

УДК 621.313; 255:29.1

А. П. Черный, д-р техн. наук,
А. Л. Юдина, А. Бердай

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНОСТИ

Аннотация. Для статистической оценки силы линейной связи переменных состояния асинхронного двигателя использован частотный аналог коэффициента корреляции двух случайных процессов – функция когерентности. Анализ рассчитанных значений функции когерентности с применением сглаженных корреляционных функций и усреднения по ансамблю реализаций процессов позволил сделать вывод о целесообразности использования временного окна, ограниченного четвертью периода входного напряжения, для получения значимых различий в работе линейной, близкой к линейной и нелинейной систем.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, оценка состояния, линейные и нелинейные свойства, функция когерентности

О. Chorny, ScD.,
A. Yudina, A. Berdai

EVALUATION OF THE INDUCTION MOTOR CONDITION BASED ON COHERENCE FUNCTION

Abstract. Frequency analog of correlation coefficient of two random processes, i.e. the coherence function has been used for statistical power evaluation of the linear connection of the state variables of the induction motor. Analysis of the calculated coherence function values with using the smoothed correlation functions and averaging over the group of processes implementation allowed us to conclude about the reasonability of using a time window bounded by quarter period of the input voltage to produce significant differences in the work of linear, close to linear and nonlinear systems.

Keywords: electromechanical system, linear and nonlinear properties, coherence function

О. П. Чорний, д-р техн наук,
А. Л. Юдіна, А. Бердай

ОЦІНКА СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЇ КОГЕРЕНТНОСТІ

Анотація. Для статистичної оцінки сили лінійного зв'язку змінних стану асинхронного двигуна використаний частотний аналог коефіцієнта кореляції двох випадкових процесів - функція когерентності. Аналіз розрахованих значень функції когерентності із застосуванням згладжених кореляційних функцій і усереднення по ансамблю реалізацій процесів дозволив зробити висновок про доцільність використання часового вікна, обмеженого чвертю періоду вхідної напруги, для отримання значущих відмінностей у роботі лінійної, близькою до лінійної і нелінійної систем.

Ключові слова: асинхронний двигун, оцінка стану, лінійні і нелінійні властивості, функція когерентності

Введение. В задачах диагностики АД важную роль играет оценка изменения их состояния в условиях неполных или отсутствующих данных о внутренней структуре и параметрах. Аналитические методы очень часто не дают точного решения, так как требуют параметров, которые могут быть определены только из экспериментальных данных [1]. Проведение натурального эксперимента является довольно сложным, так как для его реализации необходимо создать специальные режимы, например, холостой ход и короткое замыкание, обеспечить напряжение питания специальной формы, например, многочастотное, или выполнить измерения для предварительно разобранного двигателя. Естественно все это на работающем, и обеспечивающем выполнение технологического процесса двигателе невозможно. В этом случае возможно применение только статистических методов оценивания по значениям входных и выходных сигналов.

Одним из возможных подходов к оценке изменения состояния АД, является оценка изменения его линейных свойств [2, 3, 4] на основе данных спектрального анализа. Данное направление находит достаточно широкое применение в современных исследованиях и разработках [5, 3, 6].

Материал и результаты исследований. Рассмотрим АД, на статоре которого измеряется напряжения $u(t)$ и ток $i(t)$. Измерения проводятся в течение времени ΔT с периодичностью T . Предполагая, что изменение внутреннего состояния АД происходит плавно, без резких изменений, можно считать сигналы $u(t)$ и $i(t)$ стационарными процессами в течение конечного времени измерений ΔT , хотя в общем случае, при $\Delta T \rightarrow \infty$ с учетом внутренних изменений в АД, они таковыми не являются [7, 8].

Будем полагать, что внутреннее состояние двигателя: появление скрытых дефектов, развитие параметрической несимметрии, появление, например, после ремонта, локальных изменений характеристик

© Черный А.П., Юдина А.Л., Бердай А., 2014

стали приведет к изменению силы линейной связи между током и напряжением статора.

Степень линейной зависимости $u(t)$ и $i(t)$ при сдвиге τ одного процесса по отношению ко второму и определяется выражением нормированной взаимной ковариационной функции

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{K_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где $K_{xy}(\tau)$ – функция взаимной ковариации, σ_x, σ_y – СКО случайных процессов $u(t)$ и $i(t)$. Однако, учитывая, что ухудшение состояния АД приводит к появлению гармоник тока статора не вызванных гармониками напряжения, то применим аналог $\rho_{xy}(\tau)$ в частотной области – функцию когерентности $\gamma_{xy}^2(f)$. Функция когерентности (ФК) отражает степень линейной взаимосвязи гармонических компонент рассматриваемых процессов. Чем ближе функция когерентности к единице на данной частоте f , тем больше совпадение гармонических составляющих на этой частоте. ФК определяется путем нормировки взаимной спектральной плотности [3, 9, 10, 6]

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}, \quad (2)$$

где $S_{xy}(f)$ – функция взаимной спектральной плотности, «кросс-спектр», $S_{xx}(f), S_{yy}(f)$ – спектральные плотности случайных процессов $u(t)$ и $i(t)$.

Для стационарных процессов значение ФК остается постоянным и не зависит от времени и от амплитуды входного сигнала. Можно предположить, что изменение внутренних свойств системы повлечет, соответственно, и изменение значений ФК.

В [11] авторами были выполнены исследования методами математического моделирования АД. Для случаев линейной, слабо линейной и нелинейной систем. Усиление нелинейности было обусловлено проявлением изменений внутренней структуры в виде нелинейных составляющих в зависимости $L_\mu(i)$. Питание АД осуществлялось полигармоническим напряжением с уровнями гармоник, которые соответствуют реальной промышленной сети.

Полученные значения функций когерентности для трех случаев приведены на рис. 1 и позволяют сделать однозначный вывод об уменьшении линейных свойств системы при переходе от 1-го ко 2-му, а затем к 3-му случаям.

Изменение амплитуды входного напряжения и увеличение шумовой составляющей до 5 % так же практически не меняет полученных результатов.

Поскольку наличие значительных шумов в канале измерений может исказить входные и выходные сигналы, можно предусмотреть предварительное удаление субгармонических компонент, например, методом медианного фильтра [12], или удаление статистически незначимых гармоник в соответствии с [2].

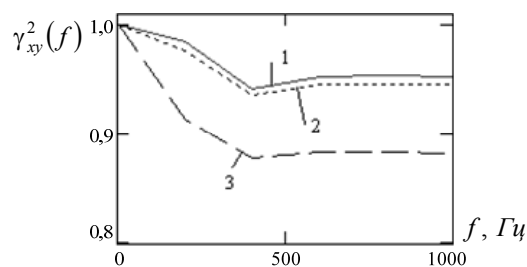


Рис. 1. Значения ФК, рассчитанные для трех случаев с эффективной разрешающей полосой $B_e = 200$ Гц

Уменьшение ФК с уменьшением линейной связи обусловлено уменьшением значения коэффициента линейной связи K_n . Проведенные исследования при различных значениях K_n позволили выявить нелинейную зависимость усредненного по всей полосе частот значения ФК от значений данного коэффициента в модели $\overline{\gamma_{xy}^2} = F(K_n)$ (рис. 2).

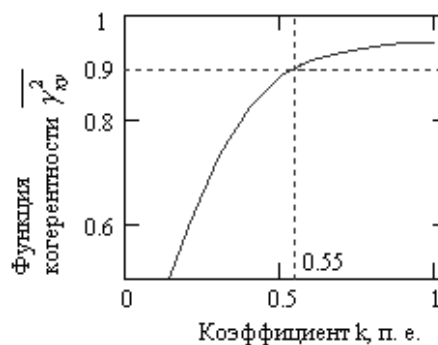


Рис. 2. Зависимость $\overline{\gamma_{xy}^2} = F(K_n)$

Анализируя $\overline{\gamma_{xy}^2} = F(K_n)$, можно утверждать, что АД может считаться линейным, если коэффициент K_n не меньше 0,55. Именно в этом случае среднее по всей полосе частот значение функции когерентности сигналов напряжения и тока лежит в диапазоне [0,9; 1], что соответствует линейной взаимосвязи процессов [3, 12].

В качестве объекта для экспериментальных исследований, для проверки рассмотренных выше положений используем аналог АД в режиме короткого замыкания. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Параметры: эквивалентное активное сопротивление обмотки $R_e = 0,02235$ Ом, и эквивалентная индуктивность $L_e = 0,0204$ Гн.

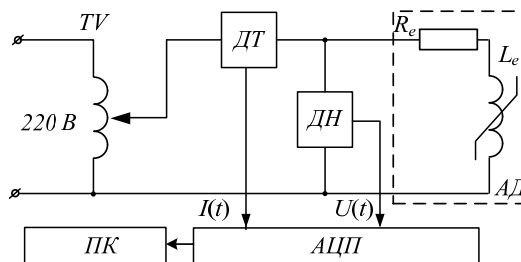


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема экспериментальной установки

Временные зависимости измеренных сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ показаны на рис. 4.

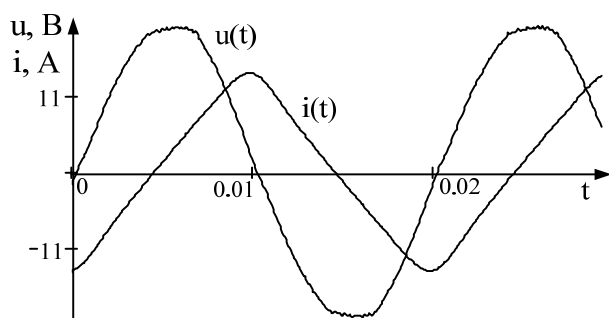


Рис. 4. Временные зависимости измеренных сигналов напряжения и тока (масштаб тока 1:5)

Визуально форма кривой напряжения близка к синусоидальной, но имеет искажения вызванные наличием помех в сети, при этом вид функции тока близок к треугольной форме, что может быть вызвано как нелинейными свойствами систем, так и формой входного напряжения (рис. 4). Форму входного напряжения и выходного тока, особенно в точках, близких к экстремуму, могут исказить погрешности измерений.

К такому выводу можно прийти и на основе гармонического анализа сигналов показанных на рис. 5. Наибольшие значения имеют первые гармоники тока и напряжения. Однако при более детальном рассмотрении можно увидеть и гармоники более высоких порядков, появление которых может быть вызвано как нелинейными свойствами системы, так и погрешностями измерений или оцифровки сигналов.

Для анализа линейных свойств рассматриваемой системы в соответствии с описанной выше методикой полученные сигналы напряжения и тока необходимо центрировать и синхронизировать по фазе.

Для расчета функции когерентности по каждой из реализаций случайных процессов рассчитаны корреляционные и автокорреляционные функции [11]. Соответствующая рассчитанным ФСП оценка значений ФК $\gamma_{xy}^2(f)$ приведена на рис. 6.

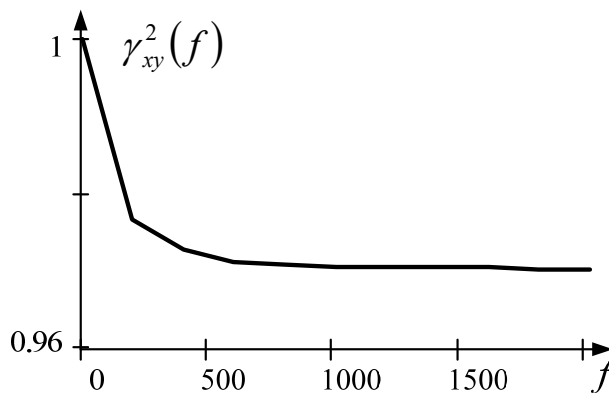


Рис. 6. Значения ФК $\gamma_{xy}^2(f)$

Полученные значения ФК свидетельствуют о том, что система линейна. Проведенные исследования позволяют утверждать, что при изменении амплитуды входного напряжения значения ФСП меняются, но $\gamma_{xy}^2(f)$ сохраняет свои значения при неизменных свойствах самой системы.

Выводы. Статистические методы прикладной теории временных рядов позволяют оценить изменение линейных свойств ЭМС при условии выбора τ_{max} , лежащего в окрестности $0,25T$.

В случае, если математическая модель системы известна, исследование значений ФК в различных режимах работы АД может позволить определить границы значений параметров, при которых система сохраняет линейные свойства. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность предположений о возможности оценки линейности системы. Проведение непрерывного контроля свойств системы позволит заметить ухудшение линейных свойств, а достижение значений $\gamma_{xy}^2(f) < 0,9$ будет свидетельствовать о снижении энергетической эффективности. Результаты выполненных исследований могут быть положены в основу систем мониторинга состояния электромеханических систем.

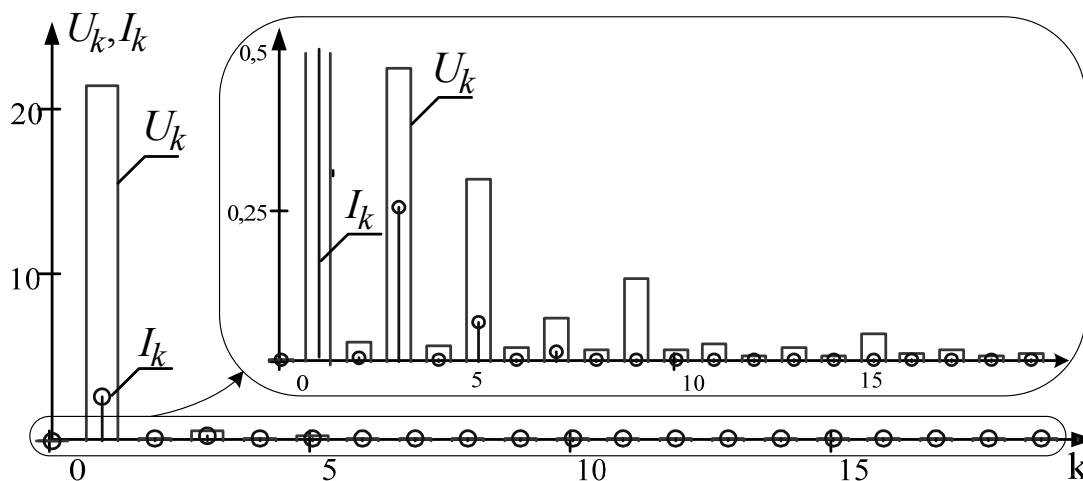


Рис. 5. Результаты гармонического анализа сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ исследуемой системы

Список использованной литературы

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л. Льюнг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.
2. Сидоренко В. М. Корекція електричних сигналів силових кіл електродвигунів у комп'ютеризованих системах моніторингу : монографія / В. М. Сидоренко, О. П. Чорний, Д. Й. Родькін, Ю. Г. Осадчук. – Кременчук : ПП Шербатих О. В., 2011. – 228 с.
3. Bendat J., Piersol A G., (1993), Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, 2nd ed., New York, *Wiley*.
4. Reddy K.S., Kuma M. P. V. V. R., Singh B.P., Suryakalavathi M., (2011), Coherence Function Method of Detection of Fult in a Power Transformer During Impulse Test, *IEEE Power and Energy Systems – ICPS*, pp. 1 – 6.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.
6. Hansson-Sandsten M., (2011), Cross-Spectrum and Coherence Function Estimation Using Time-Delayed Thomson Multitapers, *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP*, pp. 4240 – 4243.
7. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес. – М. : Мир, 1982. – 428 с.
8. Manuca R., Savit R., (1996), Stationarity and Nonstationarity in Time Series Analysis, *Physica D*, 99:134 – 61.
9. Bendat J., Piersol A., (2000), Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3rd ed., New York, *Wiley*.
10. Cadzow J., Solomon O. J., (1988), Linear Modeling and the Coherence Function, *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 35, No. 1, pp. 19 – 28.
11. Юдина А. Л. Статистическая оценка линейных свойств электромеханических систем / А. Л. Юдина, А. П. Черный, А. Бердай // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 25 – 29.*
12. Brillinger D., (1975), Time Series: Data Analysis and theory, New York, *Holt, Rinehart and Winston*

Получено 14.07.2014

References

1. L'ying L., Kuma M. P. V. V. R., Singh B. P., and Suryakalavathi M. Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya [Identification Systems. Theory for the User], (1991), *Nauka Publ.*, Moscow, Russian Federation, 432 p. (In Russian)
2. Sidorenko V.M., Chorny O.P., Rod'kin D.Y., and Osadchuk Y.G. Korektsiya elektrichnikh signaliv silovikh kil elektroprivodiv u komp'yuterizovanih sistemakh monitoringu: monografiya [Correction of Electric Signals of Power Circleof Electric Drives in the Computer-Assisted Systems of Monitoring: Monograph], (2011), *PP Scherbatikh O.V. Publ.*, Kremenchug, Ukraine, 228 p. (In Ukrainian)
3. Bendat J., and Piersol A.G., (1993), Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. 2nd ed., *Wiley*, New York (In English)
4. Reddy K.S., Kuma M.P.V.V.R., Singh B.P., and Su-

- ryakalavathi M., (2011), Coherence Function Method of Detection of Fault in a Power Transformer During Impulse Test, *IEEE Power and Energy Systems, ICPS*, pp. 1 – 6 (In English)
5. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostei: ucheb. dlya vuzov [Probability theory: Studies. for Universities], (1999), *Vysshaya Shkola Publ.*, Moscow, Russian Federation, 576 p. (In Russian)
6. Hansson-Sandsten M., (2011), Cross-Spectrum and Coherence Function Estimation Using Time-Delayed Thomson Multitapers, *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP*, pp. 4240 – 4243 (In English).
7. Otne R. Prikladnoi analiz vremennykh ryadov [Applied Time Series Analysis], (1982), *Mir Publ.*, Moscow, Russian Federation, 428 p. (In Russian).
8. Manuca R., and Savit R., (1996), Stationarity and Nonstationarity in Time Series Analysis, *Physica D*, 99:134 –61 (In English).
9. Bendat J., and Piersol A., (2000), Random Data: Analysis and Measurement Procedures. 3rd ed., *Wiley*, New York (In English).
10. Cadzow J., and Solomon O.J., (1988), Linear Modeling and the Coherence Function, *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 35, No. 1, pp. 19 – 28 (In English)
11. Yudina A.L., Chorny A.P., and Berdai A. Statisticheskaya otsenka lineinykh svoistv elektromekhanicheskikh system [Statistical Evaluation of the Linear Properties of Electromechanical Systems], (2012), *Elektromekhanichni i Energozberigayuchi Sistemi. Tematichnii Vipusk "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika" Naukovo-Virobnichogo Zhurnalu*, Kremenchuk, Ukraine, Vol. 4/2012 (20), pp. 25 – 29 (In Russian), url: <http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2013/04/253.pdf>
12. Brillinger D., (1975), Time Series: Data Analysis and theory, *Holt, Rinehart and Winston*, New York (In English).



Черный
Алексей Петрович, д-р техн. наук,
проф., директор ин-та электромеханики,
энергосбережения и систем управления
Кременчугского нац. ун-та имени
Михаила Остроградского.
Тел.+380675417900.
E-mail: apch@kdu.edu.ua,



Юдина
Анна Леонидовна, ст. преподаватель
каф. компьютерные и информационные
системы Кременчугского нац.
ун-та имени Михаила Остроградского.
Тел.+380987041318.
E-mail: iyusa@mail.ru



Бердай
Абдельмажид, начальник отдела
электротехники ENSEM. Университет
Хассан II Аин Шок РО Вох 8118, Оа-
сис, Касабланка Марокко,
+ 212666176812.
E-mail: a.berdai@gmail.com