

Поступила в редакцию 26.11.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_52

УДК 621.313.8

М.Ю. Петушков, С.С. Холодилов

НАХОЖДЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПО ЛИНЕЙНОМУ ТОКУ

Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова
Магнитогорск, Россия

Рассмотрены типичные неисправности магнитной системы синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ): разрушение магнитов, трещины, сколы, изменение геометрии ротора, падение коэрцитивной силы и др., оставляющие свой «след» на спектральной характеристике линейного тока. Предложен метод сигнатурного анализа для обработки данных спектрального анализа. Сделан вывод о возможностях системы токовой диагностики СДПМ на основе сигнатурного анализа для предупреждения неисправностей и выхода его из строя.

Ключевые слова: синхронный генератор на постоянных магнитах, токовая диагностика, дефекты, магнитная система, сигнатурный анализ, спектральный анализ.

I. Введение

В настоящее время синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) применяются в различных отраслях техники, от микромоделей, до электротранспорта, авиации, сервоприводов и др. [1]. Широкое распространение СДПМ получили благодаря многим свойствам, в том числе – применяемым в них высококоэрцитивным магнитам. Способы крепления магнитов и их свойства обуславливают возможные неисправности СДПМ. Их поиск в режиме функциональной диагностики при нормальной эксплуатации привода возможен путем снятия спектральных характеристик линейного тока [2-4]. Анализ данных тока целесообразно выполнять методом сигнатурного анализа [5, 6]. Магниты могут быть приклеены, прикручены при помощи держателей, заключены в оболочку их стекловолокна, вставлены в пазы и др. В результате вибраций, радиальных колебаний ротора различных порядков, ударных нагрузок магниты смещаются, поворачиваются вокруг оси, трескаются. При попадании металлической стружки и накоплении ее на роторе могут происходить соприкос-

новения со статором с образованием сколов на магнитах. В роторах с применением стекловолокна данные проблемы частично решены, однако такие конструкции используют в вибронгруженных системах, в системах с высокими оборотами ротора. Любое смещение магнитов ротора приводит к дисбалансу, появлению вибрации, вплоть до разрушения ротора. Оперативный контроль формы и спектра магнитного поля позволит предупредить выходы из строя [7-9].

II. Сигнатурный анализ спектра тока СДПМ

Современные исследования в области СДПМ направлены в основном на поиски оптимальных алгоритмов управления. Анализ данных алгоритмов показал, что в абсолютном большинстве они не учитывают дефекты магнитной системы и рассматривают ее как целостную систему с определенными характеристиками. Основой принципа получения данных с двигателя является анализ систем управления, режимов работы, со ссылкой на принципы диагностики. Как датчиковые, так и бездатчиковые системы управления имеют датчики тока и напряжения. Наблюдатель получает эти данные для определения скорости, углового положения, момента сопротивления движению, электромагнитного момента и др., т.е., изначально ток в линии подвергается анализу. Следовательно, можно получить первичные данные о токе до интеграторов, фильтров и прочих элементов наблюдателя [10, 11].

Другим вариантом является анализ при помощи внешнего подключения к линии и получение данных из нее. Принципиально важной особенностью СДПМ является то, что при любом изменении частоты вращения ротора генерируется обратный ток [12]. Он обусловлен тем, что система управления достаточно точно выдерживает либо частоту вращения, либо момент, но, так или иначе, происходит частичное шунтирование цепи. Таким образом, решается задача сбора данных о токе.

Каждая неисправность двигателя (и не только она) «отпечатывается» на его спектральных характеристиках, дефекты магнитной системы не исключение. Такие дефекты магнитной системы как трещины магнитов, изменение их взаимного расположения, потеря коэрцитивной силы и т.д., неизбежно отражаются на спектральных характеристиках, что и служит отправной точкой диагностики. При моделировании в качестве интегральной характеристики достаточно рассмотреть спектр электромагнитной индукции по объему. Согласно закону Фарадея, ЭДС индукции является производной от магнитного потока, в тоже время магнитный поток является функцией модуля вектора магнитной индукции, взятой по объему. Следовательно, для анализа тока в линии, возникающего из-за шунтирования цепи и наведенной ЭДС, при моделировании достаточно рассмотреть спектр электромагнитной индукции по объему.

III. Результаты моделирования

Был проведен активный эксперимент в виде моделирования системы в программном пакете Elcut Профессиональный. Для эксперимента создана модель магнитной системы СДПМ Turnigy SK3530-1100 (рис. 1). В данном двигателе применены неодимовые магниты, конструкция с оброщенным ротором.

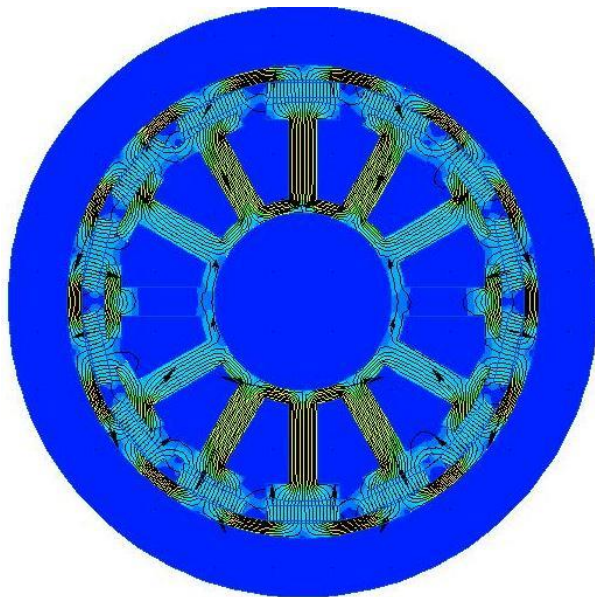


Рис. 1. Модель магнитной системы СДПМ Turnigy SK3530-1100, в пакете Elcut

Моделирование выполнялось с различными исходными параметрами по методу конечных элементов. В частности, было выполнено 512 итераций с поворотом магнитной системы по оси Z , с шагом $0,001745$ рад. Далее были внесены дефекты в магнитную систему и набор итераций повторен. В качестве считываемых данных использован интеграл магнитной индукции по объему статора. Статор был разделен на несколько законченных конструктивных элементов, для получения функции тока в катушках.

Полученные данные были подвергнуты анализу Фурье и получен спектр интегрального значения магнитной индукции. На рис. 2 представлен усеченный спектр с 10-й гармоникой интеграла индукции магнитного поля в магнитопроводе статора СПДМ по объему, полученный в результате моделирования и анализа Фурье.

В данном эксперименте была смоделирована трещина в постоянном магните шириной 0,01 мм в качестве минимального значения фактора. Подобный дефект, согласно предварительному анализу, вызывает возмущение спектральной характеристики в районе 54-й гармоники, в привязке к данному конкретному типу СДПМ. Исходя из этого, был выбран диапазон для анализа.

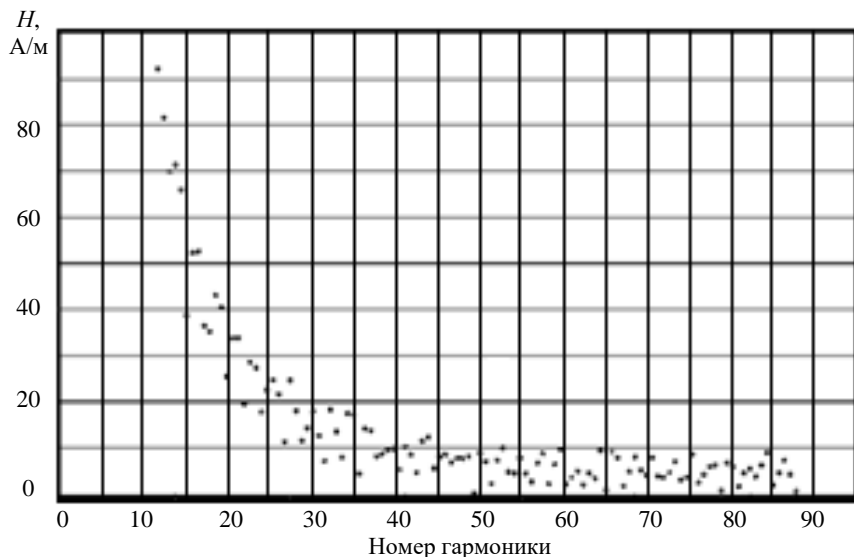


Рис. 2. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СДПМ по объему

На рис. 3 представлен спектр интеграла магнитной индукции участка статора по объему в системе без дефекта. Спектр представлен с 40-й гармоники. Как следует из рис. 3, спектр достаточно равномерный и будет использован именно для сравнения со спектром индукции в случае появления дефекта, который приведен на рис.4.

При взаимном сравнении данных выло выявлено возмущение спектра в диапазоне 42-й – 59-й гармоник. При сравнительном анализе выявлено существенное отклонение спектра в случае появления дефекта. Таким образом, подобная неисправность может быть выявлена и учтена при дальнейшей эксплуатации.

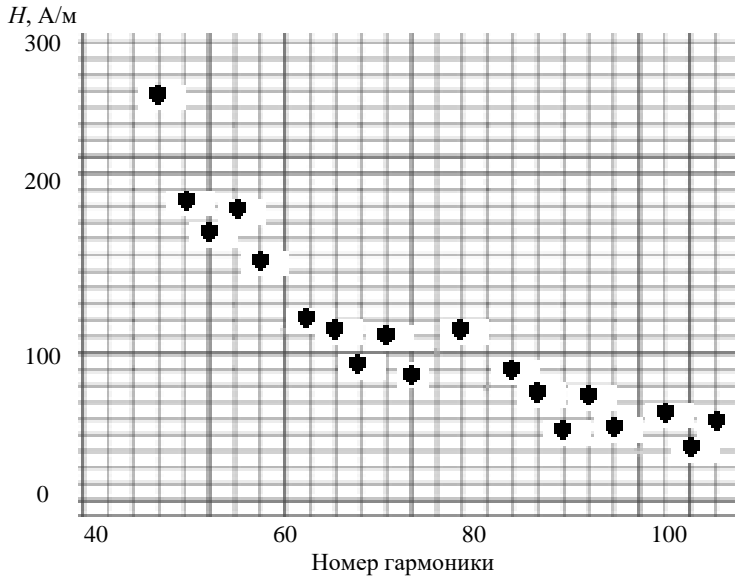


Рис. 3. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СПДМ по объему, без дефекта

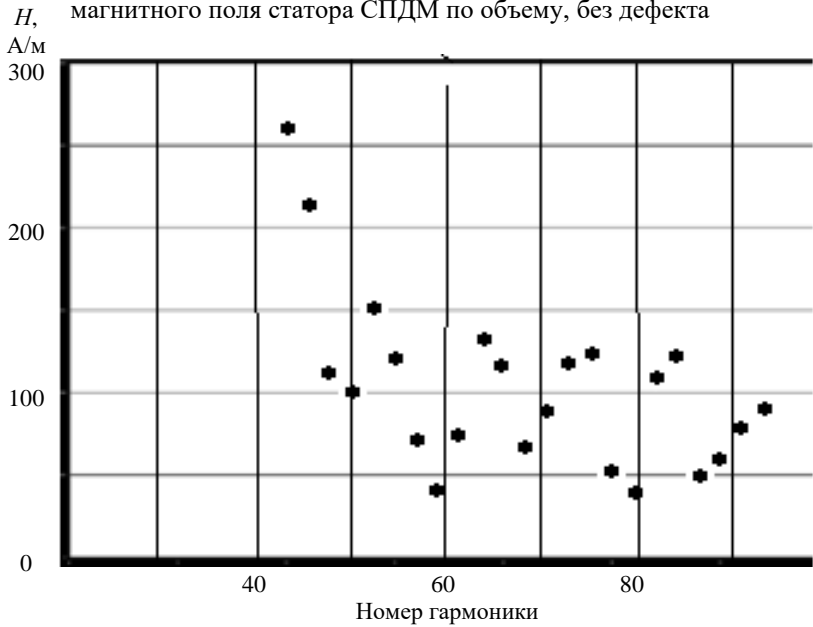


Рис. 4. Спектр интеграла индукции магнитного поля статора СПДМ по объему, с трещиной 0,01мм

Данный дефект незначителен для магнитной системы и рассматривается как предельный случай при планировании эксперимента. Такие дефекты, как трещины с большим зазором, повороты по оси, потеря коэрцитивной силы, вызовут значительно более сильные колебания спектра и, следовательно, могут быть выявлены данным методом.

Высокий номер гармоники и достаточно широкий гармонический состав обуславливают большое количество анализируемых данных. Для анализа большого количества данных наиболее эффективно использовать сигнатурный анализ. Сигнатурный анализ можно использовать как для методов тестовой диагностики, так и для методов функциональной диагностики, поскольку сокращается время для проведения диагностики оборудования и обнаружить дефект можно до наступления необратимых последствий [13, 14]. Для использования метода сигнатурного анализа первоначально снимают данные с исправного двигателя, составляют базу данных эталонных последовательностей и соответствующих сигнатур. Далее получают сигнатуры текущего состояния исследуемого двигателя, проводится анализ и программное обеспечение принимает решение о наличии или отсутствии определенного дефекта в электродвигателе [15].

IV. Заключение

Система токовой диагностики СДПМ на основе сигнатурного анализа позволит отслеживать характеристики привода без отрыва от производства, прогнозировать срок службы, выбирать оптимальные режимы эксплуатации, составить математические модели критических и некритических неисправностей СДПМ, оценить влияние методов управления СДПМ на его долговечность.

© Петушков М.Ю., 2020

© Холодилов С.С., 2020

Библиографический список

- [1] Петушков М.Ю., Холодилов С.С. Разработка системы диагностирования синхронных двигателей // 78-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Апрель 20–24, 2020, Магнитогорск, Россия. Тезисы докладов. Т.1. С. 317.
- [2] Petushkov M.U. Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. № 1. С. 1.
- [3] Kuptsov V.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method // Progress in Electromagnetics Research B. 2012. № 45. С. 269-290. DOI: 10.2528/PIERB12082916.

- [4] Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Современные методы диагностики и разработки асинхронных двигателей. Магнитогорск: МГТУ, 2010. – 247 с.
- [5] Завьялов А.С., Завьялов Е.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Использование сигнатурного анализа в диагностике электродвигателя постоянного тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 1 (22). С. 59-62.
- [6] ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. Введ. 2016-11-01. М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.
- [7] Осипов О.И., Агафонов А.Н. Техническая диагностика асинхронного двигателя // *Труды Московского энергетического института*. Т. 676. Электрический привод и системы управления. 2000. С. 22-29.
- [8] Смирнов В.И., Чернов Д.В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы // *Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика*. 2005. № 5. С. 52-56.
- [9] Осипов О.И., Агафонов А.Н., Агафонов С.Ю. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах // *Приборы и системы. Научные идеи В.А. Хубенко*. 1999. С. 81-84.
- [10] Cosmatov V., Petushkov M., Sarvarov A. Analysis of existing methods of diagnosis of electric motors and their development prospects // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Май 12-18, 2020, Сочи, Россия. С. 911. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030.
- [11] Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Токовая диагностика как метод контроля технического состояния асинхронных двигателей // *Иновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях*, Март 23-26, 2010, Челябинск, Россия. С. 82-86.
- [12] Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных моторов в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля, 2009.
- [13] Федоров О.В., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Электромагнитная совместимость пусковых устройств электроприводов переменного тока с питающей сетью // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2015. № 4. С. 17-19.
- [14] Белоусов О.С., Щербина Д.В., Петушков М.Ю. Проблемы эксплуатации современных электротехнических систем на установках холодной прокатки и горячей прокатки с оцинкованным покрытием // *Системы автоматизации и управления машиностроением*. 2014. С. 1-4.
- [15] Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Пути решения проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода в металлургической промышленности. *Интеллектуальная электротехника*. 2019. № 3. С. 60-74. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_3_60.

M.Yu. Petushkov, S.S. Kholodilov

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FAULT FINDING BY LINEAR CURRENT

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia

Abstract. Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in different branches of engineering. Applying the diagnostics of PMSM on the basis of current data analysis will allow to reveal faults of magnetic system and to prevent motor failure. Typical defects of the PMSM magnetic system can include: the destruction of magnets, cracks, chips, changes in rotor geometry, the fall of coercive force, etc., leaving their "trace" on the spectral characteristics of the linear current. Signature analysis is one of the methods for data processing of the spectral analysis of the current. It is possible to detect changes in the PMSM magnetic system and prevent its failure and destruction by comparing the current forms of signatures with signatures from the database characterizing the listed types of faults.

Keywords: current diagnostics, defects, magnetic system, permanent magnet synchronous machine, signature analysis, spectral analysis.

References

- [1] M.Yu. Petushkov and S.S. Kholodilov, "Razrabotka sistemy diagnostirovaniya sinhronnyh dvigatelej [Development of a diagnostic system for synchronous motors]", in proc. 78th int. scien. and tech. conf. "Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya [Actual problems of modern science, technology and education]", Apr. 20-24, 2010, Magnitogorsk, Russia, vol. 1, p. 317 (in Russian).
- [2] M.U. Petushkov, "Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start", *International Journal of Applied and Fundamental Research*, no. 1, pp. 1, 2013.
- [3] V.V. Kuptsov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, "A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method", *Progress in Electromagnetics Research B*, no. 45, pp. 269-290, 2012. DOI: 10.2528/PIERB12082916.
- [4] A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.V. Kuptsov, *Modern methods of diagnosis of induction motors and their development*. Magnitogorsk: NMSTU, 2010.
- [5] A.S. Zaviyalov, E.A. Zaviyalov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, "Signature analysis application for DC motor diagnostics", *Electrotechnical Systems and Complexes*, no. 1 (22), pp. 59-62, 2014.
- [6] Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors, GOST ISO 20958-2015, Nov. 2016.
- [7] O.I. Osipov and A.N. Agafonov, "Tekhnicheskaya diagnostika asinhronnogo dvigatelya [Technical diagnostics of induction motors]", *Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta [Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute]*.

- Vol. 676. *Elektricheskij Privod i Sistemy Upravleniya [Electric Drive and Control Systems]*, pp. 22-29, 2000 (in Russian).
- [8] V.I. Smirnov and D.V. Chernov, “Functional diagnostics of asynchronous electro-motors in transition operating modes”, *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, no. 5, pp. 52-56, 2005.
- [9] O.I. Osipov, A.N. Agafonov and S.Yu. Agafonov, “Funkcional'naya diagnostika asinhronnyh elektrodvigatelej v perekhodnyh rezhimah [Functional diagnostics of asynchronous electric motors in transient modes]”, *Pribory i sistemy. Nauchnye idei V.A. Hubenko [Devices and systems. V.A. Khubenko's scientific ideas]*, pp. 81-84, 1999 (in Russian).
- [10] V. Cosmatov, M. Petushkov and A. Sarvarov, “Analysis of existing methods of diagnostics of electric motors and their development prospects”, in proc. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICI-EAM)*, May 12-18, 2020, Sochi, Russia, p. 911.
DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030.
- [11] A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.V. Kuptsov, “Tokovaya diagnostika kak metod kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinhronnyh dvigatelej [Current diagnostics as a method of control of technical state of asynchronous motors]”, in proc. *Innovacionnye tekhnologii v obespechenii kachestva, energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti. Povyshenie konkurentosposobnosti metallurgicheskikh i mashinostroitel'nyh predpriyatij v sovremennyh usloviyah [Innovative technologies in quality assurance, energy efficiency and environmental safety. Increasing the competitiveness of metallurgical and machine-building enterprises in modern conditions]*, March 23-26, 2010, Chelyabinsk, Russia, pp. 82-86 (in Russian).
- [12] V.G. Tonkih, *Metod diagnostiki asinhronnyh motorov v sel'skom hozyajstve na osnove analiza ih vneshnego magnitnogo polya [Method for diagnostics of asynchronous motors in agriculture based on the analysis of their external magnetic field]*, 2009 (in Russian).
- [13] O.V. Fyodorov, A.S. Sarvarov and M.Yu. Petushkov, “Electromagnetic compatibility of starting devices for ac electric drives with power supply network”, *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, no. 4, pp. 17-19, 2015.
- [14] O.S. Belousov, D.V. Shcherbina and M.Yu. Petushkov, “Problemy ekspluatatsii sovremennyh elektrotekhnicheskikh sistem na ustanovkah holodnoj prokatki i goryachej prokatki s ocinkovannym pokrytiem [Problems of operation of co-temporary electrical systems at cold rolling and hot-rolling plants with galvanized coating]”, *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya mashinostroeniem [Automation and Control Systems for Mechanical Engineering]*, pp. 1-4, 2014 (in Russian).
- [15] M.Yu. Petushkov, A.S. Sarvarov and O.V. Fedorov, “Ways to solve proble in field of unregulated asynchronous electric drive in metallurgical industry”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 60-74, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_3_60.