

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ ШИМ

Д.Е. Татаринов¹, А.С. Григорян², И.А. Пименова²

¹ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Рассмотрены вопросы обеспечения электромеханической совместимости в асинхронных электроприводах. Для исследования электромеханических процессов в системах с автономными ШИМ-инверторами напряжения и асинхронными двигателями разработана компьютерная модель привода. Расчеты на модели показали, что непрерывное изменение частоты опорного напряжения инвертора во времени позволяет на порядок уменьшить амплитуды высших гармоник тока и электромагнитного момента двигателя при их неизменных коэффициентах искажения. Вследствие уменьшения амплитуд гармоник момента происходит снижение вибраций электропривода. Потери в двигателе изменяются незначительно. Изменение частоты опорного напряжения в заданном диапазоне частот не должно осуществляться с частотой питающих двигатель токов.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция, частота опорного напряжения, высшие гармоники, пульсации электромагнитного момента, электромеханическая совместимость.

Введение

При работе полупроводниковых преобразователей (ПП) совместно с электрическими машинами в напряжениях и токах возникают искажения, обусловленные коммутацией полупроводниковых приборов [1]. Эти искажения вызывают дополнительные потери энергии в проводниках и магнитопроводах, приводят к повышению пульсаций электромагнитного момента, увеличению уровня воздушного шума и появлению вибраций, проявлению резонансов, ускоренному старению изоляции обмоток, сокращению срока службы и т. д. Таким образом, искажения приводят к снижению показателей электромагнитной и электромеханической совместимости [2–4].

Известны схемные методы борьбы с искажениями напряжений и токов ПП. В высоковольтных системах используются многоуровневые ПП, в мощных низковольтных системах – многотактные ПП, применяются дроссели, синусные фильтры, другие типы фильтров [5]. Указанные решения позволяют существенно улучшить совместимость ПП с АД и другими элементами систем, но приводят к усложнению систем, увеличению их стоимости.

Известны методы улучшения качества выходного напряжения ПП средствами управления. Один из методов заключается в повышении частоты ШИМ. Это позволяет уменьшить амплитуду пульсаций токов и снизить потери энергии в машинах [6–9], но увеличивает потери в ПП. В трехфазных автономных инверторах напряжения (АИН) для улучшения гармонического состава

выходного напряжения и уменьшения напряжения звена постоянного тока в напряжения управления вводятся составляющие нулевой последовательности [5]. Аналогичные результаты достигаются при реализации векторной ШИМ [10, 11]. Известны и другие варианты реализации ШИМ в ПП.

В данной публикации рассмотрен алгоритм управления АИН на примере тягового электропривода самосвалов БелАз грузоподъемностью 136 т. Привод содержит АД и АИН. Результаты анализа привода при постоянной частоте ШИМ в АИН опубликованы в [8]. Приведенные ниже исследования отличаются тем, что частота ШИМ переменная.

Схема, модель и параметры тягового привода

Схема транзисторного преобразователя с АД, представленная на рис. 1, содержит АИН и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором ТАД-5.

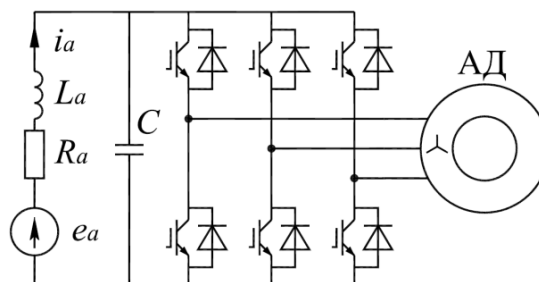


Рис. 1. Схема транзисторного преобразователя с АД

Для упрощения расчетов, в связи с отсутствием влияния входного преобразователя на выходной, первичный преобразователь не рассматривается и представлен звеном постоянного тока. Инвертор питается от источника постоянного напряжения e_a с индуктивностью L_a , активным сопротивлением R_a и током i_a . Напряжения питания АИН 1000 В. Исследования выполнены при номинальных параметрах двигателя, указанных в [8]: напряжение питания 660 В, 29 Гц, мощность 625 кВт, коэффициент мощности 0,839, скольжение 1,25 %, индуктивность рассеяния статора 0,2139 мГн, индуктивность намагничивания 6,4215 мГн, индуктивность рассеяния ротора 0,0963 мГн, активное сопротивление статора 9,6484 мОм, активное сопротивление ротора 5,8475 мОм, КПД = 0,94, индуктивность сглаживающего дросселя 220 мкГн, емкость фильтрового конденсатора 20 мФ.

Для рассматриваемой схемы преобразователя и двигателя разработана компьютерная модель

привода в MatLab-Simulink, представленная на рис. 2 и 3. Изменение параметров Т-образной схемы замещения компьютерной модели АД не учитывается. Сопротивления обмоток приняты для нагретого состояния двигателя. Адекватностью предложенной модели может служить сравнение ее с другими моделями. Такие сравнения осуществлялись и представлены в [8]. Модель электропривода содержит: источник питания, представленный звеном постоянного тока (ЗПТ); автономный инвертор напряжения (АИН), содержащий трехфазный транзисторный мост по схеме Ларионова, систему управления инвертором (СУ), формирующую импульсы управления (VT1...VT6) транзисторами (K1...K6), блок задания (БЗ), формирующий управляющие напряжения $U_y = \sqrt{3}U_\phi / U_{dc}$ (о.е) и реализующий частотный закон управления для данного типа нагрузки; асинхронный двигатель (АД); датчики напряжения и тока (U_{ab} , I_a); блок

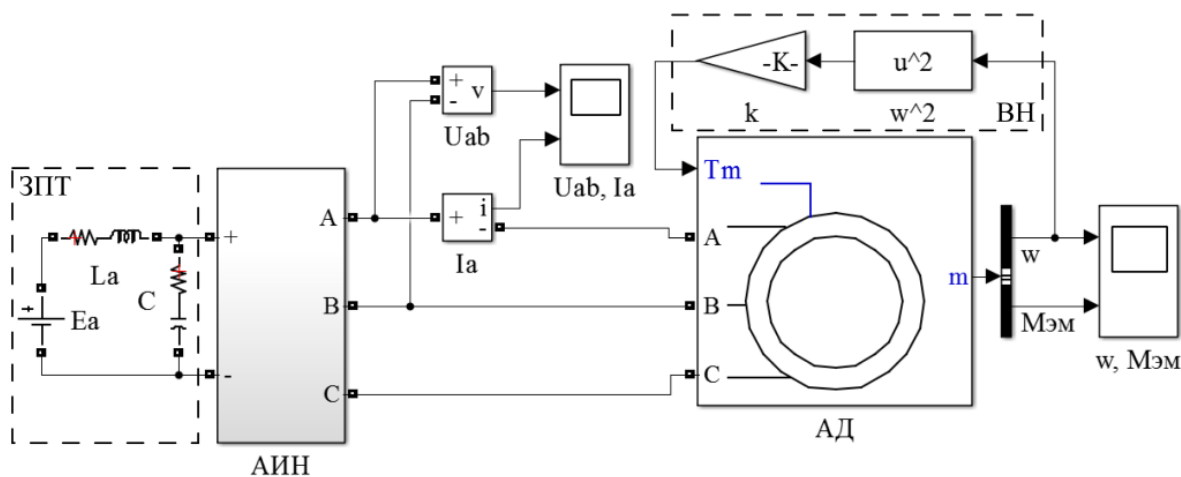


Рис. 2. Схема модели привода с АИН и АД

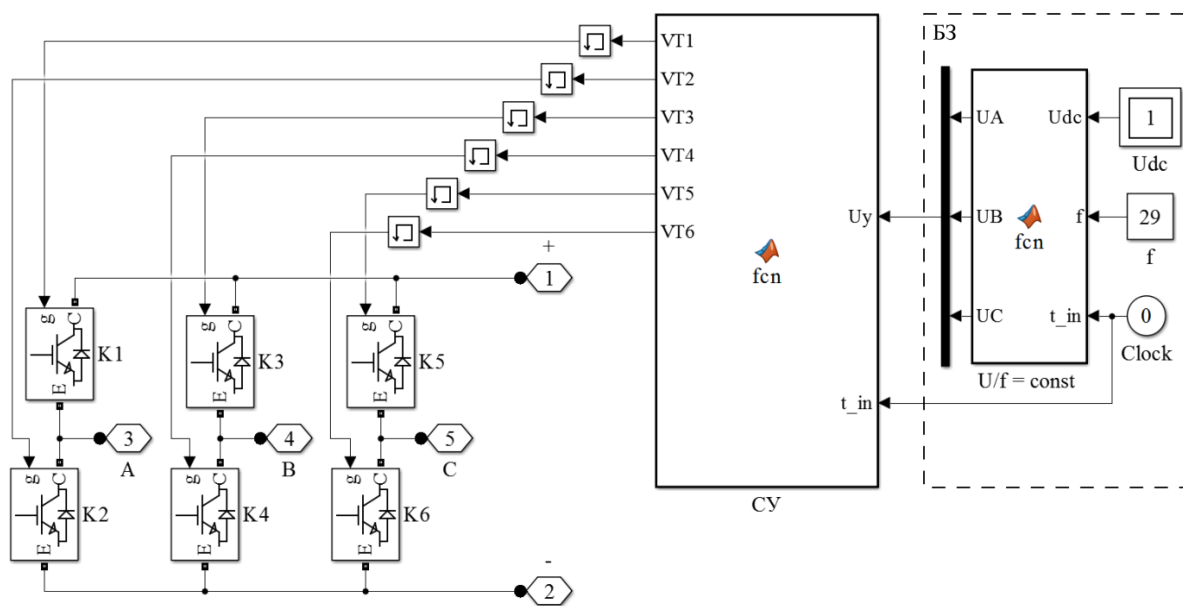


Рис. 3. Схема блока АИН

реализации вентиляторной нагрузки (ВН), на вход которого поступает сигнал частоты вращения (ω , рад/с), а на выходе рассчитывается задание момента сопротивления (T_m , Н·м).

Для повышения эффективности использования входного напряжения АИН в напряжения управления вносятся составляющие нулевой последовательности [5]. Особенность СУ инвертора заключается в использовании переменной частоты ШИМ. Изменение частоты опорного напряжения ШИМ осуществляется по следующим формулам:

$$\text{если } f_{\text{оп}} < f_{\text{мин}}, \text{ то } k = 1;$$

$$\text{если } f_{\text{оп}} > f_{\text{макс}}, \text{ то } k = -1;$$

$$f' = 2D/T_{\text{вар}}; \quad T_{\text{вар}} = 1/f_{\text{вар}};$$

$$f_{\text{оп}} = f_{\text{оп},t} + k \cdot f' \cdot \Delta t;$$

$$f_{\text{мин}} = f_{\text{оп}_\text{ср}} - \Delta f_{\text{макс}};$$

$$f_{\text{макс}} = f_{\text{оп}_\text{ср}} + \Delta f_{\text{макс}};$$

где k – коэффициент, определяющий знак производной изменения частоты опорного напряжения; $f_{\text{оп}}$ – частота опорного напряжения на текущем шаге расчетов, Гц; $f_{\text{оп},t}$ – частота опорного напряжения на предыдущем шаге, Гц; $f_{\text{оп}_\text{ср}}$ – средняя частота опорного напряжения, Гц; $\Delta f_{\text{макс}}$ – максимальное отклонение частоты от среднего значения, Гц; f' – производная изменения частоты опорного напряжения, Гц/с; D – диапазон изменения частоты, Гц; $T_{\text{вар}}$ – период изменения частоты опорного напряжения в диапазоне D , с; Δt – шаг интегрирования, с.

Расчеты электромагнитных процессов в системе с ШИМ-инвертором

На компьютерной модели привода исследовано влияние амплитуд высших гармоник выходных напряжений и токов АИН на пульсации электромагнитного момента АД при постоянной и переменной частоте ШИМ.

Расчеты выполнены при постоянной частоте ШИМ 2000 Гц, а также при переменной частоте ШИМ в диапазоне 1500–2500 Гц при различных значениях периода ($T_{\text{вар}} = 1/f_{\text{вар}}$) изменения частоты опорного напряжения в заданном диапазоне. Результаты расчета установившегося режима работы привода при переменной частоте ШИМ представлены на рис. 4, при $f_{\text{вар}} = 70$ Гц.

Как видно из рис. 4, частота ШИМ на каждом шаге работы системы линейно возрастает, а при достижении уровня 2,5 кГц происходит ее снижение до уровня 1,5 кГц. Это отражается на форме опорного напряжения, а также на амплитуде высокочастотных пульсаций в электромагнитном моменте и токах фаз на выходе АИН. Изменение частоты опорного напряжения не влияет на форму основной гармоники напряжений, токов и электромагнитного момента электропривода.

Известно, что при использовании переменной частоты ШИМ высшие гармоники напряжений и токов на частотах кратных частоте ШИМ (2, 4, 8, 12 кГц), преобразуются в широкий спектр гармоник со сравнительно малыми амплитудными значениями [1, 10]. Расчеты подтвердили данное утверждение и показали уменьшение амплитуды

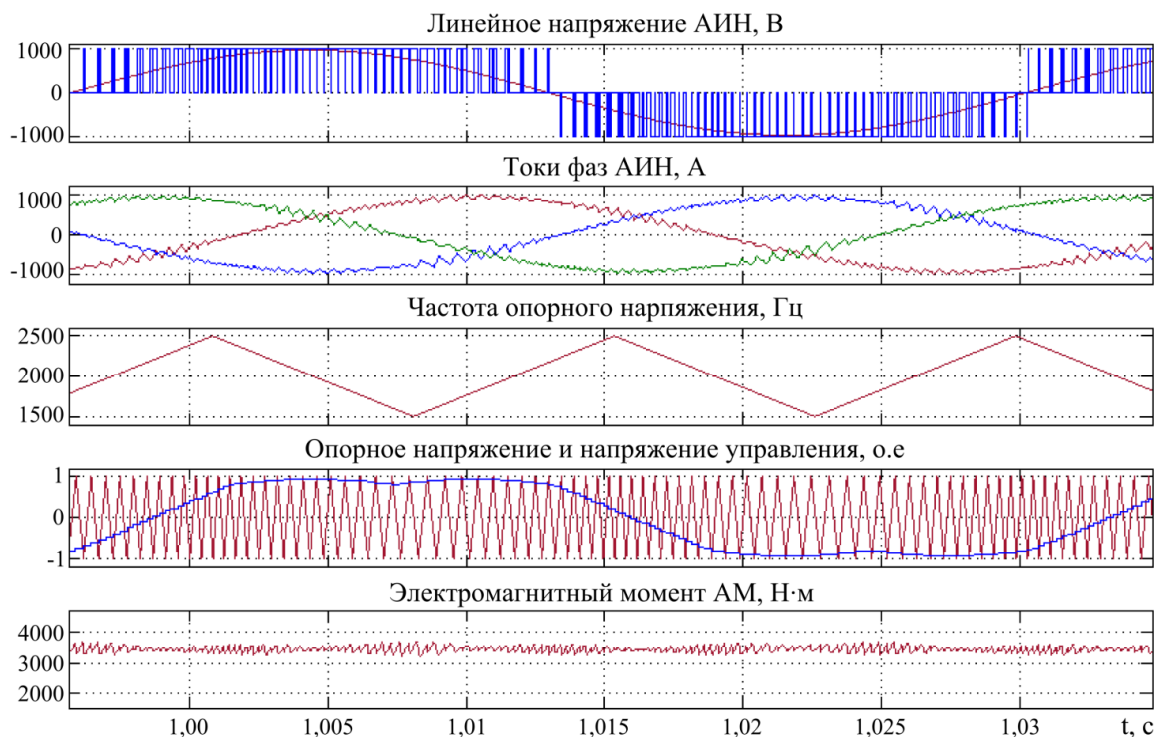


Рис. 4. Напряжения, токи и электромагнитный момент АД при переменной частоте ШИМ

наибольшей гармонике с 15 до 2,5 % от основной составляющей для напряжения и с 2 до 0,5 % для тока.

На рис. 5 представлены спектральные составы электромагнитного момента АД, полученные при постоянной и переменной частотах ШИМ, отображающие снижение амплитуд высокочастотных гармоник в электромагнитном моменте АД.

Рассматриваемый алгоритм управления АИН с использованием переменной частоты ШИМ позволяет улучшить условия работы АД и других силовых элементов, входящих в состав электропривода. В частности, уменьшение высших гармоник токов позволяет снизить уровни пульсаций электромагнитного момента АД и вибраций дроселя ориентировочно в 6–17 раз.

Диапазон изменения частоты опорного напряжения выбирался из условия допустимых потерь в силовых транзисторах АИН и в АД [5, 8]. Также от этого диапазона зависит уровень амплитуд высших гармонических составляющих в электромагнитном моменте на частотах ШИМ и кратных ей. Увеличение диапазона частот, в котором изменяется частота опорного напряжения, приводит к уменьшению уровня амплитуд высших гар-

моник, в связи с их непрерывным распределением по частотам в заданном диапазоне с меньшим уровнем.

В результате проведенных исследований выявлен частотный резонанс, возникающий в случае совпадения частоты f_{var} и частоты питающих двигателей токов, который приводит к сильному увеличению пульсаций электромагнитного момента. На рис. 6, а представлены зависимости коэффициента искажения электромагнитного момента, а на рис. 6, б зависимости амплитуды гармоники на частоте f_{var} , вносимой в электромагнитный момент, от частоты f_{var} .

На рис. 6 приняты следующие обозначения: для зависимостей при переменной частоте ШИМ: 1 – полученные при расчете управляющих напряжений один раз за период ШИМ, 2 – полученные при расчете управляющих напряжений два раза за период ШИМ; 3 – зависимость, полученная при постоянной частоте ШИМ.

Основное искажение в электромагнитный момент АД вносит амплитуда гармонической составляющей на частоте f_{var} , создаваемая переменной частотой ШИМ. На рис. 6, б представлены зависимости амплитуды этой гармоники от частоты f_{var} .

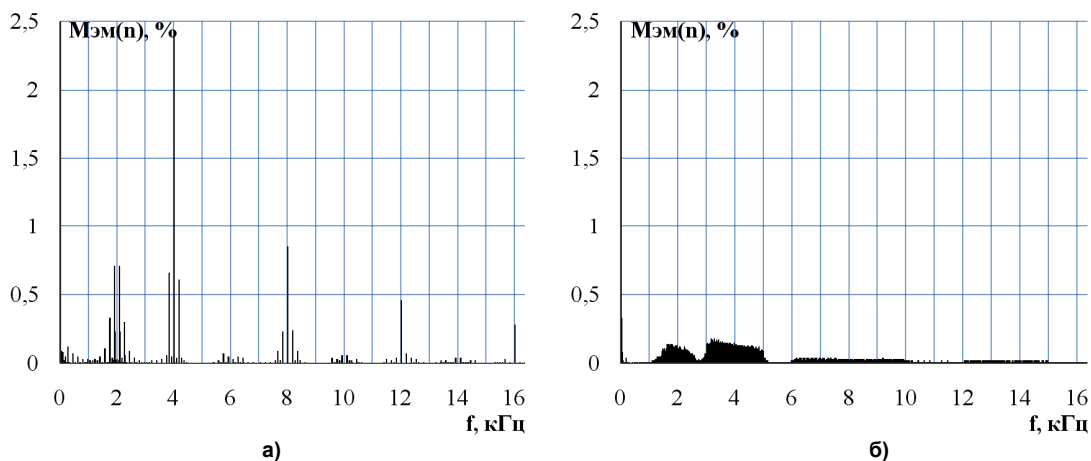


Рис. 5. Спектры электромагнитного момента АД при постоянной (а) и переменной (б) частотах ШИМ

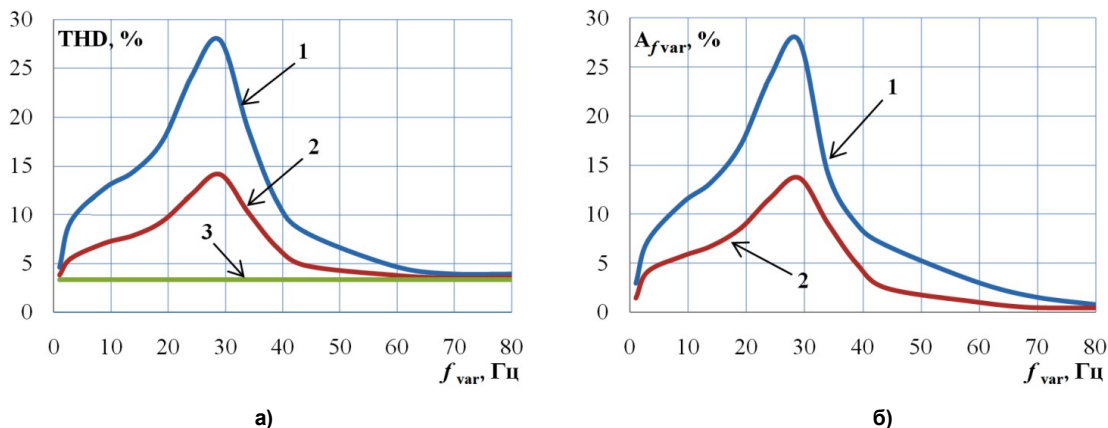


Рис. 6. Зависимости коэффициента искажения электромагнитного момента АД (а) и амплитуды гармоники на частоте f_{var} , вносимой в электромагнитный момент (б), от частоты f_{var}

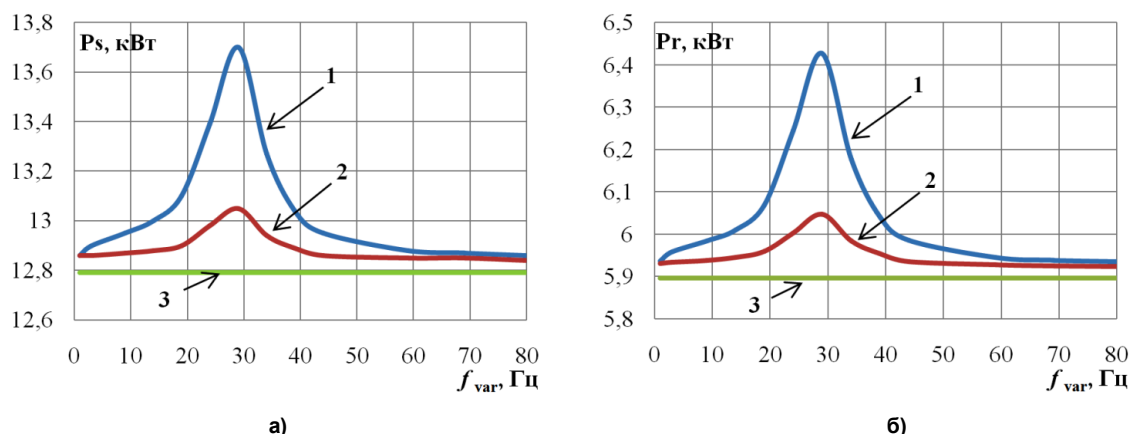


Рис. 7. Зависимости потерь энергии в активных сопротивлениях статора (а) и ротора (б) от изменения частоты опорного напряжения ШИМ

По данным зависимостям можно сделать вывод, что при приближении частоты f_{var} к частоте питающих двигатель токов – амплитуда гармоники на этой частоте, вносимая в электромагнитный момент, резко возрастает, что приводит к значительному увеличению пульсаций электромагнитного момента и, как следствие, к увеличению его коэффициента искажения (рис. 6, а). Задание частоты f_{var} вдвое больше частоты питающих двигатель токов, позволяет избежать возникновения частотного резонанса.

В процессе исследований было выявлено, что формирование управляющих напряжений ступенчатой функцией с длительностью ступени равной половине длительности такта ШИМ позволяет снизить амплитуду гармонической составляющей на частоте f_{var} в электромагнитном моменте, вносящую в него существенные искажения, ориентировочно в 2 раза (зависимость 2 рис. 6, б) и, как следствие, уменьшить пульсации момента в соответствующем эквиваленте (зависимость 2 рис. 6, а).

Для оценки потерь энергии в активных сопротивлениях обмоток статора и ротора двигателя ТАД-5 при изменении частоты опорного напряжения выполнены расчеты номинального режима работы для двух вариантов формирования управляющих напряжений (1 и 2). Результаты представлены на рис. 7 (обозначения зависимостей аналогичны рис. 6), показывают увеличение потерь энергии в активных сопротивлениях обмоток статора и ротора в зоне частотного резонанса на 7,5 % (для зависимостей 1) и на 2,25 % (для зависимостей 2) по отношению к зависимостям 3. При задании частоты f_{var} вдвое больше частоты питающих двигатель токов, потери снижаются до уровня 0,6 и 0,4 % по отношению к зависимостям 3.

Заключение

Результаты представленных исследований показывают, что рассмотренный способ управления АИН при изменении частоты ШИМ в заданных

пределах с заданной периодичностью позволяет уменьшить амплитуды высших гармоник напряжений, токов и электромагнитного момента АД ориентировочно в 6–17 раз при распределении характерных гармоник по широкому спектру частот, тем самым обеспечивая снижение вибраций электропривода.

В данной публикации рассматривался алгоритм формирования напряжения АИН с переменной частотой ШИМ и его влияние на АД без системы управления выходными координатами АД. Было выявлено положительное и отрицательное влияние данного алгоритма на АД, в частности улучшение показателей электромагнитной и электромеханической совместимости, а также возможности возникновения частотного резонанса, приводящего к увеличению пульсаций электромагнитного момента АД. Предполагается, что данные пульсации возможно скомпенсировать векторной системой управления АД. Расчет потерь энергии в активных сопротивлениях обмоток двигателя при переменной частоте ШИМ показал их увеличение в зоне частотного резонанса на 2,25 и 0,4 % при задании частоты f_{var} вдвое больше частоты питающих двигатель токов по отношению к алгоритму с постоянной частотой ШИМ.

Литература

1. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
2. Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б.Ю. Васильев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.
3. Электрический привод. Термины и определения / С.К. Козырев, А.С. Анучин, А.Е. Козярук и др.; под ред. С.К. Козырева. – М.: Изд-во МЭИ, 2015. – 96 с.
4. Вершинин, В.И. Электромагнитная и электромеханическая совместимость в электротехнических системах с полупроводниковыми преобразователями / В.И. Вершинин, В.А. Загривный,

А.Е. Козярук. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – 67 с.

5. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов; под ред. Е.А. Крутякова. – СПб.: Силовые машины: Электросила, 2004. – 252 с.

6. Ruderman, A. *Electrical Machine PWM Loss Evaluation Basics* / A. Ruderman, R. Welch // EEMODS, 2005. Heidelberg, Germany.

7. Пронин, М.В. Моделирование систем с асинхронными машинами и транзисторными преобразователями с учетом потерь энергии / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, В.В. Терещенков // Известия вузов. – 2008. – № 3. – С. 33–38.

8. Pronin, M. *Computer model-based evalua-*

tion of energy losses components in the systems with asynchronous machines and transistor converters / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, V. Tereschenkov // The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2007. Taipei, Taiwan.

9. *A Model of Semiconductor Converter-Fed Asynchronous Machines Taking into Account Energy Losses and Thermal Processes* / M. Pronin, O. Shonin, Y. Koskin et al. // EPE-PEMC 2008, Poznan, Poland. – P. 852–859.

10. Обухов, С.Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин, Д.Е. Кондратьев // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 23–31.

11. Чаплыгин, Е.Е. Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / Е.Е. Чаплыгин // Электричество. – 2009. – № 8. – С. 56–61.

Татаринов Денис Евгеньевич, аспирант кафедры «Электроэнергетики и электромеханики», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург; tde90@ya.ru.

Григорян Анаит Сергеевна, магистрант кафедры «Системы автоматического управления», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург; griganait@yandex.ru.

Пименова Ирина Александровна, аспирант кафедры «Робототехники и автоматизации производственных систем», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург; iapimenova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 28 февраля 2016 г.

DOI: 10.14529/power160112

PROVISION OF ELECTROMECHANICAL COMPATIBILITY OF VARIABLE-FREQUENCY ASYNCHRONOUS DRIVES WITH PWM-FREQUENCY REGULATION

D.E. Tatarinov¹, tde90@ya.ru,

A.S. Grigorian², griganait@yandex.ru,

I.A. Pimenova², iapimenova@yandex.ru

¹ National Mineral Resources University (Mining University), Saint-Petersburg, Russian Federation,

² Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

Provision of electromechanical compatibility of asynchronous drive is considered. A computer drive model has been developed to investigate electromechanical processes in systems with PWM-invertors and asynchronous motors. Model calculations show that continuous change in the reference voltage frequency enables a multiple decrease of the amplitude of higher harmonics and electromagnetic torque with constant distortion factor. Vibrations of the electric drive may be decreased due to the reduced amplitudes of the torque harmonics. Motor losses change insignificantly. Variation of the reference voltage frequency within the given range should not to be implemented with frequency of motor supply currents.

Keywords: self-excited inverter, induction motor, pulse width modulation, reference voltage frequency, higher harmonics, electromagnetic torque pulses, electromechanical compatibility.

References

1. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoj jelektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 1999. 199 p.
2. Vasil'ev B.Ju. *Jelektroprivod. Jenergetika jelektrivoda* [Electric Drive. Electric Power Industry]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2015. 268 p.
3. Kozyrev S.K., Anuchin A.S., Kozjaruk A.E., Ladygin A.N., Prudnikova Ju.I., Sergievskij Ju.N. *Jelektricheskij privod. Terminy i opredelenija* [Electric Drive. Terms and Definitions]. Moscow, MJEI Publ., 2015. 96 p.
4. Vershinin V.I., Zagrivnyj V.A., Kozjaruk A.E. *Jelektromagnitnaja i jelectromehaneskaja sovmestimost' v jelektrotehnicheskikh sistemah s poluprovodnikovymi preobrazovateljami* [Electromagnetic and Electromechanical Compatibility in Electrical Systems with Semiconductor Converters]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University Publ., 2000. 67 p.
5. Pronin M.V., Voroncov A.G., Kalachikov P.N., Emel'janov A.P. *Jelektroprivody i sistemy s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami (modelirovanie, raschet, primenenie)* [Electric Drive and Systems with Electric Machines and Semiconductor Converters (Simulation, Calculation, Application)]. Saint-Petersburg, "Silovye mashiny", "Jelektrosila" Publ., 2004. 252 p.
6. Ruderman A., Welch R. [Electrical Machine PWM Loss Evaluation Basics]. *EEMODS*, 2005, Heidelberg, Germany.
7. Pronin M.V., Voroncov A.G., Tereshhenkov V.V. [Modeling of System with Asynchronous Machines and Transistor Converters with Considering of Energy Losses]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Journal of Instrument Engineering], 2008, no. 3, pp. 33–38. (in Russ.)
8. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Tereshchenkov V. [Computer Model-Based Evaluation of Energy Losses Components on the Systems with Asynchronous Machines and Transistor Converters]. *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2007, Taipei, Taiwan.
9. Pronin M., Shonin O., Koskin Y., Vorontsov A., Kalatchikov P. [A Model of Semiconductor Converter-Fed Asynchronous Machines Taking into Account Energy Losses and Thermal Processes]. *EPE-PEMC*, 2008, Poznan, Poland, pp. 852–859.
10. Obuhov S.G., Chaplygin E.E., Kondrat'ev D.E. [Pulse-Width Modulation in Three Phase Voltage Source Inverters]. *Jelektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2008, no. 7, pp. 23–31. (in Russ.)
11. Chaplygin E.E. [Two Phase Pulse-Width Modulation in Three Phase Voltage Source Inverters]. *Jelektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2009, no. 8, pp. 56–61. (in Russ.)

Received 28 February 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Татаринов, Д.Е. Обеспечение электромеханической совместимости в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах при регулировании частоты ШИМ / Д.Е. Татаринов, А.С. Григорян, И.А. Пименова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 80–86. DOI: 10.14529/power160112

FOR CITATION

Tatarinov D.E., Grigorian A.S., Pimenova I.A. Provision of Electromechanical Compatibility of Variable-Frequency Asynchronous Drives with PWM-Frequency Regulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 80–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160112