

## САМОЗАПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

**Планков Александр Анатольевич**

кандидат технических наук,  
инженер ООО «ПНК ДЕВЕЛОПМЕНТ»  
Москва, Россия  
E-mail: mail\_tochka\_ru@mail.ru

Предмет исследования: процесс самозапуска асинхронных электродвигателей при наличии высших гармоник в сети питающего напряжения.

Цель исследования: анализ влияния несинусоидальности напряжения на длительность самозапуска асинхронных двигателей и величину дополнительного нагрева при самозапуске.

Методы и объекты исследования: моделирование режима самозапуска асинхронного двигателя в системе координат  $\alpha, \beta, 0$ ; имитационное моделирование в Matlab Simulink.

Результаты исследования: показано, что учет высших гармоник при достижении предельных значений суммарного коэффициента гармонических искажений (THD) может дать погрешность в определении времени самозапуска более чем на 20 %, температуры нагрева – более чем на 10 %.

**Ключевые слова:** самозапуск, асинхронный электродвигатель, высшие гармоники, электромагнитный момент, нагрев электродвигателя.

## SELF-STARTING OF INDUCTION MOTORS AT NON-SINUSOIDAL POWER SOURCE VOLTAGE

**Alexander A. Plankov**

Candidate of Technical Sciences,  
Engineer LTD «PNK DEVELOPMENT»,  
Moscow, Russia  
E-mail: mail\_tochka\_ru@mail.ru

Subject of research: the process of self-starting of asynchronous electric motors in the presence of higher harmonics in the supply voltage network.

Purpose of research: analysis of the influence of non-sinusoidal voltage on the duration of self-starting of asynchronous motors and the amount of additional heating during self-starting.

Methods and objects of research: modeling of the self-starting mode of an asynchronous motor in the coordinate system  $\alpha, \beta, 0$ ; simulation modeling in Matlab Simulink.

Main results of research: it has been shown that failure to take into account higher harmonics when the total harmonic distortion (THD) limit values are reached can result in an error in determining the self-start time by more than 20 % and the heating temperature by more than 10 %.

**Keywords:** self-starting, asynchronous electric motor, higher harmonics, electromagnetic torque, electric motor heating

### ВВЕДЕНИЕ

При питании асинхронного электродвигателя от источника несинусоидального напряжения возникают дополнительные потери, для корректного расчета которых требуется учет значительного количества факторов [4]. В работе [8] приведены результаты численных экспериментов оценки дополнительных потерь от высших гармоник на основании разработанной авторами методики. Физический эксперимент в работе [10] показал рост потерь, обусловленных высшими гармониками, на 9,5 % относительно синусоидального режима. Высшие гармоники также являются причиной возрастания шума на 5-6 дБ [5]. Влияние высших гармоник на статические характеристики  $P(U)$ ,  $Q(U)$  узлов нагрузки с асинхронными двигателями исследовано на экспериментальном стенде и опубликовано в работе [13]. В статье [11] Singh G.K. приводит всесторонний обзор исследований и разработок в области работы асинхронных двигателей с несинусоидальной формой питающего напряжения и тока. Автором сделаны попытки осветить текущие и будущие проблемы, связанные с развитием технологии привода асинхронных двигателей, чтобы обеспечить хорошую динамическую устойчивость асинхронной нагрузки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа влияния высших гармоник на условия самозапуска асинхронных двигателей, прежде всего, следует обратить внимание на изменение моментов на валу электродвигателя и возникновение дополнительных колебаний. В статье [9] приведены результаты исследования влияния несинусоидальных токов на электромагнитный момент двигателей. В работе [6] авторами была разработана имитационная модель в среде Matlab Simulink с целью анализа влияния высших гармоник на характеристики электропривода малой мощности. В работе отмечается, что «наличие высших гармоник приводит к созданию тормозящих моментов, которые могут привести не только к возникновению пульсаций электромагнитного момента и скорости» [6, с. 136]. Известно, что высшие гармоники питающего напряжения создают дополнительные тормозящие моменты (рисунок 1). На наличие дополнительных моментов также указано в статье [7, с. 50].

Система уравнений АД для анализа характеристик в системе координат  $\alpha, \beta, 0$  может быть представлена в виде:



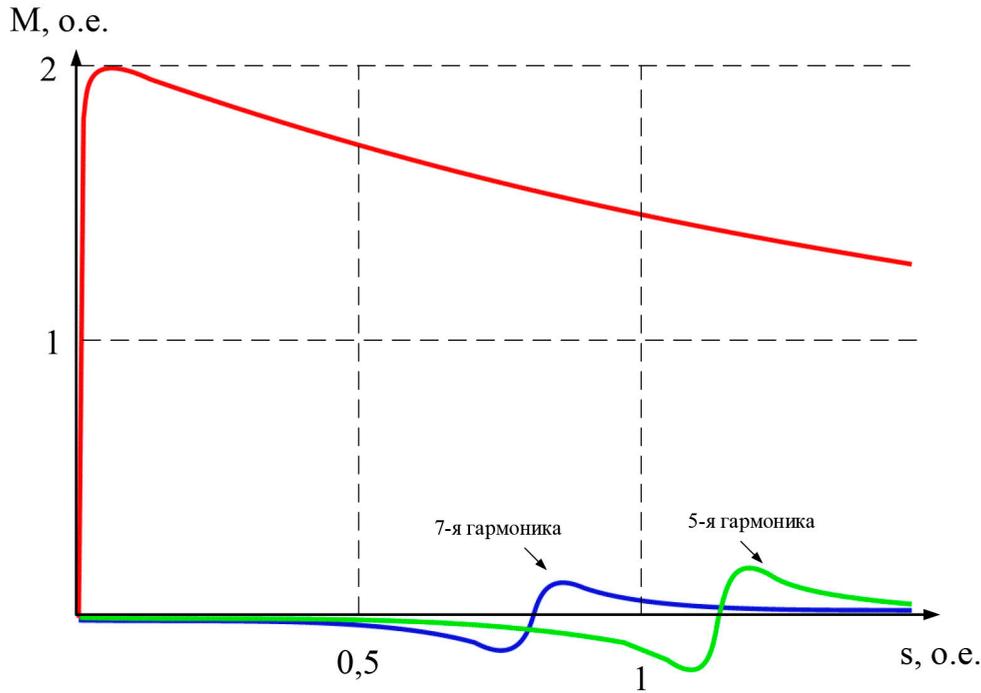


Рисунок 1. Моменты, образуемые отдельными гармониками.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} &= U_{ном} \sin(\omega_{осн} t) + \sum_{n=2}^{40} U_{n\alpha} \sin(n\omega_{осн} t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\alpha} - x_1 \Psi_{1\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} &= U_{ном} \cos(\omega_{осн} t) + \sum_{n=2}^{40} U_{n\beta} \cos(n\omega_{осн} t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\beta} - x_1 \Psi_{1\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= \Psi_{2\beta} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\alpha} - x_1 \Psi_{2\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} &= \Psi_{2\alpha} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\beta} - x_1 \Psi_{2\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \omega &= \frac{x_{\mu}(x_{\mu}^2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} + x_1 x_2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_{\mu}^2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_1 x_2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha})}{J(x_{\mu}^2 - x_1 x_2)} - \frac{m_c}{J} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\Psi_{1\alpha}$  и  $\Psi_{1\beta}$  – проекция потокосцепления обмотки статора АД на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$\Psi_{2\alpha}$  и  $\Psi_{2\beta}$  – проекция потокосцепления обмотки ротора АД на оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$U_{ном}$ ,  $U_v$  – напряжение на основной частоте и на высших гармониках соответственно;

$r_1$ ,  $r_2$  – активные сопротивления фазы обмотки статора и ротора АД соответственно;

$x_{\mu}$ ,  $x_2$  – полное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора и ротора АД соответственно;

$x_{\mu}$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания АД;

$J$  – инерционная постоянная вращающихся масс;

$m_c$  – момент исполнительного органа рабочей машины.

В качестве критерия необходимости учета высших гармоник напряжения, питающего асинхронный двигатель, в задачах динамической устойчивости в настоящей работе предлагается одновременное выполнение следующих условий: а) скольжение выбега

превышает 0,7 о.е., б) коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей и коэффициент суммарного гармонического искажения (THD) превышают установленные ГОСТ 32144-2013 нормативы.

$$\left\{ \begin{aligned} ds'_{выб} &= \frac{m_c}{T_j} dt, \quad s_{выб} \in [0.7; 1) \\ K_v &= \frac{U_v}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad K_v \notin K_v^{дон} \\ K_u &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{v_i}}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad K_u \notin K_u^{норм.дон} \\ s'_{выб} \wedge K_v \wedge K_u & \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя с учетом высших гармоник напряжения может быть определен по формуле:

$$m_{\omega}'(s) = \frac{(2+q)b_m}{\frac{s}{s_{sp}} + \frac{s_{sp}}{s} + q} \cdot U_*^2 + \sum_{v=2}^{40} \frac{2b_m}{\frac{s}{s_{sp}} - (s_v - s_{sp}) + \frac{s_{sp}}{s - (s_v - s_{sp})}} \cdot U_{v*}^2 \quad (3)$$

В рамках настоящего исследования был произведен анализ развития переходного процесса при пуске асинхронного двигателя при питании от несинусоидального напряжения (рисунок 3). Результаты имеют качественное совпадение с исследованиями других авторов по данной тематике [12, с. 860].

Известно, что высшие гармоники могут стать причиной дополнительного нагрева

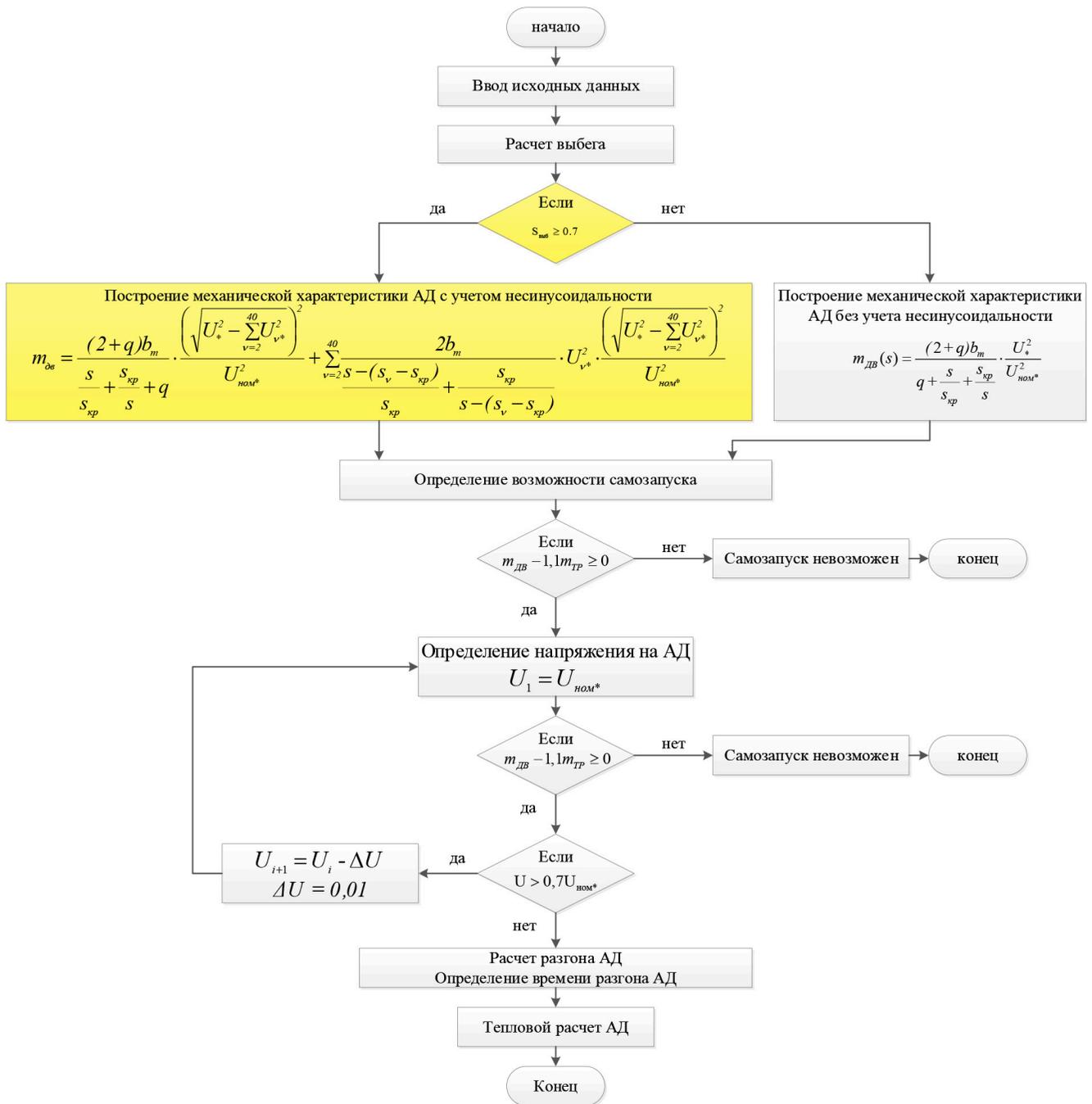
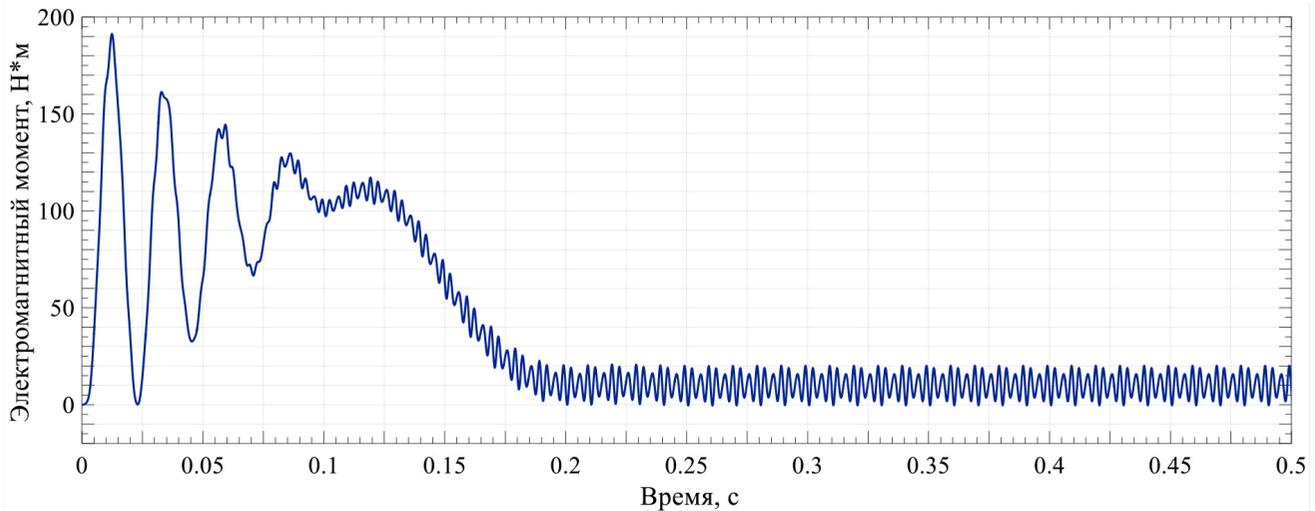


Рисунок 2. Алгоритм расчета самозапуска при несинусоидальности питающего напряжения.

токоведущих частей. В работе [3] создана диагностическая модель для исследования теплового поля асинхронного двигателя для обоснования дополнительного нагрева от воздействия высших гармоник. В статье [1] представлена разработанная методика оценки влияния токов высших гармоник и токов обратной последовательности основной частоты на тепловой режим работы, срок службы изоляции и вероятность отказа АД с учётом годового изменения температуры окружающей среды. В результате исследования авторы отмечают: «При увеличении

процентного вклада в суммарный перегрев высших гармоник, образующих обратную последовательность чередования фаз, в кривой питающего напряжения вероятность отказа q резко возрастает» [1, с. 28]. Коллектив авторов в работе [2] приводит результаты экспериментальных исследований для асинхронного двигателя АИР 90L6(M), где доказано, что в результате протекания высших гармоник появляется дополнительный нагрев изоляции обмоток, что приводит к сокращению ее нормативного технического ресурса.



**Рисунок 3.** Переходный процесс пуска АД при питании от несинусоидального напряжения.

Расчет дополнительного нагрева и дополнительных потерь мощности, обусловленных высшими гармониками, в настоящей работе производится по следующим формулам:

$$\Delta \vartheta_v = \frac{0.028}{b} \sum_{n=2}^{\infty} (K_{Uvn})^2 \frac{\sqrt{v} + 0.39\sqrt{v \pm 1}}{v^2} \approx \frac{0.03892}{b} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(K_{Uvn})^2}{v\sqrt{v}}, \quad (4)$$

$$\Delta P_v = 0.02k_{ad} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(K_{Uvn})^2}{v\sqrt{v}}. \quad (5)$$

В результате проведенных в рамках настоящей работы исследований было

определено, что фактор несинусоидальности влияет на длительность процесса самозапуска, при этом появляется погрешность в определении дополнительной температуры нагрева при самозапуске (таблица 1).

Таким образом, при достижении суммарного коэффициента гармонических искажений (THD) предельных значений, установленных действующим ГОСТ 32144-2013, считаем целесообразным учет высших гармоник при анализе как длительности процесса самозапуска, так и дополнительного нагрева, обусловленного влиянием высших гармоник.

**Таблица 1.** Результаты численного эксперимента расчета времени самозапуска и дополнительного нагрева обмоток для несинусоидального режима.

	Суммарный коэффициент гармонических искажений, %		Погрешность определения, %
	0	12	
Время самозапуска, с	5,18	6,39	23%
Температура нагрева, °С	23,7	26,4	12%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате исследования разработаны математическая модель и алгоритм учета несинусоидальности питающего напряжения для анализа самозапуска асинхронных двигателей. Показано, что наличие высших напряжений приводит к увеличению времени самозапуска более чем на 20%, дополнительный нагрев, обусловленный фактором высших гармоник, превышает 10%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Валянский, А. В. Методика оценки влияния качества электрической энергии на надежность работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А. В. Валянский, И. И. Карташев, Ю. В. Шаров. – Текст: непосредственный // Электричество. – 2015. – № 6. – С. 24-29.
2. Влияние показателей качества электроэнергии на надежность асинхронных электродвигателей /

- А. Н. Назарычев, А. Н. Скамын, А. В. Коптева [и др.]. – Текст: непосредственный // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Мат. 94-го заседания Международ. науч. семинара, Алушта, 19–23 сентября 2022 года / 2022. – С. 61-70.
3. Дмитриев, Н. А. Влияние несинусоидальности на надежность асинхронного двигателя в системе электропитания сельских районов / Н. А. Дмитриев. – Текст: непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2020. – № 5. – С. 37-43. – DOI 10.34286/1995-4646-2020-74-5-37-43
4. Зарифьян, А. А. Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян. – Текст: непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 81-91. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91.
5. Казаков, Ю. Б. Влияние несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных двигателей / Ю. Б. Казаков, Ю. И. Бондаренко. – Текст: непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 3. – С. 34-38. – DOI 10.17588/2072-2672.2015.3.034-038.
6. Макаров, В. Г. Модель электропривода малой мощности в пакете MATLAB / В. Г. Макаров, А. М. Шаряпов. – Текст: непосредственный // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 12. – С. 133-138. – DOI 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_12\_133.
7. Немцев, Г. А. Влияние высших гармонических составляющих на работу асинхронных двигателей / Г. А. Немцев, Е. А. Селезнев, Л. А. Шестакова. – Текст: непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 46-51.
8. Путилин, К. П. Добавочные потери в автономных системах электроснабжения со статическими преобразователями / К. П. Путилин, А. К. Пронина, Ю. А. Майорова. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 1. – С. 106-112. – DOI 10.17213/0136-3360-2019-1-106-112.
9. Effects of Injected Harmonics on Torque Pulsations of a Three Phase Induction Motor: Study on SPWM B / S. Venkat Raman, P. R. Tripathi, G. S. Gupta and R. K. Keshri // 2020 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE), Shillong, India. – 2020. – pp. 637-642. – DOI: 10.1109/ComPE49325.2020.9200018.
10. Experimental study on the influence of high frequency PWM harmonics on the losses of induction motor / Meihui Jiang, Jun Tian, Hui Hwang Goh, Jiawei Yi, Shenwang Li, Dongdong Zhang, Thomas Wu // Energy Reports. – Volume 8. –Supplement 8. – 2022. – Pages 332-342. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.158>.
11. G.K. Singh A research survey of induction motor operation with non-sinusoidal supply wave forms //Electric Power Systems Research. – Volume 75. – Issues 2–3. – 2005. – Pages 200-213. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2005.04.001>.
12. S. A. Deraz and H. Z. Azazi Impact of distorted voltage on three-phase induction motor performance //2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt. – 2017. – pp. 857-863. – DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301280.
13. Skamyin, A. Static load characteristics in the presence of high harmonics / A. Skamyin, O. Vasilkov // E3S Web of Conferences : International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECCE 2019, Saint-Petersburg, 19–20 ноября 2019 года. Vol. 140. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2019. – P. 10005. – DOI 10.1051/e3sconf/201914010005.