

Mechanical Power of Induction Motors with Non-sinusoidal Power Supply

¹Kovalov V., ²Kovalova Yu.

¹National Aerospace University of Ukraine "Kharkiv Aviation Institut"

²O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
Kharkiv, Ukraine

Abstract. When induction motors are powered by solid-state voltage and frequency converters, the torque on the shaft is created by the first harmonic of the current, and the higher harmonics of the current only create losses in the stator winding. The purpose of the work is to develop a methodology for determining the permissible mechanical load of asynchronous motors at non-sinusoidal currents. To achieve this goal, it is necessary to determine the influence on the mechanical power of the motor of higher current harmonics, the effective values of which depend on the control parameters of semiconductor voltage and frequency converters. For quantitative assessment of their influence on mechanical power, it is proposed using the current harmonic coefficient as a generalized parameter as the ratio of the sum of the effective values of higher current harmonics to the effective value of the first harmonic. As a result of researches, the expression for calculation of the coefficient of admissible mechanical load of the motor concerning a nominal value taking into account the coefficient of current harmonics is received. Scientific novelty: for the first time, the analytical expression for determining the coefficient of permissible mechanical load of induction motors powered by semiconductor converters of voltage and frequency using the current harmonic coefficient is obtained. Practical significance: the proposed methodology allows checking the selected induction motor for heating when supplied from semiconductor converters of voltage and frequency for a given mechanical power of the working mechanism.

Keywords: induction motor, mechanical power, harmonics coefficient, permissible loading coefficient.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.02>

UDC: 621.313.333.004.67

Puterea mecanică a motoarelor asincrone cu alimentare nesinusoidală

¹Kovalev V.N., ²Kovaleva Yu.V.

¹ Universitatea Națională Aerospațială „Institutul de Aviație din Kharkiv”

² Universitatea Națională de Economie Municipală din Harkiv, numită după A.N. Beketov
Harkov, Ucraina

Rezumat. În cazul în care motoarele cu inducție sunt alimentate de convertoare de tensiune și frecvență în stare solidă, cuplul pe arbore este creat de prima armonică a curentului, iar armonicile mai mari ale curentului creează doar pierderi în înfășurarea statorului. Scopul lucrării este de a dezvolta o metodologie pentru determinarea sarcinii mecanice admisibile a motoarelor asincrone la curent nesinusoidal. Pentru a atinge acest scop, este necesar să se determine influența asupra puterii mecanice a motorului a armonicilor de curent superioare, ale căror valori efective depind de parametrii de control ai convertoarelor de tensiune și frecvență semiconductoare. Pentru evaluarea cantitativă a influenței lor asupra puterii mecanice, se propune utilizarea coeficientului armonic de curent ca parametru generalizat ca raport dintre suma valorilor efective ale armonicilor de curent superioare la valoarea efectivă a primei armonici. În urma cercetărilor se primește expresia de calcul al coeficientului de sarcină mecanică admisibilă a motorului privind o valoare nominală ținând cont de coeficientul armonicilor de curent. Noutate științifică: se obține pentru prima dată expresia analitică pentru determinarea coeficientului de sarcină mecanică admisă a motoarelor cu inducție alimentate de convertoare semiconductoare de tensiune și frecvență folosind coeficientul armonic de curent. Semnificație practică: metodologia propusă permite verificarea motorului cu inducție selectat pentru încălzire atunci când este alimentat de la convertoare semiconductoare de tensiune și frecvență pentru o putere mecanică dată a mecanismului de lucru.

Cuvinte-cheie: motor asincron, putere mecanică, distorsiune armonică, factor de sarcină.

Механическая мощность асинхронных двигателей при несинусоидальном питании**¹Ковалев В.Н., ²Ковалева Ю.В.**¹ Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт»² Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, Харьков, Украина

Аннотация. При питании асинхронных двигателей от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты крутящего момента на валу создается первой гармоникой тока, а высшие гармоники тока лишь создают потери в обмотке статора. Поэтому при номинальной механической нагрузке двигателя потребление электрической мощности превышает номинальное значение, и двигатель перегревается. Для обеспечения номинального температурного режима необходимо уменьшать механическую нагрузку двигателя относительно номинальной. Целью работы является разработка методики определения допустимой механической нагрузки асинхронных двигателей при несинусоидальных токах. Для достижения поставленной цели необходимо определить влияние на механическую мощность двигателя высших гармоник тока, действующие значения которых зависят от параметров управления полупроводниковыми преобразователями напряжения и частоты. Для количественной оценки их влияния на механическую мощность предложено в качестве обобщенного параметра использовать коэффициент гармоник тока, как отношение суммы действующих значений высших гармоник тока к действующему значению первой гармоники. В результате исследований получено выражение для расчета коэффициента допустимой механической нагрузки двигателя относительно номинального значения с учетом коэффициента гармоник тока. Методика определения допустимой механической нагрузки асинхронных двигателей при несинусоидальном питании заключается в следующем: на компьютерной модели асинхронного электропривода с полупроводниковыми преобразователями напряжения или частоты для заданных параметров управления определить коэффициент гармоник тока статора, коэффициент допустимой механической нагрузки относительно номинальной и численное значение допустимой механической нагрузки на валу. Научная новизна: впервые получено аналитическое выражение для определения коэффициента допустимой механической нагрузки асинхронных двигателей при питании от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты с использованием коэффициента гармоник тока. Практическая значимость: предложенная методика позволяет проверить выбранный асинхронный двигатель на нагрев при питании от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты для заданной механической мощности рабочего механизма.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, несинусоидальный ток, коэффициент гармоник, допустимая механическая нагрузка.

ВВЕДЕНИЕ

В техническом паспорте асинхронного двигателя указана его номинальная механическая мощность на валу, которой соответствует потребление статором номинальной электрической мощности с учетом потерь: электрических, магнитных и механических.

Термин "номинальная" означает, что температура обмоток при этом не превышает значений, допустимых для изоляции.

Обмотка статора асинхронного двигателя при питании от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты потребляет несинусоидальный ток с высшими гармониками, которые, создавая электрические потери в обмотках, не создают крутящего момента на валу. Это означает, что при загрузке двигателя номинальной механической мощностью потребление электрической мощности превысит номинальное значение. При этом, температура изоляции обмоток превысит

допустимую, что приведет к ее ускоренному разрушению.

Отсюда следует, что для обеспечения потребления номинальной электрической мощности необходимо нагружать двигатель механической мощностью меньше номинальной. Зачастую на практике так и бывает, поскольку конструкторы выбирают из каталога двигатель ближайшей большей мощности относительно расчетной. Однако, необходимо проводить проверку величины допустимой механической мощности относительно номинальной, чтобы не превысить номинальной электрической мощности.

Следует отметить, что в каталогах можно найти специальные двигатели для питания от преобразователей напряжения и частоты, которые, однако, дороже двигателей общепромышленного исполнения примерно на 30%, поскольку имеют увеличенный диаметр проводов обмоток и увеличенную поверхность охлаждения.

В этом случае следует проводить технико-экономическое сравнение: либо выбрать специальный двигатель расчетной мощности, либо выбрать общепромышленный двигатель большей мощности.

В [1-3] проведен общий анализ влияния полупроводниковых преобразователей на режимы работы асинхронных двигателей. В [4-6] проведен анализ гармонического состава токов статора в зависимости от частоты. Однако в этих работах не рассматривается влияние высших гармоник тока на механическую мощность двигателя. Последняя однозначно определяется коэффициентом полезного действия (КПД), который при питании обмотки статора несинусоидальным током уменьшается из-за увеличения электрических потерь от высших гармоник [7]

$$\eta_{ns} = 1 - (p_{mx} + p_{mc} + p_{el1} + \sum p_{elv}) / P_{el}, \quad (1)$$

где p_{mx}, p_{mc} – мощности механических и магнитных потерь,

$p_{el1}, \sum p_{elv}$ – мощности электрических потерь от 1-й и высших гармоник,

P_{el} – потребляемая электрическая мощность.

При несинусоидальных токах расчет магнитных потерь производят по упрощенной формуле без разделения магнитных потерь от вихревых токов и от потерь на перемагничивание [8,9]

$$p_{\mu v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (2)$$

где $p_{\mu v}$ – магнитные потери в стали от действия v -й гармоники тока; B_v – v -я гармоника магнитной индукции, f_v – частота v -й гармоники; $\beta=1,3-1,5$ – эмпирический показатель степени для конкретной марки стали, учитывающий соотношение потерь на вихревые токи и на гистерезис.

Результирующие магнитные потери определяются суммированием потерь от действия каждой гармоники. В первом приближении принимаем, что нагрев стали сердечника асинхронного двигателя от магнитных потерь, вызванных гармониками магнитного потока не влияет на нагрев обмотки статора.

Аналогично принимаем, что высшие гармоники тока не влияют на механические

потери от трения в подшипниках и на вентиляционные потери.

Для количественного определения КПД асинхронного двигателя при несинусоидальных токах целесообразно использовать уравнение баланса мощностей электромеханического преобразования энергии [10]. В [11] такое уравнение приведено для обобщенной активно-индуктивной нагрузки, но для асинхронных двигателей не может быть использованным, поскольку не содержат составляющей механической мощности.

В [12] доказана достоверность использования метода суперпозиции при расчетах мощности асинхронных двигателей при несинусоидальных токах, однако не проведен анализ влияния высших гармоник тока статора на механическую мощность двигателя.

Таким образом, в рассмотренных публикациях не проводилась количественная оценка влияния высших гармоник тока на механическую мощность двигателя. Следовательно, тема статьи актуальна.

Целью работы является разработка методики определения допустимой загрузки асинхронных двигателей механической мощностью при их питании от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать влияние высших гармоник тока на механическую мощность асинхронного двигателя в зависимости от параметров управления полупроводниковыми преобразователями напряжения и частоты.

I МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения допустимой загрузки двигателя механической мощностью при несинусоидальном питании необходимо выбрать обобщающий параметр, который определяет относительные электрические потери не зависимо от мощности двигателя.

Таким параметром целесообразно принять коэффициент искажения тока (total harmonic distortion "THD" согласно стандарту МЭК IEEE 519-2022. В стандартах Содружества Независимых Государств, в частности, в стандарте Украины ДСТУ 2815-94 "Электрические и магнитные цепи и устройства. Термины и определения." коэффициент искажения называют

коэффициентом гармоник, как отношение суммы действующих значений высших гармоник тока $\sum I_v$ к действующему значению первой гармоники I_1

$$K_g = \sqrt{\sum I_v^2} / I_1. \quad (3)$$

В общем виде действующее значение несинусоидального тока статора равно

$$I_{ns} = \sqrt{I_1^2 + \sum I_v^2}, \quad (4)$$

или через коэффициент гармоник равно

$$I_{ns} = I_1 \sqrt{1 + K_g^2}, \quad (5)$$

где $I_1, \sum I_v^2$ – действующие значения первой гармоники и высших гармоник тока статора.

Определим превышение электрических потерь мощности P_{ns} при несинусоидальном токе относительно потерь при синусоидальном токе P_s

$$\frac{\Delta P_{ns}}{\Delta P_s} = \frac{I_1^2 (1 + K_g^2) (R_s + R_r)}{I_1^2 (R_s + R_r)} = 1 + K_g^2, \quad (6)$$

где R_s, R_r – омические сопротивления обмоток статора и ротора.

Из выражения (6) следует, что относительные электрические потери при несинусоидальном токе увеличиваются на квадрат коэффициента гармоник тока.

Увеличение электрических потерь относительно номинальных при несинусоидальных токах означает уменьшение КПД η_{ns} двигателя относительно номинального η_n значения на величину квадрата коэффициента гармоник тока. Тогда аналитическое выражение КПД двигателя при несинусоидальном питании определится по формуле

$$\eta_{ns} = (1 - K_g^2) \eta_n. \quad (7)$$

Поскольку КПД двигателя при несинусоидальном токе уменьшается, то необходимо уменьшать нагрузку двигателя механической мощностью, чтобы потребляемая электрическая мощность не превысила номинального значения.

Для количественной оценки необходимого уменьшения загрузки двигателя механической мощностью вводим понятие коэффициента K_{ns} допустимой загрузки двигателя механической мощностью, как отношение допустимой механической мощности P_{ns} при несинусоидальном питании к номинальной механической мощности P_n при синусоидальном питании. Формула для его определения вытекает из того, что механическая мощность двигателя прямо пропорциональна КПД, т.е.

$$K_{ns} = \frac{P_{ns}}{P_n} = \frac{\eta_{ns}}{\eta_n} = \frac{(1 - K_g^2) \eta_n}{\eta_n} = 1 - K_g^2 \quad (8)$$

Тогда численное значение допустимой загрузки механической мощностью асинхронного двигателя при несинусоидальном питании определяется формулой $P_{ns} = K_{ns} \cdot P_n$.

Таким образом, для определения допустимой загрузки двигателя механической мощностью при несинусоидальном питании необходимо определять коэффициент гармоник тока статора. Последний зависит от типа силовой схемы полупроводникового преобразователя напряжения и частоты и от параметров управления преобразователем.

Сложный характер зависимости коэффициента гармоник тока от указанных параметров исключает возможность его получения в аналитическом виде. Такую зависимость можно определять только экспериментально с последующей аппроксимацией аналитическим полиномом, например, методом планирования эксперимента.

Эксперимент может быть натурным на лабораторном стенде или компьютерным на математической модели. Поскольку асинхронные двигатели относятся к классу детерминированных систем, в которых функциональные зависимости параметров однозначно определяются причинно-следственными связями и точно описываются дифференциальными уравнениями, то целесообразно проводить компьютерный эксперимент.

При этом методика определения допустимой загрузки двигателя механической мощностью при питании от полупроводникового преобразователя заключается в следующем: 1) на

компьютерной модели определить диапазон изменения коэффициента гармоник тока статора в функции параметра управления; 2) определить коэффициент допустимой загрузки механической мощностью; 3) определить численную величину допустимой механической мощности $P_{ns} = K_{ns} \cdot P_n$.

Предложенная методика позволяет рассчитать допустимую загрузку асинхронного двигателя механической мощностью при его подключении к полупроводниковому преобразователю напряжения и частоты, и далее, сравнить с расчетной мощностью рабочего механизма.

II РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для примера практического использования предложенной методики рассмотрим случай подключения асинхронного двигателя к тиристорному преобразователю напряжения с системой импульсно-фазового управления. Такие электроприводы используются для регулирования скорости насосных установок [13]. В [14,15] проведены исследования эффективности таких электроприводов.

Компьютерный эксперимент проводим на модели показанной на рис. 1 [16].

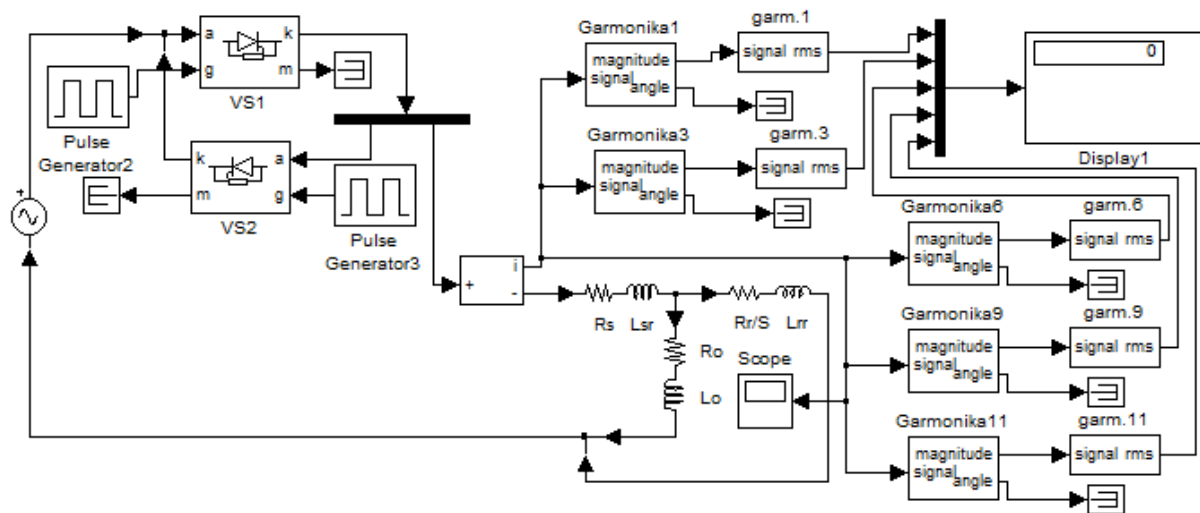


Рис. 1. Имитационная модель электропривода с Т-образной схемой замещения асинхронного двигателя.

Fig. 1. Imitation model electric drive with T-similar diagram induction motor.

Модель содержит источник напряжения, тиристорный преобразователь напряжения на тиристорах VS1, VS2, систему импульсно-фазового управления на блоках "Pulse Generator" для формирования управляющих импульсов для тириستоров, Т-образную схему замещения асинхронного двигателя, блоки "Garmonika" для определения амплитуды токов гармоник и блоки "signal rms" для расчета их действующих значений, блоки амперметра и вольтметра, дисплей и осциллограф.

Использование для исследований двухфазной модели асинхронного двигателя из библиотеки программного пакета Simulink не целесообразно, поскольку при моделировании рассчитываются переходные процессы, которые в данном исследовании не

имеют смысла и, кроме того, требуют большого количества машинного времени.

При этом модель сразу выходит на установившийся режим и потребляет в разы меньше машинного времени для вычислений, что имеет значение при большом количестве экспериментов.

Моделирование проводим для двигателя типа 4A112M4Y3 мощностью $P_n=5,5$ кВт, номинальный КПД $\eta_n=85,5\%$, для которого рассчитаны параметры Т-образной схемы замещения. На рис. 2 представлены расчетные осциллограммы напряжения и тока статора полученные на модели (а) и экспериментальные (б) с целью убедиться в правильности работы модели для иллюстрации ее достоверности.

При моделировании используем случай, когда нейтраль обмотки статора подключена

к нулевому проводу сети. При этом фазные токи в обмотках не зависят от токов других фаз. Это позволяет использовать однофазную

схему замещения асинхронного двигателя с тиристорным преобразователем.

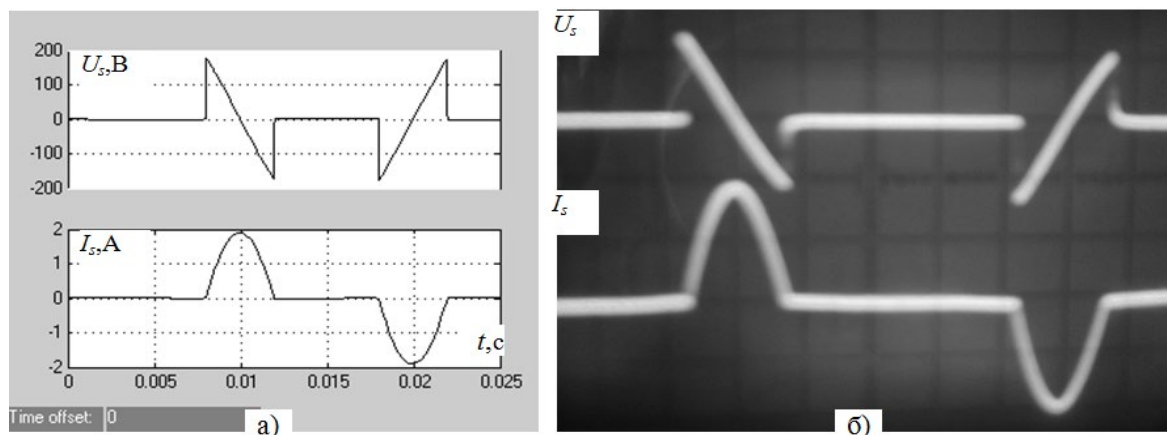


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока статора: а) полученные на модели; б) полученные на лабораторном стенде.

Fig. 2. Oscillograms of stator voltage and current obtained on the model and on the laboratory stand.

В результате моделирования получены действующие значения гармоник тока, рассчитаны коэффициенты гармоник и коэффициенты допустимой загрузки

двигателя механической мощностью в зависимости от угла управления тиристорами, результаты которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента допустимой механической загрузки

Наименование параметров	Численные значения параметров			
Угол управления тириستоров, сек	0,005	0,006	0,007	0,008
Угол управления тиристоров, эл. град.	90	108	126	144
Действующий ток 1-й гармоники, А	7,439	5,248	3,14	1,67
Действующий ток 3-й гармоники, А	1,736	1,493	1,1	0,741
Действующий ток 6-й гармоники, А	0,861	0,615	0,498	0,471
Действующий ток 9-й гармоники, А	0,319	0,295	0,206	0,09
Действующий ток 11-й гармоники, А	0,246	0,187	0,137	0,102
Коэффициент гармоник	0,266	0,385	0,51	0,532
Коэффициент допустимой загрузки	0,79	0,724	0,629	0,609

Величины высших гармонических составляющих тока зависят от нагрузки на валу асинхронного двигателя, однако их величина относительно первой гармоники не изменяется. Поэтому моделирование можно проводить для одного значения момента нагрузки.

В таблице 1 указан диапазон изменения угла управления тиристоров от 90 до 144 электрических градусов, что характерно для насосов подкачки воды на верхние этажи высотных домов.

На рис. 3 показан график зависимости коэффициента допустимой загрузки

двигателя механической мощностью от угла управления тиристоров.

Применение асинхронных электроприводов с тиристорным преобразователем напряжения наиболее целесообразно для насосов подкачки воды на верхние этажи высотных домов.

Из сопоставления механических характеристик асинхронного двигателя при регулировании напряжения и характеристики нагрузки водяного насоса следует, что электропривод насоса может работать без датчика обратной связи по скорости, поскольку рабочая точка расположена на

прямолинейном участке механической характеристике двигателя.

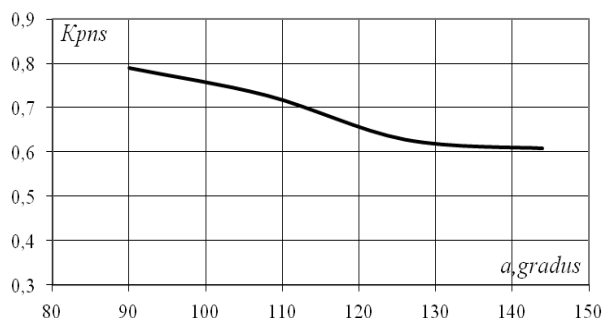


Рис. 3. Зависимость коэффициента допустимой загрузки двигателя механической мощностью от угла управления тиристоров.

Fig. 3. Dependence of the allowable mechanical power factor of the motor on the control angle of the thyristors.

Достоверность предложенной методики основана на использовании теории асинхронных двигателей, закона сохранения энергии, законов теоретической электротехники и применении апробированного метода гармонического анализа.

Провести оценку точности снижения механической мощности на валу асинхронного двигателя при несинусоидальных токах на экспериментальном стенде сложно и дорого, поскольку требуется датчик момента.

В проведении тепловых расчетов нет необходимости, поскольку идея методики - показать, на сколько надо снижать механическую нагрузку на валу, чтобы, нагрев двигателя оставался на номинальном значении при номинальной потребляемой электрической мощности.

III Выводы

В результате выполненной работы получена методика определения допустимой загрузки асинхронных двигателей механической мощностью при питании от полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты, которая заключается в следующем: 1) на компьютерной модели определить коэффициент гармоник тока статора; 2) определить коэффициент допустимой загрузки механической мощностью; 3) определить численную величину допустимой механической

мощности. Рассчитанную допустимую механическую мощность следует сравнить с расчетной мощностью рабочего механизма.

Научная новизна результатов: впервые получено аналитическое выражение для определения коэффициента допустимой загрузки асинхронных двигателей механической мощностью при их подключении к полупроводниковым преобразователям напряжения и частоты с учетом коэффициента гармоник тока.

Практическая значимость результатов: предложенная методика позволяет проверить выбранный асинхронный двигатель на нагрев при несинусоидальном питании.

Литература (References)

- [1] Lypkovsky K. A., Mykhalsky V.M. Power electronics - opportunities, expectations, reality. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2012, no. 3, pp. 59-60.
- [2] Federico Barrero, Jorge Rodas Control of Power Electronics Converters and Electric Motor Drives. *Energies*, 2021, no. 14, pp. 48-50.
- [3] El Aroudi A., Giaouris D., Iu H. H.-C., Hiskens I.A. A Review on Stability Analysis Methods for Switching Mode Power Converters. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and System*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 302-315.
[doi: 10.1109/jetcas.2015.2462013](https://doi.org/10.1109/jetcas.2015.2462013).
- [4] Nerubatskyi V. A., Plakhtii O. M., Tugay D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, no. 1, pp. 103-110.
doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103.
- [5] Plakhtii O. M., Nerubatskyi V. A., Sushko D. M., Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, no. 8(104), pp. 17-24.
doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200021.
- [6] Shurub Yu.V. Statistical optimization of induction electrical drives with regulation of frequency. *Electrical engineering & electromechanics*. 2017, no. 1, pp. 26-30.
- [7] Popovich M.G., Lozinskiy O.Y., Klepikov V. B. *Electromechanics systems for automatic control and electrical drives*. Kyiv: Libid', 2005. 680 p.
- [8] Petrenko, A. N., Tanyanskyi, V. I., & Petrenko, N. Y. Additional power loss in a frequency-controlled induction motor due to

- voltage higher harmonics. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no. 5, pp. 34-35.
- [9] Kazakov, Yu. B., Shvetsov, N. K. Calculated analysis of losses in steel asynchronous motors when powered by frequency converters with non-sinusoidal output voltage. *ISUE Bulletin*. 2015, no. 5, pp. 1-5.
- [10] Kovalova Yu. V. About the efficiency factor for induction motor at supply nonsine current. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 1, pp. 64-68.
- [11] Kalinov A.P., Leiko V.V, Rod'kin D.I. Spektrum analysis of instantaneous power in a network polyharmomics voltage and current. *Transaction Kremenchuc State Polytechnical University*, 2006, no.38, pp.59-64.
- [12] Rod'kin D.I. Princip supperpozition in the processes of transformation of energy. *Transaction Kremenchuc State Polytechnical University*. 2003, no. 28, pp. 80-85.
- [13] Beshta, O.S. Electric drive adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2012, no.4, pp. 98-108.
- [14] Lobov V.I., Lobova K.V Comparison of the mechanical characteristics of an induction motor with various parametric control circuits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 88-92
- [15] Petrushin V.S., Yakimec A.M., Plotkin Yu.R., Yenoktayeve R.N. Investigation of the soft start of an induction motor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018, no. 1, pp. 56-51. DOI: [10.15407/techned2018.01.056](https://doi.org/10.15407/techned2018.01.056)
- [16] Ostroverkhov M.Ya., Pyzhov V.M. Modeling of electromechanical systems in "Simulink" / K.: VD "Silos", 2008. 528 p.
- [17] Lobov V.I., Lobova K.V The thyristor converter influence on the pulsations of the electromagnetic torque of the induction motor at parametrical control. *Electrical engineering & electromechanics*. 2017, no.4, pp. 34-41.

Сведения об авторах.



Виктор Николаевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры мехатроники и электротехники Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт». Область научных интересов – энергетика электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.
E-mail: kovalov1952@gmail.com



Юлия Викторовна Ковалева, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения и электропотребления городов Харьковского национального университета городского хозяйства. Область научных интересов – энергетика электроприводов с полупроводниковыми преобразователями.
E-mail: kovalova.jv@gmail.com