

Оценка энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей

Ю.Б. Казаков¹, Е.А. Шумилов², А.В. Тамьяров², А.Н. Морозов¹

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

²ФГБОУВО «Самарский государственный университет» филиал в г. Сызрани,
г. Сызрань, Российская Федерация
E-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Частотно-регулируемые асинхронные двигатели с питанием от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения являются источниками высокочастотных внешних электромагнитных полей и помех, которые оказывают влияние на оборудование и обслуживающий персонал, вызывают проблемы электромагнитной совместимости. Уровень магнитных полей и помех при заданной частоте не должен превышать допустимых значений. Существующие расчетные методики не позволяют определять внешние электромагнитные поля и энергию помех асинхронных двигателей при несинусоидальном питающем напряжении. Необходима оценка энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей при разных несущих частотах преобразователей частоты.

Материалы и методы: Разложение формы кривой напряжения на временные гармоники выполнено с использованием рядов Фурье. Расчет гармоник тока выполнен на основании схем замещения асинхронного двигателя с учетом изменения сопротивлений в зависимости от частоты гармоник. Моделирование электромагнитных полей при действии спектра токовых гармоник выполнено методом конечных элементов. Расчеты энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей выполнены с использованием результатов расчета электромагнитных полей.

Результаты: Разработана методика оценки влияния несинусоидальности питающего напряжения на энергию внешних электромагнитных полей частотно-регулируемых асинхронных двигателей, учитывающая широтно-импульсную модуляцию напряжения при разных несущих частотах преобразователя и спектр временных гармоник электромагнитных полей. Определены величины энергии электромагнитных полей и индукции внешних электромагнитных полей частотно-регулируемых асинхронных двигателей разной мощности при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения с разной несущей частотой преобразователя. Установлено, что высокочастотные составляющие внешних электромагнитных полей частотно-регулируемых АД при использовании преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения расширяют частотный диапазон воздействия, повышают индукцию внешних электромагнитных полей до 13,5 % и энергию электромагнитных полей до 10 %, по сравнению с синусоидальным питающим напряжением, что отрицательно сказывается на электромагнитной совместимости работы магниточувствительных устройств и на обслуживающем персонале.

Выводы: С увеличением несущей частоты инвертора ШИМ результирующая индукция внешних электромагнитных полей и энергия электромагнитных полей частотно-регулируемых АД снижается и приближается к случаю питания синусоидальным напряжением. Разработанная методика позволяет оценить внешние электромагнитные поля частотно-регулируемых асинхронных двигателей и определить их влияние на электромагнитную совместимость работы магниточувствительных устройств и на обслуживающий персонал.

Ключевые слова: частотно-регулируемый асинхронный двигатель, несинусоидальное питающее напряжение, гармонический анализ, внешние магнитные поля, энергия электромагнитных полей, конечно-элементное моделирование.

Estimation of external electromagnetic interference energy of frequency-regulated asynchronous motors

Yu.B. Kazakov¹, E.A. Shumilov², A.V. Tamyarov², A.N. Morozov¹

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

²Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation
E-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Abstract

Background: Frequency-controlled asynchronous motors fed by frequency converters with pulse width modulation are sources of high-frequency external electromagnetic fields and interference that affect the equipment and maintenance personnel, and cause electromagnetic compatibility problems. The level of magnetic fields and noise at a given frequency should not exceed the permissible values. The existing computational methods cannot be used to determine external electromagnetic fields and the noise energy of induction motors with non-sinusoidal supply voltage. It is necessary to estimate the energy of external electromagnetic disturbances of frequency-controlled asynchronous motors at different carrier frequencies of frequency converters.

Materials and methods: The decomposition of the voltage curve shape into time harmonics is performed using the Fourier series. The current harmonics are calculated based on the replacement schemes for the asynchronous motor taking into account the change in impedances with the change in the harmonics frequency. The modeling of electromagnetic fields under the action of current harmonic spectrum is performed by the finite element method. The calculations of the energy of external electromagnetic disturbances of frequency-controlled asynchronous motors are made using the electromagnetic field calculation results.

Results: The developed technique for estimating the influence of supply voltage non-sinusoidality on the energy of external electromagnetic disturbances of frequency-controlled asynchronous motors takes into account the voltage pulse width modulation at different carrier frequencies of the converter and the spectrum of the time harmonics of the electromagnetic fields. It also allows us to determine the values of energy of electromagnetic interference and induction of external electromagnetic fields of frequency-controlled asynchronous motors of different power fed by a frequency converter with pulse width modulation of voltage with different converter carrier frequency values. It has been confirmed that high-frequency components of external electromagnetic fields of frequency-adjustable AD using pulse width modulation frequency converters expand the effect frequency range, and increase the induction of external electromagnetic fields to 13.5% and the energy of electromagnetic interference to 10%, in comparison with the sinusoidal supply voltage. This has a negative effect on electromagnetic compatibility of magnet-sensitive devices and on the staff.

Conclusions: With the increase in the carrier frequency of the PWM inverter, the resulting induction of external electromagnetic fields and the energy of the electromagnetic disturbances of the frequency-adjustable ADs decreases and approaches the values of the power supply with sinusoidal voltage. The developed method allows evaluating external electromagnetic fields of frequency-regulated asynchronous motors and determining their effect on electromagnetic compatibility of magnet-sensitive devices and the staff.

Key words: frequency-controlled asynchronous motor, non-sinusoidal supply voltage, harmonic analysis, external magnetic fields, electromagnetic interference energy, finite element simulation.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.037-043

Введение. Асинхронные двигатели (АД) являются источниками внешних электромагнитных полей (ВЭМП) [1]. ВЭМП АД распространяются в пространстве, вызывают электромагнитное загрязнение окружающей среды, создают электромагнитные помехи. Плотность размещения и установленная мощность АД постоянно возрастают, интенсивность ВЭМП АД усиливается. ВЭМП оказывают влияние на оборудование и обслуживающий персонал, приводят к нарушениям в работе устройств автоматики, защиты и связи. Повышается вероятность сбоев в электронных и микропроцессорных системах управления технологическими процессами, компьютерных сетях, которые из-за низкого допустимого уровня и широкого частотного спектра восприимчивы рабочих сигналов имеют наиболее высокую чувствительность к импульсным помехам¹. Например, в связи с высокой концентрацией электрооборудования и компьютерной техники в сравнительно малом пространстве летательных аппаратов, военно-морских судов и подвижной техники возникает проблема их электромагнитной совместимости с магниточувствительным оборудованием в условиях совместной эксплуатации. Уровень ВЭМП является показателем качества специальных «маломощных» АД.

Технические средства обладают разной восприимчивостью к электромагнитным помехам. Так, нарушение режимов работы интегральных микросхем и чувствительных элементов ЭВМ возникает уже при воздействии электромагнитных помех с энергией $W = 10^{-7}$ Дж (табл. 1) [2].

¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Влияние электромагнитных полей на человека проявляется в тормозных процессах в центральной нервной системе, головных болях, вялости, быстрой утомляемости, повышении артериального давления, учащении пульса, а после длительного воздействия и в изменении в составе крови. Воздействие электромагнитных полей опасно для человека [3].

В настоящее время питание АД все шире осуществляется от преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения [4]. Это обуславливает появление в форме напряжения и тока АД широкого спектра высокочастотных составляющих, некоторые из которых могут быть значительными по амплитуде и достаточно мощными источниками высокочастотных электромагнитных помех [5]. Энергия высокочастотных электромагнитных помех частотно-регулируемых АД усиливает результирующее воздействие на чувствительные элементы оборудования и на человека. С повышением частоты отрицательное влияние ВЭМП возрастает. По Российским санитарным нормам², при длительном общем воздействии на человека предельно-допустимый уровень магнитного поля для частоты 50 Гц составляет 100 мкТл, для частот от 10 до 30 кГц, при которых обычно работают ПЧ с ШИМ напряжения, – 62,5 мкТл.

В связи с этим анализ внешних высокочастотных электромагнитных помех частотно-регулируемых АД, особенно при питании от ПЧ с ШИМ напряжения, и определение суммарной энергии всего спектра ВЭМП АД является актуальной задачей.

² СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

Таблица 1. Чувствительность технических средств к электромагнитным помехам с энергией W

Устройства	Степень повреждения при воздействии энергии, $\lg W$ [Дж]														
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Генераторы, электродвигатели, трансформаторы													o	o	x
Катушки индуктивности фильтров							o	o	x	x	x	x	x	x	x
Измерительные приборы, реле						o	o	o	x	x	x	x	x	x	x
Проволочные резисторы						o	o	o	o	o	o	x	x	x	x
Пленочные резисторы					o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x
Варисторы					o	o	o	o	o	o	o	x	x	x	x
Конденсаторы					o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x
Танталовые конденсаторы			o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Выпрямительные диоды и стабилитроны										x	x	x	x	x	x
Светодиоды и переключающие диоды			o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x
СВЧ-диоды	o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Тиристоры				o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x
Интегральные микросхемы и чувствительные элементы ЭВМ		o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Примечание: o – нарушение режимов работы устройств; x – разрушение устройства.

Материалы и методы. Объемная плотность энергии электромагнитной помехи w , создаваемая ВЭМП АД и выделяемая в координате точки источника $R = 0$, может быть определена путем интегрирования по времени воздействия T [6]:

$$w_{R=0} = \int_0^T \frac{u^2(t)}{X(t)} dt, \quad (1)$$

где $u(t)$ – временная зависимость изменения напряжения, подаваемого на АД; $X(t)$ – временная зависимость изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора АД.

Современные ПЧ обычно используют синусоидальную ШИМ напряжения первого рода. В этом случае возможно разложение формы напряжения в гармонический ряд

$$u(t) = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Mv} \sin(v\omega t + \varphi_v),$$

где U_{Mv} – амплитуда v -й временной гармоники напряжения; $\omega = 2\pi f_1$ – угловая частота; f_1 – частота 1-й гармоники; φ_v – фаза гармоники.

Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения АД, зависящие от частоты, определяют форму его тока $i(t)$ [7].

Очевидно, что гармонический состав напряжения будет влиять на результирующую энергию внешней электромагнитной помехи, создаваемой частотно-регулируемым АД, и в каждой точке пространства, окружающего АД, энергия этой помехи будет разной.

При синусоидальном питании АД энергия электромагнитной помехи будет соответствовать энергии основной гармоники ВЭМП. Для частотно-регулируемых АД результирующая объемная плотность энергии электромагнитной помехи в точке пространства R будет представлять совокупность объемных плотностей энергий всех гармоник ВЭМП:

$$\sum_{v=1}^{\infty} w_{v,R=0} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{U_{Mv}^2}{X_v} \int_0^T \sin^2(v\omega t) dt, \quad (2)$$

где $X_v = v\omega L$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора АД для v -й высокочастотной временной гармоники; L – индуктивность обмотки статора АД.

С удалением на расстояние R от источника объемная плотность энергии v -й гармонической электромагнитной помехи спадает по закону³

$$w_{v,R} = \frac{1}{R^{v+2}}.$$

Тогда суммарная плотность энергии электромагнитной помехи в точке R от всех гармоник будет равна

$$\sum_{v=1}^{\infty} w_{v,R} = \sum_{v=1}^{\infty} \left(\frac{1}{R^{v+2}} w_{v,R=0} \right). \quad (3)$$

При таком подходе не учитывается насыщение ферромагнитных материалов, косвенно учитывается зубчатость сердечников АД и частотные зависимости сопротивлений схемы замещения, упрощенно учитывается пространственное затухание высокочастотных ВЭМП.

Другой подход определения объемной плотности электромагнитных помех со снятием перечисленных допущений заключается в расчете на основании известной временной зависимости индукции ВЭМП:

$$w_R = \frac{\mu_0}{2} \int_0^T B_R^2(t) dt, \quad (4)$$

где $B_R(t)$ – временная зависимость изменения индукции ВЭМП в точке R .

Определение $B_R(t)$ возможно численными методами с корректной дискретизацией по пространственной и временной координатам [8], например, на основе метода конечных элементов по заданному закону изменения $u(t)$ или $i(t)$.

Результаты. Выполнено определение ВЭМП и анализ энергии внешних электромагнит-

³ Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.20.02. – Барнаул, 2009. – 20 с.

ных помех, создаваемых частотно-регулируемым АД АИР71В6УЗ.

Питание АД осуществляется от ПЧ с синусоидальной ШИМ напряжения. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора АД для 1-й гармоники (50 Гц) составляет $X_1 = 34,685$ Ом. С помощью гармонического анализа определены

высшие гармонические выходного напряжения ПЧ при несущих частотах ШИМ $f_H = 600$ Гц и $f_H = 1200$ Гц. Амплитуда основной (первой) гармоники в обоих случаях составляла 537,56 В. В табл. 2 приведены амплитуды некоторых гармоник напряжения.

Таблица 2. Сравнительный состав амплитуд гармоник выходного напряжения ПЧ с синусоидальной ШИМ при $f_H = 600$ Гц / 1200 Гц

№ гармоники	1	...	22	...	26	...	47	...	68
Амплитуда, В ($f_H = 600$ Гц / 1200 Гц)	537,56/ 537,56	....	146,05/ 124,69	....	146,15/ 126,85	....	36,42/ 120,04	....	37,45/ 62,55
№ гармоники	89	...	91	...	95	...	97	...	101
Амплитуда, В ($f_H = 600$ Гц / 1200 Гц)	35,69/ 14,93	....	11,10/ 49,94	....	10,34/ 49,36	....	11,65/ 49,06	....	11,31/ 50,99
№ гармоники	103	...	112	...	116	...	124	...	128
Амплитуда, В ($f_H = 600$ Гц / 1200 Гц)	35,31/ 15,51	....	19,23/ 16,14	....	11,67/ 16,6	....	12,49/ 14,52	....	18,77/ 17,3

Экспериментальное определение гармонического состава напряжения показало, что относительная погрешность определения амплитуд гармоник не превысила 5,7 %.

Очевидно, что при изменении f_H ШИМ частотный спектр питающего напряжения изменяется. Это приводит к изменению интенсивности ВЭМП и энергии внешних электромагнитных помех АД.

Рассматриваемый временной отрезок составлял $T = 1/200$ с. Объемные плотности энергии внешних электромагнитных помех для 1-й и 22-й гармоник составили соответственно $w_{1,R=0} = 0,052$ и $w_{22,R=0} = 0,003$ Дж/м³, т.е. добавка только 22-й гармоники составляет около 6 %.

С увеличением порядка гармоники пространственное затухание ВЭМП усиливается. Совокупные значения объемных плотностей энергии помех на расстоянии 1,5 и 2 м от АД представлены в табл. 3.

Таблица 3. Объемная плотность энергии электромагнитных помех (Дж/м³) частотно-регулируемого АД с изменением R и f_H ШИМ

f_H , Гц \ R , м	1,5	2
600	0,046227	0,0195003
1200	0,046223	0,0195000

Полученные значения энергии ВЭМП АД сопоставимы с допустимыми уровнями воздействия на технику (см. табл. 1).

При реализации другого подхода результирующая индукция ВЭМП АД рассчитывалась численным методом на основе конечно-элементных моделей⁴ при заданных существенных для расчета ВЭМП амплитудах гармоник

токов АД. Так, ток статора при питании рассматриваемого АД от ПЧ с ШИМ напряжения при $f_H = 600$ Гц в номинальном режиме и $I_{M1} = 2,5$ А записывается как

$$\begin{aligned}
 i(t) = & 2,5 \sin(\omega t + 0) + 0,03218 \sin(5\omega t + 212,6) + \\
 & + 0,01988 \sin(7\omega t + 186,2) + 0,01198 \sin(16\omega t + 204,6) + \\
 & + 0,0556 \sin(20\omega t + 195,5) + 0,11857 \sin(22\omega t + 265,7) + \\
 & + 0,1 \sin(26\omega t + 195,2) + 0,03981 \sin(28\omega t + 200,9) + \\
 & + 0,00473 \sin(32\omega t + 179,7) + 0,00753 \sin(41\omega t + 195) + \\
 & + 0,02544 \sin(43\omega t + 190,6) + 0,01385 \sin(47\omega t + 97,1) + \\
 & + 0,01326 \sin(49\omega t + 92,5) + 0,02 \sin(53\omega t + 258,6) + \\
 & + 0,00571 \sin(55\omega t + 186,5) + 0,00789 \sin(64\omega t + 186,5) + \\
 & + 0,00984 \sin(68\omega t + 183,3) + 0,00878 \sin(76\omega t + 181,5) + \\
 & + 0,00618 \sin(80\omega t + 178,1) + 0,00235 \sin(85\omega t + 205,4) + \\
 & + 0,00717 \sin(89\omega t + 201,7) + 0,00218 \sin(91\omega t + 185,2) + \\
 & + 0,00195 \sin(95\omega t + 201,6) + 0,00215 \sin(97\omega t + 172,2) + \\
 & + 0,002 \sin(101\omega t + 178,1) + 0,00613 \sin(103\omega t + 181,5) + \\
 & + 0,00194 \sin(107\omega t + 183,3) + 0,00477 \sin(110\omega t + 186,5) + \\
 & + 0,00307 \sin(112\omega t + 258,6) + 0,0018 \sin(116\omega t + 92,5) + \\
 & + 0,0018 \sin(124\omega t + 125,7) + 0,00262 \sin(128\omega t + 97,1) + \\
 & + 0,00411 \sin(130\omega t + 190,1) + 0,00295 \sin(131\omega t + 197) + \\
 & + 0,00301 \sin(133\omega t + 190,1) + 0,00159 \sin(152\omega t + 197,2) + \\
 & + 0,0025 \sin(154\omega t + 171) + 0,0026 \sin(155\omega t + 202,7) + \\
 & + 0,00233 \sin(157\omega t + 208,1) + 0,00169 \sin(175\omega t + 205,9) + \\
 & + 0,00203 \sin(182\omega t + 183,1) + 0,00124 \sin(184\omega t + 178,1) + \\
 & + 0,00098 \sin(196\omega t + 178,1) .
 \end{aligned}$$

Для $f_H = 1200$ Гц амплитуды токов гармоник и фазы были несколько другими.

Распределение ВЭМП, полученное компьютерным моделированием с использованием метода конечных элементов, представлено на рис. 1. Так как моделируемый АД имеет шесть полюсов, то линии магнитного потока ВЭМП формируют шестиугольник.

⁴ Elcut – руководство пользователя. ООО «Тор», Санкт-Петербург. 2015.

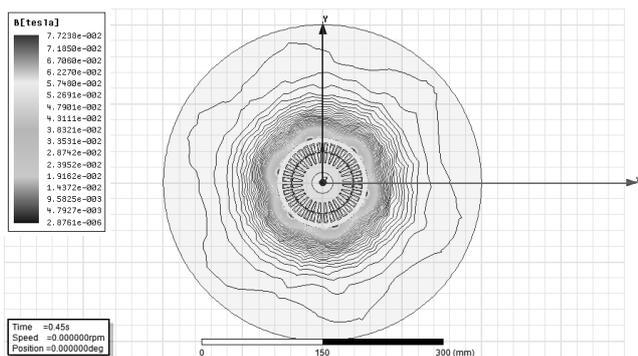


Рис. 1. Распределение ВЭМП при питании АД от ПЧ с ШИМ напряжения, $f_H = 600$ Гц

Временные изменения индукции ВЭМП АД в точке R (0,06 м; 0,06 м; 0 м) представлены на рис. 2–4.

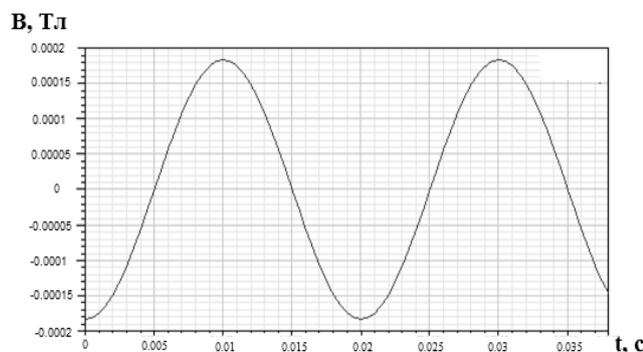


Рис. 2. Распределение ВЭМП при питании АД от источника синусоидального напряжения

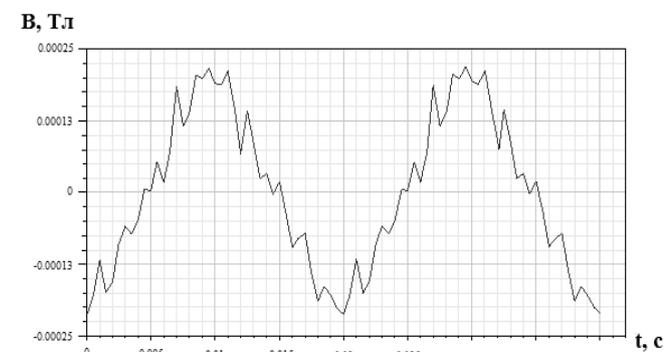


Рис. 3. Распределение ВЭМП при питании АД от ПЧ с ШИМ напряжения, $f_H = 600$ Гц

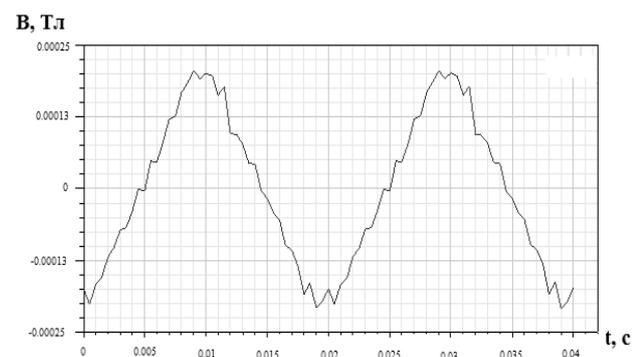


Рис. 4. Распределение ВЭМП при питании АД от ПЧ с ШИМ напряжения, $f_H = 1200$ Гц

Использование ПЧ с ШИМ напряжения обуславливает появление высокочастотных составляющих и увеличение амплитудного значения индукции ВЭМП АД с 185 мкТл для синусоидального напряжения до 210 мкТл и 200 мкТл для $f_H = 600$ Гц и $f_H = 1200$ Гц ШИМ, соответственно, т.е. на 13,5 и 8 %. То есть с уменьшением f_H амплитуда индукции ВЭМП растет, а форма индукции искажается сильнее. Экспериментальное определение амплитуд индукций ВЭМП показало, что относительная погрешность их определения не превысила 5,54 %, что свидетельствует о достаточной точности расчета ВЭМП АД.

Для АД ТАДВМ280-4У2 мощностью 170 кВт аналогичное моделирование в точке R (0,63 м; 0,63 м; 0 м), т.е. на расстоянии около 0,9 м от оси АД, показало, что амплитудное значение индукции ВЭМП АД повышается с 116 мкТл для синусоидального напряжения до 205 мкТл и 170 мкТл для $f_H = 600$ Гц и $f_H = 1200$ Гц, соответственно, т.е. на 76,7 и 46,6 %. В эксперименте, выполненным ПАО «НИПТИЭМ», индукция ВЭМП при синусоидальном питающем напряжении составила 105 мкТл, т.е. погрешность расчета составила 10,5 %.

Полученные результаты свидетельствуют о важности контроля уровня ВЭМП АД, так как возможно превышение индукции ВЭМП частотно-регулируемых АД предельно допустимых норм, что представляет опасность для здоровья.

Выводы. Предложенная методика определения внешних электромагнитных полей и энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей учитывает форму несинусоидальности напряжения, в том числе в виде широтно-импульсной модуляции. Методика включает разложение формы кривой напряжения на временные гармоники, алгоритмы расчета гармоник тока, интенсивности внешних электромагнитных полей и энергии внешних электромагнитных помех от совокупного действия всего спектра гармоник напряжения. Оценка интенсивности внешних электромагнитных полей и энергии внешних электромагнитных помех конкретных асинхронных двигателей при синусоидальном питающем напряжении и при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения с разными несущими частотами показала, что высокочастотные составляющие внешних электромагнитных полей частотно-регулируемых АД при использовании преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения расширяют частотный диапазон воздействия, повышают индукцию внешних электромагнитных полей и энергию внешних электромагнитных помех, что отрицательно сказывается на электромагнитной совместимости работы магниточувствительных устройств и на обслуживающем персонале.

С увеличением несущей частоты инвертора ШИМ результирующая индукция внешних электромагнитных полей и энергия электромагнитных помех частотно-регулируемых АД снижа-

ются и приближаются к случаю питания синусоидальным напряжением.

Список литературы

1. Асадуллин А.И., Белашов В.Ю. Исследование ЭМ полей, генерируемых электрооборудованием и элементами ЭЭС // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 11/12. – С. 98–105.
2. Овсянников А.Г., Борисов Р.К. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 196 с.
3. Васильева Л.К., Горский А.Н. Электротехнические аспекты влияния низкочастотных электромагнитных полей на человека // Вестник МАНЭБ. – 2000. – № 4(28). – С. 31–35.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
5. Курнышев Б.С., Фомин П.А. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2005. – 100 с.
6. Малков Н.А., Пудовкин А.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с.
7. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Анализ гармонического состава напряжения частотного электропривода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 154–159.
8. Численный анализ внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением / Ю.Б. Казаков, А.В. Тамьяров, Е.А. Шумилов, Д.О. Чуянов // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 34–37.

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru
Kazakov Yuri Borisovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral Degree), Professor, Head of Electromechanics Department,
telephone (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Шумилов Егор Алексеевич,
ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» (филиал в г. Сызрани),
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и промышленной автоматики,
телефон (8464) 98-39-58,
e-mail: shumilov_e_a@mail.ru
Shumilov Egor Alekseyevich,
Samara State Technical University (Syzran Branch),
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics and Industrial Automation Department
telephone (8464) 98-39-58,
e-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Тамьяров Андрей Валериевич,
ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» (филиал в г. Сызрани),
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и промышленной автоматики,
телефон (8464) 98-39-58.
Tamyarov Andrei Valerievich,
Samara State Technical University (Syzran Branch),
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics and Industrial Automation Department
telephone (8464) 98-39-58.

References

1. Asadullin, A.I., Belashov, V.Yu. Issledovanie EM poley, generiruemykh elektrooborudovaniem i elementami EES [A study of electromagnetic fields generated by electric equipment and electric power systems]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2011, no. 11/12, pp. 98–105.
2. Ovsyannikov, A.G., Borisov, R.K. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electric power engineering]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2010. 196 p.
3. Vasilyeva, L.K., Gorsky, A.N. Elektrotekhnicheskie aspekty vliyaniya nizkочастотnykh elektromagnitnykh poley na cheloveka [Electricotechnical aspects of low-frequency electromagnetic field effects on people]. *Vestnik MANEB*, 2000, no. 4(28), pp. 31–35.
4. Sokolovskiy, G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC variable frequency electric drives]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 272 p.
5. Kurnyshev, B.S., Fomin, P.A. *Elektromagnitnaya sovместimost' reguliruemykh asinkhronnykh elektroprivodov* [Electromagnetic compatibility of controlled asynchronous electric drives]. Ivanovo, 2005. 100 p.
6. Malkov, N.A., Pudovkin, A.P. *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv* [Electromagnetic compatibility of radioelectronic devices]. Tambov, Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007. 88 p.
7. Zyryanov, V.M., Mitrofanov, N.A., Sokolovskiy, Yu.B. Analiz garmonicheskogo sostava napryazheniya chastotnogo elektroprivoda [Analysis of harmonic composition of variable-frequency electric drive voltage]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2015, no. 1, pp. 154–159.
8. Kazakov, Yu.B., Tamyarov, A.V., Shumilov, E.A., Chuyanov, D.O. Chislennyy analiz vneshnikh elektromagnitnykh poley asinkhronnykh dvigateley pri pitanii shirotno-impul'sno-modulirovannym napryazheniem [Calculation analysis of external electromagnetic fields of asynchronous drives fed by PWM voltage]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 34–37.

Морозов Александр Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06.
Morozov Aleksandr Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Postgraduate Student of the Electromechanics Department,
telephone (4932) 26-97-06.