

## УПРОЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ В ИССЛЕДОВАНИЯХ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В. Л. Беляев<sup>1</sup>, Т. В. Скоробогатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Одесский национальный политехнический университет.

<sup>2</sup>Черноморский филиал Администрации морских портов Украины

**Аннотация.** Исследованы упрощенные модели электроприводов с частотным регулированием с широтно – импульсной модуляцией – физическая и имитационная, разработанные с целью оценки степени несинусоидальных искажений сетевого тока. Проведено сравнение результатов симуляции, полученных на упрощенных моделях с результатами натурных экспериментов на асинхронном двигателе с преобразователем частоты. Установлена возможность использования обеих исследованных моделей для указанной выше цели.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, искажение синусоидальности тока, гармоники, упрощенные модели.

### Введение

Развитие силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники обуславливает ее распространение в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий, на транспорте и других отраслях экономики в виде различного рода преобразовательных устройств. Одним из видов такой техники являются электроприводы с частотным регулированием, выполняющие регулирование двигателей переменного тока с помощью инверторов напряжения с широтно – импульсной модуляцией (ШИМ). Работа этих преобразователей вызывает искажения формы синусоиды тока, потребляемого из питающей электросети, и появление высших гармоник (ВГ), что может привести к нарушению работы измерительной техники, защитных аппаратов, а также автоматических конденсаторных установок. Для выбора и принятия адекватных мер по устранению негативного влияния частотных преобразователей (ЧП) с ШИМ на ток питающей электросети необходимо провести оценку степени искажения синусоидальности тока от нагрузки ЧП и определить спектр ВГ.

### 1. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Результаты исследований такого рода приведены в работах [1, 2]. Тем не менее, остается актуальным вопрос о возможности создания адекватных физических и имитационных моделей описанных выше процессов и выработки на их основе практических рекомендаций для внед-

рения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) [3 - 9]. Открытым остается также вопрос допустимости использования упрощенных моделей частотных электроприводов с целью определения параметров фильтров высших гармоник.

### 2. Цель и задачи исследований

Цель исследований, представленных в данной статье, - установить возможность использования упрощенных физических и имитационных моделей для оценки зависимости между коэффициентом несинусоидальности и уровнями относительных величин гармоник тока, потребляемого из питающей сети, от величины нагрузки ЧП.

### 3. Материал и результаты исследований

Материалом для данной статьи послужили данные, полученные в результате моделирования работы ЧП с инвертором напряжения, формирующего выходное напряжение методом ШИМ. Предметом исследования был спектральный состав тока ЧП, потребляемого из электросети. Ранее уже проводились такие исследования на физической модели, состоящей из ЧП Altivar 71 мощностью 2,2 и 5,5 кВт и, соответственно, асинхронных двигателей (АД) мощностью 2,8 и 5,5 кВт [1,2]. В результате исследований были получены регрессионные функции для зависимостей

$$I_{v\%} = f(I_{I*}), \quad (1)$$

$$THDi_{\%} = f(I_{I*}), \quad (2)$$

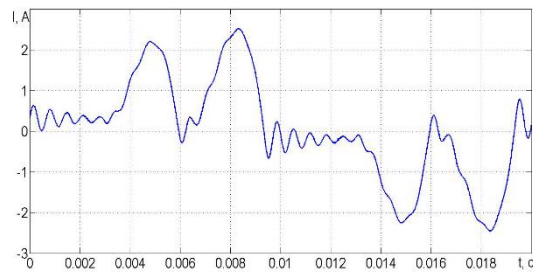
где  $I_{V\%} = \frac{I_V}{I_{I_{ном}}}$  - относительное значение

тока  $V$ -й гармоники,  $I_{I_{ном}}$  - действующее значение первой гармоники сетевого тока, соответствующее номинальной нагрузке на выходе

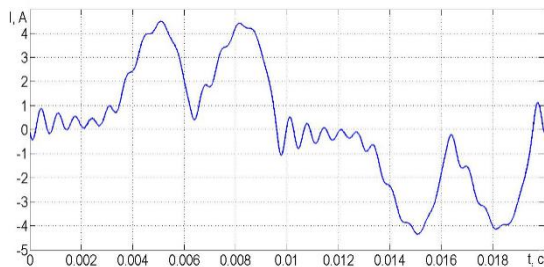
ЧП,  $I_{I^*} = \frac{I_I}{I_{I_{ном}}}$  - относительное значение пер-

вой гармоники сетевого тока,  $I_I$  - текущее значение первой гармоники сетевого тока,  $THDi\%$  - значение коэффициента несинусоидальности сетевого тока.

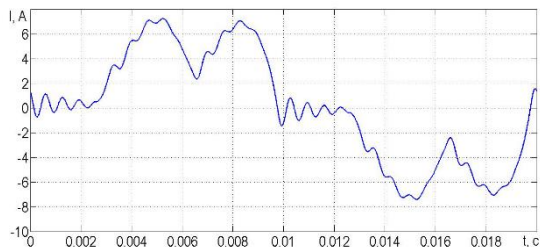
Графики осциллограмм сетевого тока для двух типов ЧП и АД при различной нагрузке ЧП приведены на рис. 1 и рис. 2.



а)

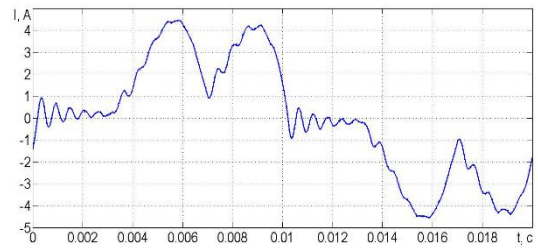


б)

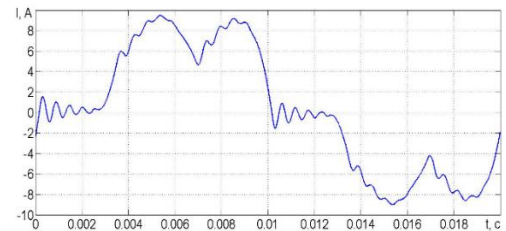


в)

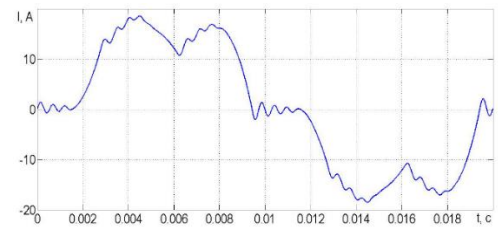
Рис. 1. Осциллограммы сетевого тока ЧП мощностью 2,2 кВт с АД 2,8 кВт при нагрузке, % : а) 25, б) 50, в) 100.



а)



б)



в)

Рис. 2. Осциллограммы сетевого тока ЧП мощностью 5,5 кВт с АД 5,5 кВт при нагрузке, %: а) 25, б) 50, в) 100.

Схема физической модели представлена на рис.3

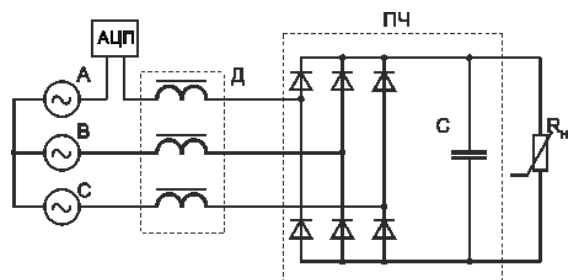


Рис. 3. Схема упрощенной физической модели для исследования спектра сетевого тока ЧП.

Модель представляет собой входной выпрямитель ЧП, подключенный к сети последовательно с сетевым дросселем Д. К звену постоянного тока ЧП подключен переменный резистор  $R_n$ , имитирующий изменяющуюся нагрузку асинхронного двигателя.

В качестве имитационной упрощенной модели исследовалась аналогичная схема, представленная на рис. 4

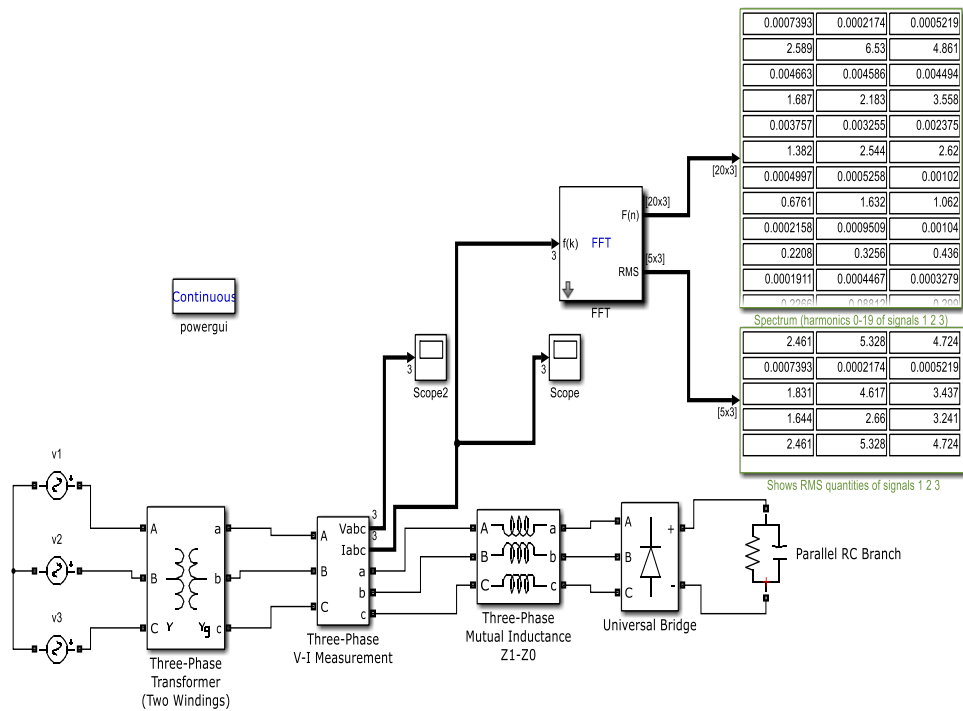


Рис. 4. Схема упрощенной имитационной модели для исследования спектра сетевого тока ЧП в среде SIMULINK с использованием пакета Sim Power Systems

Упрощенная имитационная модель содержит те же самые силовые элементы, что и упрощенная физическая, и дополнительно оснащена виртуальными измерительными приборами тока и напряжения, осциллографами и блоком, выполняющим быстрое преобразование Фурье в цифровой форме. Результаты симуляции работы схемы отображаются на цифровых табло в виде измеренных значений токов трех фаз, фиксируются в виде осциллограмм тока и напряжения, сохраняются в виде диаграмм, отображающих спектральный состав сетевого тока. На верхнем табло отображены в цифровой форме амплитуды гармоник токов трех фаз, а на нижнем – действующие значения спектра токов. Вся информация сохраняется в виде файлов выходных переменных. На рис. 5 и рис. 6 приведены примеры результатов симуляции работы модели.

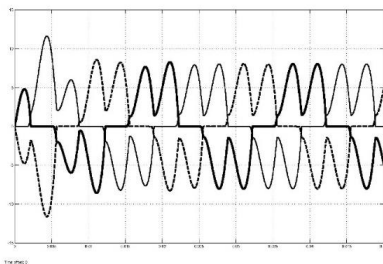


Рис. 5. Осциллограммы трех фаз сетевого тока модели.

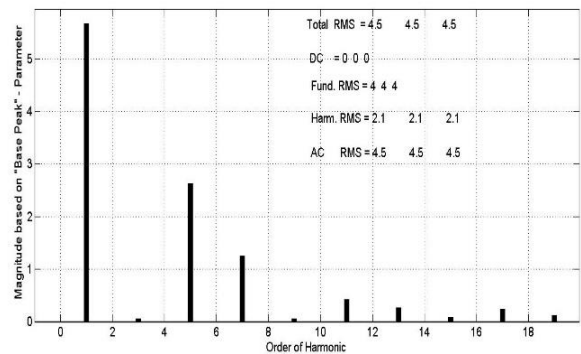


Рис. 6. - Диаграмма спектрального состава сетевого тока, полученная в результате симуляции.

#### 4. Результаты исследований

Основной задачей исследования было сравнение результатов симуляции, полученных на упрощенных физической и имитационной моделях, с результатами натурного эксперимента на физической модели с ЧП и АД, приведенными в [1,2].

На рис.7 и рис. 8 приведены визуализации функциональных зависимостей (1) и (2), соответственно, для 5-й, 7-й, 11-й гармоник и THD. На каждом из графиков представлены результаты, полученные при натурном эксперименте и на упрощенных моделях.

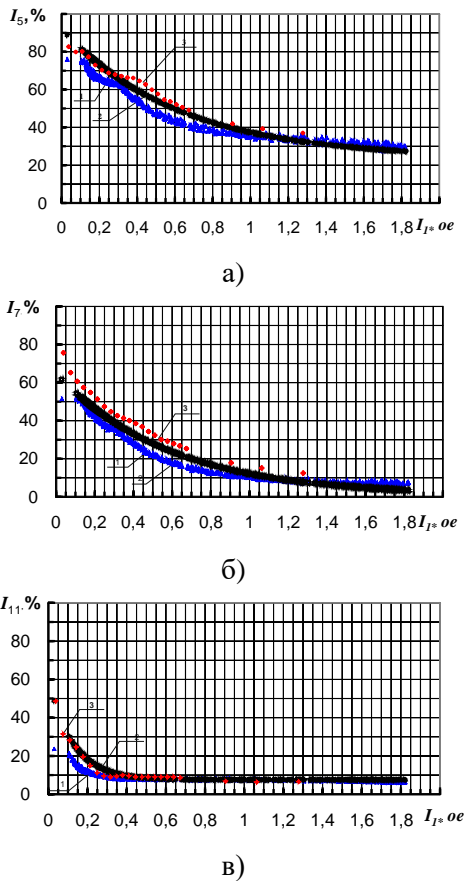


Рис. 7. Графики зависимости  $I_{V\%} = f(I_{1*})$ : а)  $I_{5\%} = f(I_{1*})$  б)  $I_{7\%} = f(I_{1*})$ , в)  $I_{11\%} = f(I_{1*})$ , 1) натурный эксперимент, 2) упрощенная физическая модель, 3) упрощенная имитационная модель.

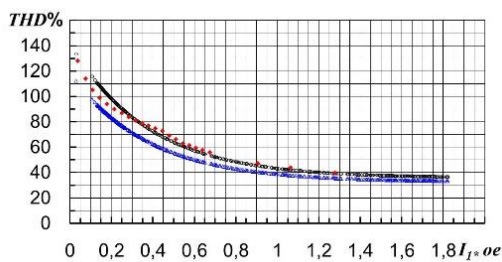


Рис. 8. Графики зависимости  $THDi_{\%} = f(I_{1*})$ : 1) натурный эксперимент, 2) упрощенная физическая модель, 3) упрощенная имитационная модель.

Как следует из приведенных рисунков, результаты симуляции имитационной модели по величине превышают соответствующие значения натурной модели не более чем на 10% в диапазоне токов менее  $0,5I_{1*}$ . В диапазоне токов более  $0,5I_{1*}$  расхождение результатов указанных моделей не превышает 5%. Для проверки гипотезы о

возможности использования упрощенной имитационной модели проведены статистические исследования изменения сетевого тока при пуске АД на натурном эксперименте, упрощенных физической и имитационной моделях. В качестве критерия оценки схожести результатов моделирования была выдвинута гипотеза о равенстве средних статистических выборок

Наиболее часто используемым методом проверки статистической гипотезы о равенстве средних двух выборок является критерий Стьюдента (t-критерий) [3,4]. Основным требованием к выборкам при использовании параметрического критерия Стьюдента является нормальность их распределения, то есть подчинение нормальному закону распределения вероятностей. Поэтому, прежде всего было проведено исследование каждой из выборок (пятая, седьмая, одиннадцатая гармоника и коэффициент искажения синусоидальности THD) для каждой из трех представленных выше моделей на нормальность по критерию  $\chi^2$  Пирсона. Результаты этих исследований приведены на рис.9-14.

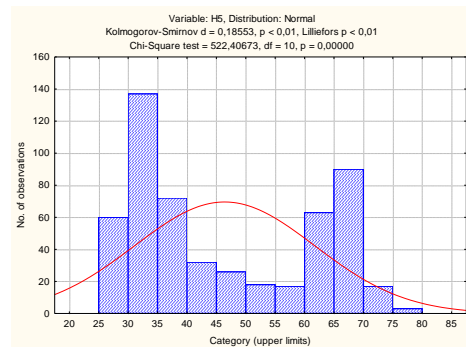


Рис. 9. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности нормального закона распределения (НЗР) для 5-й гармоники, полученной на физической модели с АД.

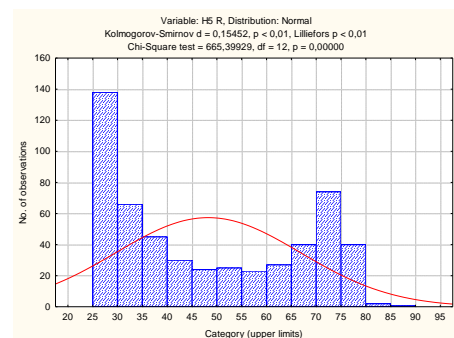


Рис. 10. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 5-й гармоники, полученной на упрощенной физической модели.

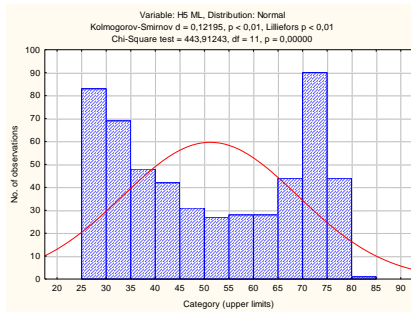


Рис. 11. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 5-й гармоники, полученной на упрощенной имитационной модели.

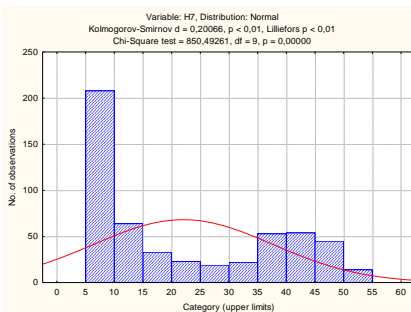


Рис. 12. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 7-й гармоники, полученной на физической модели с АД.

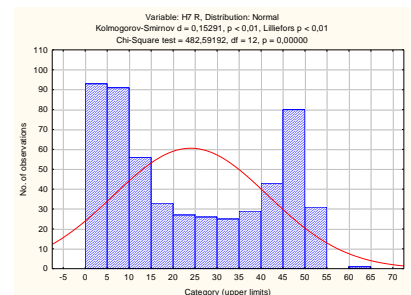


Рис. 13. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 7-й гармоники, полученной на упрощенной физической модели.

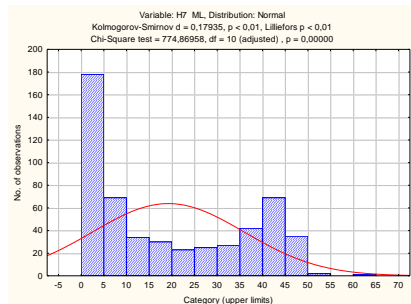


Рис. 14. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 7-й гармоники, полученной на упрощенной имитационной модели.

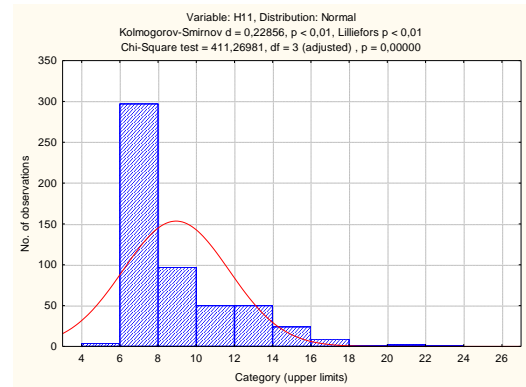


Рис. 15. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 11-й гармоники, полученной на физической модели с АД.

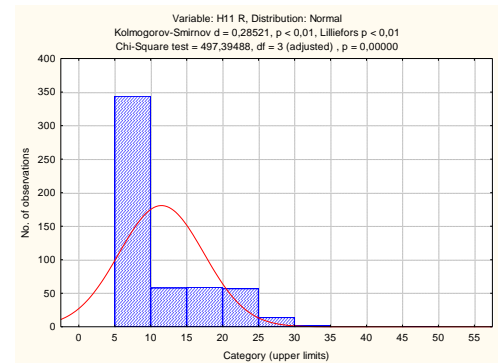


Рис. 16. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 11-й гармоники, полученной на упрощенной физической модели.

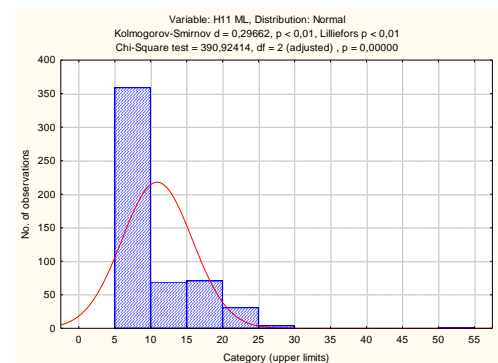


Рис. 17. Гистограмма и ожидаемое значение плотности вероятности НЗР для 11-й гармоники, полученной на упрощенной имитационной модели.

Из приведенных данных следует, что ни в одном из приведенных случаев не подтверждается гипотеза о подчинении рассматриваемых выборок нормальному закону распределения вероятностей. Следовательно, для подтверждения или опровержения гипотезы о равенстве средних сопоставляемых выборок необходимо использовать непараметрические методы сравнения.

Поскольку сравнению подлежали три статистические выборки (больше двух), то использовались тест Краскела – Уоллеса (Kruskel – Wallles test), а также медианный тест (median test). Оба указанных текста являются непараметрической альтернативой однофакторному дисперсионному анализу, применяемому при сравнении выборок, количество которых больше двух и которые подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Для проведения сравнения исходные данные выборок пятой гармоники (H5), седьмой (H7), одиннадцатой (H11) и коэффициента гармонических искажений по току (THD) были сгруппированы по признаку модели, в которой они были получены. Индексы «AD», «R», «ML» присвоены физической модели с асинхронным двигателем, упрощенной физической модели и упрощенной имитационной модели соответственно. Результаты исследований, выполненных в программном пакете STATISTIKA приведены в табл. 1-8. Графическая интерпретация полученных данных приведена на рис. 21-24 в виде диаграмм типа «boxplot» («ящик и усы») [3,4].

Таблица 1  
Результаты теста Краскела – Уоллеса для пятой гармоники

Зависимая переменная: H5	Независимые (сгруппированные) переменные): p=0,0001		
	Код	Кол-во отсчетов	Сумма рангов
AD	101	535	405953,0
R	102	535	413946,0
ML	103	535	468916,0

Таблица 2  
Результаты теста Краскела – Уоллеса для седьмой гармоники

Зависимая переменная: H7	Независимые (сгруппированные) переменные): p=0,0001		
	Код	Кол-во отсчетов	Сумма рангов
AD	101	535	456556,0
R	102	535	464487,0
ML	103	535	367772,0

Таблица 3  
Результаты теста Краскела – Уоллеса для одиннадцатой гармоники

Зависимая переменная: H11	Независимые (сгруппированные) переменные): p =0,001		
	Код	Кол-во отсчетов	Сумма рангов
AD	101	535	338746,0
R	102	535	431842,0
ML	103	535	518227,0

Таблица 4  
Результаты теста Краскела – Уоллеса для THD

Зависимая переменная: THD	Независимые (сгруппированные) переменные): p=0,0001		
	Код	Кол-во отсчетов	Сумма рангов
AD	101	535	348454,0
R	102	535	459503,0
ML	103	535	480858,0

Таблица 5  
Результаты медианного теста для пятой гармоники

Зависимая переменная: H5	Median = 43,8569; H5 Независимые (сгруппированные) переменные) Chi-Square=13,78; df = 2; p = 0,001			
	AD	R	ML	Всего
Медиана: эксперимент	295,0	273,0	235,0	803,0
ожидаемая	267,7	267,7	267,7	
эксп.- ожид.	27,3	5,3	-32,7	
Медиана: эксперимент	240,0	262,0	300,0	802,0
ожидаемая	267,3	267,3	267,3	
эксп.- ожид.	-27,3	-5,3	32,7	
Кол-во отсчетов	535,0	535,0	535,0	1605,0

Таблица 6  
Результаты медианного теста для седьмой гармоники

Зависимая переменная: H7	Median = 43,8569; H7 Независимые (сгруппированные) переменные) Chi-Square=7,69; df = 2; p = 0,0214

Продолжение таблицы 6  
Результаты медианного теста для  
седьмой гармоники

	AD	R	ML	Вс его
Медиана: эксперимент	276,0	242,0	285,0	80 3,0
ожидаемая	267,7	267,7	267,7	
эксп.- ожид.	8,3	-25,7	17,3	
Медиана: эксперимент	259,0	293,0	250,0	80 2,0
ожидаемая	267,3	267,3	267,3	
эксп.- ожид.	-8,3	25,7	-17,3	
Кол-во от- счетов	535,0	535,0	535,0	16 05, 0

Таблица 7

Результаты медианного теста для  
одиннадцатой гармоники

Зависимая переменная: H11	Median = 43,8569; H11 Независимые (сгруппирован- ные) переменные) Chi- Square=16,783; df = 2; p=0,0002			
	AD	R	ML	Всего
Медиана: эксперимент	293,0	262,0	248,0	803
ожидаемая	267,7	267,7	267,7	
эксп.- ожид.	25,3	-5,7	-19,7	
Медиана: эксперимент	242,0	273,0	287,0	802
ожидаемая	267,3	267,3	267,3	
эксп.- ожид.	-25,3	5,7	19,7	
Кол-во от- счетов	535,0	535,0	535,0	1605

Таблица 8

Результаты медианного теста для THD

Зависимая перемен- ная: THD	Median = 43,8569; THD Независимые (сгруппированные) переменные) Chi-Square=7,93; df=2; p = 0,019			
	AD	R	ML	Всего
Медиана: эксперимент	293,0	262,0	248,0	803
ожидаемая	267,7	267,7	267,7	
эксп.- ожид.	25,3	-5,7	-19,7	
Медиана: эксперимент	242,0	273,0	287,0	802
ожидаемая	267,3	267,3	267,3	

Продолжение таблицы 8  
Результаты медианного теста для THD

экспери- мент.- ожи- даемая.	-25,3	5,7	19,7	
Кол-во от- счетов	535,0	535,0	535,0	1605

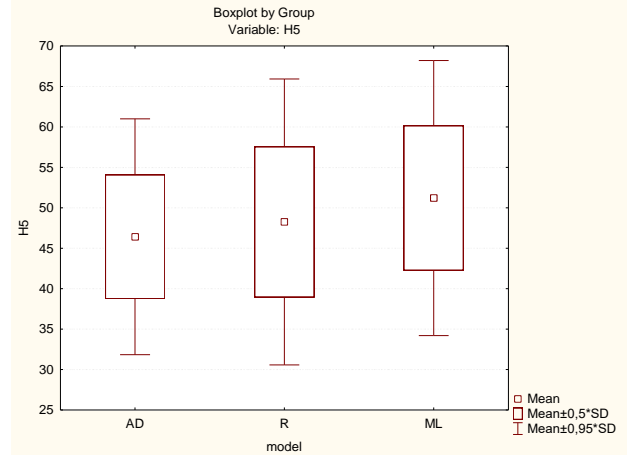


Рис. 21. Диаграмма соотношения средних зна-  
чений трех моделей для 5-й гармоники тока.

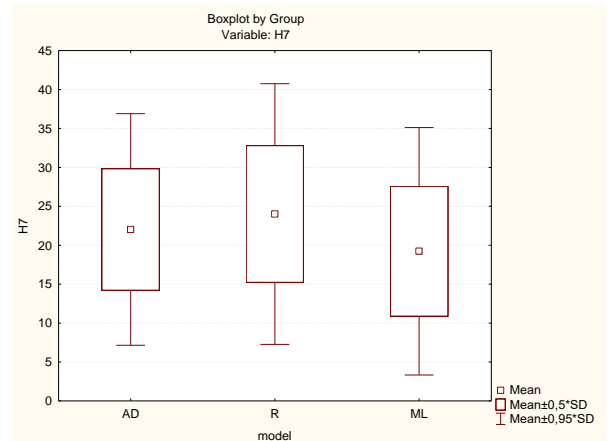


Рис. 22. Диаграмма соотношения средних зна-  
чений трех моделей для 7-й гармоники тока.

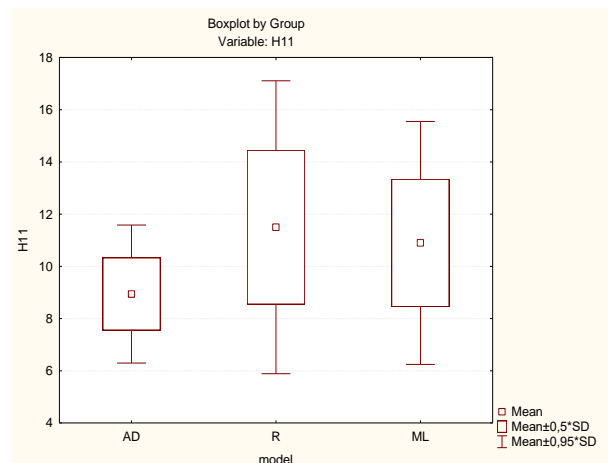


Рис. 23 – Диаграмма соотношения средних зна-  
чений трех моделей для 11-й гармоники тока.

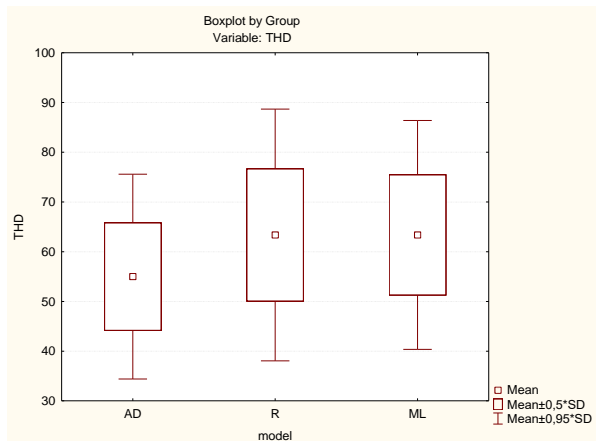


Рис. 24. Диаграмма соотношения средних значений трех моделей для THD тока.

### 5. Обсуждение результатов исследований

Исследования результатов симуляции, полученных на упрощенных физической и имитационной моделях проведены с использованием современных методов имитационной статистики, что позволило выявить корреляционные зависимости между величиной тока питающей сети и уровнями отдельных гармоник тока, а также THD тока. Следует отметить, что полученные результаты предоставляют возможность построения на базе исследованных упрощенных имитационных моделей более сложных, но быстродействующих в среде MATLAB с целью решения задач электромагнитной совместимости.

### 6. Выводы.

Представленные графики иллюстрируют очевидную близость результатов, полученных на физической и имитационной моделях с данными натурального эксперимента, что подтвердилось статистическими исследованиями. Наиболее наглядно это показано на диаграммах типа «boxplot», из которых следует, что среднее значение выборки физической модели с асинхронным двигателем гарантированно попадает в интервал  $\pm 0,5$  стандартного отклонения от средней величины выборки модели MATLAB. Следовательно, вполне допустимо использовать представленные упрощенные модели для оценки не-синусоидальности сетевого тока, вызванной работой частотных преобразователей.

### Список использованной литературы

1. Радимов, С. Н. Экспериментальное исследование степени искажения сетевого тока частотного электропривода [Текст] / С. Н. Радимов,

В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб [и др.] // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2010. – Вип. 75. – С. 52–56.

2. Беляев, В. Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно – импульсной модуляцией [Текст] / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // *Электромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія и практика"*. Кременчук – 2012. – № 19. – С. 469–471.

3. Electromagnetic Compability (EMC) of technical equipment, IEC 61000–3–12 International Standard, [Text]. 2004.

4. Das, J. C. (2004). *Passive Filters – Potentialities and Limitations* [Text]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no.1, January/February, pp. 232–241.

5. Acagi H., (December, 2005). *Active Harmonic Filters*, [Text]. *Proceedings of the IEEE* vol. 93, no. 12, pp.2128–2141.

6. Von Jouanne A., Enjeti P. N., Banerjee B. (July/August 1999). *Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives*. [Text]. *IEEE Trans, on Ind. Appl.*, vol. 35, no.4, pp. 908–916.

7. Беляев, В. Л. Упрощенные модели электроприводов с широтно – импульсной модуляцией [Текст] / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // *"Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах"*, Наука, освіта і практика". Кременчук . –2014 (2). – С.240–242.

8. Altivar 71. Преобразователи частоты. [Текст] Schneider Electric. – 2009. – 332 с.

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

### References

1. Radimov S. N., Beliaiev V. L., Besarab A. N. and other (2010). *Experimental research of distortion degree of network current of AC adjustable speed drive*. [Eksperimental'noe issledovanie stepeni iskazheniya toka chastotnogo elektroprivoda] *Elektromashinobud. ta elektroobladn.* Issue . 75. - 2010, p. 52–56. [in Russian]

2. Bilyayev V. L. and Radimov S. N. (2012). Harmonic composition of network current of electric drive with power width modulation. [Garmonicheskij sostav setevogo toka chastotnykh elektroprivodov s shirotno-impul'snoj modulyatsiej] *Electromechanical and energy saving systems thematic issue "problems of automatic electric drive. Theory and applications"*. Issue . 19. Kremenchuk – 2012, p. 469–471. [in Russian]
3. Electromagnetic Compability (EMC) of technical equipment, IEC 61000–3–12 International Standard, 2004.
4. Das J. C. (2004). Passive Filters – Potentialities and Limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no.1, January/February, pp. 232–241.
5. Acagi H., (December, 2005). Active Harmonic Filters, *Proceedings of the IEEE* vol. 93, no. 12, pp.2128–2141.
6. Von Jouanne A., Enjeti P. N., Banerjee B. (July/August 1999). Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives. *IEEE Trans, on Ind. Appl.*, vol. 35, no.4, pp.908-916.
7. Bilyayev V. L. and Radimov S. N. (2014). Simplified models of electric drives with pulse-width modulation. [Uproshchennye modeli elektroprivodov s shirotno-impul'snoj modulyatsiej] "*Problems of energy saving in electrical systems" Science, education and practice*". Kremenchuk, Issue . 1(2), – pp .240–242. (in Russian).
8. Altivar 71. Adjustable speed drives [Preobrazovateli chastoty]. Schneider Electric, 2009. – 332 c
9. Ice T., Hayashi Y., 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, p.p. 385–390.

## SIMPLIFIED MODELS OF ELECTRIC DRIVES WITH FREQUENCY CONTROL IN STUDIES OF POWER QUALITY

V. L. Biliaiev<sup>1</sup>, T. V. Skorobogatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Polytechnic University

<sup>2</sup>Chornomorsk branch of the Ukrainian Sea Ports Authority

**Abstract.** *The article presents two simplified models of AC drive with adjustable speed with voltage inverter and voltage generation using pulse width modulation-physical and mathematical, designed to assess the degree of total harmonic distortion of the line current. The physical one is an input rectifier inverter turned on to the network in series with a mains choke. A resistor is connected to the DC bus-simulating the load of an asynchronous motor. A similar scheme implemented in the SIMULINK software in the form of a mathematical simplified model was investigated. The aim of the study was to determine the possibility of using simplified models to assess the relationship between the total levels of harmonic distortion and the relative harmonics of the current consumed from the network, from the magnitude of the inverter load. The obtained simulation results are compared with the models and results of a physical model with a frequency Converter and an asynchronous motor. The visualization of functional dependencies between the fifth, seventh and eleventh harmonics, respectively, total harmonic distortions and network current consumption is shown. As a criterion for assessing the similarity of the simulation results, the hypothesis of equality of the average statistical samples was proposed and nonparametric comparison methods were used. The presented graphs illustrate the obvious similarity of the results obtained on the physical and simulation models with the data of the field experiment, which was confirmed by statistical studies. This is most clearly shown in the diagrams of type "boxplot", from which it follows that the median physical model with asynchronous motor is guaranteed to be in the range of  $\pm 0.5$  standard deviations from the mean of the sampling model in MATLAB. A preliminary conclusion is made about the adequacy of models based on comparison of experimental data.*

**Key words:** *adjustable speed drive, simplified models*

## СПРОЩЕНІ МОДЕЛІ ЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**В. Л. Біляєв<sup>1</sup>, Т. В. Скоробогатов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Одеський національний політехнічний університет

<sup>2</sup>Чорноморська філія Адміністрації морських портів України

**Анотація.** В статті наведені дві спрощені моделі електропривода змінного струму з регульованою швидкістю обертання з інвертором напруги і формуванням напруги з використанням широтно-імпульсної модуляції-фізико-математична, призначена для оцінки ступеня сумарних гармонійних спотворень струму лінії. Фізична одне інвертор випрямляча струму вхідного сигналу повернутий далі до мережі послідовно з дроселем основ. До шини постійного струму підключений резистор-імітує навантаження асинхронного двигуна. Була досліджена аналогічна схема, реалізована в програмному забезпеченні SIMULINK у вигляді математичної спрощеної моделі. Метою дослідження було визначення можливості використання спрощених моделей для оцінки залежності між сумарними рівнями гармонійних спотворень і величинами відносних гармонік струму, що споживається від мережі, від величини навантаження інвертора. Проведено порівняння отриманих результатів моделювання з моделями і результатами фізичної моделі з перетворювачем частоти і асинхронним двигуном. Показана візуалізація функціональних залежностей між п'ятою, сьомою і одинадцятю гармоніками відповідно, сумарними гармонійними спотвореннями і споживаним струмом мережі. В якості критерію оцінки схожості результатів моделювання була висунута гіпотеза про рівність середніх статистичних вибірок і використовувалися непараметричні методи порівняння. Представлені графіки ілюструють очевидну близькість результатів, отриманих на фізичній та імітаційній моделі з даними натурального експерименту, що підтвердилося статистичними дослідженнями. Найбільш наочно це показано на діаграмах типу «boxplot», з яких випливає, що середнє значення вибірки фізичної моделі з асинхронним двигуном гарантовано потрапляє в інтервал  $\pm 0,5$  стандартного відхилення від середньої величини вибірки моделі MATLAB. Зроблено попередній висновок про адекватність моделей на основі порівняння експериментальних даних..

**Ключові слова:** перетворювач частоти, спотворення синусоїдальності струму, гармоніки, спрощені моделі.

Получено 23.07.2019



**Беляев Владимир Леонидович.** Одесский национальный политехнический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергоменеджмента. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: [biliaiev@opu.ua](mailto:biliaiev@opu.ua).

**Volodymyr Biliaiev,** Odessa National Polytechnic University, Ph. D, associate professor of the Department of power supply and energy management, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: [biliaiev@opu.ua](mailto:biliaiev@opu.ua).

**ORCID ID:** 0000-0002-2915-4033



**Скоробогатов Тимофей Владленович.** Администрация морских портов Украины (Черноморский филиал), инженер по эксплуатации электрооборудования. Ул. Труда 6, Черноморск, Одесская область. Украина, E-mail: [timofeyskorobogatov@gmail.com](mailto:timofeyskorobogatov@gmail.com).

**Timofey Skorobogatov** Ukrainian Sea Ports Authority (USPA) (Chernomorsk) Engineer on technical supervision of exploitation of power equipment. 6, Pratsi Str., Chornomorsk, Odesa Region, 68001, Ukraine. E-mail: [timofeyskorobogatov@gmail.com](mailto:timofeyskorobogatov@gmail.com).

**ORCID ID:** 0000-0003-3107-7740