

ОБЗОР И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, А ТАКЖЕ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИХ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С.С. Костинский

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

Резюме: В качестве объекта для проведения экспериментальных исследований был выбран преобразователь частоты марки ACS150. На основе выполненных измерений сделан вывод, что в спектральном составе силы тока, потребляемого преобразователем частоты, помимо токов основной гармонической составляющей преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих также присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше. Также, исходя из полученных данных, можно утверждать, что при уменьшении частоты управления скоростью вращения двигателя и величины загрузки преобразователя частоты увеличивается количество пульсаций на осциллограмме силы тока, как результат наблюдаются увеличение значений высших гармонических составляющих и рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока. Основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, в то же время гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению.

Приведен краткий обзор технических решений, направленных на повышение электромагнитной совместимости асинхронного частотно-регулируемого привода. В частности, отмечены такие решения, как повышение количества полупроводниковых ключей, используемых в инверторах, совершенствование режимов управления, применение специальных разделительных трансформаторов, пассивных (резонансных) и активных фильтров.

Ключевые слова: качество электрической энергии, высшие гармонические составляющие тока, преобразователь частоты, асинхронный электрический двигатель, пассивный фильтр, активный фильтр, биполярный транзистор с изолированным затвором, полевой транзистор с изолированным затвором, запираемый тиристор, силовой модуль высшей степени интеграции.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20188.

Для цитирования: Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 27-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42.

REVIEW AND RESULTS OF STUDIES OF THE HARMONIC COMPOSITION OF THE CURRENT CONSUMED BY LOW-POWER FREQUENCY CONVERTERS, AS WELL AS METHODS AND DEVICES TO REDUCE THEIR NEGATIVE IMPACT ON POWER SUPPLY SYSTEMS

SS. Kostinskiy

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

Abstract: The ACS150 frequency Converter was chosen as the object for experimental research. On the basis of the measurements it is concluded that in the spectral composition of current drawn by the frequency Converter, in addition to currents the main harmonic component is dominated by currents 5, 7, 11, 13, and 17th harmonics, i.e. harmonic components of odd non-multiple of three. Currents 3, 9 and 15 th harmonic components are also present in the spectral composition, but their value is much smaller. Also, based on the data obtained, it can be argued that with a decrease in the frequency of motor speed control and the load value of the frequency Converter, the number of pulsations on the current waveform increases, as a result, there is an increase in the values of the higher harmonic components and an increase in the value of the total harmonic components of the current. The main contribution to the increase in the index of the total harmonic components of the amperage with a decrease in the load of the frequency Converter and the output frequency of the motor speed control is made by odd harmonic components of the amperage multiple of three, at the same time harmonic components of the amperage non-multiple of three, namely the 5th and 7th order, are not subject to change.

A brief review of technical solutions aimed at improving the electromagnetic compatibility of asynchronous frequency-controlled drive is given. In particular, such solutions as increasing the number of semiconductor switches used in inverters, improving control modes, the use of special separation transformers, passive (resonant) and active filters are noted.

Keywords: quality of electric energy, harmonic or high frequency component of the current, frequency converter, asynchronous electric motor, passive power filter, active power filter, insulated gate bipolar transistor (IGBT), metal oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFET), gate turn off (GTO), super integrating power modules (SIPM).

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-38-20188.

For citation: Kostinskiy SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):27-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42.

Введение и литературный обзор

Ежегодное производство электрических двигателей во всем мире составляет около 7 млн. На их долю потребления приходится примерно 70 % вырабатываемой электрической энергии [1]. Их функция – преобразование электрической энергии в механическую. Для управления процессом преобразования применяются регулируемые и нерегулируемые электроприводы. Регулируемый электропривод достаточно широко используется в энергетике, промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве [2]. Использование регулируемого электропривода способствует снижению потребления электрической энергии и как следствие его применение является одним из важных мероприятий по энергосбережению [3]. При этом достигается не только снижение потребления электрической энергии, но и увеличивается ресурс оборудования [2].

Более половины вырабатываемой электрической энергии потребляется асинхронными электрическими двигателями [4]. Электроприводы постоянного тока повсеместно вытесняются регулируемыми электроприводами переменного тока [2, 5]. В связи с этим увеличивается количество предприятий, которые внедряют частотно-регулируемый привод в целях повышения энергосбережения и как следствие уменьшения стоимости выпускаемой продукции и повышения ее конкурентоспособности [4, 6].

Автоматизированный электропривод широко используется и имеет большие перспективы эффективного применения с асинхронными электродвигателями [7, 8].

В последнее время преимущества и лидерство асинхронного частотно-регулируемого привода определяются как совершенствованием и повышением эффективности самих асинхронных двигателей, так и созданием и внедрением устройств силовой электроники и интеллектуальных систем управления и контроля, обеспечивающих требуемые статические, динамические характеристики, энергосбережение и высокие энергетические показатели [6]. Это можно объяснить достижениями в развитии силовой полупроводниковой и микропроцессорной технике, которые в совокупности позволяют реализовывать различные алгоритмы управления асинхронными двигателями имеющими ряд преимуществ перед двигателями постоянного тока [2].

Совершенствование технических показателей преобразователей частоты является основой технического прогресса [9]. Основными элементами преобразователей частоты являются силовые полупроводниковые преобразователи [3]. Основной вектор развития преобразователей частоты связан с усовершенствованием силовых полупроводниковых приборов и микроконтроллеров, применяемых для их управления [10]. Применение современных достижений в области микроконтроллеров способствует увеличению функциональных возможностей и более гибкой настройке способов управления преобразователей частоты [4].

В связи со сложившейся тенденцией направленной на повышение энергоэффективности частотно-регулируемых электроприводов асинхронных электродвигателей и снижения их негативного влияния на питающую сеть наиболее интенсивно развиваются электрические приводы, имеющие наиболее экономичные способы управления [11]. Регулируемые электроприводы производят с применением полупроводниковых ключей, которые являются полностью управляемыми. В таких электроприводах изменение величины напряжения, фазы и частоты достигается за счет использования широтно-импульсной модуляции в совокупности с системой управления [12]. Совершенствование силовой части регулируемых электроприводов осуществляется за счет применения современных выпускаемых полупроводниковых приборов, таких как: *MOSFET*, *IGBT*, *GTO*, *IGCT* и др. [4, 11].

Преобразователи частоты, выполняемые с применением *IGBT*, являются наиболее распространенными, т.к. выполняют наилучшее преобразование по сравнению с остальными полупроводниковыми ключами, при этом имеют площадь кристалла меньше, чем у *MOSFET* [3, 13]. В ближайшее время основную конкуренцию преобразователям, выполненным с использованием *IGBT*, составят преобразователи выполненные с применением *CSTBT*, *EST*, *IEGT*, *CIGBT* и др. [3]. По оценкам специалистов можно прогнозировать, что *IGBT* будут применяться для преобразователей частоты мощностью до 1000 кВт с допустимым напряжением до 8 кВ [1, 14].

К существенным достоинствам *MOSFET* по сравнению с *IGBT* можно отнести значительную перегрузочную способность и меньшее изменение сопротивления в открытом состоянии между стоком и истоком [13]. Однако при указанных достоинствах существует и недостаток, связанный с необходимостью установки для них устройств и схем ограничения перенапряжения между затвором и истоком. Исходя из сведений, приведенных в литературных источниках, можно сделать заключение, что *MOSFET* будут применяться в преобразователях частоты с мощностью до 10 кВт и напряжением до 1,5 кВ [1].

GTO являются запираемыми тиристорами, оптимизированными для низких потерь в проводящем состоянии. Область применения *GTO* не ограничивается использованием в регулируемых электроприводах. Они применяются при изготовлении систем бесперебойного электропитания, компенсаторов и др. Однако, широкое применение *GTO* в электроприводах сдерживается использованием *IGBT* и *MOSFET*, между которыми и разворачивается основная конкуренция. Вследствие этого область использования *GTO* ограничена электроприводами, рассчитанными на несколько десятков киловатт. Перспективы дальнейшего развития *GTO* связаны с созданием *HDGTO* и *IGCT*, для которых не требуется защитных цепей от перенапряжения, и которые обладают большей надежностью при переменной нагрузке [15].

Перспективными являются работы направленные на создание интегрированных интеллектуальных модулей (*IPM*). Их отличительной чертой является объединение силовых полупроводниковых ключей и элементов их управления на одном кристалле [13]. Быстрыми темпами растет применение *IPM* в системах электропривода [16]. По оценкам специалистов наибольшая область применения *IPM* – это сектор маломощного (приблизительно до 4 кВт) электропривода [17]. Дальнейшее развитие *IPM* должно привести к созданию *SIPM*

(*Super IPM*), которые будут обладать функцией самозащиты от перегрузок, и включать в свой состав выпрямитель, корректор коэффициента мощности и тормозной ключ с управлением [1].

Преобразователи частоты в большинстве случаев состоят из выпрямителя, фильтра и инвертора, который представляет собой автономный инвертор напряжения (АИН) [18]. Силовые ключи, входящие в конструкцию преобразователей, являются источниками помехоэмиссии высших гармонических составляющих тока и напряжения [19, 20]. Исследования преобразователей частоты, выполненные в работе [18], свидетельствуют об увеличении значений высших гармонических составляющих в выходных напряжении и токе при подключении преобразователей к сети [21]. Появление гармонических составляющих тока, связано с отличием закона управления автономного инвертора тока (АИН) от синусоидального. Следовательно, независимо от законов управления АИТ и АИН будут наблюдаться высшие гармонические составляющие в потребляемом токе и напряжении [22]. Таким образом, широкое и повсеместное применение преобразователей частоты в системах электроснабжения негативно сказывается на качестве электрической энергии [23 – 25]. Поэтому одним из важнейших критериев при оценке эффективности преобразователей частоты является обеспечение их электромагнитной совместимости [4]. В указанном контексте также следует указать, что частотно-регулируемые приводы малой мощности являются наиболее массово востребованными [10]. На их долю приходится примерно 2/3 рынка электроприводов [2].

Приведенный обзор из литературных источников свидетельствуют о необходимости исследования спектров гармонических составляющих тока в сетях с преобразователями частоты малой мощности, работающими при различных режимах загрузки, в целях обеспечения их электромагнитной совместимости.

Материалы и методы

В качестве объекта для проведения настоящего исследования выбран преобразователь частоты, производимый фирмой *ABB* марки *ACS150*. Для реализации эффективных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости в сетях 0,38 кВ необходимо исследовать гармонический состав потребляемого преобразователем частоты тока [26 – 28]. Один из эффективных путей получения такого рода информации – экспериментальные исследования [27, 29]. Осциллограммы, полученные в результате, позволяют анализировать спектральный состав потребляемого тока, после разложения их в ряд Фурье [26, 30]. Результаты экспериментальных измерений, получены с помощью анализатора качества электрической энергии *Metrel*, внесенного в Государственный реестр средств измерения под номером 52911-13 и прошедшего метрологическую поверку (свидетельство о поверке № 206.1-22463). Указанный анализатор качества электрической энергии имеет внешнее программное обеспечение (*PowerView*), позволяющее выполнять загрузку измеренных данных на персональный компьютер, просмотр, анализ и печать полученных результатов. При этом спектральный состав, рассчитанный на основе полученных осциллограмм, и результаты, полученные с помощью программного обеспечения анализатора качества электрической энергии, практически совпадают.

Результаты

На рис. 1 показаны результаты экспериментальных измерений осциллограммы мгновенных значений силы тока фазы *L1* преобразователя частоты *ACS150* при разных выходных частотах управления скоростью вращения двигателя. Далее приведены результаты выполненных исследований только для фазы *L1*, однако аналогичные результаты были получены и для фаз *L2* и *L3*.

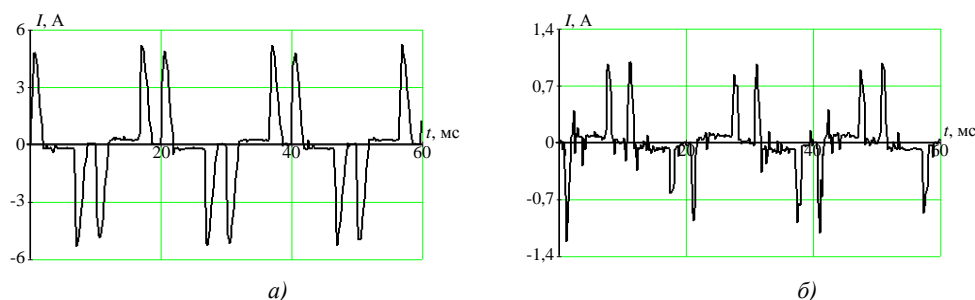


Рис. 1. Осциллограмма мгновенных значений силы тока фазы *L1* преобразователя частоты *ACS150* при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: *а* – 50 Гц; *б* – 10 Гц

Осциллограммы мгновенных значений силы тока при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя 50 и 10 Гц имеют схожий вид. Однако визуально заметно увеличение пульсаций при низкой частоте управления скоростью вращения двигателя, что косвенно свидетельствует об увеличении на низких частотах суммарного коэффициента гармонических составляющих силы тока, потребляемого частотно-регулируемым приводом. Для более детального анализа измеренных осциллограмм мгновенных значений силы тока получен их спектральный состав с использованием разложение в ряд Фурье (рис. 2).

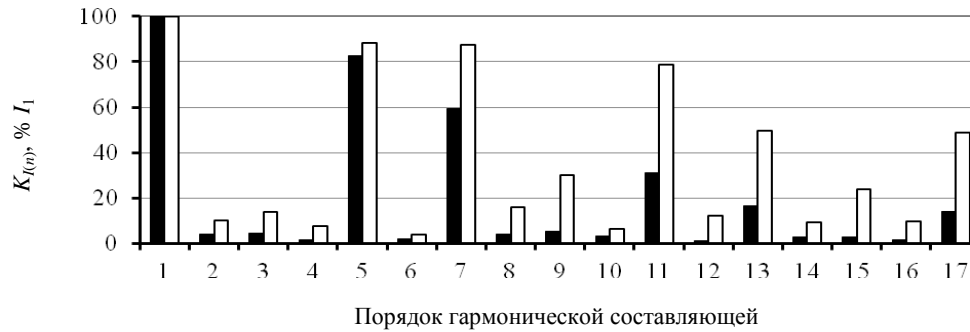


Рис. 2. Амплитудный спектр силы тока в фазе L1 преобразователя частоты ACS150 при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: ■ – 50 Гц; □ – 10 Гц

В виду того, что величина загрузки преобразователя частоты динамически изменяется в процессе его эксплуатации, необходимо рассмотреть изменение величины суммарных гармонических составляющих силы тока при изменении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя (рис. 3, 4).

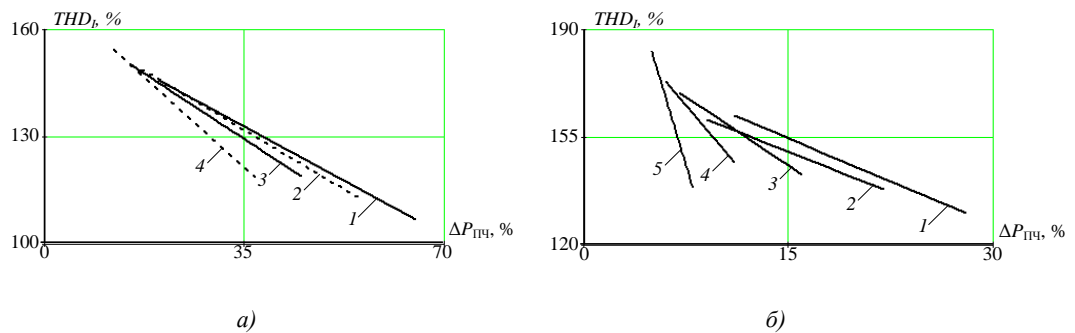


Рис. 3. Зависимости изменения значений суммарных гармонических составляющих силы тока в фазе L1 при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя:

а – 1 – 50 Гц; 2 – 45 Гц; 3 – 40 Гц; 4 – 35 Гц;
б – 1 – 30 Гц; 2 – 25 Гц; 3 – 20 Гц; 4 – 15 Гц; 5 – 10 Гц

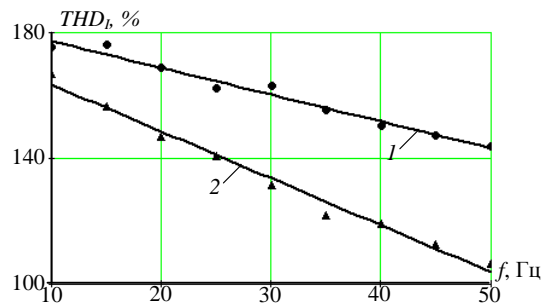


Рис. 4. Зависимости изменения значений суммарных гармонических составляющих силы тока в фазе L1 при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 1): 1 – min граничное значение $\Delta P_{ПЧ}$; 2 – max граничное значение $\Delta P_{ПЧ}$

Таблица 1

Изменение значений суммарных гармонических составляющих тока в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

f , Гц	Диапазон загрузки преобразователя частоты, %	Интервал изменения значений THD_I при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, %		Относительное изменение величины THD , %
		min	max	
50	19,947 – 65,038	143,958	106,473	35,231
45	17,611 – 54,318	147,218	112,643	30,703
40	15,12 – 44,359	150,478	119,242	26,29
35	12,951 – 35,593	155,381	121,964	27,397
30	11,145 – 27,781	163,041	131,412	24,132
25	9,487 – 21,04	162,121	140,906	15,031
20	7,881 – 15,418	168,767	146,972	14,839
15	6,573 – 10,877	176,007	156,517	12,47
10	5,542 – 7,403	175,425	166,858	5,842

Для более детального анализа порядка гармонических составляющих, влияющих на увеличение показателя суммарных гармонических составляющих тока, при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя необходимо рассмотреть зависимости изменения значений отдельных нечетных гармонических составляющих тока кратных и не кратных трем, преобладающих в спектре мгновенных значений силы тока (рис. 5, 6).

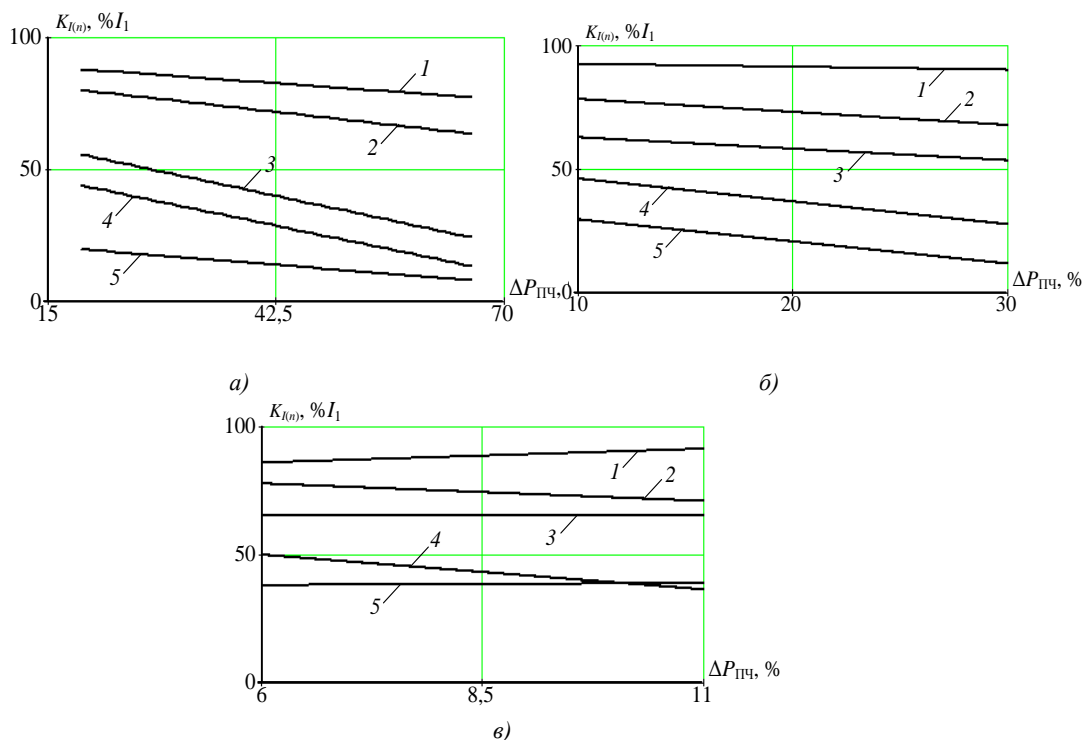


Рис. 5. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ не кратных трем при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 10 Гц.

Порядок гармонических составляющих: 1 – 5; 2 – 7; 3 – 11; 4 – 13; 5 – 17

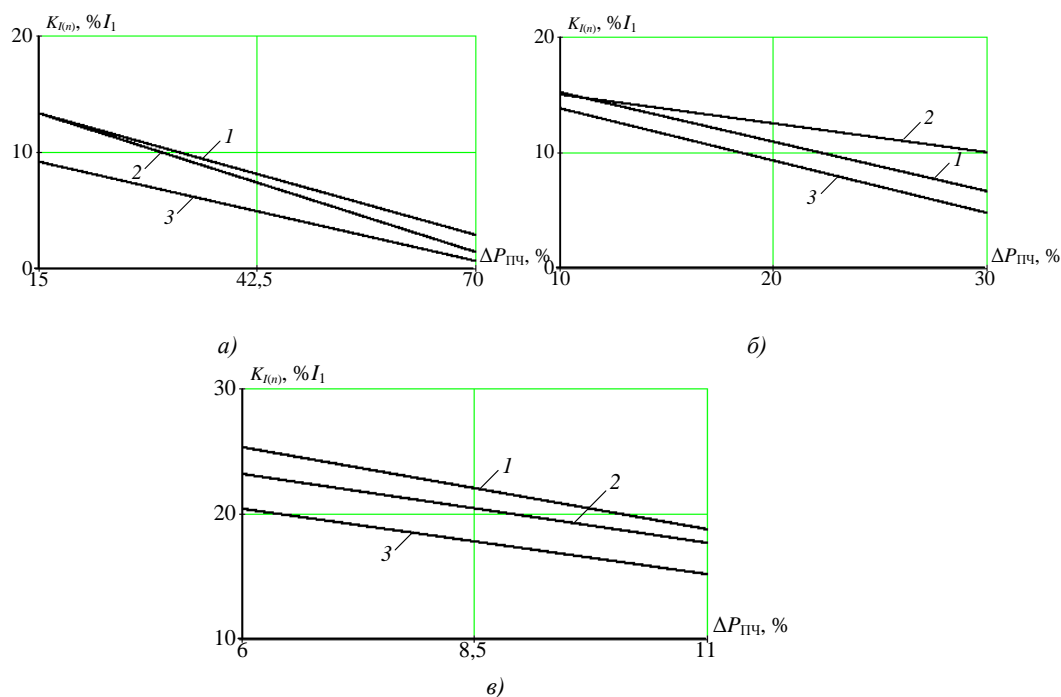


Рис. 6. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ кратных трем при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 10 Гц. Порядок гармонических составляющих: 1 – 3; 2 – 9; 3 – 15

На рис. 7 приведены зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока кратных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при \min граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 2.

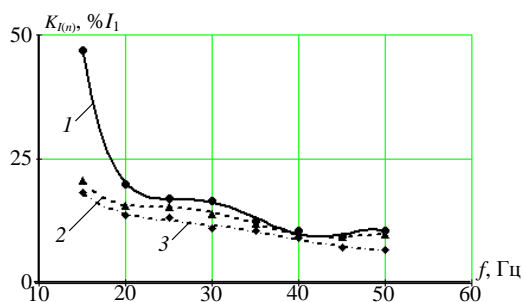


Рис. 7. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ кратных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 5-го порядка, при \min граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 2): 1 – порядок гармонической составляющей – 3; 2 – порядок гармонической составляющей – 9; 3 – порядок гармонической составляющей – 15.

Таблица 2

Изменение значений 3-й, 9-й и 15-й гармонических составляющих силы тока кратных трем в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

Порядок гармонической составляющей	f , Гц	Диапазон загрузки преобразователя частоты, %	Интервал изменения величины $K_{I(n)}$, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, %		Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, %
			\min	\max	
3	50	19,947 – 65,038	10,549	2,808	7,741
	45	17,611 – 54,318	9,397	4,389	5,008

Продолжение таблицы 2

	40	15,12 – 44,359	10,64	6,324	4,316
	35	12,951 – 35,593	12,493	5,886	6,608
	30	11,145 – 27,781	16,538	5,815	10,723
	25	9,487 – 21,04	17,182	8,536	8,646
	20	7,881 – 15,418	20,042	9,417	10,624
	15	6,573 – 10,877	46,862	39,987	6,876
9	50	19,947 – 65,038	9,894	2,477	7,418
	45	17,611 – 54,318	9,263	4,725	4,538
	40	15,12 – 44,359	9,86	6,801	3,059
	35	12,951 – 35,593	12,013	6,838	5,174
	30	11,145 – 27,781	14,06	8,78	5,28
	25	9,487 – 21,04	15,427	9,486	5,942
	20	7,881 – 15,418	15,66	11,146	4,514
	15	6,573 – 10,877	20,697	18,565	2,133
15	50	19,947 – 65,038	6,776	1,293	5,483
	45	17,611 – 54,318	7,242	1,987	5,256
	40	15,12 – 44,359	9,018	3,155	5,863
	35	12,951 – 35,593	10,545	3,533	7,012
	30	11,145 – 27,781	11,009	4,635	6,374
	25	9,487 – 21,04	13,282	5,584	7,698
	20	7,881 – 15,418	13,723	8,542	5,181
	15	6,573 – 10,877	18,192	11,412	6,78

На рис. 8 приведены зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока 5-го и 7-го порядка при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 3.

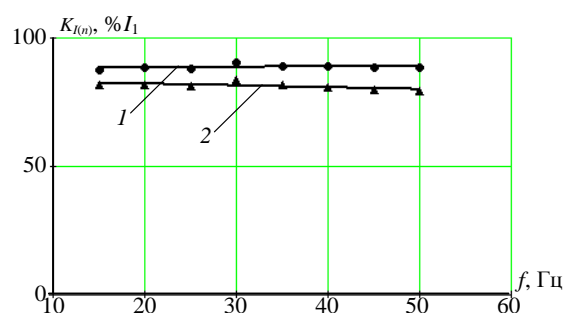


Рис. 8. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ нечетных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 3):

1 – порядок гармонической составляющей – 5; 2 – порядок гармонической составляющей – 7;

Таблица 3

Изменение значений 5-й и 7-й гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

Порядок гармонической составляющей	f , Гц	Диапазон загрузки преобразователя частоты, %	Интервал изменения величины $K_{I(n)}$, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, %		Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, %
			<i>min</i>	<i>max</i>	
5	50	19,947 – 65,038	88,518	79,379	9,139
	45	17,611 – 54,318	88,611	81,64	6,971
	40	15,12 – 44,359	88,902	83,743	5,159

	35	12,951 – 35,593	89,137	84,752	4,386
	30	11,145 – 27,781	90,511	86,374	4,137
	25	9,487 – 21,04	87,848	88,136	-0,288
	20	7,881 – 15,418	88,502	87,304	1,199
	15	6,573 – 10,877	87,549	87,829	-0,279
7	50	19,947 – 65,038	79,145	61,943	17,203
	45	17,611 – 54,318	79,956	66,013	13,943
	40	15,12 – 44,359	80,76	69,51	11,25
	35	12,951 – 35,593	81,669	71,14	10,529
	30	11,145 – 27,781	83,722	75,462	8,26
	25	9,487 – 21,04	81,475	79,06	2,416
	20	7,881 – 15,418	81,687	79,715	1,972
	15	6,573 – 10,877	81,552	81,114	0,438

На рис. 9 приведены зависимости изменения значений гармонических составляющих силы тока некртные трем, а именно 11-го, 13-го и 17-го порядка, при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 4.

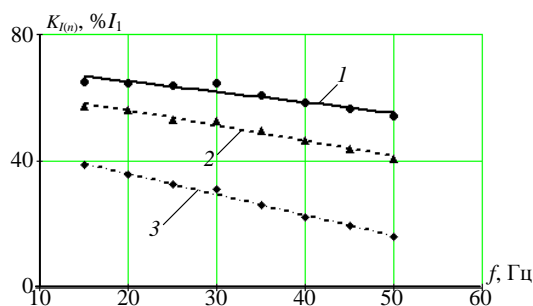


Рис. 9. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ некртных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 4):

1 – порядок гармонической составляющей – 11; 2 – порядок гармонической составляющей – 13; 3 – порядок гармонической составляющей – 17

Таблица 4

Изменение значений 11-й, 13-й и 17-й гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

Порядок гармонической составляющей	f , Гц	Диапазон загрузки преобразователя частоты, %	Интервал изменения величины $K_{I(n)}$ при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, %		Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, %
			<i>min</i>	<i>max</i>	
11	50	19,947 – 65,038	54,045	27,009	27,036
	45	17,611 – 54,318	56,693	31,965	24,728
	40	15,12 – 44,359	58,273	37,452	20,821
	35	12,951 – 35,593	60,764	40,11	20,654
	30	11,145 – 27,781	64,577	47,25	17,327
	25	9,487 – 21,04	63,999	53,333	10,666
	20	7,881 – 15,418	64,722	58,076	6,646
	15	6,573 – 10,877	65,167	61,374	3,793
13	50	19,947 – 65,038	40,638	15,152	25,485
	45	17,611 – 54,318	43,863	18,566	25,297
	40	15,12 – 44,359	46,645	23,151	23,494
	35	12,951 – 35,593	49,554	25,501	24,053

Продолжение таблицы 4

	30	11,145 – 27,781	52,602	34,204	18,399
	25	9,487 – 21,04	53,156	40,904	12,253
	20	7,881 – 15,418	56,025	45,829	10,196
	15	6,573 – 10,877	57,42	49,575	7,845
17	50	19,947 – 65,038	16,251	11,028	5,223
	45	17,611 – 54,318	19,58	9,451	10,129
	40	15,12 – 44,359	22,258	8,384	13,874
	35	12,951 – 35,593	26,261	7,561	18,7
	30	11,145 – 27,781	31,192	11,993	19,198
	25	9,487 – 21,04	32,583	17,293	15,29
	20	7,881 – 15,418	35,868	22,558	13,31
	15	6,573 – 10,877	38,705	29,289	9,416

Обсуждение

По результатам полученного амплитудного спектра мгновенных значений силы тока, потребляемого частотно-регулируемым приводом, можно однозначно сказать, что уровень высших гармонических составляющих при низкой частоте управления скоростью вращения двигателя довольно высокий. Спектральный состав силы тока так же показывает, что помимо основного преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих так же присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше. Это можно объяснить тем, что входные выпрямители этих частотно-регулируемых приводов – трехфазные. Остальными гармоническими составляющими можно пренебречь [31, 32]. Указанные результаты соответствуют приведенным в литературных источниках [6, 23, 33 – 35] для других марок частотно-регулируемых приводов малой мощности.

На основании графических зависимостей (см. рис. 3, 4), а также данных табл. 1 можно сделать вывод, что при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя наблюдается рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока. Отмеченную закономерность можно объяснить следующим. Для регулирования выходной частоты управления скоростью вращения двигателя применяется ШИМ. При уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя уменьшаются время импульса и амплитуда силы тока, в результате величина силы тока не успевает достичь номинального значения, после чего следует безтоковая пауза, и величина силы тока снижается до нуля раньше окончания безтоковой паузы, как следствие появляется провал потребляемого тока, после которого следует бросок тока в виде следующего импульса. Все это приводит к характерным пульсациям, хорошо заметным на осциллограмме мгновенных значений силы тока, приведенной на рис. 1 б, искажению формы потребляемого частотно-регулируемым приводом тока и, как итог, к увеличению показателя суммарных гармонических составляющих силы тока.

Учитывая приведенные на рис. 5, 6 зависимости, можно сделать заключение, что основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, о чем свидетельствует больший, чем для нечетных гармонических составляющих силы тока не кратных трем, характер изменения в сторону увеличения, что отражено на рис. 6.

Гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению как при низких значениях выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, так и при уменьшении загрузки преобразователя частоты, что хорошо заметно на рис. 5 в. При этом, гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 11-го, 13-го и 17-го порядка, менее подвержены изменению, чем кратные трем, как при низких значениях выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, так и при уменьшении загрузки преобразователя частоты, что хорошо заметно на рис. 9 и по данным табл. 4.

В целях обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты и, как следствие, снижения величины гармонических составляющих силы тока, генерируемых ими в питающую сеть при различных режимах нагрузки, в литературных источниках предлагается ряд технических решений. Их можно разделить на конструкционные,

применение которых связано с изменением конструкции или режимом управления самого преобразователя частоты, и решения, связанные с использованием специальных устройств.

К наиболее популярному конструкционному решению относится повышение количества полупроводниковых ключей, используемых в инверторах [36, 37]. Известно, что увеличение числа полупроводниковых ключей приводит к уменьшению гармонических составляющих тока [38]. Например, применение 12-пульсного выпрямителя позволяет полностью подавить 5-ю и 7-ю гармонические составляющие в питающем токе [39]. Однако для реализации указанного решения в литературных источниках [40, 41] также предлагается использовать схемы инверторов с 12 и 18 полупроводниковыми ключами, а в [42] – с 24 и 36 ключами. В то же время увеличение количества полупроводниковых ключей в инверторах приводит к увеличению их стоимости и повышению сложности серийного изготовления. К конструкционным решениям также можно отнести совершенствование режимом управления преобразователя частоты, т.е. различные методы модуляции. В [43, 44] предложены новые методы для реализации ШИМ, направленные на то, чтобы создать желательную амплитуду и форму волны напряжения, тем самым уменьшить гармонические искажения.

К решениям, связанным с использованием специальных устройств, в первую очередь относится применение специальных разделительных трансформаторов с обмотками «треугольник-звезда». Они позволяют эффективно бороться с гармоническими составляющими, кратными трем [39]. В [42] предлагается последовательно с каждым тиристорным мостом использовать автотрансформатор, обмотки которого соединены по схеме «зигзаг». Немаловажным решением так же является использование пассивных (резонансных) фильтров [45, 46]. Например, подключение пассивного фильтра на входе 6-пульсного выпрямителя при 100% нагрузке обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармонических искажений до величины 8-10 % [39]. Но в то же время пассивным фильтрам присущи недостатки, обусловленные их конструкцией, устранить которые можно применяя активные фильтры, реагирующие на изменение уровня высших гармонических составляющих при динамических процессах работы электроприводов [34, 47].

Все вышеперечисленные технические решения, безусловно, приводят к снижению величины гармонических составляющих силы тока, генерируемых преобразователями частоты в питающую сеть.

Выводы

1. Широкое применение преобразователей частоты в системах электроснабжения приводит к искажению синусоидальности тока, потребляемого ими из питающей электросети, и, как следствие, к повышению гармонических составляющих тока и напряжения. В спектральном составе силы тока, потребляемого преобразователем частоты, помимо основной преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих также присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше.

2. При уменьшении частоты управления скоростью вращения двигателя, при помощи преобразователя частоты, увеличивается количество пульсаций на осциллограмме силы тока, как результат наблюдается увеличение значений высших гармонических составляющих. Особый рост отмечен для коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока кратных трем.

3. При уменьшении величины загрузки преобразователя частоты наблюдается рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока.

4. Основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, в то же время гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению.

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: от настоящего к будущему // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 6-12.
2. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 46-48.

3. Евсеев Ю.А., Ковалев В.Д., Сурма А.М. Состояние и перспективы развития Российской полупроводниковой элементной базы силовой электроники // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 5. С. 2-14.
4. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода // Новости электротехники. 2005. № 2 (32).
5. Das B., Fancan M., Kasari P.R., Chakrabarti A. Comparison of different PWM-VSI fed 3 Φ im based on modulation index and switching frequency // International conference on electrical, electronics, signals, communication and optimization (EESCO). 2015.
6. Kupppillai R., Subramanian P., Vetrivel D. Single phase to three phase conversion with suppressed input current distortions for induction motor drive // IEEE International conference on technological advancements in power and energy: exploring energy solutions for an intelligent power grid (TAP Energy). 2018. pp. 1-4.
7. Козярук А.Е. Эффективный промышленный электропривод сегодня // Сборник трудов IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016. С. 56-58.
8. Arya K., Mini V.P., Mayadevi N., Harikumar R. Power quality enhancement of VSI fed induction motor drive // International CET conference on control, communication, and computing. 2018. pp. 28-32.
9. Багаев А.А. Современное состояние и перспективы развития электропривода // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2003. № 1 (9). С. 57-60.
10. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств // Силовая электроника. 2009. № 23. С. 4-7.
11. Макаров В.Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 109-120.
12. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 4. Т. 14. С. 96-105.
13. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // Силовая электроника. 2010. № 25. С. 8-14.
14. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // Современные технологии автоматизации. 2004. №2. С. 20-30.
15. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 24. С. 6-11.
16. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: вчера, сегодня, завтра // Силовая электроника. 2006. № 1. С. 4-7.
17. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электроприводов малой мощности // Силовая электроника. 2005. № 4. С. 30-35.
18. Чаплыгин Е.Е. Анализ искажений выходного напряжения и сетевого тока матричного преобразователя частоты // Электричество. 2007. № 11. С. 25-38.
19. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.3 // Силовая электроника. 2010. № 28. С. 12-17.
20. Makhubele J.W., Ogudo K.A. Analysis on modulation techniques of an AC drive with respect to harmonic content and efficiency // International conference on intelligent and innovative computing applications (ICONIC). 2019.
21. Salsabil I.T., Ahmed M.R. Design and Implementation of a single phase symmetrical hybrid sinusoidal pulse width modulated inverter for improve performance // International conference on advancement in electrical and electronic engineering (ICAEEE). 2018.
22. Hoque M.R., Islam R., Islam K., Alam M.J. Performance analysis of AC-DC converter based self excited DC shunt motor using single tuned passive filter // 10-th International conference on electrical and computer engineering (ICECE). 2018. pp. 325-328.
23. Беляев В.Л., Радимов С.Н. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. 2012. № 3 (19). С. 469-471.
24. Panchbhai A., Prajapati N., Parmar S. Harmonic mitigation in AC motor using multi-pulse rectifier // IEEE International WIE conference on electrical and computer engineering. 2017. pp. 1-4.
25. Ayala M., Gonzalez O., Rodas J., Gregor R., Rivera M. Predictive control at fixed switching frequency for a dual three-phase induction machine with Kalman filter-based rotor estimator // IEEE International conference on automatic (ICA-ACCA). 2016.
26. Хажиев Р.А. Исследование гармонического состава потребляемого тока светодиодных драйверов с использованием программируемого источника напряжения GW INSTEK APS-71102 //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. № 4. Т. 13. С. 139-144.

27. Лещинская Т.Б., Таранов М.М. Исследование токов эмиссии бытовых электроприемников // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 2. С. 54-61.

28. Авербух М.А., Лескина Я.В., Коржов Д.Н., Чередников А.В. Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете Matlab 7.12 // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 4. С. 57-62.

29. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока осветительных электроприемников // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 25-32.

30. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока бытовых электроприемников, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 8. С. 29-39.

31. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Экспериментальные исследования гармонического состава тока и напряжения на шинах станций управления установками электроцентробежных насосов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2015. № 1. С. 203-208.

32. Плацанский Л.А., Зарипов Ш.У. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 2. С. 61-66.

33. Ольховский В.Я., Мятаж Т.В., Наяксов С.Ю. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. № 1 (30). С. 84-97.

34. Авербух М.А., Лимаров Д.С. Обеспечение электромагнитной совместимости крановых частотных электроприводов с электрическими сетями промышленных предприятий: монография – Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 185 с.

35. Ковалева Н.А., Денчик Ю.М., Аникин В.В. Источники гармоник тока и напряжения в электротехническом комплексе добычи нефти из глубинных скважин // Омский научный вестник. 2015. № 137. С. 151-154.

36. Prasad S.V.S., Singh R.R., Somasekhar V.T., et al. Performance evaluation of an induction motor drive with direct torque control for open-end winding and cascaded three-level topologies // International conference on computer applications in electrical engineering - recent advances. 2018. pp. 1-6.

37. Narsale D., Dhamse S.S. A review on different multilevel topology used in AC drives to mitigate the total harmonic distortion // IEEE International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC). 2018. pp. 230-236.

38. Abdollahi R. Harmonic reduction using a novel multipulse AC-DC converter // World journal of engineering. 2018. V. 15. Is. 4. pp. 520-530.

39. Барутсков И.Б., Вдовенко С.А., Цыганков Е.В. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты // Главный энергетик. 2011. № 6. С. 5-15.

40. Gupta C., Varshney A., Verma N., et al. THD analysis of eleven level cascaded H-bridge multilevel inverter with different types of load using in drives applications // 2-nd IEEE International conference on advances in computing and communication engineering (ICACCE). 2015. pp. 355-359.

41. Swamy M.M. An electronically isolated 12-pulse autotransformer rectification scheme to improve input power factor and lower harmonic distortion in variable-frequency drives // IEEE Transactions on industry applications. 2015. V. 51 (5). pp. 3986-3994.

42. Singh B., Gairola S., Chandra A., et al. Zigzag connected autotransformer based controlled AC-DC converter for pulse multiplication // IEEE International symposium on industrial electronics. 2007. pp. 889-894.

43. Aarniovuori L., Kärkkäinen H., Niemelä M., et al. PWM power distribution and switching frequency analysis in motor drives // Industrial Electronics Conference (IECON). 2016. pp. 4356-4361.

44. Sayed M.A., Takeshita T., Iqbal A. New PWM technique for three-to-five phase matrix converter with high efficiency and low THD // IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC). - 2015. pp. 3217-3224.

45. Boonseng C., Rapeepornpat B., Suksawat D., et al. Design and installation of passive power filter for grid-connected solar rooftop applications at industrial plants // Grand international conference and exposition Asia. 2019. pp. 724-729.

46. Chaudhari P.S., Patil S.L. Reduction in harmonics of BLDC motor drive using controlled LC filter // Electric Power Components and Systems. 2018. V. 46. Is. 14-15. pp. 1686-1703.

47. Balasubramaniam S., Gunasekaran S., Ramasamy S., et al. Design and implementation of solar power fed permanent magnet synchronous motor with improved DC-DC converter and power quality

improvement using shunt active filter for reducing vibration in drive for industrial applications // Journal of vibroengineering. 2019 V. 21. Is. 2. pp. 507-525.

Автор публикации

Костинский Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроснабжение и электропривод, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.

References

1. Lancov V, Eranosyan S. Intelligent power electronics: from the present to the future. *Power electronics*. 2009;22:6-12.
2. Kolpakov A. Prospects of electric drive development. *Power electronics*. 2004;1:46-48.
3. Evseev YuA, Kovalev VD, Surma AM. State and prospects of development of the Russian semiconductor element base of power electronics. *Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*. 2005;5:2-14.
4. Lazarev G. High-voltage converters for frequency-controlled electric drive. *Electrical engineering news*. 2005; 2 (32).
5. Das B, Fancon M, Kasari PR, Chakrabarti A. Comparison of different PWM-VSI fed 3 im based on modulation index and switching frequency. *International conference on electrical, electronics, signals, communication and optimization (EESCO)*, 2015.
6. Kuppalai R, Subramanian P, Vetrivel D. Single phase to three phase conversion with suppressed input current distortions for induction motor drive. *IEEE International conference on technological advancements in power and energy: exploring energy solutions for an intelligent power grid (TAP Energy)*, 2018. pp. 1-4.
7. Kozyaruk AE. Efficient industrial electric drive today. *Proceedings of the IX international (XX all-Russian) conference on automated electric drive AEP-2016*. 2016. pp. 56-58.
8. Arya K, Mini VP, Mayadevi N, et al. Power quality enhancement of VSI fed induction motor drive. *International CET conference on control, communication, and computing*. 2018. pp. 28-32.
9. Bagaev AA. Current state and prospects of electric drive development. *Bulletin of Altai state agrarian University*. 2003;1 (9):57-60.
10. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. *Power electronics*, 2009;23:4-7.
11. Makarov VG. Analysis of the current state of the theory and practice of asynchronous electric drive. *Bulletin of Kazan technological University*. 2011;6:109-120.
12. Nikolaev AA, Kornilov GP, Hramshin TR, Nikiforov G, et al. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of metallurgical enterprises. *Bulletin of Magnitogorsk state technical University. G. I. Nosova*. 2016;4 (14):96-105.
13. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 3. *Power electronics*. 2010; 25:8-14.
14. Florencev S. Current state and forecast of development of power electronics devices. *Modern automation technologies*. 2004;2:20-30.
15. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 2. *Power electronics*. 2010;24:6-11.
16. Lancov V, Eranosyan S. Intelligent power electronics: yesterday, today, tomorrow. *Power electronics*. 2006;1:4-7.
17. Bashkurov V. International Rectifier intelligent power modules for low power drives. *Power electronics*. 2005;4:30-35.
18. CHaplygin EE. Analysis of distortions of output voltage and mains current of matrix frequency converter. *Electricity*. 2007;11:25-38.
19. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 4.3. *Power electronics*. 2010;28:12-17.
20. Makhubele JW, Ogudo KA. Analysis on modulation techniques of an AC drive with respect to harmonic content and efficiency. *International conference on intelligent and innovative computing applications (ICONIC)*, 2019.
21. Salsabil IT, Ahmed M.R. Design and Implementation of a single phase symmetrical hybrid sinusoidal pulse width modulated inverter for improve performance. *International conference on advancement in electrical and electronic engineering (ICAEEE)*. 2018.
22. Hoque M.R, Islam R, Islam K, et al. Performance analysis of AC-DC converter based self excited DC shunt motor using single tuned passive filter. *10-th International conference on electrical and computer engineering (ICECE)*. 2018, pp. 325-328.

23. Belyaev VL, Radimov SN. Harmonic composition of mains current of frequency drives with pulse width modulation. *Electromechanical and energy saving systems*. 2012;3 (19):469-471.
24. Panchbhai A, Prajapati N, Parmar S. Harmonic mitigation in AC motor using multi-pulse rectifier. *IEEE International WIE conference on electrical and computer engineering*, 2017. pp. 1-4.
25. Ayala M, Gonzalez O, Rodas J, Gregor R, et al. Predictive control at fixed switching frequency for a dual three-phase induction machine with Kalman filter-based rotor estimator. *IEEE International conference on automatic (ICA-ACCA)*. 2016.
26. Hazhiev RA. Investigation of the harmonic composition of the current consumption of led drivers using a programmable voltage source GW INSTEK APS-71102. *Bulletin of South Ural state University. Series: Computer technology, control, electronics*. 2013;4 (13):139-144.
27. Leshchinskaya TB, Taranov MM. Study of emission currents of household electric receivers. *Bulletin of the Federal state educational institution of higher professional education «Moscow state agroengineering university. V.P. Goryachkina»*. 2009;2:54-61.
28. Averbuh MA, Leskina YaV, Korzhov DN, et al. Analysis of electrodynamic processes and electromagnetic compatibility of frequency electric drive in Matlab 7.12 package. *News of universities. Electromechanics*. 2014;4:57-62.
29. Kostinskij SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current of lighting electrical receivers. *Industrial power engineering*. 2018;9:25-32.
30. Kostinskij S.S. Review and results of studies of the harmonic composition of the current of household electrical receivers, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems. *Industrial power engineering*. 2018;8:29-39.
31. Kovalev AYU, Kuznecov EM, Anikin VV. *Experimental studies of the harmonic composition of current and voltage on the tires of control stations of electric centrifugal pumps*. 2015;1:203-208.
32. Plashchanskij LA, Zaripov Sh.U. Influence of higher harmonics on the state of electric networks. *Proceedings of higher educational institutions. Mining journal*. 2010;2:61-66.
33. Ol'hovskij V.Ya, Myatezh TV, Nayaksov SYu. Investigation of the influence of higher harmonics of small nonlinear consumers on the operation of the network up to 1000 V. *Reports of the Academy of Sciences of the higher school of the Russian Federation*. 2016;1(30):84-97.
34. Averbuh MA, Limarov DS. *Ensuring electromagnetic compatibility of crane frequency drives with electrical networks of industrial enterprises*. Belgorod, Publishing house of BSTU, 2009;22:6-12.
35. Kovaleva NA, Denchik YuM, Anikin VV. Sources of current and voltage harmonics in the electrotechnical complex of oil production from deep wells. *Omsk scientific bulletin*, 2015;137:151-154.
36. Prasad SV, Singh RR, Somasekhar VT, et al. Performance evaluation of an induction motor drive with direct torque control for open-end winding and cascaded three-level topologie. *International conference on computer applications in electrical engineering - recent advances*. 2018. pp. 1-6.
37. Narsale D, Dhamse SS. A review on different multilevel topology used in AC drives to mitigates the total harmonic distortion. *IEEE International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC)*. 2018, pp. 230-236.
38. Abdollahi R. Harmonic reduction using a novel multipulse AC-DC converter. *World journal of engineering*. 2018;15 (4):520-530.
39. Barutskov IB, Vdovenko SA, Cygankov E.V. Harmonic distortions during operation of frequency converters. *Chief power*. 2011;6:5-15.
40. Gupta C, Varshney A, Verma N, et al. THD analysis of eleven level cascaded H-bridge multilevel inverter with different types of load using in drives applications . *IEEE International conference on advances in computing and communication engineering (ICACCE)*. 2015, pp. 355-359.
41. Swamy MM. An electronically isolated 12-pulse autotransformer rectification scheme to improve input power factor and lower harmonic distortion in variable-frequency drives. *IEEE Transactions on industry applications*. 2015;51 (5):3986-3994.
42. Singh B, Gairola S, Chandra A, et al. Zigzag connected autotransformer based controlled AC-DC converter for pulse multiplication. *IEEE International symposium on industrial electronics*. 2007, pp. 889-894.
43. Aarniovuori L, Kärkkäinen H, Niemelä M, et al. PWM power distribution and switching frequency analysis in motor drives . *Industrial Electronics Conference (IECON)*, 2016. pp. 4356-4361.
44. Sayed MA, Takeshita T, Iqbal A. New PWM technique for three-to-five phase matrix converter with high efficiency and low THD. *IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*, 2015, pp. 3217-3224.
45. Boonseng C, Rapeepornpat B, Suksawat D, et al. Design and installation of passive power filter for grid-connected solar rooftop applications at industrial plants. *Grand international conference and exposition Asia*. 2019, pp. 724-729.
46. Chaudhari P.S., Patil S.L. [Reduction in harmonics of BLDC motor drive using controlled LC filter] *Electric Power Components and Systems*. 2018; 46(14-15):1686-1703.

47. Balasubramaniam S, Gunasekaran S, Ramasamy S., et al. Design and implementation of solar power fed permanent magnet synchronous motor with improved DC-DC converter and power quality improvement using shunt active filter for reducing vibration in drive for industrial applications. *Journal of vibroengineering*. 2019;21 (2):507-525.

Authors of the publication

Sergey S. Kostinskiy – Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),Novocherkassk, Russia.
Email: mirovingen1987@mail.ru.

Поступила в редакцию

03.12.2019г.