

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ

В. О. Квашнин, В. А. Косенко

Донбасская государственная машиностроительная академия

Аннотация. В представленной работе приведены результаты исследований определения энергоэффективности асинхронного электропривода с прямым управлением моментом. Для разработанной модели предложенной системы управления были определены динамические зависимости скорости, момента, токов и напряжений на основе которых были определены энергетические параметры в виде зависимостей коэффициента мощности и КПД. Аналогичные исследования были проведены для системы векторного управления и для нерегулируемого электропривода. На основе полученных данных был проведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, прямое управление моментом, коэффициент мощности, КПД, энергоэффективность.

Введение

В современном машиностроении широкое применение получили регулируемые асинхронные электропривода, отличающиеся относительной простотой конструкции, низкой стоимостью и доступностью на рынке. Для управления асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором в настоящее время большое распространение получили системы скалярного и векторного управления [1]. Однако у данных систем автоматического управления (САУ) электроприводом (ЭП) имеются свои недостатки, в особенности у систем с векторным управлением, имеющие довольно сложную структуру в результате необходимости выполнения преобразования систем координат из неподвижной во вращающуюся, ориентированную по полю ротора и обратно. Этот недостаток отсутствует у систем с прямым управлением моментом (ПУМ) [2,3,4], которые в свою очередь являются усовершенствованием систем с векторным управлением. Но стоит отметить, что системы прямого управления моментом (Direct Torque Control – DTC) в свою очередь имеют один существенный недостаток, который обусловлен использованием в системе релейных регуляторов, что вызывает повышенные пульсации момента.

Цель

Целью данной работы являлось определение энергоэффективности предложенной системы с прямым управлением моментом АД с КЗ ротором при различных режимах работы (пуск, номинальная нагрузка и холостой ход). Для дости-

жения указанной цели необходимо было решить ряд задач:

- определить критерии оценки энергоэффективности системы ЭП с ПУМ в сопоставлении с существующими вариантами регулируемого и нерегулируемого электропривода, на примере системы с векторным управлением (ВУ) и непосредственно неуправляемого АД с КЗ ротором.

- промоделировать рассматриваемые варианты ЭП и провести оценку полученных зависимостей ω , M , U , I в функции времени при различных режимах работы (пуск, холостой ход, нагрузка).

- по полученным зависимостям рассчитать и построить графики S , η , $\cos(\varphi)$ в функции времени для рассматриваемых вариантов ЭП при различных режимах работы.

- определить среднедействующее значение этих показателей за период разгона и на участках холостого и при работе под нагрузкой.

- провести обработку полученных результатов и выполнить их сопоставительный анализ.

Исследования

При решении поставленных задач в рассмотрение были взяты два вида математических моделей электроприводов реализованных на одном и том же АД с КЗ ротором [5], параметры которого приведены в таблице 1. Первая – это цифровая математическая модель асинхронного ЭП с ПУМ разработка и описание которой приведено в л. [6]. Она реализована на специально разработанной для решения подобных задач трехфазной модели АД с КЗ ротором в координатной системе α - β с трехфазным напряжением питания [7, 8]. Структурная цифровая модель системы ПУМ представлена на рисунке 1.

Таблица 1
 Параметры АД с КЗ ротором серии АИР100L2

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Значение
Номинальная мощность	P_H	кВт	5,5
Номинальная скорость	n_H	об/мин	2850
Номинальный ток	I_H	А	11
КПД	η	%	88
Коэффициент мощности	$\cos(\varphi)$	-	0,88
Кратность пуск. тока	$I_{п}/I_H$	-	7,5
Кратность пуск. момента	$M_{п}/M_H$	-	2,1
Кратность крит. момента	M_K/M_H	-	2,4

Данная система управления содержит следующие цифровые, математические блоки:

- Блок регуляторов;
- Блок формирования ШИМ;
- Блоки формирования синусоидального сигнала;
- Объект управления (АД с КЗ ротором).

Вторая – это классическая цифровая математическая модель АД с ВУ, описание которой приведено [9]. Для ее реализации была взята стандартная модель из библиотек Matlab, схема которой представлена на рисунке 2. Следует отметить, что обе системы в своей структуре используют ПИ-регуляторы скорости.

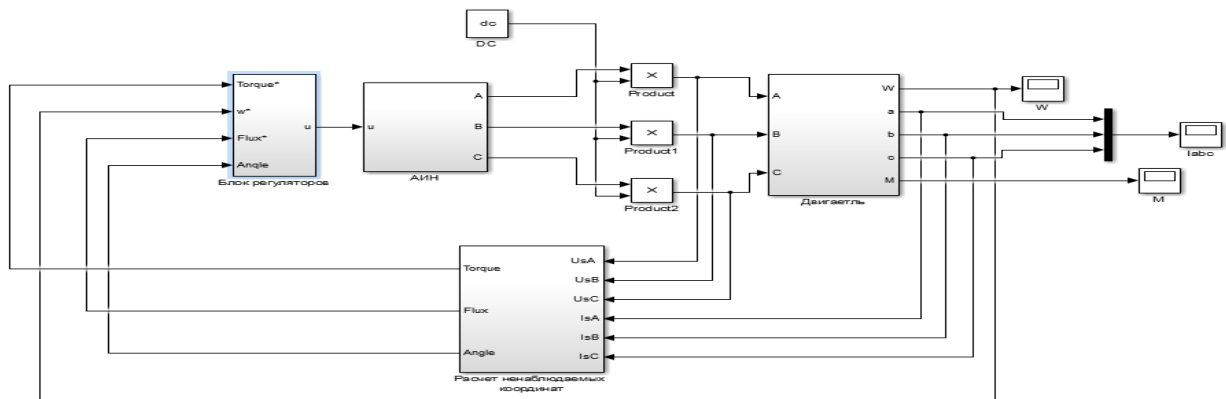


Рис. 1. Цифровая математическая модель асинхронного электропривода с прямым управлением моментом

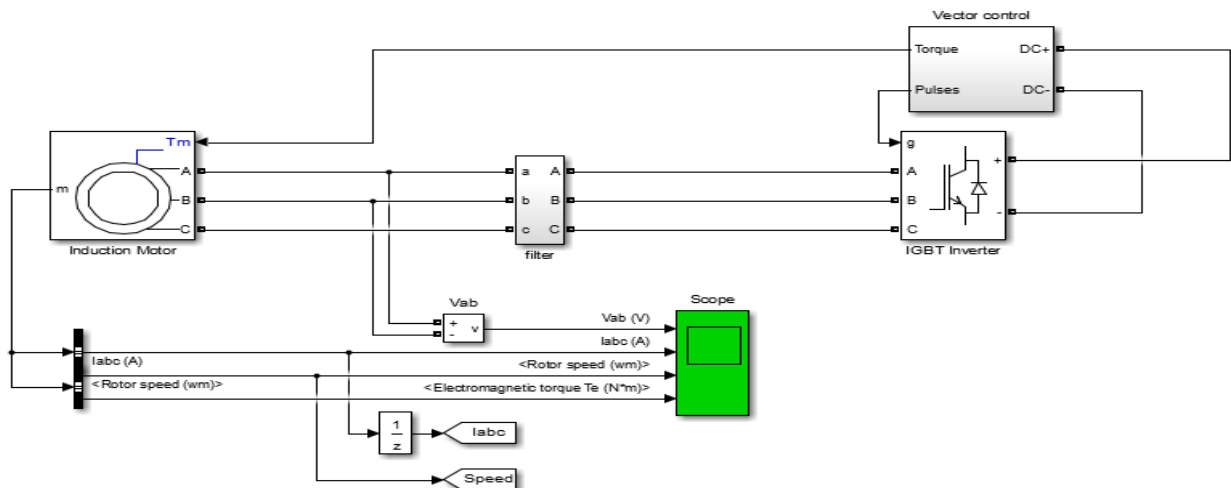


Рис. 2. Цифровая математическая модель асинхронного электропривода с векторным управлением

Полученные результаты моделирования в виде графиков скорости, момента токов, и напряжений для рассматриваемых систем сопо-

ставлялись между собой и сравнивались с аналогичными результатами моделирования нерегулируемого АД при различных режимах работы.

Соответствующие полученные зависимости напряжений и токов статора, а также угловой скорости и момента на валу двигателя представлены на рисунках 3-12.

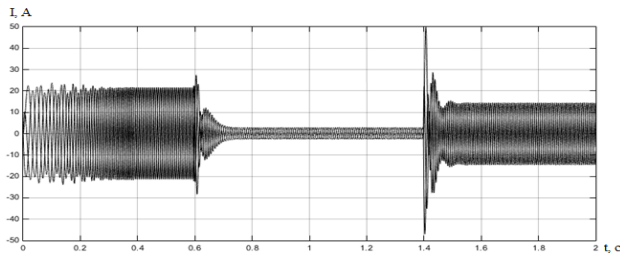


Рис. 3. Токи статора (ПУМ)

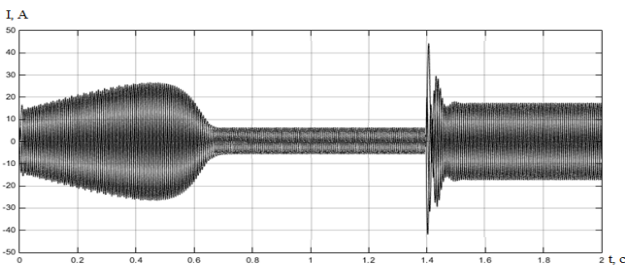


Рис. 4. Токи статора (ВУ)

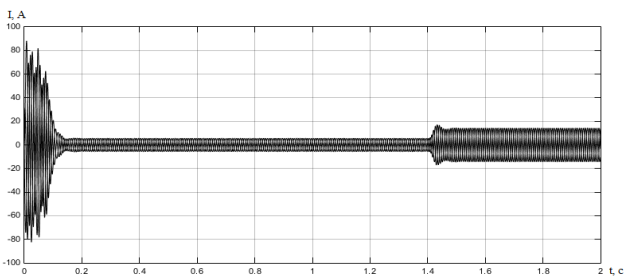


Рис. 5. Токи статора (нерегулируемый АД)

Исследование полученных результатов на участке пуска показывает, что разгон АД, как и в ПУМ так и при ВУ осуществляется за одно и то же время, $t_n=0,6$ с, в отличие от нерегулируемого ЭП у которого время пуска длится $t_n=0,13$ с. В первом случае этот процесс протекает при неизменной амплитуде тока $I_{пПУМ} = 20,5$ А. Во втором случае амплитуда тока плавно изменяется $I_{пВУ} = 13 - 27,5$ А. Из зависимости токов полученных, для нерегулируемого ЭП видно, что их максимальная амплитуда во время пуска достигает $I_{пнЭП} = 80$ А. Из приведенных зависимостей напряжений видно, что при ПУМ амплитуда линейно нарастает $U_{пПУМ} = 0 - 140$ В, а при ВУ она изменяется $U_{пВУ} = 0 - 280$ В, для нерегулируемого ЭП амплитуда напряжений остается неизменной на протяжении всей его работы $U_{пнЭП} = 311$ В.

При работе на участке холостого хода, который как при ПУМ, так и при ВУ длится $t_{xx} = 0,8$ с, обе системы имеют разную, постоянную амплитуду тока на данном рабочем участке. При

использовании ПУМ $I_{xxПУМ} = 2,9$ А, а при применении ВУ $I_{xxВУ} = 5,6$ А. Для нерегулируемого ЭП данное значение равняется $I_{xxнЭП} = 5,7$ А.

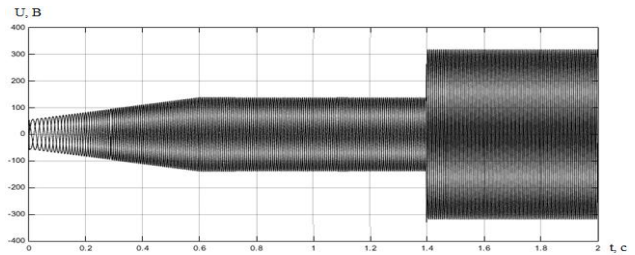


Рис. 6. Напряжения статора (ПУМ)

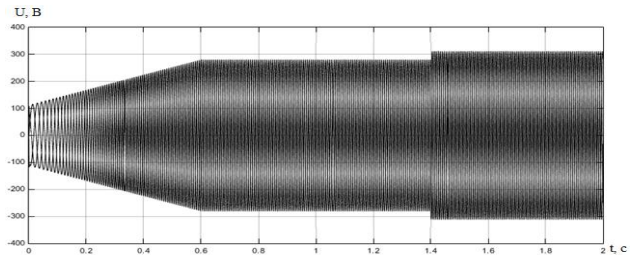


Рис. 7. Напряжения статора (ВУ)

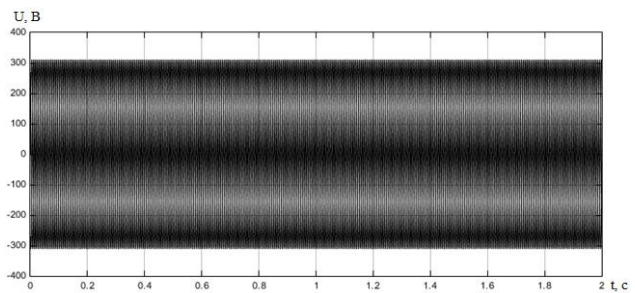


Рис. 8. Напряжения статора (нерегулируемый АД)

При работе ЭП при номинальной нагрузкой в системах ПУМ и ВУ амплитуды фазных напряжений возрастают до своей номинальной величины $U_{ном} = 311$ В. Из приведенных зависимостей видно, что значения токов ЭП при номинальной нагрузкой для ПУМ равны $I_{нПУМ} = 15$ А, а для ВУ $I_{нВУ} = 16,2$ А. Для нерегулируемого ЭП значение тока номинальной нагрузки равно $I_{ннЭП} = 15,9$ А.

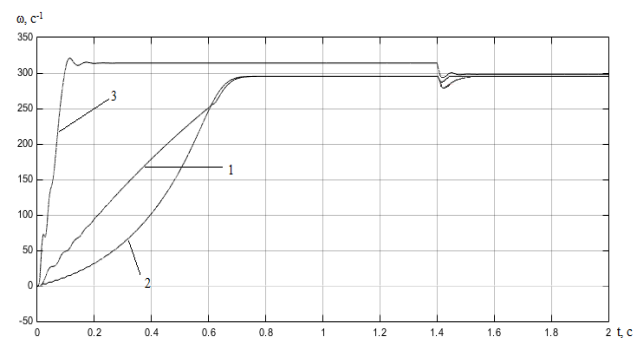


Рис. 9. Угловая скорость развиваемая на валу двигателя (ПУМ)

На графиках угловых скоростей под номером 1 изображена зависимость при питании от системы ПУМ, 2 – системы ВУ, 3 – от нерегулируемого ЭП (прямой пуск АД).

Из приведенных зависимостей видно, что разгон ЭП до установленной скорости $\omega = 295 \text{ с}^{-1}$ осуществляется за $t_n = 0,65 \text{ с}$. В нерегулируемом ЭП разгон происходит за $t_n = 0,12 \text{ с}$, при этом наблюдается незначительное перерегулирование. При работе под нагрузкой в нерегулируемом ЭП наблюдается просадка скорости до ее номинального значения $\omega_n = 298,2 \text{ с}^{-1}$. В системах ПУМ и ВУ осуществляется стабилизация скорости на ее установленном значении $\omega = 295 \text{ с}^{-1}$, с небольшой динамической ошибкой. В системе ПУМ стабилизация скорости осуществляется за $t_{\text{пн}} = 0,2 \text{ с}$ в отличие от ВУ $t_{\text{пн}} = 0,45 \text{ с}$.

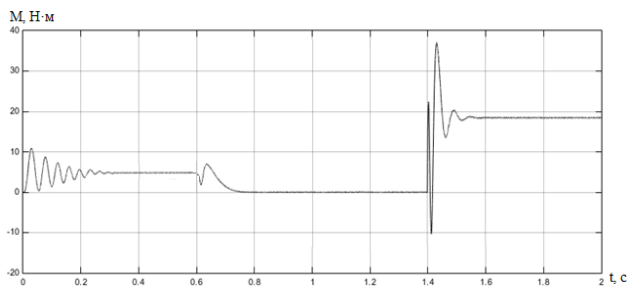


Рис. 10. Момент на валу двигателя (ПУМ)

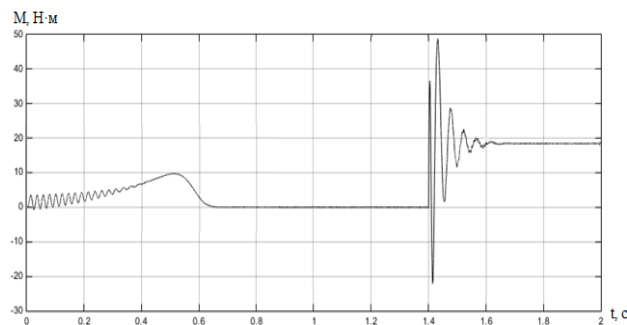


Рис. 11. Момент на валу двигателя (ВУ)

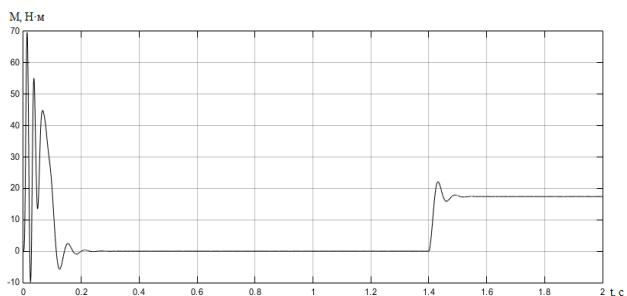


Рис. 12. Момент на валу двигателя при питании АД от нерегулируемого источника

Обработка приведенных зависимостей моментов показала, что на пусковом участке, который для ПУМ и ВУ длится $t_n = 0,6 \text{ с}$, наблюдаются разные значения моментов. Для системы ПУМ

осуществляется стабилизация пускового момента на значении $M_{\text{пПУМ}} = 4,8 \text{ Н·м}$. На зависимостях системы с ВУ значение пускового момента плавно нарастает $M_{\text{пВУ}} = 0 - 10 \text{ Н·м}$. Для нерегулируемого ЭП время пуска равно $t_n = 0,16 \text{ с}$, с максимальным значением пускового момента $M_{\text{пнЭП}} = 70 \text{ Н·м}$.

При номинальном режиме работы для обеих систем ЭП, в том числе и для нерегулируемого ЭП значение момента равно номинальному $M_n = 18,44 \text{ Н·м}$.

Для расчета энергетических характеристик [10] использовались известные расчетные соотношения из теоретических основ электротехники применимые к электрическим машинам, такие как:

мгновенная активная электромагнитная мощность, потребляемая из электросети:

$$P_{1i} = 3 \cdot (i_i \cdot u_i) \quad (1)$$

где i_i и u_i – мгновенные соответствующие значения фазного тока и напряжения;

Полезная активная мощность асинхронного электродвигателя, которая может быть определена, как механическая мощность на валу двигателя

$$P_{2\text{мех}} = M_i \cdot \omega_i \quad (2)$$

где M_i и ω_i – мгновенные соответствующие значения момента и угловой скорости электродвигателя.

КПД для текущих значений

$$\eta_i = \frac{P_{2\text{мех}}}{P_{1i}} \quad (3)$$

коэффициент мощности

$$\cos(\varphi)_i = \frac{P_{1i}}{S} \quad (4)$$

где S – полная мощность

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (5)$$

где U, I – действующие, среднеквадратичные значения тока и напряжения на конкретном временном промежутке.

$$I = \frac{\sqrt{i_i^2 + i_i^2 \dots + i_n^2}}{n} \quad (7)$$

$$U = \frac{\sqrt{u_i^2 + u_i^2 \dots + u_n^2}}{n} \quad (8)$$

На основе полученных зависимостей используя приведенные расчетные соотношения (1-8) были рассчитаны динамические зависимости полной потребляемой мощности АД с КЗ ротором, которые изображены на рисунках 13 и 14.

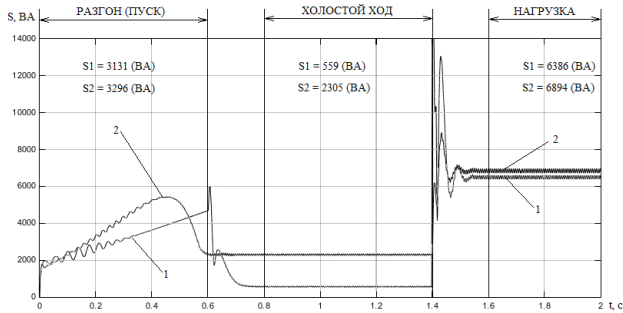


Рис. 13. Полные мощности потребляемые из сети при питании АД от системы ПУМ и ВУ

На рисунке 13 под номером 1 представлен график полной мощности при использовании системы ПУМ, под номером 2 – система ВУ.

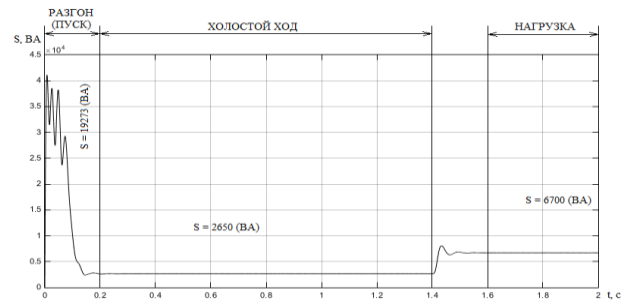


Рис. 14. Полная мощность потребляемая из сети при питании АД от нерегулируемого источника

Для проведения анализа энергоэффективности электропривода для двух систем управления и для нерегулируемого электропривода были рассчитаны средние значения коэффициента мощности и КПД для различных режимов работы, которые представлены на рисунке 15.

Из проведенного исследования энергетических зависимостей следует, что при питании от системы ПУМ энергопотребление при пуске составляет $2,066 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, для холостого хода

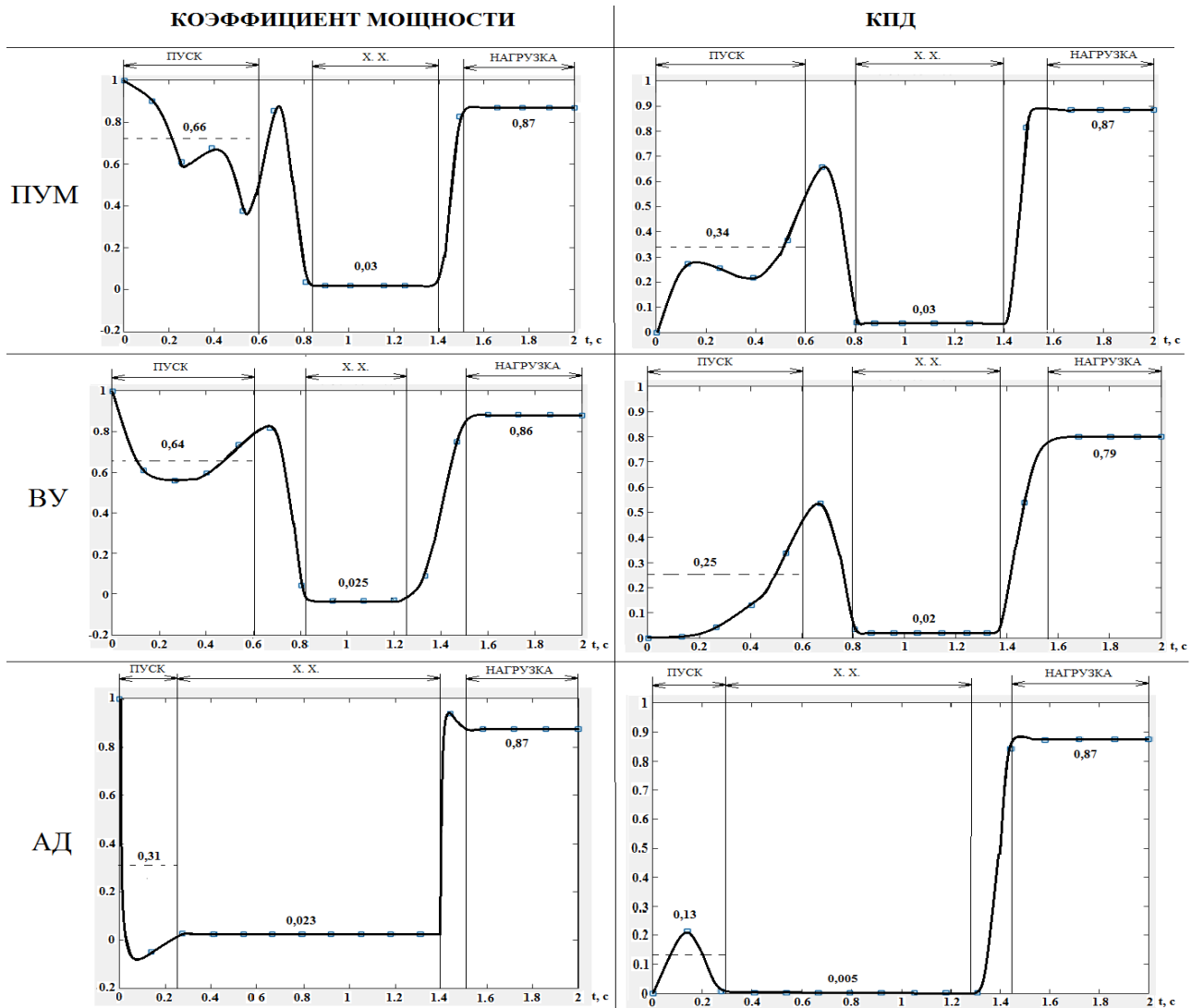


Рис. 15. Средние значения КПД и коэффициента мощности

энергопотребление составляет $0,017 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч и для режима под нагрузкой данное значение составляет $5,56 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч.

Для системы ВУ среднее потребление электрической энергии составляет $2,1 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, однако на участке холостого хода данный параметр составляет $0,057 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, что практически на 70 % выше чем в системе ПУМ. При работе данного ЭП на рабочем участке (под номинальной нагрузкой) энергопотребление $5,8 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, почти на 7 % выше от системы ПУМ.

Для нерегулируемого ЭП среднее энергопотребление на участке пуска составляет $5,97 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, на холостом ходу $0,06 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч и для работы под номинальной нагрузкой значение энергопотребления составляет $5,83 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч.

Анализ

Полученные результаты значений коэффициента мощности и КПД были сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Установившиеся (среднедействующие) значения коэффициента мощности и КПД

Значение Параметр	Пуск	Х.Х.	Ном. нагрузка
Коэф. мощности, $\cos(\varphi)$	0,66 (ПУМ)	0,03 (ПУМ)	0,87 (ПУМ)
	0,64 (ВУ)	0,025 (ВУ)	0,86 (ВУ)
	0,31 (НЭП)	0,023 (НЭП)	0,87 (НЭП)
КПД, η	0,34 (ПУМ)	0,03 (ПУМ)	0,87 (ПУМ)
	0,25 (ВУ)	0,02 (ВУ)	0,79 (ВУ)
	0,13 (НЭП)	0,005 (НЭП)	0,87 (НЭП)

Из проведенного анализа полученных зависимостей следует:

– что рассмотренные системы управляемого ЭП за счет плавного пуска обеспечивают относительно малое энергопотребление и более высокий $\cos(\varphi)$, в отличие от нерегулируемого ЭП. Однако самыми высокими энергетическими показателями обладает предложенная система с ПУМ, имеющая самое низкое энергопотребление и самый высокий КПД и $\cos(\varphi)$ за счет контроля и стабилизации момента;

– на участке холостого хода в системе ЭП с ПУМ благодаря более низкому напряжению питания достигается самое низкое энергопотребление, которое на 70 % ниже чем в рассмотренной

модели ВУ и на 72 % ниже от показателей нерегулируемого ЭП;

– на последнем участке работы (режим номинальной нагрузки) рассматриваемых систем управления ЭП, система ПУМ, как и в предыдущих режимах работы имеет самое низкое энергопотребление (почти на 7 % ниже чем в ВУ), а также обеспечивает оптимальный показатель $\cos(\varphi)$ и имеет более высокий КПД чем у рассмотренной системы ВУ.

Выводы

В результате выполненной работы достигнуто:

– определены критерии оценки энергетической эффективности системы ЭП с ПУМ по полной потребляемой из сети мощности и полученным показателям КПД и $\cos(\varphi)$ в различных режимах работы – при пуске, работе на холостом ходу и под нагрузкой.

– определены действующие значения этих показателей за период разгона, а также на участках холостого хода и работе под нагрузкой.

– в результате двух близких вариантов ЭП с различными высокоточными системами управления (ПУМ и ВУ) установлено, что первый вариант ЭП за счет прямого управления моментом имеет более высокие энергетические показатели $\cos(\varphi)$ и КПД во всех рассмотренных режимах работы.

– получена методика оценки энергетической эффективности для рассматриваемых ЭП.

– установлено в ходе исследований, что, вариант ЭП с ПУМ является более приемлемым вариантом в плане энергоэффективности.

Список использованной литературы

1. Behera, P. K. Speed control of Induction Motor using Scalar Control Technique / P. K. Behera, A. K. Sahoo [Text] International Journal of Computer Applications, ETCC – 2014, pp. 37–39.
2. Alnasir, Z. A. Design of direct torque controller of induction motor (DTC) / Z. A. Alnasir [Text] International Journal of Engineering and Technology, IJET – 2012, pp. 54–70.
3. Карандеев, Д. Ю. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности / Д. Ю. Карандеев, Е. А. Энгель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru>
4. Квашнин, В. О. Построение и исследование модели системы прямого управления моментом для минимизации пульсаций электромагнитного момента / В. О. Квашнин, Ю. Н. Чередник

- [Текст] Електромеханічні і енергозберігаючі системи 2012р, Сборник 3, с. 382–384
5. Каталог асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electronpo.ru/production>
6. Kvashnin, V. Modeling systems direct torque control using a three-phase mathematical model / V. Kvashnin, V. Kosenko [Text] Published in the Journal Electrotechnic and Computer Systems, No. 22(98), 2016, pp. 56–61.
7. Квашнин, В. О. Разработка динамической модели асинхронного двигателя / В. О. Квашнин [Text] Вісник: Східноукраїнського Національного університету: Науковий журнал: Луганськ. – 2006: Випуск № 1(95).– С.87–91.
8. Квашнин, В. О. Анализ построения динамической модели асинхронного двигателя на основе расчетных и каталожных данных / В. О. Квашнин, В. А. Косенко [Текст] Електротехнічні та комп'ютерні системи г. Одеса 2014, с. 241–244.
9. Даденков, Д. А. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете программ Matlab/Simulink / Д. А. Даденков, Е. М. Солодкий, А. М. Шачков [Текст] Вестник Пермского национального исследовательского политехнического института; Пермь 2014, с. 117–128.
10. Квашнин, В. О. Удосконалення методики визначення енергетичних характеристик асинхронного двигуна з використанням його математичної моделі / В. О. Квашнин, В. А. Косенко [Текст] Сборник трудов XX международной научно-технической конференции, г. Севастополь 2013, 3-й том 302 с, с. 274–277.

References

1. Behera, P. K., Sahoo A. K. (2014) “Speed control of Induction Motor using Scalar Control Technique”, International Journal of Computer Applications, pp. 37-39.
2. Alnasir, Z. A. (2012) “Design of direct torque controller of induction motor (DTC)”, International Journal of Engineering and Technology, pp. 54-70.
3. Karandeev, D. Y., Engel, E. A. “Direct control of the torque of an induction motor using an adaptive neurocontroller under uncertainty conditions” [Pryamoe upravlenie momentom asinxronnogo dvigatelya s ispolzovaniem adaptivnogo nejro-
- kontrollera v usloviyax neopredelennosti], available at: <http://naukovedenie.ru>
4. Kvashnin, V., Cherednik Y. (2012) “Construction and investigation of a model of a direct torque control system for minimizing pulsations of the electromagnetic moment” [Postroenie i issledovanie modeli sistemy pryamogo upravleniya momentom dlya minimizacii pulsacij elektromagnitnogo momenta], Electromechanical and saving system, Collection 3, pp. 382–384.
5. Catalog of induction motors with squirrel cage rotor [Katalog asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom], available at: <http://www.electronpo.ru/production>
6. Kvashnin, V., Kosenko V. (2016) “Modeling systems direct torque control using a three-phase mathematical model” Published in the Journal Electrotechnic and Computer Systems, No. 22(98), pp. 56–61.
7. Kvashnin, V. O. (2006) “Development of a dynamic model of an induction motor” [Razrabotka dinamicheskoy modeli asinxronnogo dvigatelya], Visnik svidnoukraïnskogo nacionalnogo universitetu: naukovij zhurnal, Lugansk, Issue № 1 (95), pp.87–91.
8. Kvashnin V. O., Kosenko, V. A. (2014) “Analysis of the construction of a dynamic model of induction motor based on the calculated and catalog data” [Analiz postroeniya dinamicheskoy modeli asinxronnogo dvigatelya na osnove raschetnyx i katalogovannyx dannyx], Elektrotexnicheskije i kompyuternye sistemy, Odessa, pp. 241–244.
9. Dadenkov, D. A., Solodkiy, E. M., Shachkov, A. M. (2014) “Modeling of the vector control system by an induction motor in the Matlab / Simulink software package” [Modelirovaniye sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete programm Matlab/Simulink], Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo institute, Perm, pp. 117–128.
10. Kvashnin, V. O., Kosenko, V. A. (2013) “Improving methods for determining the energy characteristics of induction motor using its mathematical model” [Udoskonalennya metodiki viznachennya energetichnix xarakteristik asinxronnogo dviguna z vikoristannyam jogo matematichnoï modeli], Sbornik trudov XX mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencii, Sevastopol, Volume 3 302 p., pp. 274–277.

DETERMINATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH DIRECT TORQUE CONTROL

V. O. Kvashnin, V. A. Kosenko

Abstract. In modern mechanical engineering, there are many types of regulated electric drives, as a result of which ever more stringent requirements are set for them. One of these key requirements is energy efficiency. The aim of the presented work is to conduct an energy efficiency assessment of the previously developed electric drive model with direct torque control. To achieve this goal, it was required to determine the criteria for estimating the energy efficiency, calculate and plot the S , η , $\cos(\varphi)$ curves and determine their average value at specific sections of the main operating modes of the electric drive. In order to carry out the comparative analysis according to the established criteria in this work, the vector control system was chosen as the second control system, as well as for a more complete analysis, a study of an unregulated electric drive was presented. For all the models presented in the work, the dependences ω , M , I , U were determined on the basis of which the average values of S , η , and $\cos(\varphi)$ were determined. Upon receipt of the results, a comparative analysis was carried out, which showed that the proposed direct torque control system has the highest energy efficiency.

Key words: Asynchronous electric drive, direct torque control, power factor, efficiency, energy efficiency.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ПРЯМИМ КЕРУВАННЯМ МОМЕНТОМ

В. О. Квашнін, В. А. Косенко

Донбаська державна машинобудівна академія

Анотація. У представленій роботі наведені результати досліджень визначення енергоефективності асинхронного електроприводу з прямим керуванням моментом. Для розробленої моделі запропонованої системи керування були визначені динамічні залежності швидкості, моменту, струмів і напруг на основі яких були визначені енергетичні параметри у вигляді залежностей коефіцієнта потужності і ККД. Аналогічні дослідження були проведені для системи векторного керування і для нерегульованого електроприводу. На основі отриманих даних було проведено їх порівняльний аналіз.

Ключові слова: асинхронний електропривод, пряме керування моментом, коефіцієнт потужності, ККД, енергоефективність.

Получено 11.05.2017



Квашнин Валерий Олегович, кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Электромеханические системы автоматизации» Донбасской государственной машиностроительной академии. Ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: v.kvashnin@mail.ru, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

Valeriy Kvashnin, Candidate of Technical Sciences, Docent, Lecturer, Department of «Electromechanical systems of automation», Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8171-9794



Косенко Владислав Артурович, аспирант кафедры «Электромеханические системы автоматизации» Донбасской государственной машиностроительной академии. Ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина,

E-mail: kosenko281@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (099) 709-57-84

Vladislav Kosenko, graduate student «Electromechanical automation» systems, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3945-3253