

Влияние несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных двигателей

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Бондаренко
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Шумы и вибрации транспортных тяговых электрических двигателей должны укладываться в строгие экологические нормы. Существующие методики позволяют определять виброшумовые характеристики двигателей при синусоидальном питающем напряжении. В то же время в современных транспортных силовых установках все чаще используются системы частотного управления тяговыми электродвигателями с несинусоидальным питающим напряжением от преобразователей частоты. Наличие высших временных гармоник напряжения может вызывать дополнительный спектр вибровозмущающих сил в электродвигателе, что повлияет на электромагнитный шум. Создание энергоэффективных тяговых асинхронных машин с частотным управлением для гибридного привода транспортных средств требует корректного определения их виброшумовых характеристик. В связи с этим необходимы разработка методики расчета электромагнитных шумов электродвигателей при несинусоидальности питающего напряжения и оценка влияния степени несинусоидальности напряжения на шум.

Материалы и методы: Методика оценки влияния несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных электродвигателей включает разложение формы кривой напряжения на временные гармоники, алгоритм расчета электромагнитных шумов от каждой временной гармоники напряжения для наиболее выраженных пространственных гармоник электромагнитных полей, а также определение интегральных показателей электромагнитного шума от совокупного действия всего спектра временных и пространственных гармоник.

Результаты: Разработана методика расчета интегральных показателей электромагнитного шума асинхронных двигателей при несинусоидальности питающего напряжения, которая учитывает форму несинусоидальности, в том числе, в виде широтно-импульсной модуляции, зубчатость сердечников статора и ротора, электромагнитное состояние двигателя, спектр временных и пространственных гармоник электромагнитных сил. Дана оценка виброшумовых характеристик тягового асинхронного двигателя 120 кВт при синусоидальной форме питающего напряжения и при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения. Установлено, что несинусоидальность питающего напряжения вызывает появление спектра временных гармоник напряжения, дополнительного спектра вибровозмущающих сил в электродвигателе, что изменяет его электромагнитный шум.

Выводы: Разработанная методика позволяет проводить расчет интегральных показателей электромагнитного шума асинхронных двигателей при несинусоидальности питающего напряжения. Электромагнитный шум тягового асинхронного двигателя 120 кВт при форме питающего напряжения в виде широтно-импульсной модуляции может возрастать до 6 дБ, по сравнению с синусоидальным питающим напряжением.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, несинусоидальность напряжения, электромагнитный шум, вибрации, пространственные гармоники, зубцовые гармоники, временные гармоники.

Influence of nonsinusoidal feed-in voltage on vibronoise parameters of induction motors

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Bondarenko
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Noises and vibrations of traction electric motors must meet the strict ecological norms. The existing methods can determine vibronoise parameters of motors under sinewave feed-in voltage. However, modern transport power plants are more and more frequently using the systems of electric motor frequency control with nonsinusoidal feed-in voltage from the frequency converters. The presence of higher temporal voltage harmonics can cause an additional spectrum of vibration disturbances in an electric motor, which influences the electromagnetic noise. Development of energy-efficient traction induction machines with a frequency control of transport vehicle hybrid drive requires correct determination of their vibronoise parameters. This fact makes it necessary to develop methods of electromagnetic noises calculation of electric motors with nonsinusoidal feed-in voltage and to estimate the effect of voltage nonsinusoidality degree.

Materials and methods: The method of estimating the influence of feed-in voltage nonsinusoidality on the vibronoise parameters of induction drives includes voltage curve decomposition into temporal harmonics, an algorithm of electromagnetic noise calculation for each temporal voltage harmonics for the most apparent spatial harmonics of electromagnetic fields, determination of integrated indices of electromagnetic noise for the combination of all temporal and spatial harmonics.

Results: The developed method of calculating integrated indices of electromagnetic noise from induction motors with nonsinusoidal feed-in voltage takes into account the nonsinusoidality shape including pulse-width modulation, stator and rotor core serration, motor electromagnetic parameters, and the spectrum of temporal and spatial harmonics of electromagnetic forces. The paper describes the results of evaluating the vibronoise parameters of the 120 kW traction induc-

tion motor under sinewave feed-in voltage and in case of its feeding from a frequency converter with voltage pulse-width modulation. It has been proved that the feed-in voltage nonsinusoidality results in a spectrum of temporal voltage harmonics, an additional spectrum of vibration disturbances, which changes the motor electromagnetic noise.

Conclusions: The developed method allows us to calculate the integrated indices of electromagnetic noise of induction motors under nonsinusoidal feed-in voltage. The electromagnetic noise of the 120 kW under feed-in voltage pulse-width modulation can reach 6 dB compared to the sinewave feed-in voltage.

Key words: induction motor, nonsinusoidal voltage, electromagnetic noise, vibration, spatial harmonics, tooth harmonics, temporal harmonics.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.3.034-038

Преобразование энергии в электрических машинах сопровождается возникновением шума и вибраций. Их показатели должны укладываться в строгие экологические нормы. Источником магнитных шумов и вибраций являются переменные пульсирующие и вращающиеся электромагнитных силы и моменты, действующие на конструкцию электрической машины, вызывая ее виброактивность и колебания. Величины магнитных сил и их частоты зависят от типа электрической машины, частоты вращения, формы и частоты питающего напряжения, электромагнитных нагрузок, числа зубцов статора и ротора, обмотки статора и других факторов [1–4].

Современные транспортные силовые установки все чаще используют системы частотного управления тяговыми асинхронными электродвигателями (АД) с несинусоидальным питающим напряжением от преобразователей частоты (ПЧ). Наличие высших временных гармоник напряжения вызывает появление дополнительного спектра вибровозмущающих сил в электродвигателе, что изменяет их электромагнитный шум. Отмечено, что присутствие высших гармоник в напряжении сети с суммарной амплитудой 20 % может увеличить амплитуду шумов и вибраций АД до 40 % [5]. В то же время увеличение числа фаз АД, питание напряжением особой формы может позволить улучшить его виброшумовые характеристики [6].

Существующие методики [2, 3] позволяют определять магнитные шумы и вибрации АД при синусоидальном питающем напряжении. Однако расчетных методик изменения виброшумовых характеристик при несинусоидальном напряжении не существует. В связи с этим разработка такой методики является актуальной задачей.

Источником магнитного шума и вибрации являются колебания ярма статора электродвигателя, поэтому виброакустические расчеты сводятся к исследованиям колебаний его ярма под действием периодически изменяющихся во времени и распределенных по окружности радиальных и тангенциальных сил гармонических полей статора и ротора, которые зависят от распределения магнитной индукции в зазоре.

Пространственные гармонические поля статора (ν) определяются зубчатостью статора и схемой обмотки при p – числе пар полюсов и d – знаменателе дробности обмотки:

$$\nu = 6kp/d + p.$$

Пространственные зубцовые гармонические поля короткозамкнутого ротора (μ) определяются зубчатостью ротора и числом пар полюсов:

$$\mu = \kappa Z_2 + p,$$

где $\kappa = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Пространственные гармоники полей статора ν , зубцовые ротора μ и порядки вибрации $r = \mu \pm \nu$, не превышающие 6, так как большие порядки вибраций несут незначительную энергию, для трехфазного АД с короткозамкнутым ротором 3 кВт, 1000 об/мин с числами пазов статора $Z_1 = 36$ и ротора $Z_2 = 42$ представлены на рис. 1 и в табл. 1.

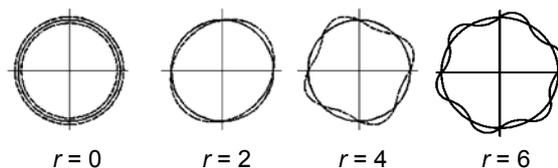


Рис. 1. Формы колебаний ярма статора АД для порядков вибраций r

Таблица 1. Пространственные гармоники полей статора ν , зубцовые ротора μ и соответствующие им порядки вибрации r

$\nu \backslash \mu$	+3	-15	+21	-33	+39	-51	+57	-69	+75	-87
+3	+6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-39	-	-	-	-6	0	-	-	-	-	-
+45	-	-	-	-	+6	-	-	-	-	-
-81	-	-	-	-	-	-	-	-	-6	+6
+87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

Угловая частота вращения радиальной вибрационной силы порядка r составляет

$$\omega_r = 2\pi f_r,$$

где для $r = \mu - \nu$

$$f_r = f_1 \kappa Z_2 (1 - s) / p; \quad (1)$$

для $r = \mu + \nu$

$$f_r = f_1 [\kappa Z_2 (1 - s) / p + 2], \quad (2)$$

где s – скольжение; f_1 – частота напряжения.

Амплитуда радиальной вибрационной силы порядка r составляет

$$P_r = 20 B_\delta^2 (R_1 / R_c), \quad (3)$$

где R_1 – внутренний радиус сердечника; R_c – средний радиус спинки ярма статора; B_δ – индукция в зазоре (берется из электромагнитного расчета).

Приведенная деформация (податливость) статора определяется при $r = 0$ как

$$\lambda_c = R_c^2 / (E h_c)$$

или при $r \geq 2$ как

$$\lambda_c = (12 R_c / E) (R_c / h_c)^3 (r^2 + 1) / r^2 (r^2 - 1)^2,$$

где h_c – высота сердечника; E – модуль упругости.

Для рассматриваемого двигателя λ_c уменьшается с 0,32 см/Н при $r = 0$ до 0,16 см/Н при $r = 6$.

Скорость колебаний (вибраций) на поверхности сердечника статора рассчитывается как

$$y_c = P_r / \sqrt{2} Z_c,$$

где $Z_c = |\omega_r| m_c 10^{-2} - 1 / |\omega_r| \lambda_c$ – полное механическое сопротивление статора; m_c – приведенная масса спинки статора.

Уровень магнитного шума для порядка вибрации r составляет

$$L_r = 20 \lg(\omega_r |y_c| 10^2 / 3) \text{ дБ.}$$

Разные гармоники полей создают свои уровни шума L_1, L_2, \dots, L_m . При определении результирующего уровня вибрации L_Σ исходят из соображений, что если одновременно действуют два акустических источника, уровни громкости которых в рассматриваемой точке акустического поля равны L_1 и L_2 ($L_1 > L_2$), то результирующий уровень в той же точке равен $L_\Sigma = L_1 + \Delta L$, где зависимость $\Delta L = \psi(L_1 - L_2)$ определяется в соответствии с табл. 2.

Таблица 2. Зависимость $\Delta L = \psi(L_1 - L_2)$

$L_1 - L_2$, дБ	0,0	2,0	4,0	6,0	10,0
ΔL , дБ	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5

Результаты расчетов виброшумовых характеристик [3] сведены в табл. 3.

Таблица 3. Величины вибраций и шума АД

ν	μ	$r = \mu \pm \nu$	B_{ν} , Тл	B_{μ} , Тл	P_r , Н/см ²	ω_r , 1/с	y_c , см/с	L_r , дБ	L_Σ , дБ
+3	+3	+6	0,778	–	9,32	628	0,662	43,0	67
-33	-39	-6	0,173	0,16	0,85	4187	0,406	55,0	
+39	-39	0	0,274	0,16	1,35	3559	1,097	62,5	
+39	+45	+6	0,274	0,13	1,10	4187	0,525	57,5	
+75	-81	-6	0,185	0,09	0,52	7746	0,461	61,5	

Примечание: $\Delta L = 2,5$ дБ для $L_1 = 62,5$ и $L_2 = 61,5$; для следующих пар источников шумов: $\Delta L = 1,5$ дБ для $L_1 = 61,5$ и $L_2 = 57,5$; $\Delta L \approx 1,5$ дБ для $L_1 = 57,5$ и $L_2 = 55$; $\Delta L \leq 0,5$ дБ и не имеет практического значения для $L_1 = 55$ и $L_2 = 43$; $\Sigma \Delta L = 5,5$ и $L_\Sigma = 62,5 + 5,5 = 67$ дБ.

Для рассматриваемого двигателя уровень шума не должен превышать 72 дБ. Уровень вибрации двигателей оценивается по наибольшему из эффективных значений вибрационной скорости и не должен превышать 2,8 см/с. Согласно полученным данным,

двигатель по уровню шумов и вибраций находится на пределе требований.

Расчет виброшумовых характеристик более мощного тягового АД ТАД-250 120 кВт при синусоидальном напряжении по подобному алгоритму дал уровень шума 83 дБ при второй по значимости влияния (после первой) пятой пространственной гармонической поля статора.

При работе АД от источника с несинусоидальной формой питающего напряжения появляются высшие временные гармоники напряжения. Каждая временная гармоника напряжения γ будет создавать свои токи, электромагнитные поля и силы, деформации, вибрации ярма статора и магнитные шумы. ПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выдает напряжение разряженной импульсной формы с широким спектром временных гармоник. Наибольшие амплитуды наблюдаются для гармоник, близких к кратности числа импульсов ШИМ на периоде N , но нечетных, и их амплитуды соизмеримы с амплитудой первой (основной) гармоники. Так, для параметров ШИМ $N = 24$ и скважности импульсов $\varepsilon = 0,2$ наибольшие амплитуды напряжений наблюдаются для $\gamma = 23 - U_{23}/U_1 = 0,94$ и для $\gamma = 47 - U_{47}/U_1 = 0,77$ (рис. 2) [7].

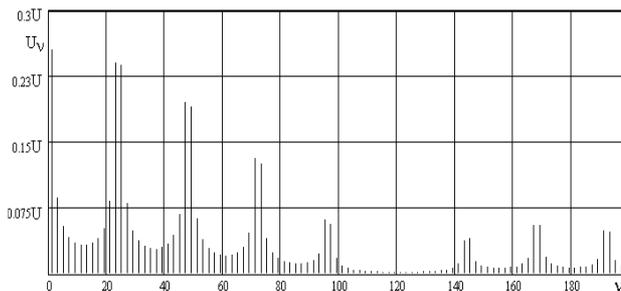


Рис. 2. Спектральный состав временных гармоник выходного напряжения ПЧ с ШИМ при $N = 24$ и $\varepsilon = 0,2$

Для оценки влияния высших временных гармоник напряжения расчет виброшумовых характеристик нужно проводить по описанной выше методике для каждой временной гармоники γ . Частота возбуждающих сил пропорциональна номеру временной гармоники, и вместо f_1 в (1), (2) расчеты проводим для всех $f_{1\gamma} = \gamma f_1$. Так как для высоких временных гармоник γ АД находится в режиме КЗ и $s_\gamma = 1$, то в (1), (2) принято, что амплитуды гармоник магнитной индукции в зазоре $B_{\delta\gamma}$ (3) определяются как

$$B_{\delta\gamma} = B_\delta U_\gamma / (2 U_1).$$

Результаты расчетов [8] виброшумовых характеристик ТАД-250 при питании от ПЧ с ШИМ напряжения с учетом влияния пространственных гармоник $\nu = 1$ и $\nu = 5$, как наиболее выраженных, и 179 временных гармоник γ электромагнитных полей приведены на рис. 3 и в табл. 4.

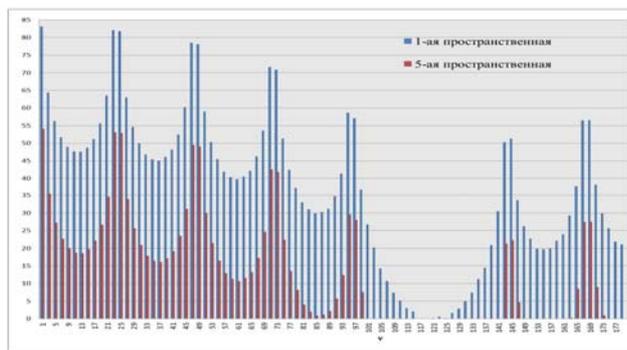


Рис. 3. Уровни электромагнитных шумов от высших временных гармонических полей, вызванных несинусоидальностью питающего напряжения ПЧ с ШИМ для наиболее выраженных 1-й и 5-й пространственных гармоник

Результирующий уровень шума ТАД при питании от ПЧ с ШИМ напряжения и несинусоидальной форме напряжения составляет 88 дБ, что соответствует нормам для данного двигателя – 94 дБ. Увеличение уровня шума, по сравнению с питанием напряжением синусоидальной формы, составляет 5 дБ, или 6 %.

Таблица 4. Уровни шумов (L) для пространственных v и временных γ гармоник электромагнитных полей при работе ТАД от ПЧ с ШИМ напряжения

γ	$L_{v=1}$, дБ	$L_{v=5}$, дБ	γ	$L_{v=1}$, дБ	$L_{v=5}$, дБ
1	82	54	19	55,6	26,6
3	64,4	35,4	21	63,5	34,5
5	56,2	27,3	23	81,9	53,0
7	51,6	22,6	25	81,8	52,8
9	48,9	19,9	27	62,9	33,9
11	47,6	18,6	29	54,6	25,6
13	47,5	18,5	31	49,9	20,9
15	48,7	19,7
17	51,0	22,0	173	29,8	0,87

Заключение

Разработанная методика определения электромагнитного шума АД позволяет учитывать форму несинусоидальности напряжения, в том числе в виде широтно-импульсной модуляции, зубчатость сердечников статора и ротора, электромагнитное состояние двигателя, действие полного спектра временных и пространственных гармоник электромагнитных сил.

Показано, что изменение питания тягового АД 120 кВт с синусоидальной формы напряжения на питание от ПЧ с ШИМ напряжения приводит к возрастанию шума на 5–6 дБ.

Работа выполнена по контракту №02.G25.31.0049 Минобнауки РФ.

Список литературы

1. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

2. Шубов И.Г. Шум и вибрации электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Попов В.И., Тихонов С.И. Магнитный шум трехфазных многополюсных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии RA // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 66–73.

4. Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия RA. – М.: ЗНАК, 1999.

5. Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А. О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 330–331.

6. Ананьев С.С., Голубев А.Н. Улучшение виброшумовых характеристик асинхронного электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 6. – С. 81–84.

7. Казаков Ю.Б., Андреев В.А., Сухинин В.П. Энергоэффективность асинхронных двигателей при вариациях режимных и конструктивных параметров / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 132 с.

8. Бондаренко Ю.И., Казаков Ю.Б. Расчет шумов тягового асинхронного двигателя при работе от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения // Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2015» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т. 4. – С. 49–53.

References

1. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asin-khronnykh mashinakh* [Higher harmonics in induction machines]. Moscow, Energiya, 1981. 352 p.

2. Shubov, I.G. *Shum i vibratsii elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986.

3. Popov, V.I., Tikhonov, S.I. Magnitnyy shum trekhfaznykh mnogopolyusnykh asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom serii RA [Magnetic noise in three-phase multipole induction motors with RA series squirrel-cage rotors]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 4, pp. 66–73.

4. Popov, V.I., Akhunov, T.A., Makarov, L.N. *Sovremennye asinkhronnye elektricheskie mashiny: Novaya Rossiyskaya seriya RA* [Modern induction electric machines: a new Russian RA series]. Moscow, ZNAK, 1999.

5. Nemtsev, A.G., Fedorov, O.V., Shestakova, L.A. O vibratsii elektrodvigateley pri nalichii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v napryazhenii istochnika pitaniya [On vibration motors under higher harmonic components in the power supply voltage]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Collected works of the VIIIth International conference on automatic electric drives]. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 2014, vol. 1, pp. 330–331.

6. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N. Uluchshenie vibroshumovykh kharakteristik asinkhronnogo elektroprivoda [Improving the vibrating characteristics of the asynchronous electric drive]. *Vestnik IGEU*, 2005, issue 6, pp. 81–84.

7. Kazakov, Yu.B., Andreev, V.A., Sukhinin, V.P. *Energoeffektivnost' asinkhronnykh dvigateley pri variatsiyakh rezhimnykh i konstruktivnykh parametrov* [Efficiency of the induction motor with various operation and design parameters]. Ivanovo, 2011. 132 p.

8. Bondarenko, Yu.I., Kazakov, Yu.B. Raschet шумов тягового асинхронного двигателя при работе от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения [Noise calculation of the traction induction motor fed by frequency inverter with pulse-width modulated voltage]. *Materiyal'y X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Energiya – 2015»* [Proceedings of the Xth International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «Energy-2015»]. Ivanovo, 2015, vol. 4, pp. 49–53.

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики,
телефон (4932)26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Бондаренко Юрий Игоревич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru