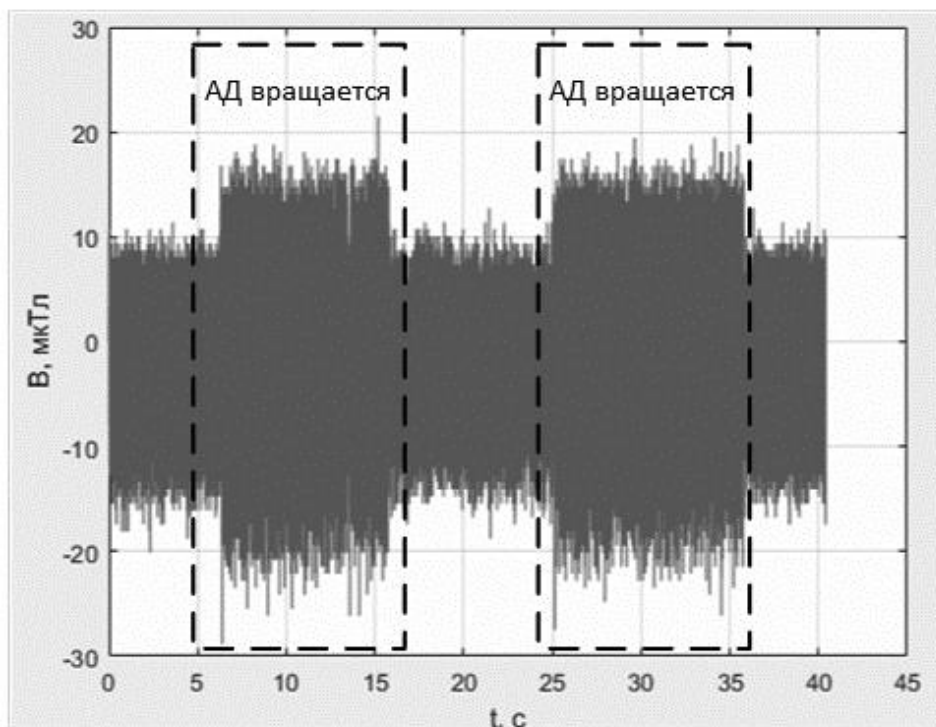
Рис. 5. Значения индукции ВМП в исследуемых точках (см. рис. 2) в ходе первого эксперимента: а – в диапазоне от 0 до 2000 мкТл; б – в диапазоне от 0 до 15 мкТл (участок 1)

Сопоставляя спектры на реальном двигателе и его модели, можно сказать, что они с достаточной точностью соответствуют друг другу как по величине амплитуды ос-

новой гармоники сигнала, так и по изменению ее частоты, что подтверждает корректность разработанной модели с учетом остаточной намагниченности.



а)



б)

Рис. 6. Результаты второго эксперимента (при вращении ротора АД рукой): а – сигнал с ВИД; б – сигнал с датчика Холла

На рис. 9 приведен пример ЧВС одного из сигналов ВМП в режиме выбега, снятого на высоковольтном АД типа ДАМСО-15-12-8, который является приводом дымососа на теплоэлектростанции. В ходе анализа спектра можно увидеть две области. В начале выбега (рис. 9, участок 2) характерны высокие значения ам-

плитуды ВМП, поскольку ток в обмотке ротора мощных высоковольтных электродвигателей на этом интервале еще не успевает полностью затухнуть. После этого наличие ВМП обусловлено уже только явлением остаточной намагниченности и практически не изменяется с течением времени (рис. 9, участок 1).

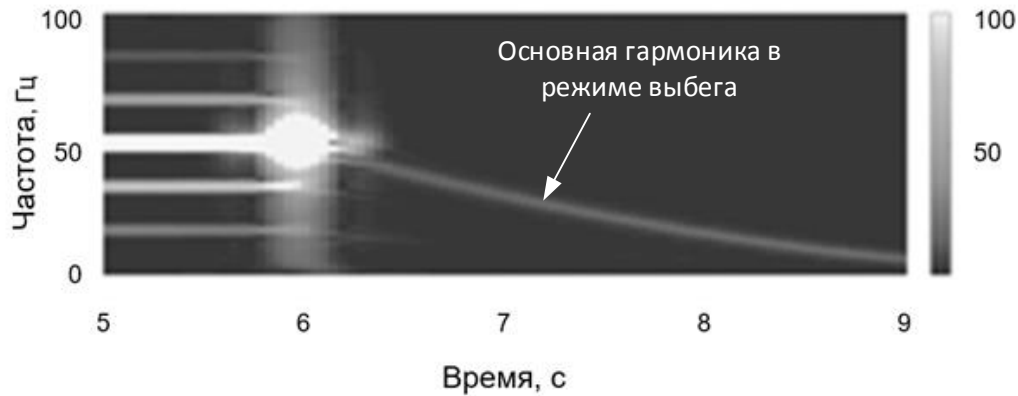


Рис. 7. ЧВС ВМП АД типа АИР71А6 в режиме выбега

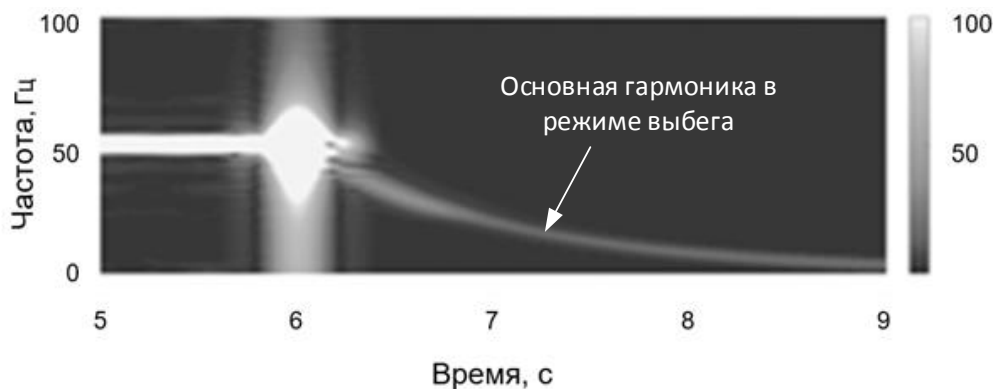


Рис. 8. ЧВС ВМП имитационной модели АД типа АИР71А6 в режиме выбега

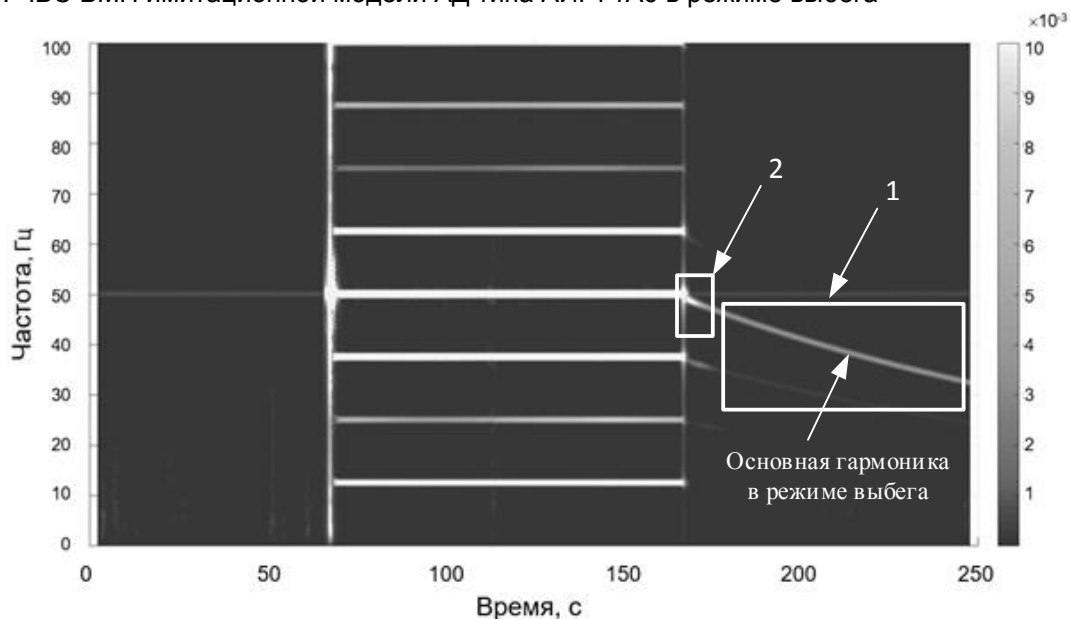


Рис. 9. ЧВС ВМП высоковольтного АД типа ДАМСО-15-12-8

Анализируя спектры реальных электродвигателей, приведенные на рис. 7 и 9, можно заметить, что на них проявляется не только основная гармоника сигнала, но и еще ряд гармонических составляющих, которые могут быть обусловлены неисправностью электродвигателя, например динамическим эксцентриситетом. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности использования сигнала выбега в целях диагностики электродвигателей и о необходимости проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Выводы. В ходе исследования доказана возможность регистрации и исследования сигнала ВМП АД в режиме выбега, который обусловлен явлением остаточной намагниченности, также подтверждена возможность моделирования АД с учетом остаточной намагниченности для анализа сигналов в режиме выбега. При этом подтверждена корректность разработанной модели.

Сделан вывод о том, что сигнал ВМП пригоден для анализа на основе оконного преобразования Фурье, что подтверждает возможность проведения дальнейших исследований в целях разработки методов контроля неисправностей АД в режиме выбега по ВМП, например выявления повреждений обмотки ротора или повышенного динамического эксцентриситета.

Список литературы

1. **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.
2. **Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О.** Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2(22). – С. 61–69.
3. **Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н.** Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 80–89.
4. **Оценка** возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.

5. **Chernyavska I., OndĚej V.** Analysis of Broken Rotor Bar Fault in a Squirrel Cage Induction Motor by Means of Stator Current and Stray Flux Measurement // International Power Electronics and Motion Control Conference. – Varna, Bulgaria, 2016. – P. 532–537.

6. **An improved** 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady state / E. Devillers, J. Le Besnerais, T. Lubin, et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – P. 1–12.

7. **Finite** element analysis and experimental study of the nearmagnetic field for detection of rotor faults in induction motors / V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, A. Ceban // Progress in Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 50. – P. 37–59.

8. **Экспериментальное** определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

9. **Потапенко А.О., Юсупова А.О., Латыпов С.И.** Способ диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в режиме выбега // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 62–70.

10. **Чупров И.И., Суворов И.Ф.** Диагностика и прогнозирование технического состояния асинхронного электрического двигателя по напряжению выбега // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: материалы I Всерос. заоч. науч.-практ. конф. – Чита, 2018. – С. 75–79.

References

1. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy, O.V., Vedenev, V.N., Tonkikh, V.G., Khomutov, S.O. *Vestnik AltGTU*, 2006, no. 2, pp. 9–13.
2. Luk'yanov, A.V., Mukhachev, Yu.S., Bel'skiy, I.O. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 2(22), pp. 61–69.
3. Pyrko, S.A., Mitioglo, A.M., Ishmet'ev, E.N. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 80–89.
4. Novoselov, E.M., Savel'ev, V.A., Skorobogatov, A.A., Strakhov, A.S., Sulynenkov, I.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 3, pp. 38–46.
5. Chernyavska, I., OndĚej, V. Analysis of Broken Rotor Bar Fault in a Squirrel Cage Induction Motor by Means of Stator Current and Stray Flux Measurement. *International Power Electronics and Motion Control Conference*. Varna, Bulgaria, 2016, pp. 532–537.
6. Devillers, E., Le Besnerais, J., Lubin, T., Hecquet, M., Lecointe, J. An improved 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady

state. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2018, vol. 54, issue 2, pp. 1–12.

7. Fireteanu, V., Romary, R., Pusca, R., Ceban, A. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, vol. 50, pp. 37–59.

8. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Pugachev, A.A. *Defektoskopiya*, 2020, no. 5, pp. 3–11.

9. Potapenko, A.O., Yusupova, A.O., Latypov, S.I. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 62–70.

10. Chuprov, I.I., Suvorov, I.F. Diagnostika i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnogo elektricheskogo dvigatelya po napryazheniyu vybega [Diagnostics and prediction of the technical condition of an asynchronous electric motor based on run-out voltage]. *Materialy I Vserossiyskoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki»* [Proceedings of the I All-Russian virtual scientific-practical conference “Science and Education: current research and development”], 2018, pp. 75–79.