

УДК 621.314.5

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В МНОГОФАЗНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАЗЕМНОЙ ТЯГИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.Г. ЛОГАЧЕВА, Р.Р. ХУСНУТДИНОВ, И.О. АЙМЕТОВ

Казанский государственный энергетический университет

Повышение энергоэффективности транспортных средств является неотъемлемым признаком научно-технического прогресса. Одним из средств повышения энергоэффективности транспорта является внедрение электрического привода с многофазными асинхронными двигателями. При этом питание многофазных двигателей осуществляется от многофазных преобразователей частоты с автономными инверторами напряжения, количество и режим работы силовых ключей которых может отличаться от традиционно принятых в трехфазных преобразователях. В статье приведена сравнительная оценка потерь в трехфазном и 79-фазном преобразователях частоты, основанная на расчете статических и динамических потерь в ключах автономных инверторов напряжения, выходное напряжение которых формируется по закону синусоидальной широтно-импульсной модуляции и по базовому закону коммутации ключей.

Ключевые слова: многофазный преобразователь частоты, инвертор, ШИМ, IGBT, потери.

Введение

Рост экологической сознательности, желание снизить уровень загрязнения воздуха в городах транспортными средствами, в целом – стремление повысить топливную эффективность транспорта ведут к все большему распространению электрической тяги. Современный электрический транспорт – это уже не только метро, поезда, троллейбусы и трамваи, но и легковые автомобили, и даже частично – самолеты.

В начале 2000-х гг. зарубежной компанией *Chorus Motors* (Великобритания) стала развиваться технология применения многофазных электрических двигателей для целей наземной электрической тяги гражданских воздушных судов. Разработанная компанией технология наземной тяги для самолетов *WheelTug* [1], представляющая собой встраиваемые в шасси воздушного судна тяговые двигатели, питающиеся от бортовой вспомогательной силовой установки и управляемые из кабины пилотов, постепенно привлекает все больше авиаперевозчиков. Экономия затрат на топливо, безопасность и снижение уровня загрязнения окружающей среды являются одними из главных преимуществ использования такой системы при движении самолета на земле, по сравнению с реактивной тягой. Компанией проводились неоднократные испытания системы совместно с партнерскими авиакомпаниями и аэропортами, показавшие возможность движения самолета по аэродрому без использования реактивной тяги и дополнительных буксиров со скоростью до 40 км/ч. Представив, сколько рейсов совершается ежедневно и сколько при этом сжигается топлива во время движения на

взлетно-посадочную полосу, на стоянку, и учтя прочие наземные перемещения, можно представить, какую экономию можно получить, оборудовав самолет этой системой.

На рис. 1 показан график годовой экономии топлива для различных моделей самолета компании Боинг, составленный представителями компании *Chorus Motors*.

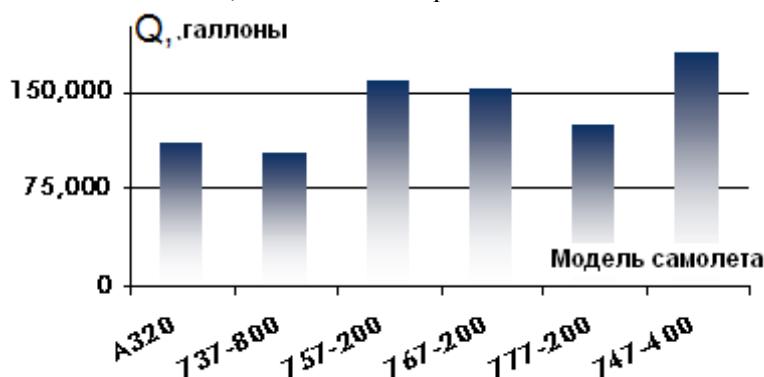


Рис. 1. Годовая экономия топлива при оборудовании самолетов Боинг системой *WheelTug*

Инновационность технологии заключается в применении новых многофазных асинхронных двигателей, имеющих количество фаз статора, превышающее три. Кроме того, сердечник статора и ротор двигателя имеют «плоскую» конструкцию (когда диаметр значительно превышает длину сердечника) для обеспечения возможности размещения двигателя в колесе самолета.

На сегодняшний день технология *WheelTug* имеет статус опытной коммерческой разработки. Оборудование предоставляется заказчику без первоначального взноса на условиях последующей выплаты 50% процентов от сэкономленных, благодаря внедрению технологии, финансовых средств.

Существует ряд работ [2–9], в которых отмечаются такие преимущества многофазных асинхронных двигателей, как повышенная надежность, улучшенные виброшумовые и энергетические характеристики. Но учитывая, что применение подобных машин неразрывно связано с необходимостью использования источника многофазного переменного напряжения, а именно многофазного преобразователя частоты, представляется интересной оценка эффективности такого источника энергии.

Одной из важнейших энергетических характеристик любой системы является ее коэффициент полезного действия. Для электротехнических устройств определяющим фактором в вычислении КПД являются электрические потери. Проведем оценку эффективности многофазного преобразователя частоты путем определения потерь электроэнергии в нем и сравнения полученных значений со значением для его трехфазного аналога.

Методика оценки потерь в многофазном преобразователе частоты

Следует отметить, что с увеличением количества фаз двигателя топология преобразователя частоты существенно не меняется. Изменению подлежит только количество плеч автономного инвертора напряжения (АИН), на котором лежит функция формирования выходных питающих двигателей напряжений. В таком случае для трехфазного и многофазного преобразователя частоты величина потерь будет отличаться в части потерь в инверторе напряжения, так как неизбежно изменяются количество и номинальные мощности ключей.

В большинстве случаев формирование выходного напряжения в существующих трехфазных преобразователях частоты происходит методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом выходное напряжение преобразователя представляет собой последовательность прямоугольных импульсов. При таком режиме работы под потерями в инверторе напряжения можно понимать потери в ключах (*IGBT* транзисторах с анти-параллельными диодами) – потери на переключение (динамические потери, зависят от частоты коммутации) и потери в проводящем режиме (статические потери).

Самым распространенным законом ШИМ является синусоидальный закон, при котором формируемая последовательность импульсов представляет собой моделированную синусоиду. Чтобы максимально приблизить форму напряжения, подаваемого на обмотки статора двигателя, к синусоиде, в преобразователе частоты используются ключи с высокой частотой переключения, а между двигателем и преобразователем частоты устанавливаются синусные фильтры. Фильтры предназначены для приближения формы питающего напряжения к синусоиде, так как питание несинусоидальным напряжением отрицательно сказывается на характеристиках трехфазного двигателя. В частности, это приводит к дополнительному нагреву обмоток, появлению в воздушном зазоре машины магнитных полей, вращающихся противоположно полю основной гармоники с отличной от него скоростью, создающих тормозящие и колебательные моменты [10]. С другой стороны, одним из преимуществ увеличения количества фаз двигателя является возможность полезного использования высших временных гармоник и созданных ими магнитных полей в воздушном зазоре машины [1, 9].

Предположив, что частота коммутации силовых ключей преобразователя равна частоте выходного напряжения, получим базовый закон формирования фазных напряжений статора двигателя.

Мощность статических потерь в одном *IGBT* можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{ст_IGBT}} = I_{\text{max}} \cdot U_{\text{ce(sat)}} \cdot D, \quad (1)$$

где $I_{\text{max}} = \sqrt{2}I_{\text{ном_двиг}}$ – ток через включенный ключ; $U_{\text{ce(sat)}}$ – напряжение на открытом ключе; D – коэффициент заполнения сигнала ШИМ (для расчета принят равным 0,23 для синусоидальной ШИМ и 0,5 – для базового закона модуляции, при котором длительность проводящего и закрытого состояния ключа одинакова и составляет половину периода).

Мощность динамических потерь в *IGBT* определяется по формуле

$$P_{\text{дин_IGBT}} = \frac{(E_{\text{sw(on)}} + E_{\text{sw(off)}}) f_{\text{ШИМ}}}{\pi}, \quad (2)$$

где $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ; $E_{\text{sw(on)}}$ и $E_{\text{sw(off)}}$ – энергии включения и выключения ключа, соответственно, приведенные в справочных данных.

Суммарные потери *IGBT*-транзистора

$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{дин_IGBT}} + P_{\text{ст_IGBT}},$$

Статические потери диода

$$P_{\text{ст_D}} = I_{\text{max}} \cdot U_{\text{ec}} \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right), \quad (3)$$

где U_{ec} – прямое падение напряжения на диоде; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Динамические потери переключения диода

$$P_{\text{дин}_D} = \frac{E_{\text{rec}} \cdot f_{\text{ШИМ}}}{\pi}, \quad (4)$$

где E_{rec} – энергия восстановления диода.

Суммарные потери диода

$$P_D = P_{\text{ст}_D} + P_{\text{дин}_D}, \quad (5)$$

суммарные потери одного ключа

$$P_{\text{кл}} = P_{\text{IGBT}} + P_D. \quad (6)$$

Суммарные потери мощности инвертора

$$P_{\text{инв}} = 2mP_{\text{кл}}. \quad (7)$$

Полученные результаты и их анализ

Наибольшее количество фаз асинхронного двигателя на сегодняшний день рассмотрено в работе [9] и равно 79 для двигателя мощностью 170 кВт. При этом в работе не приведена оценка потерь в 79-фазном преобразователе частоты. Покажем, что даже для такого большого количества фаз потери в многофазном АИН не превышают потери в АИН традиционного трехфазного исполнения.

Стандартная частота коммутации для трехфазных инверторов находится в диапазоне 1–15 кГц. Рассматривая установившийся режим работы, примем частоту коммутации ключей 10 кГц.

В таблице приведены расчетные данные потерь для 3-фазного и 79-фазного преобразователей частоты. Для 79-фазного преобразователя также рассмотрено 2 варианта: с ШИМ коммутацией и с коммутацией ключей по базовому закону (частота ШИМ 50 Гц).

Таблица

Результаты расчета потерь мощности в АИН

Тип IGBT-модуля		FS450R12OE4	FS15R12VT3	FS25R12KT3
1	2	3	4	5
Способ формирования выходного напряжения $U_{\text{вых}}$		ШИМ	ШИМ	базовый
Энергия включения IGBT	$E_{\text{sw(on)}}$, мДж/пульс	40,5	1,95	2,5
Энергия выключения IGBT	$E_{\text{sw(off)}}$, мДж/пульс	56	1,45	2,9
Падение напряжения на включенном IGBT	$U_{\text{ce(sat)}}$, В	2,05	1,9	1,9
Прямое падение напряжения на диоде	U_{ce} , В	1,65	1,65	1,65
Энергия обратного восстановления диода	E_{rec} , мДж/пульс	39,5	0,94	2,1

Продолжение таблицы

Выходной ток инвертора	$I_{\text{вых}}, \text{ А}$	237	8,8	14
частота ШИМ инвертора	$f_{\text{ШИМ}}, \text{ Гц}$	10000	10000	50
Количество фаз m	m	3	79	79
Пиковый ток	$I_{\text{пик}}, \text{ А}$	335,17	12,45	19,78
Потери проводимости IGBT	$P_{\text{ст_IGBT}}, \text{ Вт}$	158,032	5,44	18,81
Потери переключения IGBT	$P_{\text{дин_IGBT}}, \text{ Вт}$	307,17	10,82	0,085
Суммарные потери IGBT	$P_{\text{IGBT}}, \text{ Вт}$	465,2	16,26	18,9
Потери проводимости диода	$P_{\text{ст_D}}, \text{ Вт}$	55,3	2,053	2,62
Потери переключения диода	$P_{\text{дин_D}}, \text{ Вт}$	125,73	2,99	0,033
Суммарные потери диода	$P_{\text{D}}, \text{ Вт}$	181,035	5,046	2,65
Суммарные потери одного IGBT (вместе с диодом)	$P_{\text{кл}}, \text{ Вт}$	646,2363	21,30659	21,54
Суммарные потери мощности инвертора	$P_{\text{инв}}, \text{ Вт}$	3877,42	3366,44	3403,62

Справочные параметры полупроводниковых элементов определялись при температуре кристалла $T_c=125^\circ\text{C}$ [11–13]. Для расчета выбраны модули фирмы *Infineon* (США), относящиеся к 4-му (серия E4) и 3-му поколению (ТЗ). Корректность такого сравнения обусловлена тем, что в пределах одного поколения, по сравнению с серией E3 (большие токи), транзисторы из серии ТЗ (меньшие токи) обладают улучшенными параметрами, в частности уменьшенными потерями. По величине потерь транзисторы ТЗ сходны с сильноточными транзисторами следующего четвертого поколения (серия E4).

Из таблицы видно, что потери в 79-фазном инверторе не превышают потери в трехфазном инверторе как при синусоидальной ШИМ, так и базовом законе переключения. При формировании выходного напряжения с помощью синусоидальной ШИМ при выбранной частоте коммутации 10 кГц потери переключения превышают потери проводимости примерно в два раза, при базовом законе переключения потери проводимости оказываются значительно больше потерь переключения.

Заключение

Таким образом, применение многофазных асинхронных двигателей с многофазными преобразователями частоты для целей электрической тяги воздушных судов при наземном перемещении действительно может улучшить энергетическую эффективность этого вида транспорта. Конечно, для получения более конкретных оценок требуется расчет массо-габаритных характеристик привода и исследование его влияния на характеристики других установок воздушного судна. Тем не менее, данное направление имеет перспективы развития в отечественной науке и промышленности.

Выводы

1. При формировании выходного напряжения инвертора с помощью синусоидальной ШИМ при частоте коммутации IGBT-ключей 10 кГц потери переключения превышают потери проводимости примерно в два раза.
2. При формировании выходного напряжения инвертора по базовому закону коммутации IGBT-ключей с частотой 50 Гц потери проводимости значительно превышают потери переключения.
3. Потери в 79-фазном инверторе не превышают потери в трехфазном инверторе как при формировании выходного напряжения по закону синусоидальной ШИМ, так и по базовому закону коммутации.
4. Применение многофазных асинхронных двигателей с многофазными преобразователями частоты для целей электрической тяги воздушных судов при наземном перемещении имеет перспективы развития в отечественной науке и промышленности.

Summary

Improving the energy efficiency of vehicles is an essential feature of scientific and technical progress. One means of increasing the energy efficiency of transport is the introduction of electric drive with multiphase induction motors. At the same time multiphase motors are fed by multiphase frequency converters based on voltage source inverters. The number and operating mode of power switches in multiphase frequency converters may differ from the traditionally accepted in the three-phase converter. The article presents a comparative assessment of losses in three phase and 79-phase frequency converters based on the calculation of static and dynamic losses in the switches of voltage source inverters, the output voltage of which is formed under the law of sinusoidal pulse width modulation and the basic law of switching

Keywords: Multiphase frequency converter, inverter, PWM, IGBT, losses.

Литература

1. WheelTug. Driving aerospace. [Электронный ресурс] // Раздел на официальном сайте компании Chorus Motors, посвященный технологии WheelTug. – Режим доступа: <http://www.wheeltug.gi/> (дата обращения: 25.11.2012).
2. Ward, E.E. Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor / E.E. Ward, H. Harer // Proceedings of the IEEE. – 1969. – №116 (6). – P. 980–984.
3. Levi, E. A novel concept of a multiphase, multi-motor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter / E. Levi, M. Jones, S.N. Vukosavic, H.A.Toliat // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 320–335.
4. Kundrotas, B. Application and Perspectives of Multiphase Induction Motors [Электронный ресурс] / B. Kundrotas // Science – future of Lithuania. – 2012. – Vol. 4. – №1. – Режим доступа: <http://www.mla.vgtu.lt/index.php/mla/article/view/mla.2012.15> (дата обращения: 25.11.2012).
5. Zhang, X. Analysis and experiment of multi-phase induction motor drives for electrical propulsion / X. Zhang, C. Zhang, M. Qiao, F. Yu // International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2008. – P. 1251–1254.
6. Nanoty, A. Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor / A. Nanoty, A.R. Chudasama // International Journal of Electromagnetics and Applications. – 2012. – № 2(5). – P. 77–84.
7. Jatskevich, J. Modelling Multiphase Induction Motors for Electric Ship Propulsion Systems / J. Jatskevich, M. Maksimcev/ 2005 WSEAS/IASME International Conference on electrosience and technology for naval engineering and all-electric ship. – 2005. – P.10–16.
8. Бражников А.В. Многофазный асинхронный инверторный электропривод с улучшенными пусковыми качествами / А.В. Бражников, И.Р. Белозеров, И.И. Рафальский // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7. С.133–137.

9. Логачева А.Г. Комплексная методика повышения эффективности многофазных электрических двигателей переменного тока: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / А.Г. Логачева; [Место защиты: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова]. Казань, 2015. 160 с.

10. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: Учеб. для электротехн. спец. вузов. В 2-х ч. Ч. 1: 2-е изд. М.: Высш. шк., 1987. 319 с.

11. Technical Information. FS450R17KE3. IGBT-Module. IGBT-modules [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Infineon. 05.11.2013. – Режим доступа: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS450R12OE4-DS-v03_02-en_de.pdf?fileId=db3a304334c41e910134d756add742c1 (дата обращения: 20.10.2016).

12. Technical Information. FS15R12VT3. IGBT-Module. IGBT-modules [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Infineon. 03.10.2013. – Режим доступа: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS15R12VT3-DS-v02_00-en_de.pdf?fileId=db3a304412b407950112b431446153f7 (дата обращения: 20.10.2016).

13. Technical Information. FS25R12KT3. IGBT-Module. IGBT-modules [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Infineon. 03.10.2013. – Режим доступа: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS25R12KT3-DS-v02_01-en_de.pdf?fileId=db3a304412b407950112b431414d53ef (дата обращения: 20.10.2016).

Поступила в редакцию

28 декабря 2016 г.

Логачёва Алла Григорьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета. (КГЭУ). Тел: 8(960)054-68-29. E-mail: logacheva.alla@yandex.ru.

Хуснутдинов Рустем Рауфович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(960)045-85-49. E-mail: khrr@yandex.ru.

Айметов Игорь Олегович – студент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(919)624-52-75. E-mail: aymetov2010@yandex.ru.