

УДК 681.518.5

Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя

Ермаков К. С.¹, Тумакова Е. В.^{1,*}

[*tumakova_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассматривается вопрос создания информационно-измерительной системы для электрической машины. Разработка системы приводится на примере асинхронного электродвигателя АИР-56В2У3. Информационно-измерительная система предназначена для измерения электрических и механических параметров электродвигателя, что в дальнейшем позволит создать систему для обнаружения дефектов в электрической и механической части электродвигателя. Предлагаемая информационно-измерительная система состоит из двух подсистем и математической модели. При построении подсистемы для измерения механических параметров электродвигателя используется фазохронометрический метод. В статье приводится моделирование нескольких дефектов электродвигателя, таких как обрыв обмоток и скачок напряжения сети

Ключевые слова: электромеханические системы, асинхронный электродвигатель, фазохронометрический метод, информационно-измерительная система

Введение

В настоящее время асинхронные электродвигатели являются потребителями более 70% всей электроэнергии в стране. Опыт эксплуатации электродвигателей свидетельствует о большом количестве отказов, происходящих по причине аварийных ситуаций. Выход из строя электродвигателя ведёт к значительным экономическим потерям. Дополнительно к убыткам добавляется снижение электро- и пожаробезопасности, связанное с возможными короткими замыканиями, возникающими в обмотке статора или ротора поврежденного электродвигателя. Обнаружение дефектов в работающем электродвигателе на ранней стадии их развития не только предупредит внезапную остановку производства в результате аварии, но и значительно снизит расходы на ремонт электродвигателя и увеличит срок его службы [1].

Электрические машины – это важные составляющие во многом недорогом оборудовании и промышленных процессах. Они часто используются при критических режимах работы приводов, где внезапные отказы могут привести к угрозе для

безопасности и большим экономическим потерям. В электрических машинах может появляться целый ряд неисправностей: неисправности стрежней ротора, неисправности подшипников, эксцентриситет воздушного зазора, дефекты статора. Дефекты витков обмотки – это одна из наиболее распространённых проблем, возникающих в статоре. Другая распространённая группа дефектов – это межслойные короткие замыкания.

Выход из строя обмотки статора обычно начинается с короткого замыкания между соседними витками в обмотке. Разрушенная изоляция обмотки может стать причиной дефектов, которые приводят к возникновению в витках высоких токов и к перегреву обмотки. Такой перегрев может быстро привести к серьёзным неисправностям в обмотке на разных фазах или между обмоткой и землёй, что приведёт к постоянным и необратимым разрушениям, как в обмотке, так и в сердечнике статора.

Раннее обнаружение таких дефектов в обмотке необходимо для предотвращения серьёзного разрушения двигателя. Использование привода с переменной скоростью увеличивает эти проблемы из-за высоких скачков напряжения, возникающих из-за переключения преобразователя [2].

С увеличением разнообразия используемых в современном мире электрических машин, а также с расширением сфер их применения, непрерывно связан процесс развития систем, необходимых для поддержания рабочего состояния электрических машин, своевременного обнаружения зарождающихся дефектов и неисправностей. Применяемые системы диагностики электрических машин в своей основе используют следующие методы: вибродиагностика; анализ электрических токов и напряжений; измерение тепловых полей и магнитных полей рассеяния объекта; капиллярная, оптическая, радиационная, электромагнитная дефектоскопия; химический анализ технологических жидкостей (трансформаторного масла и смазки) и отработанных газов и т. д. [3-5]. Также широко известным методом диагностики состояния электродвигателя является метод сигнатурного анализа. В данном случае для обработки сигнала используются преобразования Фурье, Гилберта-Хуана и вейвлет-преобразование [5].

Для создания эффективной системы диагностики необходимо наряду с измерением контролируемых параметров проведение вычислительного математического моделирования в целях идентификации исследуемого объекта с режимами его работы. В том числе с имитированием критических дефектов и аварийных режимов работы, которые невозможно реализовать экспериментально [6]. В данной статье представлена разработка информационно-измерительной системы для измерения электрических и механических параметров асинхронного электродвигателя АИР-56В2У3.

1. Объект исследования и схема построения системы

Асинхронные электродвигатели АИР (ранее выпускались двигатели 4А, 4АМ) с короткозамкнутым ротором. Благодаря простоте конструкции, отсутствию подвижных контактов, ремонтпригодности, невысокой цене по сравнению с другими электрическими двигателями они применяются практически во всех отраслях

промышленности и сельского хозяйства. Также они используются для привода вентиляционного оборудования, насосов, компрессорных установок, станков, эскалаторов и многих других технических устройств.

Блок-схема измерительной системы представлена на рис.1. Она состоит из следующих элементов: подсистема измерения электрических параметров (электрическая подсистема), подсистема на базе фазохронометрического метода для измерения механических параметров электродвигателя (механическая подсистема), ЭВМ, а также математическая модель электродвигателя, позволяющая получать информацию о дефектах.

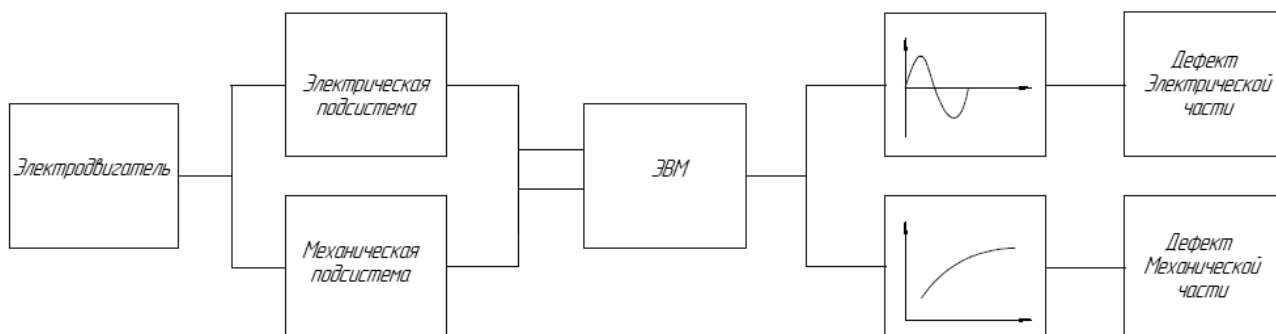


Рис.1. Блок-схема измерительной системы

Электрическая подсистема предназначена для выявления дефектов электрической части асинхронного электродвигателя (АД), а механическая подсистема – для определения дефектов механической части. Измерительная информация с обеих подсистем передаётся в код на жёсткий диск ЭВМ и выполняется обработка результатов измерений с использованием математической модели для определения конкретного дефекта электродвигателя.

Для получения информации о функционировании механической части электродвигателя применён фазохронометрический метод. При использовании данного метода информация об объекте содержится в вариациях продолжительности временных интервалов, соответствующих прохождению интервалов (квантов) фазы. Вследствие погрешности сборки электродвигателя, непостоянства сил, воздействующих на вал электродвигателя и др., в вариациях продолжительности временных интервалов содержится информация о техническом состоянии электродвигателя, которая может быть использована для выявления дефектов как механической, так и электрической части электродвигателя. Метод разработан на кафедре «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана [7-9]. В данной работе выполняется измерение интервалов времени, соответствующих повороту ходовой части электродвигателя (вала). При использовании технических средств фазохронометрического метода реализуется более высокий метрологический уровень информационно-измерительной системы (относительная погрешность не более 10^{-4} % от номинала).

Для измерения интервалов времени были проанализированы различные типы датчиков и измерительных устройств. Для реализации экспериментальной системы нецелесообразно использовать токовихревой датчик, из-за необходимости установки на

вал дополнительного информационного диска для создания измерительных меток. Поэтому, исходя из требуемой точности, выбран фотоэлектрический датчик СКБ ИС ЛИР 158, выдающий измерительные импульсы, соответствующие угловым перемещениям вала.

Таким образом, выбранные средства измерения позволяют получать результаты измерений, необходимые для математической обработки и формирования информации о дефектах электродвигателя.

2. Функциональная схема экспериментального стенда

Функциональная схема, экспериментальной информационно-измерительной системы изображена на рис. 2.

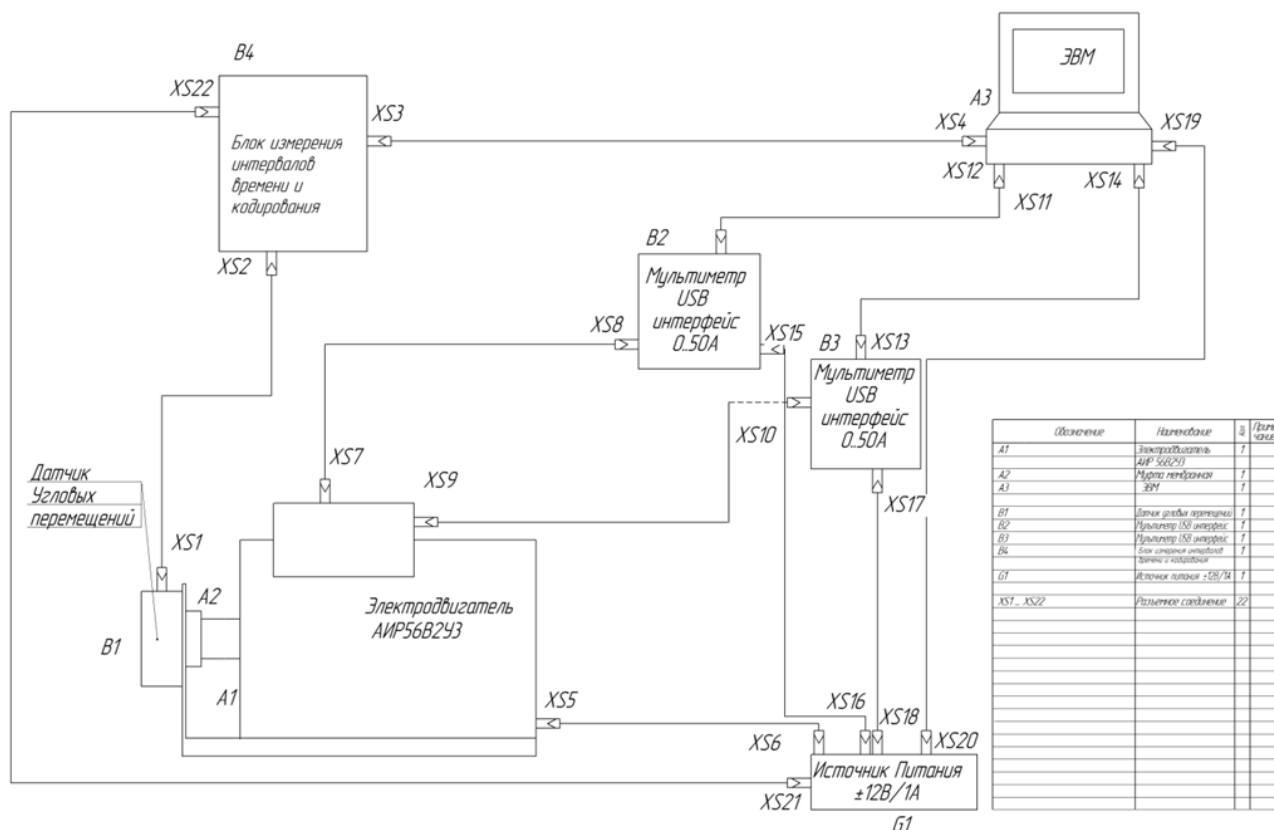


Рис. 2. Функциональная схема информационно-измерительной системы

Датчик угловых перемещений (энкодер) устанавливается на валу электродвигателя с помощью спроектированной оснастки. Измерительный импульс от датчика передаётся в блок измерения интервалов времени и кодирования для дальнейшей передачи в ЭВМ. Для измерения силы тока и напряжения к «клеммной коробке» электродвигателя подключаются два мультиметра регистрирующих фирмы FLUKE, сигналы от которых передаются в ЭВМ, в которой выполняется математическая обработка измерительной информации.

3. Математическое моделирование

Для взаимосвязи результатов измерений, получаемых электрической и механической подсистемами, с конструкцией двигателя применяется математическое моделирование.

Для реализации математической модели асинхронного электродвигателя на данном этапе использовались среды Mathcad и Matlab Simulink.

В среде Mathcad было проведено моделирование влияния скачка напряжения в сети.

Для моделирования работы электродвигателя использована модифицированная формула Клосса. Она связывает среднее текущее значение вращающего момента асинхронного двигателя и частоту вращения его вала, с учётом влияния частоты, напряжения питания.

$$M(n, f, U) = \frac{2M \frac{\left(\frac{U}{U_{\text{ном}}}\right)^2}{\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^2}}{\frac{n_0 - n}{\Delta n_{\text{кр}}} + \frac{\Delta n_{\text{кр}}}{n_0 - n}}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент, f , $f_{\text{ном}}$ – частота сети и частота сети номинальная соответственно, n , n_0 , $n_{\text{кр}}$ – частота вращения ротора, критическая, номинальная соответственно.

На рис. 3 представлены результаты моделирования в среде Mathcad изменений естественной механической характеристики (ЕМХ – характеристика, представляющая зависимость частоты вращения двигателя от развиваемого им момента) в зависимости от различных значений напряжения сети в том числе от скачка напряжения.

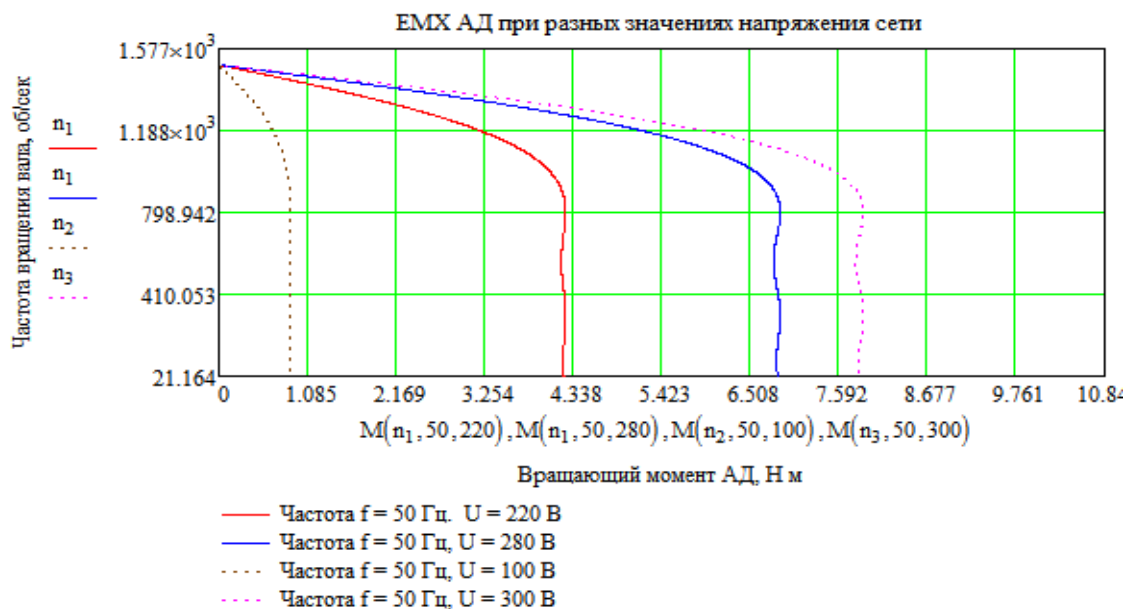
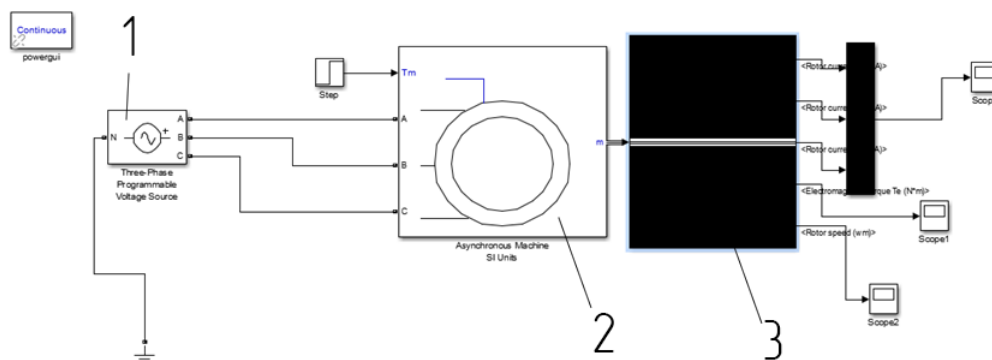


Рис. 3. Естественные механические характеристики асинхронного двигателя

Так же разработана имитационная модель трёхфазного асинхронного двигателя, реализованная в среде Matlab Simulink (пакет для визуального программирования). Модель представлена на рис 4. С помощью этой модели проведено моделирование обрывов в обмотке ротора электродвигателя.



1.Программируемый трехфазный источник питания 2. Асинхронная машина 3. Шинный селектор для обработки данных

Рис. 4. Имитационная модель асинхронного двигателя в среде Simulink

В основе математической модели лежат уравнения Парка-Горева, реализованные для асинхронного двигателя с коротко замкнутым ротором относительно тока статора и потокосцепления ротора в синхронной ортогональной системе координат (d, q), ориентированной по вектору потокосцепления ротора:

$$\begin{aligned}\sigma L_S \frac{dI_d}{dt} &= -R_S I_d + U_d + \sigma L_S \omega_\Psi I_q - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt}; \\ \sigma L_S \frac{dI_q}{dt} &= -R_S I_q + U_q - \sigma L_S \omega_\Psi I_d - \frac{L_m}{L_r} \omega_\Psi \frac{d\Psi_r}{dt}; \\ T_r \frac{d\Psi_r}{dt} &= -\Psi_r + L_m I_d; \\ \omega_\Psi &= \omega + \omega_S = \omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_q}{\Psi_r}; \\ M &= \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_q,\end{aligned}\tag{2}$$

где R_S, R_r – активные сопротивления фаз статора и ротора; L_S, L_r, L_m - индуктивности фаз статора, ротора, взаимная; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_r}$ - коэффициент рассеяния; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ - постоянная времени роторной цепи; U_d, U_q, I_d, I_q - проекции векторов напряжения и тока статора на оси d и q; ω_Ψ - частота вращения вектора потокосцепления ротора; $\omega = Z_p \omega_r$ - электрическая частота вращения ротора; ω_S - частота скольжения; Z_p - число пар полюсов; Ψ_r - потокосцепления ротора [10].

На рис. 5 представлены токи фаз в штатном режиме, полученные в среде Matlab Simulink.

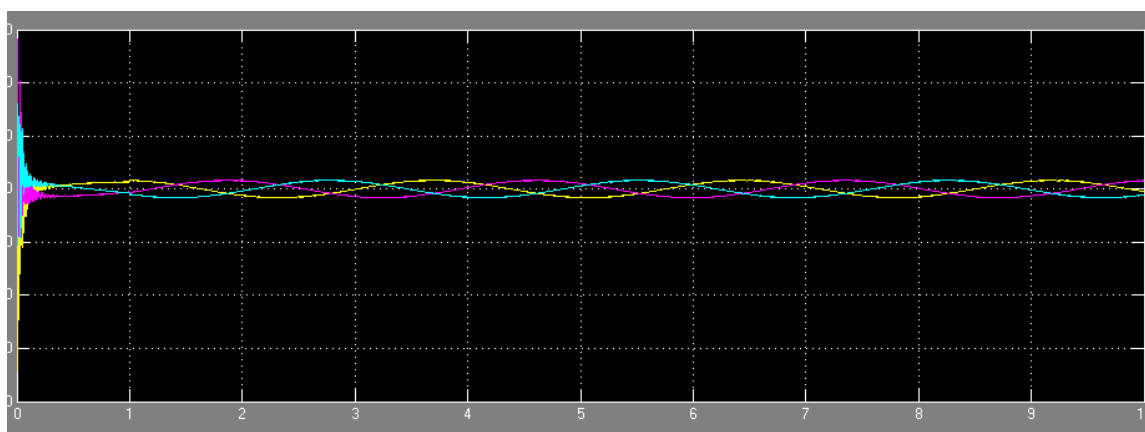


Рис. 5. Токи фаз в штатном режиме работы электродвигателя

При изменении токов в одной из фаз, возникающем из-за разрыва в обмотке, электродвигатель входит в переходный режим, при котором токи других фаз сначала временно компенсируют потерянный ток, но потом неизбежно электродвигатель останавливается (см. рис. 6) [11].

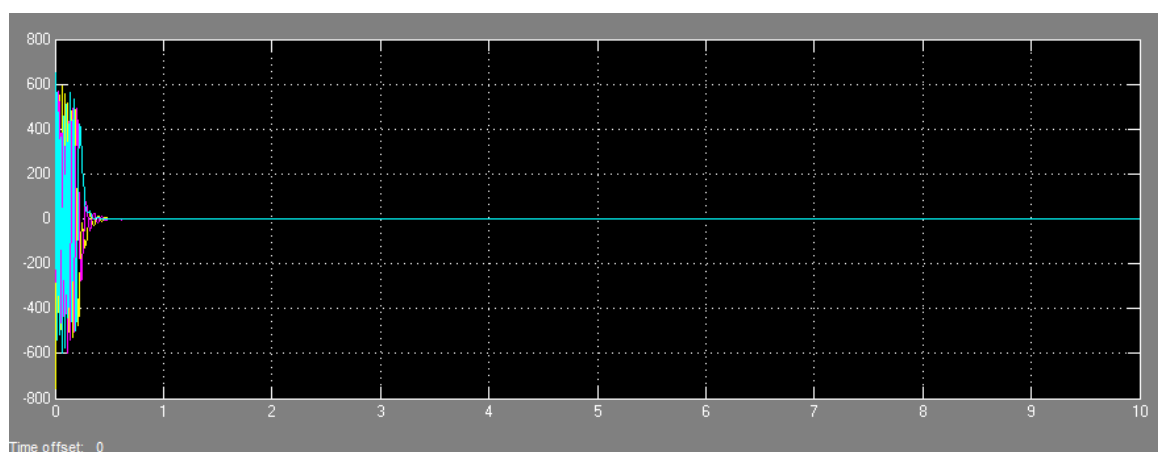


Рис. 6. Токи фаз при коротком замыкании

Имея данную информацию, можно обеспечить аварийную защиту электродвигателя.

Заключение

В работе впервые предложено применение фазохронометрического метода к диагностике асинхронного электродвигателя. Одновременно используются два различных способа моделирования работы электродвигателя в рамках одной информационно-измерительной системы.

Для экспериментального стенда разработана информационно-измерительная система для асинхронного электродвигателя на базе фазохронометрического метода и

математическая модель для выявления дефектов электродвигателя, реализованная в двух средах: Mathcad и Matlab Simulink. Выполнен вычислительный эксперимент, имитирующий скачок напряжения в сети и определение дефекта обрыва в обмотке ротора электродвигателя.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных **МК-3625.2015.8**. Отдельные результаты поддержаны в рамках **НИР 9.1265.2014/К** по выполнению проектной части государственного задания в рамках научной деятельности (код проекта 1265).

Список литературы

1. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127-137.
2. Vaimann T., Kallaste A. Conditionm of electrical machines. Tallinn University of Technology, 2011.
3. Вахромеев О.С., Каримов Р.Т., Надеев А.И. Современные методы диагностики электромеханических систем. М.: Машиностроение, 2005. С. 51- 56.
4. Esfahani E.T. Multisensor wireless system for eccentricity and bearing fault detection in induction motors // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2014. Vol. 19, no. 3. P. 818-826. DOI: [10.1109/TMECH.2013.2260865](https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2260865)
5. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. Vol. 23, iss. 8. P. 2658-2670. DOI: [10.1016/j.ymssp.2009.05.011](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.011)
6. Комшин А.С. Математическое моделирование процесса измерительного контроля деградации конструкционных материалов // Метрология. 2010. № 8. С. 17-22.
7. Бережко И.А., Гостюхин О.С., Комшин А.С. Информационные измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы. 2014. № 5. С. 13-17.
8. Комшин А.С., Медведева О.В. Измерительный контроль деградации свойств конструкционных материалов валопровода // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 34-38.
9. Киселев М.И., Зройчиков Н.А., Пронякин В.И., Чивилев Я.В. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 10-13.
10. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7. С. 7-17.
Алёшин С.В., Синопальников В.А., Соколов Е.А., Филатов В.В. Асинхронный трехфазный двигатель привода главного движения станка как датчик контроля состояния инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 3 (11). С. 110-119.

Information-Measuring System to Control the Electrical and Mechanical Motor Parameters

K.S. Ermakov¹, E.V. Tumakova^{1,*}

[*tumakova_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: electromechanical systems, induction motor, phasechronometric method, information-measuring system

The article considers the issue of creating an information-measuring system for an asynchronous motor. The presented system allows ensuring the failure-free protection of electromotor, considerably reducing costs of its unplanned repair, and reduced economical loss from idle time of the electric motor.

The developed system comprises a mathematical model and two subsystems to measure electrical and mechanical parameters of the asynchronous motor.

The electrical subsystem comprises a FLUKE company recording multi-meter a signal from which passes through the block of intervals and coding and comes to PC. The mechanical subsystem uses technical tools of phase-chronometric method. This method developed at the department of Metrology and Interchangeability allows an increasing efficiency of developed informative-measuring system.

Mathematical modeling is used to link information from subsystems (electrical and mechanical) to electromotor construction.

The work conducted mathematical modeling of some defects of electric motor, namely: rupture of rotor winding and line surge.

The mathematical model in Mathcad was based on a modified formula of Kloss. It allows us to tie the average current value of the torque of the induction motor with shaft speed and take into account the effect of the frequency and voltage.

The Matlab Simulink (the package for visual programming) environment was used to simulate a rupture of the rotor winding. Simulation results showed how the phase currents of the electric motor changed with the winding rupture.

The developed information-measuring system has a number of advantages over traditional systems used in this field (vibration-based diagnostics systems). It will allow an increasing efficiency of the system for diagnostics of electrical machines created on the basis of this information-measuring system.

References

1. Sidel'nikov L.G., Afanas'ev D.O. Control methods review of induction motors technical state during operation. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*, 2013, no. 7, pp. 127-137. (in Russian).
2. Vaimann T., Kallaste A. *Conditionm of electrical machines*. Tallinn University of Technology, 2011.
3. Vakhromeev O.S., Karimov R.T., Nadeev A.I. *Sovremennye metody diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem* [Modern methods of diagnosis of electromechanical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 51- 56. (in Russian).
4. Esfahani E.T. Multisensor wireless system for eccentricity and bearing fault detection in induction motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 818-826. DOI: [10.1109/TMECH.2013.2260865](https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2260865)
5. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 8, pp. 2658-2670. DOI: [10.1016/j.ymssp.2009.05.011](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.011)
6. Komshin A.S. Mathematical model of measurement control process of construction material degradation. *Metrologiya*, 2010, no. 8, pp. 17-22. (in Russian).
7. Berezhko I.A., Gostyukhin O.S., Komshin A.S. Information measuring phase-chronometric systems for diagnostics in the field of power industry. *Pribory = Instruments*, 2014, no. 5, pp. 13-17. (in Russian).
8. Komshin A.S., Medvedeva O.V. Measuring control of degradation of properties of structural materials of rotor shaft turbine units. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2014, no. 5, pp. 34-38. (in Russian).
9. Kiselev M.I., Pronyakin V.I., Chivilev Ya.V., Zroichikov N.A. A precision investigation of turbine unit operation using optic-electronic instruments. *Teploenergetika*, 2006, no. 11, pp. 10-13. (English version of journal: *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 11, pp. 868-872. DOI: [10.1134/S0040601506110036](https://doi.org/10.1134/S0040601506110036)).
10. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N. Adaptive vector control system for an asynchronous electric drive. *Elektrotekhnika*, 2003, no.7, pp. 7-17. (English version of journal: *Russian Electrical Engineering*, 2003, vol. 74, no. 7, pp. 8-20.).
11. Aleshin S.V., Sinopal'nikov V.A., Sokolov E.A., Filatov V.V. Asynchronous three-phase motor of main drive of the machine as sensor monitoring tool. *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2010, no. 3, pp. 110-119. (in Russian).