

УДК 621.316.176: 62-83

В. Л. Беляев, канд. техн. наук,
С. Н. Радимов, д-р техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СЕТЕВОГО ТОКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Аннотация. Рассмотрены методы исследования влияния нагрузки частотного электропривода с инвертором напряжения и формированием выходного напряжения по методу широтно-импульсной модуляции на искажение формы и спектральный состав тока, потребляемого из питающей сети. Установлена принципиальная возможность исследования данной проблемы как по осциллограмме сетевого тока при пуске электропривода, позволяющая учесть реальные параметры питающей сети, так и с помощью упрощенной математической модели.

Ключевые слова: частотный электропривод, широтно-импульсная модуляция, несинусоидальность, сетевой ток, математическая модель, спектральная плотность мощности, спектрограмма тока

V. L. Bilyayev, PhD.,
S. N. Radimov, ScD.

RESEARCH OF NONSINUSOIDAL HARMONIC DISTORTIONS OF THE CURRENT FROM MAINS OF THE AC ADJUSTABLE SPEED DRIVE WITH VOLTAGE INVERTER AND VOLTAGE FORMING USING PWM

Abstract. Methods for research of influence of total harmonic distortion of the current form consumed from mains with load of the AC adjustable speed drive with voltage inverter and voltage forming using pulse width modulation is in this article. It is established the possibility to research this problem using both oscillogram of the consumed current from mains during motor starting and with simplified mathematical model.

Keywords: adjustable speed drive, pulse width modulation, total harmonic distortion, current from mains, mathematical model, power spectrum density, current spectrogram

В. Л. Біляєв, канд. техн. наук,
С. Н. Радімов, д-р техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИНУСОІДАЛЬНИХ СПОТВОРЕНЬ МЕРЕЖЕВОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ НА ОСНОВІ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Анотація. Розглянуто методи дослідження впливу навантаження частотного електроприводу з інвертором напруги та формуванням вихідної напруги за методом широтно-імпульсної модуляції на спотворення форми та спектральний склад струму, що споживається з живлячої мережі. Встановлено принципову можливість дослідження даної проблеми як за допомогою осцилограми мережевого струму під час пуску електроприводу, яка дозволяє врахувати реальні параметри живлячої мережі, так і за допомогою спрощеної математичної моделі.

Ключові слова: частотний електропривод, широтно-імпульсна модуляція, несинусоїдальність, струм мережі, математична модель, спектральна щільність потужності, спектрограма струму

Введение. В промышленных, коммунальных и транспортных предприятиях, в том числе и в морских портах, все более широко используются современные электромеханические системы с полупроводниковыми преобразователями (ПП). Являясь основой, на которой реализуются экономичные с большими функциональными возможностями и удобные при эксплуатации системы электропривода, ПП в то же время оказывают негативное воздействие на показатели качества электроэнергии в системе

электроснабжения в которой они работают. В частности, имеет место генерация высших гармоник тока и обусловленное этим фактором искажение синусоидальности формы тока. В свою очередь, оно вызывает искажение синусоидальности формы напряжения питающей сети и может привести к таким негативным последствиям, как недопустимый нагрев оборудования, преждевременное старение изоляции, сбои в работе электронных устройств, погрешности в работе измерительных приборов, превышающие допустимые пределы [1 – 2].

© Беляев В.Л., Радимов С.Н., 2015

Проблемам электромагнитной совместимости электромеханических устройств на основе ПП посвящено множество как теоретических, так и экспериментальных исследований [1; 3 – 7]. В работе [3] приведены результаты экспериментального исследования степени искажения синусоидальности тока, потребляемого из сети электроприводами с преобразователями частоты (ПЧ), построенными на основе инверторов напряжения с формированием выходного напряжения по методу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Обработка результатов эксперимента позволила установить функциональную зависимость коэффициента несинусоидальных искажений сетевого тока высшими гармониками (THDi – Total Harmonic Distortion) от нагрузки ПЧ в виде степенной функции.

В [4] установлено, что для наиболее значимых 5 и 7 гармонических составляющих сетевого тока их функциональную зависимость от нагрузки ПЧ удобно описывать экспоненциальной регрессией. Там же показано, что 11-я и более высокие гармоники практически не зависят от нагрузки ПЧ.

В работе [8] доказана принципиальная возможность проведения подобных исследований на упрощённых физических и, что особенно важно, на математических моделях в среде MATLAB Simulink, причем в этих моделях отпадает необходимость в представлении выходной части ПЧ – автономного инвертора.

Проведенные исследования на физических и математических моделях частотного привода подтвердили утверждение о том, что величина тока, потребляемого частотным приводом из сети, и степень искажения его синусоидальности определяется изменением напряжения на конденсаторах звена постоянного тока, вызванного возрастанием / снижением нагрузки приводного двигателя. Отметим, что снижение напряжения в звене постоянного тока с ростом нагрузки не зависит от того, является ли нагрузка статической или динамической, обуслов-

ленной режимами изменения скорости. Отсюда следует, что обработка осциллограммы сетевого тока, снятой при разгоне частотного привода, позволяет полностью определить искомую зависимость THDi от нагрузки ПЧ.

В продолжительном режиме работы электроприводы с ПЧ, как правило, работают с нагрузкой, меньшей их номинальной мощности, а в режимах повторно-кратковременных, с частыми пусками и реверсами характер нагрузки существенно отличается и может превышать номинальное значение. Поэтому для приводов, работающих в повторно-кратковременных режимах, необходимо обладать информацией о влиянии нагрузок, превышающих номинальное значение вплоть до его полуторного значения, на искажение синусоидальности сетевого тока.

Для получения этой зависимости в пределах изменения нагрузки привода от режима холостого хода до 1,5 номинального значения (и пропорционального изменения действующего значения первой гармоники сетевого тока I_1) необходимо выбрать соответствующий темп разгона исходя из момента инерции привода. Например, в [3] исследования проводились на физических моделях с двигателями мощностью 2,8 и 5,5 кВт с маховиками на валах, инерционность которых в несколько раз превышала моменты инерции двигателей. Для питания двигателей в составе частотного привода использовались преобразователи Altivar 71 – мощностью 2,2 и 5,5 кВт соответственно [9].

Цель данной статьи – определение спектра высших гармоник сетевого тока во всем диапазоне изменения нагрузки электропривода с ПЧ, рассматривая ток как случайную функцию $i(t)$.

Материал и результаты исследований. Для количественной оценки гармонического состава сетевого тока проводилась запись осциллограмм тока, потребляемого двигателями из сети. На рисунках 1 и 2 представлены осциллограммы пуска двигателей 2,8 и 5,5 кВт соответственно.

На рис. 3 – осциллограмма наложения пусков двигателей 2,8 и 5,5 кВт, причем начала пусков смещены, и темп разгона двигателя мощностью 2,8 кВт снижен по сравнению с представленными на рис. 1.

Совмещенный пуск двух двигателей рассматривался как один из возможных режимов работы порталного крана при выполнении работ по обработке грузов в морских портах.

Для исследования спектра представленных осциллограмм сетевого тока использовались два метода непараметрического анализа сигналов, т.е. не требующих дополнительной информации:

- а) построение спектрограммы – мгновенного спектра во времени;
- б) оценка спектральной плотности мощности (СПМ) случайного процесса методом усреднения модифицированных реализаций – метод Уэлча [10].

Для вычисления спектрограммы исходный вектор сигнала – осциллограмма сетевого тока была разбита на сегменты длиной в один период основной частоты 50 Гц, для каждого из которых был вычислен спектр с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектральная плотность средней мощности случайного сигнала $W(\omega)$ – это функция, характеризующая распределение средних значений квадратов амплитуд гар-

монических составляющих этого сигнала. Поскольку случайным сигналом является электрический ток, то его средний квадрат можно рассматривать как среднюю мощность, выделяемую на сопротивлении 1 Ом, которая распределена по частотам в определенной полосе, зависящей от природы случайного процесса [11].

Таким образом, спектральная плотность средней мощности представляет собой среднюю мощность, приходящуюся на 1 Гц при заданной частоте ω , имеет размерность энергии и рассчитывается по выражению

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|I_T(\omega)|^2}{T},$$

где $I_T(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T i(t)e^{j\omega t} dt$ – спектральная плотность случайной функции $i(t)$ на интервале времени T .

На рисунках 4; 5 и 6 представлены спектрограммы, а на рисунках 7; 8 и 9 оценки СПМ для представленных выше осциллограмм пуска двигателей 2,8 и 5,5 кВт. В итоге, получены обобщенные оценки случайной функции сетевого тока $i(t)$ в широком диапазоне нагрузок ПЧ.

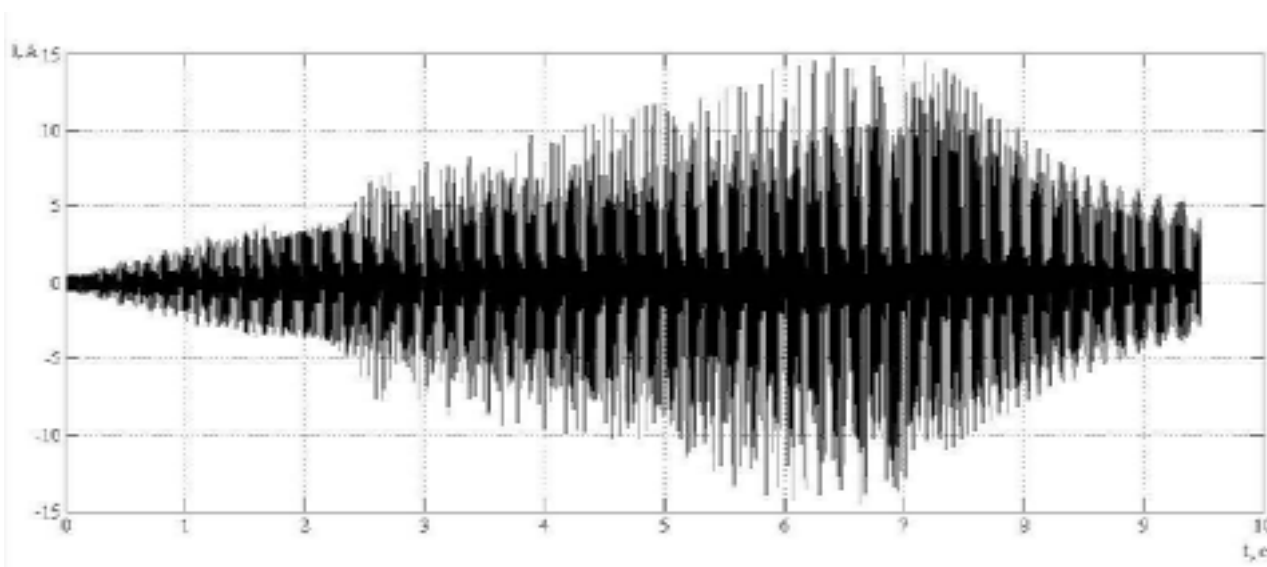


Рис. 1. Осциллограмма сетевого тока при пуске двигателя мощностью 2,8 кВт

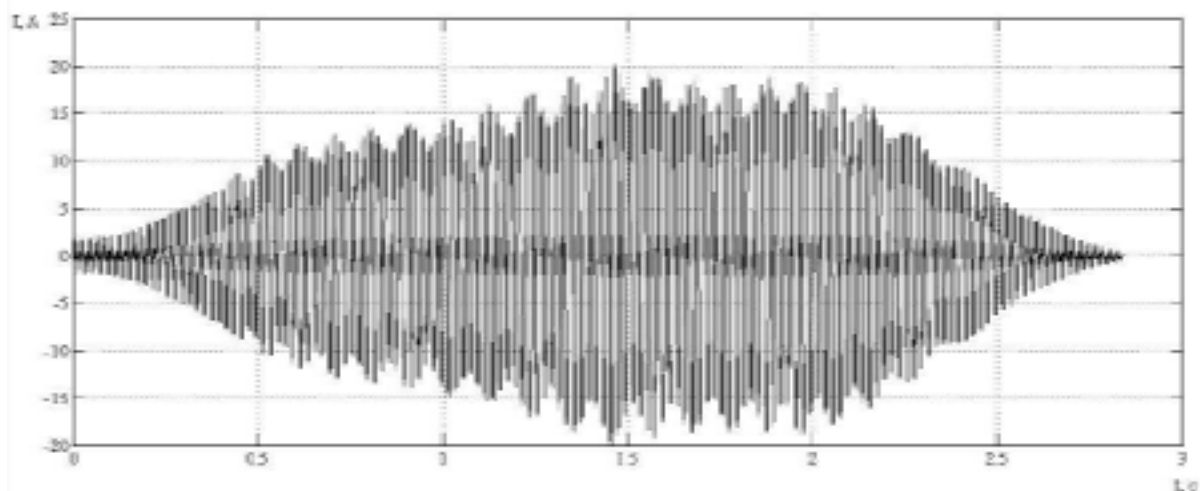


Рис. 2. Осциллограмма сетевого тока при пуске двигателя мощностью 5,5 кВт

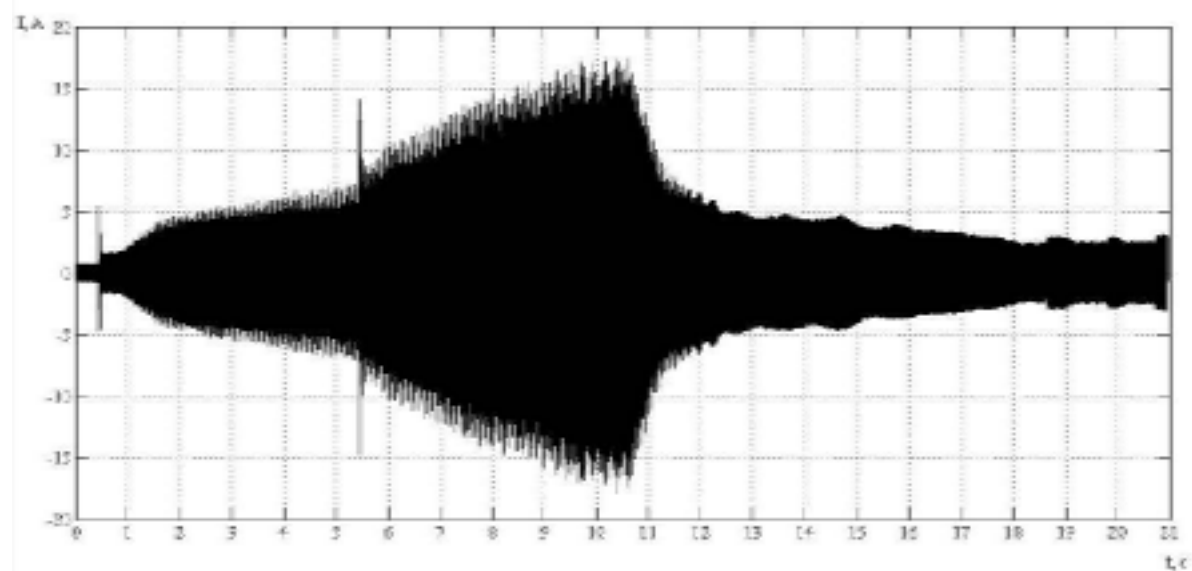


Рис. 3. Осциллограмма сетевого тока при совместном пуске двигателей

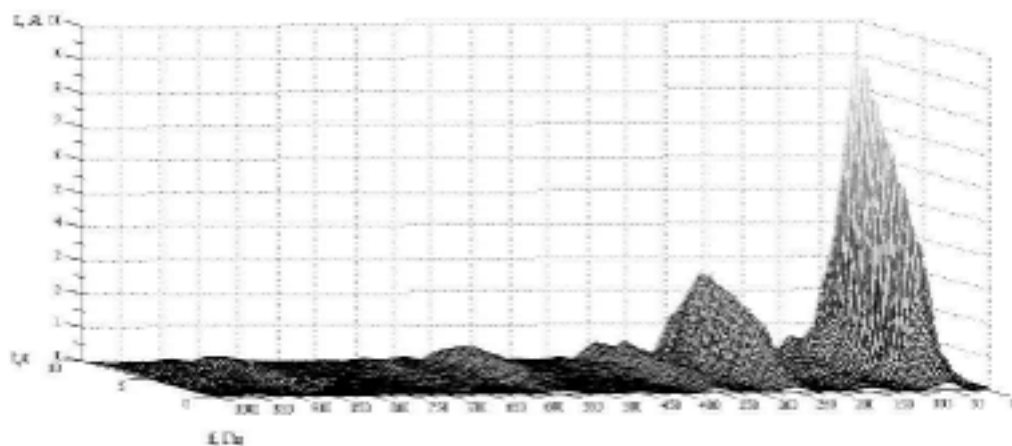


Рис. 4. Спектрограмма сетевого тока при пуске двигателя 2,8 кВт

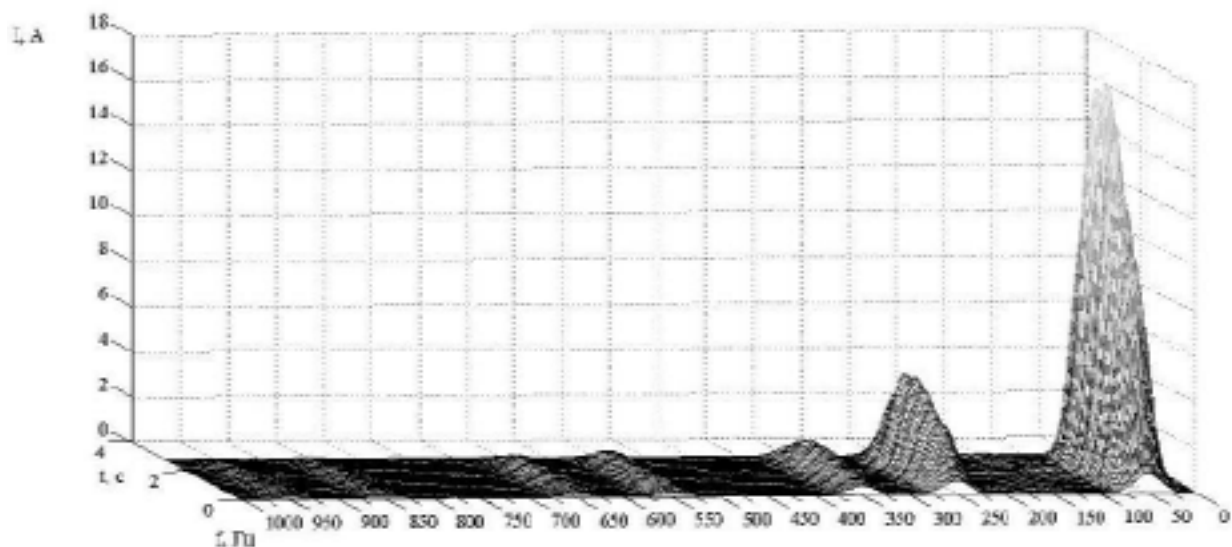


Рис. 5. Спектрограмма сетевого тока при пуске двигателя 5,5 кВт

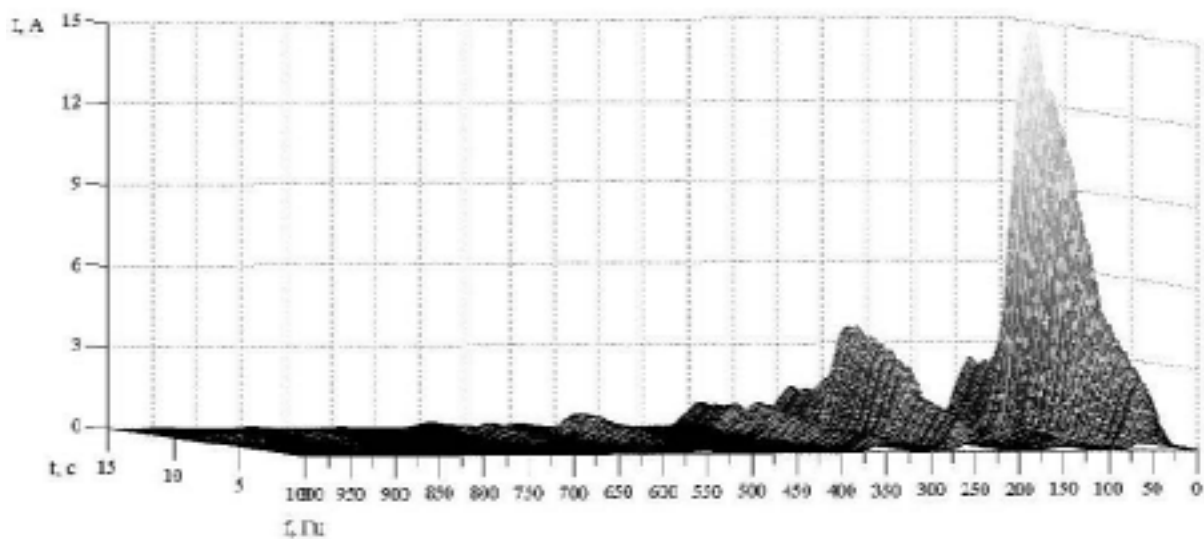


Рис. 6. Спектрограмма сетевого тока при совместном пуске двигателей

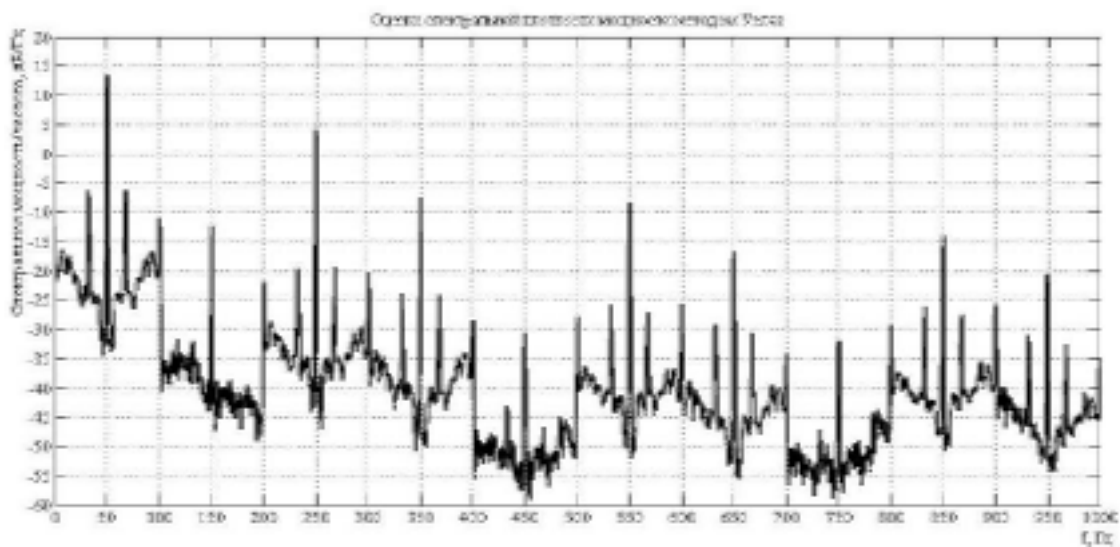


Рис. 7. Оценка СПМ сетевого тока при пуске двигателя мощностью 2,8 кВт методом Уэлча

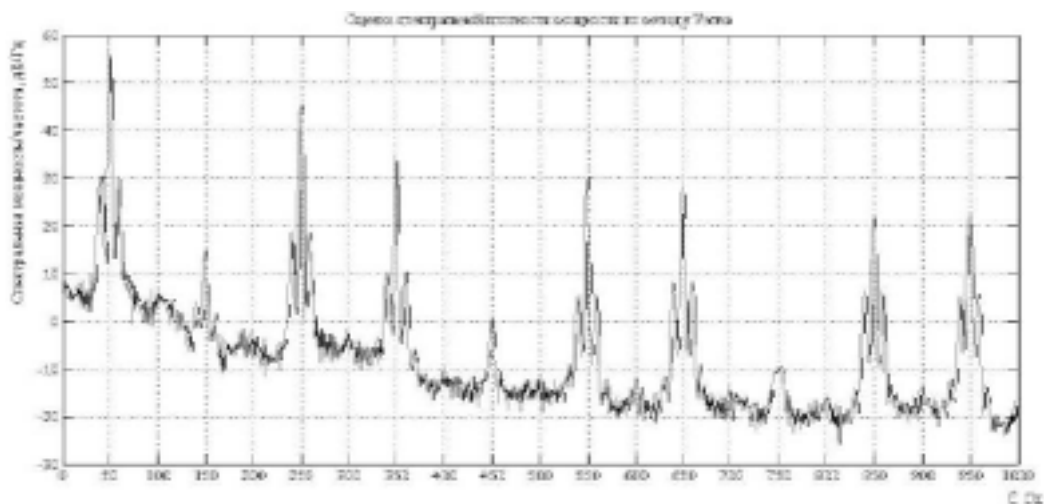


Рис. 8. Оценка СПМ сетевого тока при пуске двигателя мощностью 5,5 кВт методом Уэлча

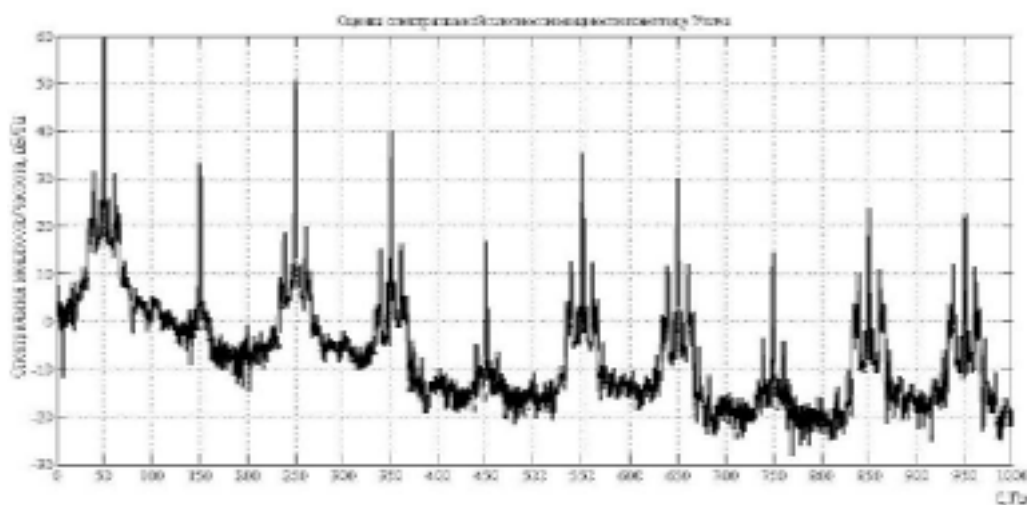


Рис. 9. Оценка СПМ сетевого тока при пуске двигателей 2,8 и 5,5 кВт методом Уэлча

Спектрограмма наглядно иллюстрирует и совмещает временную и частотную шкалу исследуемого сигнала пуска асинхронных двигателей под управлением ПЧ в виде трехмерной поверхности. На оси OX представлена шкала частот; на оси OY – шкала времени, в течение которого проводился пуск двигателей; на оси OZ – шкала тока. Анализ приведенных спектрограмм пусков упомянутых выше двигателей с ПЧ показывает, что в спектральный состав гармонических составляющих сетевого тока при работе ПЧ с ШИМ входят преимущественно пятая, седьмая и одиннадцатая гармоники. Это отражено в виде вытянутых «холмов», расположенных на поверхности спектрограммы напротив частот 250; 350 и 550 Гц соответственно. Гармоника основной частоты представлена «холмом» напротив частоты 50 Гц. Причем состав спектра не изменяется во

всем диапазоне нагрузок, поскольку вдоль всей оси времени наблюдаются, только упомянутые выше «холмы». Гармоники более высоких порядков не оказывают существенного влияния на форму тока, потребляемого преобразователем. Этот факт предоставляет возможность целенаправленно выбирать или проектировать фильтры низших частот для эффективного снижения коэффициента несинусоидальности тока, потребляемого из питающей сети.

Проведенная оценка спектральной плотности мощности трех рассмотренных режимов пуска позволяет утверждать, что в спектре сетевого тока присутствуют гармоники неканонических частот [10] (интергармоники) в виде «всплесков», расположенных перед и после каждой из присутствующих в спектре. Однако они не оказывают существенного влияния на искажение формы тока,

поскольку их уровень более, чем на 20 дБ/Гц, ниже уровня соответствующей гармоника канонической частоты.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований и совпадающих с ними результатов моделирования в MATLAB, среда Simulink, можно утверждать следующее.

1. Исследование влияния нагрузки частотного привода на искажение синусоидальности сетевого тока, с учетом реальных параметров питающей сети, удобно проводить путем обработки осциллограммы тока при пуске привода.

2. Спектральный состав гармоник тока остается неизменным во всем исследованном диапазоне сетевого тока (нагрузок привода).

3. Гармоники тока неканонических частот (интергармоники) не оказывают существенного влияния на форму сетевого тока.

4. Для исследования влияния нагрузки частотного привода с ШИМ на спектральный состав сетевого тока и его THDi предлагается удобно использовать упрощенную модель частотного привода без выходного каскада – модели автономного инвертора [8].

Таким образом, результаты представленных исследований дают возможность обоснованного выбора при проектировании фильтров низших частот с целью повышения качества электроэнергии в питающей сети при работе преобразователей частоты с ШИМ. Например, для приведенных трех случаев следует проектировать силовые фильтры с резонансной частотой 250, 350 и 550 Гц соответственно. Вместе с тем можно не прибегать к проектированию фильтров для гармоник промежуточных частот.

Список использованной литературы

1. Карташев И. И. Определение виновника искажений напряжения путем приборного контроля качества электроэнергии / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко // *Зб. наук. пр. IV Міжнар. наук. конф. «Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств»*. – Маріуполь : 2000. – С. 337 – 340.

2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электри-

ческой энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ13109-87; введ. 01.01.1999. – К. : Госстандарт Украины, 1999.

3. Радимов С. Н. Экспериментальное исследование степени искажения сетевого тока частотного электропривода / С. Н. Радимов, В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб и др. // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : – 2010. – Вип. 75. – С. 52 – 56.

4. Беляев В. Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематич. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода: теорія і практика»*. – Кременчук : – 2012. – № 19. – С. 469 – 471.

5. Das J.C., (2004), *Passive Filters – Potentialities and Limitations*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No.1, January/February 2004, pp. 232 – 241.

6. Acagi H., (2005), *Active Harmonic Filters Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, No. 12, December 2005, pp. 2128 – 2141.

7. Von Jouanne A., Enjeti P.N., and Banerjee B., (1999), *Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives*, *IEEE Trans, on Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 4, July/August 1999, pp. 908 – 916.

8. Беляев В. Л. Упрощенные модели электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: наука, освіта і практика*. – 2014. – Кременчук : – Вип. 1/2014 (2). – С. 240 – 242.

9. Altivar 71. Преобразователи частоты / Schneider Electric, 2009. – 332 с

10. Ice T., Hayashi Y., and Tsuji K., (2000), *Definitions of Power Quality Levels and the Simplest Approach for Unbundled Power Quality Services*, *Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality Power*, October 1-4, 2000, pp. 385 – 390.

11. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский // *Учебник для вузов*. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.

Получено 09.02.2015

References

1. Kartashov I.I., and Ponomarenko I.S. *Opređenje vinovnika iskazheniy napriazheniya putem pribornogo kontrolya kachestva elektroenergii* [Detection of Object Responsible for Voltage Distortion by Means of Device Supervision of Electric Power Quality], (2000), *Zbirnyk Naukovykh Prac IV Mizhnarodnoi Naukovoï konferencii "Efektyvnist i Yakist Electropostachannya Ppromyslovykh Pidpryemctv"*, Mariupol, Ukraine, pp. 337 – 340 (In Russian).
2. GOST 13109-97 *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.* [Electric Power Quality Standards Specifications in Electric Power Supply Systems of Common Purpose.], (1999), *Gosstandart Ukraine*, Kiev, Ukraine (In Russian).
3. Radimov S.N., Bilyayev V.L., Besarab A. N. and other. *Eksperimentalnoe issledovanie stepeni iskazhenia setevogo toka chastotnogo elektroprivoda*, [Experimental Research of Distortion Degree of Network Current of AC Adjustable Speed Drive], (2010), *Elektromashinobuduvanny ta Elektroobladnanny*, Kiev, Ukraine, Iss. 75, pp. 52 – 56 (In Russian).
4. Bilyayev V.L., and Radimov S.N. *Garmonicheskii sostav setevogo toka chastotnykh elektroprivodov s shirotno – impulsnoy modulyatsiey* [Harmonic Composition of the Current Consumed from Mains with Load of the AC Adjustable Speed Drive using Pulse width Modulation], (2012) *Elektromekhanichni ta Energozberigay "Problemy Avtomatyzovanogo Elektroprivoda: Teoriya i Praktyka"*, Kremenchug, Ukraine, Iss. 19, pp. 469 – 471 (In Russian).
5. Das J.C., (2004), *Passive Filters – Potentialities and Limitations*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232 – 241 (In Russian).
6. Acagi H., (2005), *Active Harmonic Filters*, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, No. 12, December 2005, pp. 2128 – 2141 (In Russian).
7. Von Jouanne A., Enjeti P.N., and Banerjee B., (1999), *Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives*, *IEEE Trans, on Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 4, July/August 1999, pp. 908 – 916 (In Russian).
8. Bilyayev V.L., and Radimov S.N. *Uproshchennyye modeli elektroprivodov s shirotno-impul'snoi modulyatsiey* [Simplified Models of Electric Drives with Pulse-width Modulation], (2014), *"Problemy Energoresursozberezhennya v Elektrotekhnichnykh Systemakh: Nauka, Osvita i Praktyka"*, Kremenchug, Ukraine, Iss. 1/2014 (2), pp. 40 – 242 (In Russian).
9. Altivar 71. *Preobrazovateli chastoty* [Adjustable Speed Drives], 2009, *Schneider Electric*, 332 p. (In Russian).
10. Ice T., Hayashi Y., and Tsuji K., (2000), *Definitions of Power Quality Levels and the Simplest Approach for Unbundled Power Quality Services*, *Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality Power*, October 1-4, 2000, pp. 385 – 390 (In Russian).
11. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly. Uchebnik dlya vuzov.* [Radio Engineering Circuits and Signals: Textbook for High Schools], (1986), Moscow, Russian Federation, *Radio i Sviaz*, 512 p. (In Russian).



Беляев
Владимир Леонидович,
канд. техн. наук, доц. каф.
электроснабжения и энер-
гоменеджмента Одесского
нац. политехн. ун-та,
пр. Шевченко, 1 г. Одесса,
65044.
E-mail: vlbel@ukr.net



Радимов
Сергей Николаевич,
д-р техн. наук, проф. каф.
электроснабжения и энер-
гоменеджмента Одесского
нац. политехн. ун-та,
пр. Шевченко, 1г. Одесса,
65044.
E-mail: radimov7@rambler.ru