

УДК 621.313.8

Численный анализ внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением

Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук, А.В. Тамьяров, канд. техн. наук, Е.А. Шумилов, Д.О. Чуянов, аспиранты

Проведен численный анализ внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании от преобразователя с широтно-импульсной модуляцией напряжения. Представлены результаты исследований на разработанных 3D конечно-элементных моделях. Показано, что внешние электромагнитные поля таких асинхронных двигателей существенны, содержат высокочастотные составляющие, могут оказывать вредное влияние на обслуживающий персонал и ухудшать электромагнитную совместимость.

Ключевые слова: внешние электромагнитные поля, асинхронные двигатели, широтно-импульсная модуляция напряжения, электромагнитная совместимость.

Numerical Analysis of External Electromagnetic Fields of Induction Motors with Supply of Latitude Pulse-Modulated Voltage

Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering, A.V. Tamyarov, Candidate of Engineering, E.A. Shumilov, D.O. Chuyanov, Post Graduate Students

The authors carry out the numerical analysis of external electromagnetic fields of induction motors with supplying from the latitude pulse-modulated voltage converter. The research results are demonstrated on the base of the developed 3D finite-element models. It is shown that external electromagnetic fields of induction motors are essential, and they contain high frequency components as well as have a harmful impact on staff and worsen electromagnetic compatibility.

Key words: external electromagnetic fields, induction motors, latitude pulse-modulated voltage, electromagnetic compatibility.

Асинхронные электродвигатели (АД) при работе создают внешние электромагнитные поля (ВЭМП). ВЭМП распространяются в пространстве, создают электромагнитное загрязнение окружающей среды. Возрастающая энерговооруженность производств приводит к повышенной плотности размещения АД, усилению влияния ВЭМП АД на работу других устройств, к проблемам электромагнитной совместимости [1]. Питание АД от преобразователей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения вызывает ВЭМП АД не только промышленной, но и повышенных частот. При работе современных электроприводов ВЭМП АД повышают вероятность сбоев в электронных и микропроцессорных системах управления, которые из-за низкого уровня и широкого частотного спектра рабочих сигналов имеют наиболее высокую чувствительность к импульсным помехам. Так, нарушение режимов работы интегральных микросхем и чувствительных элементов ЭВМ возникает уже при воздействии электромагнитных помех с энергией $W = 10^{-7}$ Дж.

ВЭМП оказывают воздействие и на обслуживающий персонал. Оно проявляется в тормозных процессах со стороны центральной нервной системы, головных болях, вялости, быстрой утомляемости, повышении артериального давления, учащении пульса, а после длительного воздействия происходят изменения в составе крови. Наиболее чувствительны центральная нервная, сердечнососудистая, гормональная и репродуктивная системы человека. Органы человека имеют собственные частоты колебаний в диапазоне от 4 до 60 Гц. По Российским сани-

тарным нормам, предельно-допустимые уровни полей снижаются при повышении частоты. Так, если при воздействии на человека в течение всей рабочей смены предельно-допустимая индукция постоянного магнитного поля составляет 10^4 мкТл, то для частоты 50 Гц она снижается до 100 мкТл, а для частот от 10 до 30 кГц, при которых обычно работают преобразователи с ШИМ напряжения, – до 62,5 мкТл. Предельно допустимый уровень электрического поля в диапазоне частот от 10 до 30 кГц при воздействии на человека в течение всей смены составляет 500 В/м.

Актуальность анализа ВЭМП АД подтверждается защитой нескольких кандидатских и докторских диссертаций в течение последних 5 лет [2, 3, 4]. В [2] приводятся результаты экспериментальных измерений и исследований ВЭМП АД при работе в разных режимах. Показано, что наибольших значений ВЭМП достигают в торцевой части АД, торцевой магнитный поток меняется в зависимости от режима работы и конструктивных особенностей АД. По величине и характеру внешнего торцевого магнитного потока можно диагностировать наличие дефектов и неисправностей в АД. Однако расчетные методы моделирования ВЭМП АД в [2] не представлены.

В исследованиях [3, 4] проводился расчетный анализ ВЭМП АД на основе аналитических методов с принятием достаточно серьезных допущений. Современные численные методы электромагнитного анализа позволяют отказаться от большинства этих допущений и рассматривать все процессы с учетом реальных конструкций АД, дискретности размещения обмоток, нелинейности ха-

рактических характеристик намагничивания, наведенных вихревых токов и др. Кроме того, в опубликованных исследованиях не рассматривались режимы работы АД от частотных преобразователей напряжения и регуляторов с ШИМ напряжения.

Аналитическое исследование влияния работы частотно-регулируемых АД друг на друга только через питающую сеть, но не через ВЭМП, проведено в [5]. Особенно актуальна эта проблема при питании АД от преобразователей с ШИМ напряжения [6], когда ВЭМП будут иметь широкий частотный спектр.

Таким образом, исследование ВЭМП АД при питании от преобразователей с ШИМ напряжения ранее не выполнялось и является актуальным. Это обуславливает целесообразность разработки численных моделей частотно-регулируемых АД и исследования интенсивности и параметров ВЭМП АД.

Внешние электромагнитные поля АД создаются токами в обмотках статора и ротора. Частотный спектр тока статора зависит от типа АД, нагрузки и параметров преобразователя. Спектральный анализ тока был выполнен на основе имитационной модели асинхронного частотно-регулируемого электропривода в среде Simulink пакета Matlab. Анализ проводился для АД мощностью 550 Вт с синхронной частотой вращения 1000 об/мин. Несущая частота преобразователя составляла 3000 Гц, модулирующая – 50 Гц. По отношению к высшим временным гармоникам напряжения АД, работающий в режимах от режима пуска до холостого хода на первой гармонике, находится в режиме короткого замыкания (КЗ). Временные зависимости выходного напряжения инвертора представлены на рис. 1.

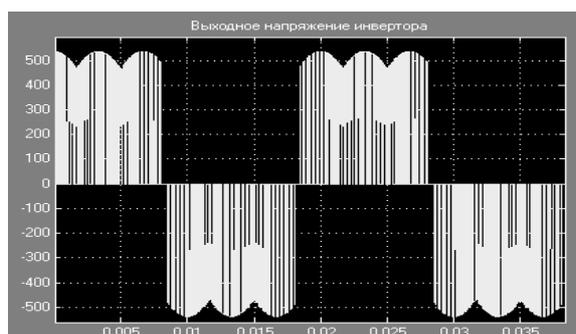


Рис. 1. Оциллограмма выходного напряжения инвертора

Гармонический анализ позволил определить составляющие тока статора (табл. 1).

Кривые фазных токов в АД в номинальном режиме при питании от частотного преобразователя представлены на рис. 2.

Моделирование ВЭМП АД при работе с ШИМ напряжения осуществлялось методом конечных элементов с помощью пакета Ansoft Maxwell. На рис. 3 представлено распределение линий внешнего электромагнитного поля такого АД при работе в номинальном режиме.

Таблица 1. Гармонический состав тока статора (коэффициент гармоник 6,74 %)

Параметры	Номер гармоники				
	1	5	7	11	13
Амплитуда, А	2,51	0,09	0,06	0,01	0,01
Фаза, °	0,0	107,9	-76,2	-79,9	94,7
	58	62	64	119	121
Амплитуда, А	0,08	0,08	0,01	0,04	0,04
Фаза, °	-78,2	-78,3	-79,2	111,1	-69

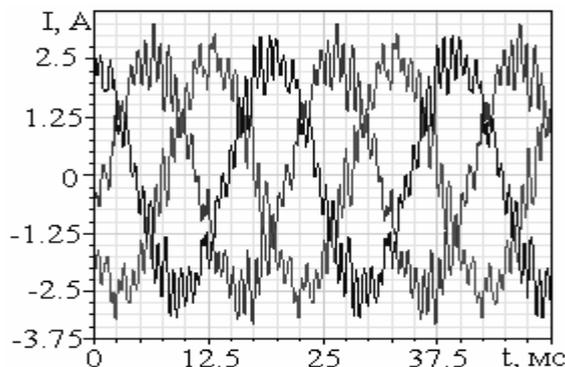


Рис. 2. Фазные токи в АД в номинальном режиме при питании от частотного преобразователя

Наибольшее значение индукции изменяющегося во времени внешнего магнитного поля в точке А (-30 мм; 100 мм) в поперечном сечении АД, находящейся на удалении 47,4 мм от поверхности корпуса, достигает 4,3 мкТл (рис. 3,а). Основными источниками внешнего магнитного поля в АД являются лобовые части обмоток. Наибольшее значение индукции изменяющегося во времени внешнего магнитного поля в точке В (-100 мм; 100 мм) в продольном сечении АД, находящейся на удалении 46,4 мм от поверхности корпуса, достигает уже 340 мкТл (рис. 3,б).

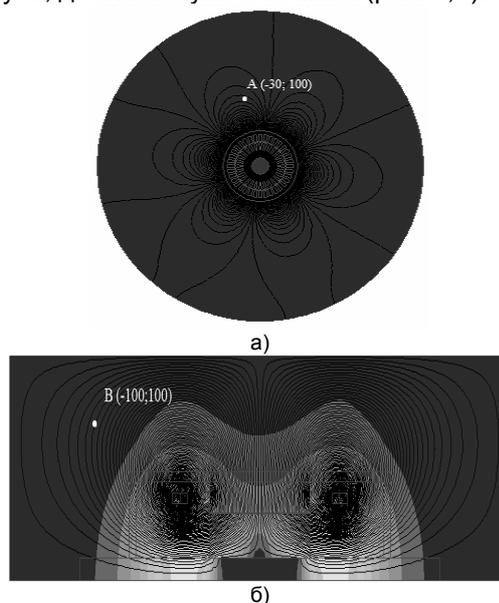


Рис. 3. Распределение линий внешнего электромагнитного поля АД: а – в поперечном сечении б – в продольном сечении

Такое различие в результатах двумерного моделирования, хотя и по разным сечениям АД,

требует применения трехмерного моделирования. Была разработана трехмерная конечно-элементная модель АД с учетом конструктивных особенностей машины, расположения пазов статора и ротора, дискретного размещения проводников обмоток.

Трехмерная модель двигателя и внешнего магнитного поля от лобовых частей обмотки статора АД представлена на рис. 4.

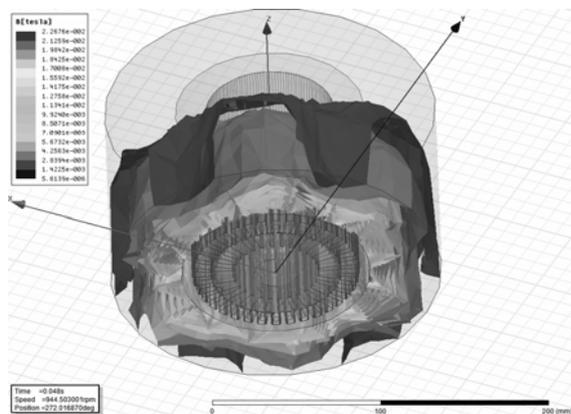


Рис. 4. Трехмерная модель двигателя и внешнего магнитного поля лобовых частей обмотки АД

В номинальном режиме при питании АД от преобразователя с широтно-импульсно-модулированным напряжением график изменения индукции ВЭМП представлен на рис. 5. Наибольшие значения индукции близки значениям, полученным в двухмерной модели продольного сечения АД.

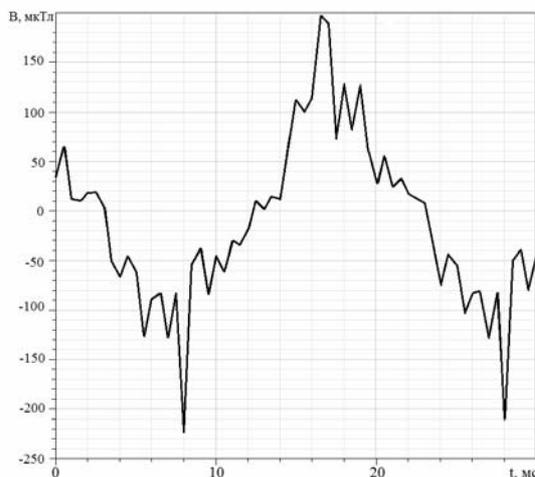


Рис. 5. Индукция ВЭМП АД в номинальном режиме при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением

Наибольшие ВЭМП АД создаются при пусковых токах и в зоне лобовых частей. Были смоделированы ВЭМП АД, находящемся в заторможенном режиме. Токи временных гармоник практически не изменились по сравнению с номинальным режимом. Ток первой гармоники зада-

вался пусковой. На рис. 6 представлены графики изменения индукции ВЭМП при питании АД синусоидальным напряжением в режиме холостого хода и ШИМ напряжения в заторможенном режиме. Высокочастотные импульсы индукций при питании от ШИМ напряжения могут увеличивать ВЭМП до 80 % при переходе от режима холостого хода до режима КЗ.

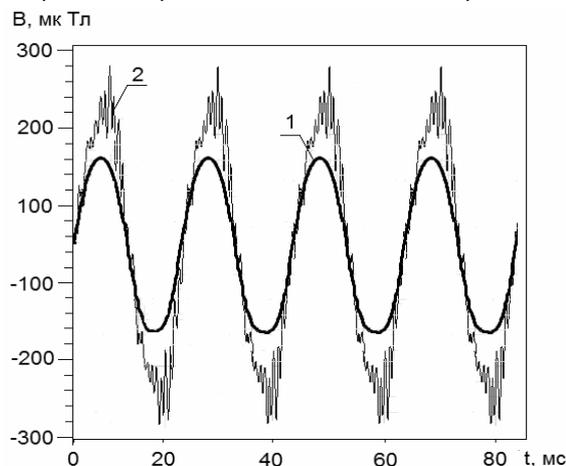


Рис. 6. Индукция ВЭМП АД: 1 – при питании синусоидальным напряжением в режиме холостого хода; 2 – при питании ШИМ напряжения в заторможенном режиме

Таким образом, осуществлено моделирование и исследование ВЭМП АД при питании ШИМ напряжения. Показано, что ВЭМП АД существенны, содержат высокочастотные составляющие, которые могут приводить к возрастанию ВЭМП до 80 % при переходе от режима холостого хода до режима КЗ.

Список литературы

1. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – М.: Изд. центр «Академия», 2010. – 224 с.
2. Voitto Kokko. Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements: academic Dissertation / University of Oulu / public discussion in Raahensali, on March 14th, 2003. – Oulu, Finland, 2003. – 102 pages.
3. Сотников В.В. Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: специальность 05.09.01 / Марийский государственный технический университет. – Йошкар-Ола, 2002. – 38 с.
4. Жумангулов К.К. Внешние магнитные поля электромеханических преобразователей электротехнических комплексов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: специальность 05.09.03 / НАО «Алматинский институт энергетики и связи». – Алматы, 2006. – 41 с.
5. Курнышев Б.С., Фомин П.А. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2005. – 100 с.
6. Казаков Ю.Б., Шумилов Е.А., Чуюнов Д.О. Исследование внешних электромагнитных полей при питании широтно-импульсно-модулированным напряжением: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – Иваново, 2011. – Т. 3. – С. 112–115.

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

Тамьяров Андрей Валерьевич,
Филиал ФГБОУВПО «Самарский государственный технический университет» (г. Сызрань),
кандидат технических наук, доцент, кафедры ЭПА,
телефон (8464) 98-39-58.

Шумилов Егор Алексеевич,
Филиал ФГБОУВПО «Самарский государственный технический университет» (г. Сызрань),
старший преподаватель кафедры ЭПА, аспирант,
телефон (8464) 98-39-58,
e-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Чуянов Дмитрий Олегович,
Филиал ФГБОУВПО «Самарский государственный технический университет» (г. Сызрань),
старший преподаватель кафедры ЭПА, аспирант,
телефон (8464) 98-39-58.