

УДК 621.314

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB

Стаценко О. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Стаття присвячена аналізу енергетичних показників системи електроприводу змінного струму з асинхронним двигуном та векторним керуванням при використанні стандартних бібліотек програмного середовища MATLAB Simulink. Проведений аналіз коефіцієнту корисної дії та коефіцієнту потужності системи електроприводу для різних режимів роботи електричного двигуна. Визначені співвідношення втрат енергії у складових частинах системи. Використання запропонованого підходу дозволяє оцінити енергоефективність системи в залежності від її призначення на етапі проектування.

Ключові слова: асинхронний електропривод, енергетичні показники, векторне керування

Системи електроприводу змінного струму є найбільш розповсюдженими та споживають значну частину електроенергії, що виробляється в світі [1]. Існує значна кількість технологічних процесів з високими вимогами до якості керування [1], що обумовлює необхідність використання в них систем регульованого електроприводу зі спеціальними підходами до керування. До таких підходів відносять векторне керування з орієнтацією по магнітному полю ротора та пряме керування моментом [2].

Слід зазначити, що використання цих підходів не завжди забезпечує високі енергетичні показники всієї системи. Значною мірою це залежить від навантаження та характеру роботи двигуна [3]. На етапі проектування системи електроприводу доцільним є проведення попереднього аналізу точності регулювання частоти обертання та моменту двигуна та визначення енергетичних параметрів.

Найбільш розповсюдженим програмним середовищем для вирішення цієї задачі є пакет *MATLAB Simulink* [4]. Даний пакет має значну кількість вбудованих стандартних бібліотек, що дозволяють аналізувати різноманітні об'єкти, включаючи електротехнічні та електронні системи.

Постановка завдання

Основною задачею даної статті є визначення підходу та проведення аналізу енергетичних параметрів системи електроприводу з асинхронним двигуном та

векторним керуванням по магнітному полю ротора з використанням стандартних бібліотек програмного середовища MATLAB Simulink.

Результати досліджень

Для побудови імітаційної моделі для аналізу енергетичних показників використаємо стандартну модель асинхронного електроприводу з керування по магнітному полю (*Field-Oriented Control Induction Motor Drive*) з бібліотеки *SimPowerSystems* [4]. Ця модель описує систему, яка складається з асинхронного двигуна (*Induction motor*), діодного випрямляча (*Three-phase diode rectifier*), транзисторного інвертора (*Three-phase inverter*), блоку гальмівного резистора (*Braking chopper*), системи керування по магнітному полю (*F.O.C.*), регулятора швидкості (*Speed controller*) та датчика швидкості (*Speed sensor*), рис. 1.

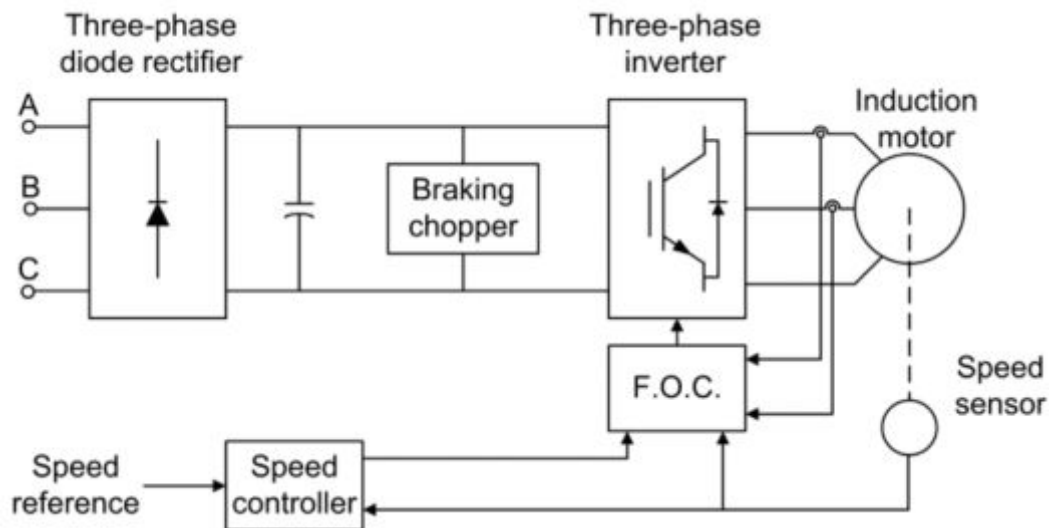


Рис.1. Структура стандартної моделі асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Структури системи керування по магнітному полю та регулятора швидкості наведені на рис. 2, 3, відповідно.

До складу системи керування по магнітному полю входять такі блоки: ψ_r *calculation* блок використовується для оцінки потоку ротора двигуна; Θ_e *calculation* блок використовується для знаходження фазового кута потоку ротора обертового поля; *abc-dq* блок виконує перетворення фазових змінних *abc* в *dq* компоненти системи відліку, що обертається разом із потоком ротора; *dq-abc* блок виконує зворотне перетворення; *iqs*calculation* блок використовує розрахований потік ротора і завдання моменту, щоб обчислити квадратурну складову струму статора, необхідну для

отримання електромагнітного моменту на валу двигуна; *ids*calculation* блок використовує завдання потоку ротора для обчислення прямої складової струму статора, необхідної для отримання потоку ротора в машині; *current regulator* є релейним регулятором струму з регульованою шириною смуги гістерезису; *switching control* блок використовується для обмеження частоти комутації перетворювача максимальним значенням; *flux controller* блок використовується для управління зміною потоку; *magnetization vector* блок містить вектор, використовуваний для створення початкового потоку двигуна; *magnetization control* блок містить логіку, використовувану для врахування нелінійної характеристики намагнічування.

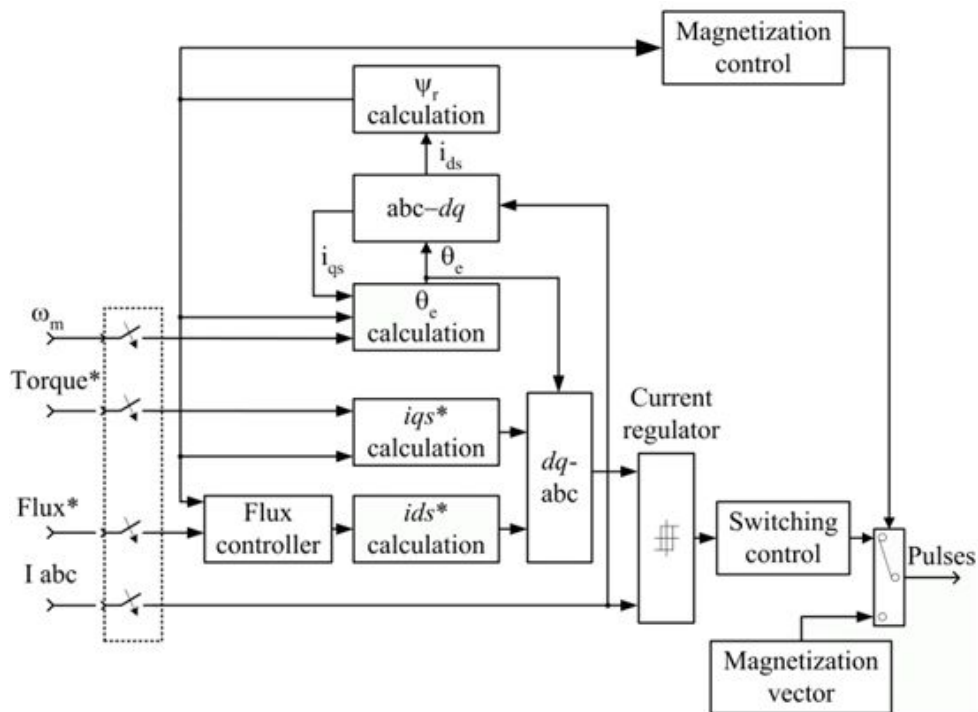


Рис. 2. Структура системи керування по магнітному полю

Регулятор швидкості побудований з використанням ПІ-регулятора, та він має функції обмеження швидкості зміни частоти обертання, максимального сигналу завдання електромагнітного моменту. Крім того, даний регулятор реалізує функцію зниження магнітного потоку для роботи на частоті вищій за номінальну.

Імітаційна модель для визначення енергетичних показників показана на рис. 4. До її складу входить блок системи електроприводу (*Field-Oriented Control Induction Motor Drive*), блок трифазного живлення, блок вимірювання трифазних напруг та струмів, блок вимірювання складових частин потужності, блоки *Subsystem*, призначені

для визначення відповідних параметрів, та блоки *Step* та *Timer*, за допомогою яких здійснюється завдання частоти обертання двигуна та навантажувальний момент.

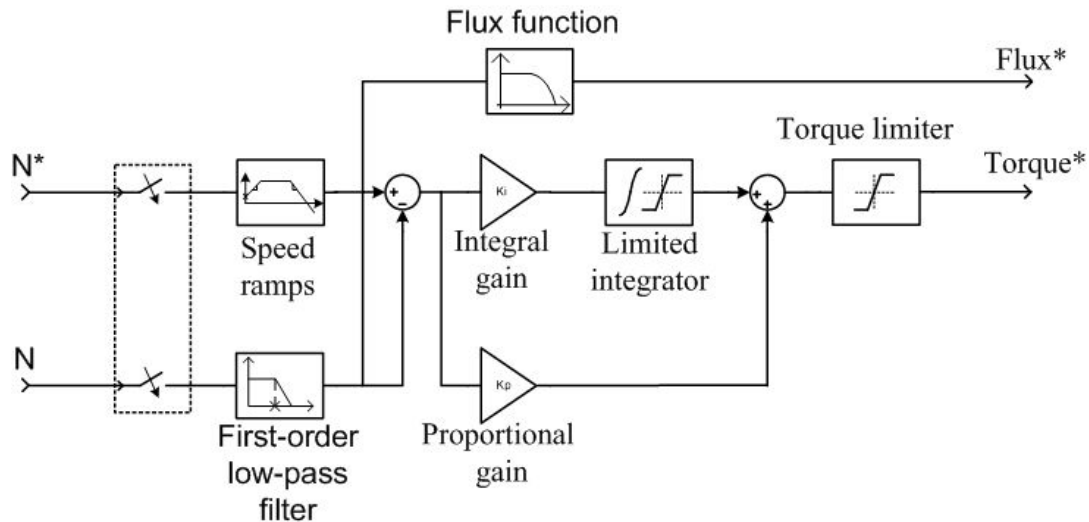


Рис. 3. Структура регулятора швидкості

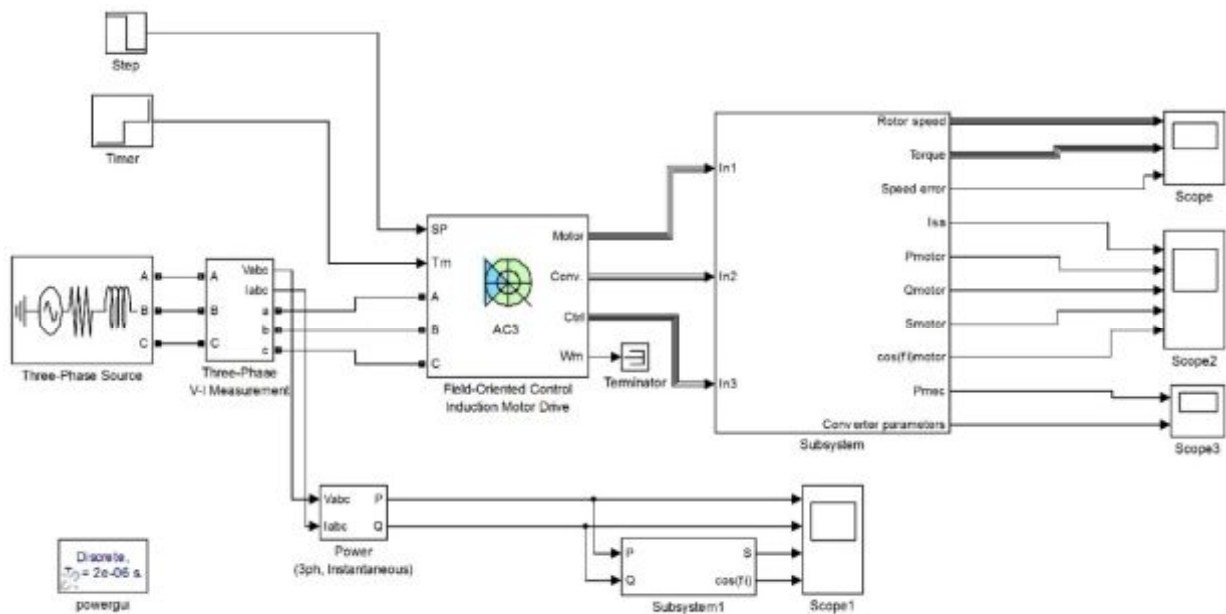


Рис. 4. Імітаційна модель для аналізу енергетичних параметрів системи електроприводу

З використанням запропонованої моделі розглянемо процес розгону асинхронного двигуна від нульової швидкості до номінальної та гальмування від номінальної швидкості до нульової. Для аналізу використаємо двигун типу 4A160M4У3 потужністю 18,5 кВт з параметрами [5]: $R_s = 0.264$ Ом, $R_r = 0.151$ Ом, $L_s = 1.7$ мГн, $L_r = 2.6$ мГн, $L_M = 88$ мГн, $p = 2$, $\Delta s_{ном} = 1.1$ Гц, $n_c = 1500$ об/хв. Момент інерції

прийємо постійним і рівним $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а момент опору задаватимемо стрибкоподібно від нульового значення до $100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в момент часу 0.7 с . В системі керування рівень максимального моменту обмежений $110 \text{ Н}\cdot\text{м}$, максимальна швидкість зміни частоти – $3000 \text{ об}/(\text{хв}\cdot\text{с})$. Коефіцієнт підсилення пропорційної складової ПІ-регулятора дорівнює 50 , а інтегральної – 30 . Рівень потокозчеплення заданий на рівні 0.8 Вб . Результати розрахунку наведені на рис. 5.

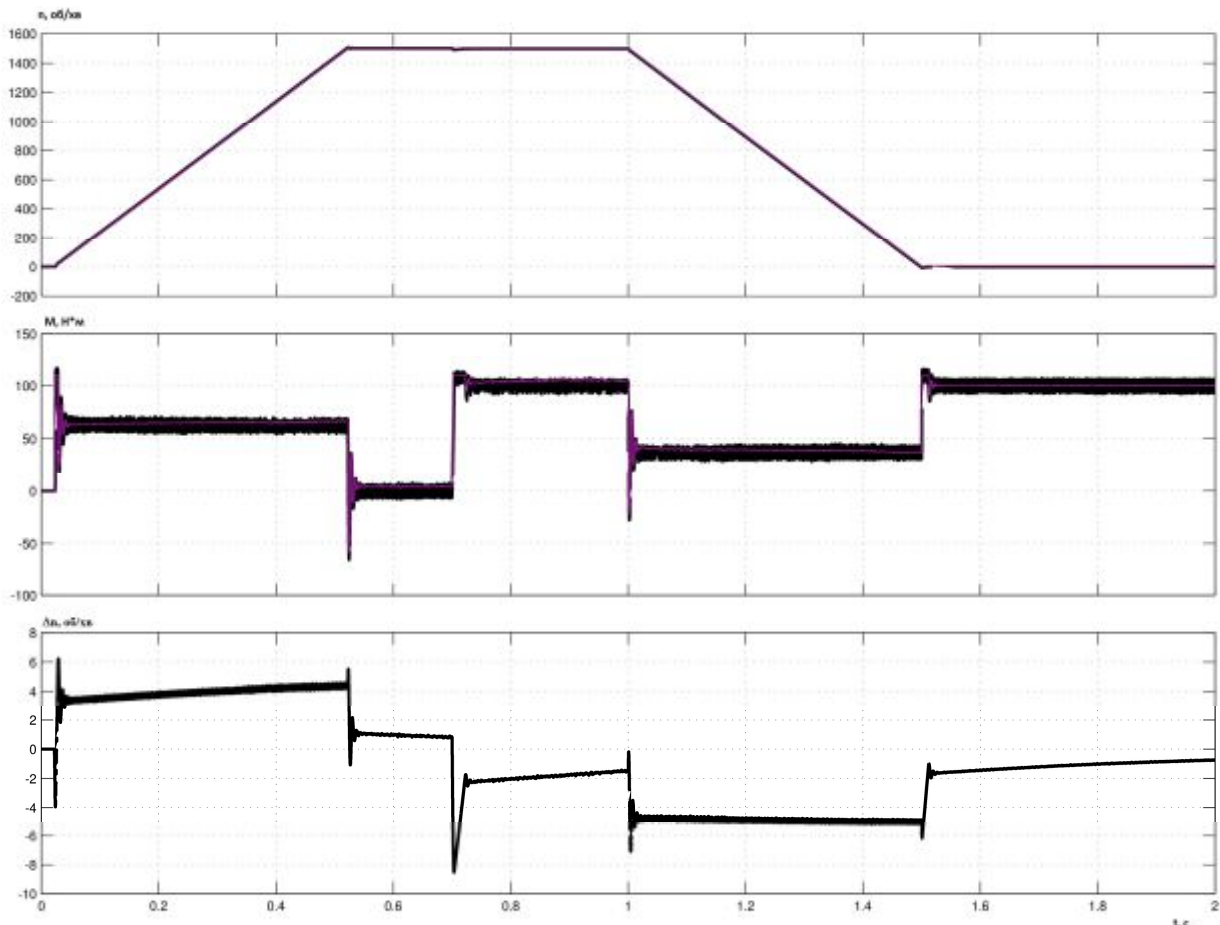


Рис.5. Графіки зміни частоти обертання, електромагнітного моменту та похибки регулювання частоти

На графіках зміни частоти та моменту наведені також сигнали завдання цих величин. Слід зазначити, що сигнал завдання частоти подається стрибкоподібно в нульовий момент часу, але система керування корегує його для забезпечення попереднього встановлення потокозчеплення на заданому рівні, що викликає паузу у формуванні сигналу до 0.04 с , та обмежує максимальну зміну частоти, що призводить до лінійної зміни швидкості. Електромагнітний момент встановлюється на тому рівні, при якому має відбуватися відповідна зміна швидкості. Під час розгону з нульовим моментом навантаження ця величина складає $63 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Коли частота обертання

постійна, збільшення моменту навантаження до 100 Н*м призводить до збільшення електромагнітного моменту також до цього значення. Під час гальмування електромагнітний момент встановлюється на рівні 37 Н*м для забезпечення відповідного відпрацювання сигналу завдання частоти. Максимальна похибка регулювання при номінальному значенні частоти обертання складає 8 об/хв, що відповідає 0,5 %.

Для аналізу енергетичних характеристик таких систем у сталих режимах роботи використовуються коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Але безпосередній їх аналіз з використанням цієї моделі є ускладненим. Це обумовлено імпульсним характером напруги статора двигуна, наявністю високочастотної складової електромагнітного моменту та струму статора двигуна, та несинусоїдальним переривчастим характером вхідного струму перетворювача. Всі ці фактори призводять до імпульсної зміни вказаних параметрів, що суттєво ускладнює їх аналіз. Виходом з цієї ситуації може бути перехід до усереднених значень.

В таблиці 1 наведені розраховані по результатам моделювання усереднені значення корисної механічної потужності, активної потужності та коефіцієнта потужності на вході електричного двигуна, активної потужності та коефіцієнта потужності на вході всієї системи при постійній частоті обертання валу двигуна, що дорівнює 1500 об/хв та різних моментах навантаження.

Таблиця 1

Енергетичні параметри системи електроприводу при роботі двигуна на номінальній частоті

М, Н*м	Р _{мех} , Вт	Р _{ел.дв.} , Вт	К _{пот.дв.}	Р _{ел.пр.} , Вт	К _{пот.пр.}
10	1690	1720	0.443	1760	0.996
20	3260	3330	0.679	3370	0.995
30	4840	4950	0.794	5010	0.994
40	6400	6600	0.853	6670	0.993
50	7980	8270	0.884	8350	0.992
60	9550	9960	0.901	10050	0.992
70	11120	11670	0.912	11780	0.991
80	12680	13410	0.917	13520	0.991
90	14260	15190	0.915	15310	0.99
100	15820	16970	0.915	17100	0.989

Як можна побачити з наведених результатів, при зменшенні навантаження коефіцієнт потужності електричного двигуна знижується, але це не впливає на коефіцієнт потужності всієї системи, що обумовлено наявністю ланки постійного струму в перетворювачі частоти.

Розглянемо, як змінюється коефіцієнт корисної дії в залежності від навантаження та частоти обертання двигуна. Результати моделювання наведені в табл.2, 3 (в таблиці 2 – ККД, в таблиці 3 – відносний рівень втрат енергії в електродвигуні).

Таблиця 2

Залежність ККД електроприводу від навантаження та частоти

M, Н*М	n = n _{НОМ}	n = 0.75*n _{НОМ}	n = 0.5*n _{НОМ}	n = 0.25*n _{НОМ}
10	0.962	0.951	0.928	0.868
20	0.967	0.958	0.94	0.89
30	0.965	0.955	0.935	0.882
40	0.961	0.948	0.927	0.864
50	0.955	0.942	0.916	0.847
60	0.95	0.934	0.905	0.827
70	0.944	0.926	0.892	0.807
80	0.938	0.918	0.881	0.785
90	0.931	0.909	0.869	0.767
100	0.925	0.901	0.857	0.748

Таблиця 3

Залежність відносного рівня втрат енергії в електродвигуні від загальних втрат енергії в системі при різних навантаженнях та частотах

M, Н*М	n = n _{НОМ}	n = 0.75*n _{НОМ}	n = 0.5*n _{НОМ}	n = 0.25*n _{НОМ}
10	0.421	0.469	0.486	0.492
20	0.563	0.619	0.65	0.664
30	0.657	0.733	0.754	0.78
40	0.744	0.788	0.822	0.846
50	0.778	0.845	0.857	0.889
60	0.82	0.879	0.884	0.913
70	0.839	0.892	0.907	0.927
80	0.871	0.915	0.924	0.94
90	0.884	0.923	0.931	0.948
100	0.893	0.939	0.944	0.956

Виходячи з отриманих результатів можна зробити такі висновки: ККД системи зменшується при збільшенні навантаження та робочої частоти; втрати енергії в двигуні є визначальними в системі при високих навантаженнях та частотах та зменшуються при малих значеннях навантаження.

Слід зазначити, що моделі електричних двигунів в стандартних бібліотеках враховують лише електричні втрати в обмотках статора та ротора, але не враховують втрати у сталі статора, механічні втрати, додаткові та гармонічні втрати. Моделі напівпровідникових пристроїв не враховують втрат на перемиканні. Це призводить до того, що реальний рівень втрат в системі електроприводу енергії буде вищим. Щоб позбутися цього недоліку необхідно доповнити моделі електричного двигуна та напівпровідникових приладів.

Висновки

В результаті виконаних досліджень з використанням побудованої моделі та запропонованого підходу був проведений аналіз енергетичних показників системи електроприводу з векторним керуванням. Отримані результати дозволяють визначити енергетичну ефективність використання такої системи електроприводу в різноманітних технологічних застосуваннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. – М.:Изд.центр «Академия», 2007. – 576 с.
2. Leonhard W. Control of electrical drives / Leonhard W. – Springer, 2001. – 470 p.
3. Стаценко А. В. Анализ потерь энергии в асинхронном двигателе при управлении по критерию максимуму соотношения «момент-ток» / А. В. Стаценко // Вісник КНУТД. – 2014. – Вип. 3. – С. 234-237.
4. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / Герман-Галкин С.Г. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

Анализ энергетических показателей асинхронного электропривода с использованием программной среды MATLAB

Стаценко А. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Статья посвящена анализу энергетических показателей системы электропривода переменного тока с асинхронным двигателем и векторным управлением при использовании стандартных библиотек программной среды MATLAB Simulink. Проведен анализ коэффициента полезного действия и коэффициента мощности системы электропривода для разных режимов работы электрического двигателя. Определены соотношения потерь энергии в составляющих частях системы. Использование предложенного подхода позволяет оценить энергоэффективность системы в зависимости от ее назначения на этапе проектирования.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, энергетические показатели, векторное управление

Analysis of energy performance of induction drive with MATLAB software environment

Statsenko O. V.

Kyiv national university of technologies and design

This article is devoted to the analyzes of the energy performance of the AC drive with vector controlled induction motor using standard library of MATLAB Simulink software environment. The analysis of the drive system efficiency and power factor for different modes of electric motor operation were conducted. The ratio of energy losses in the components of the system was determined. The use of this approach allows to estimate the energy efficiency of the system, depending on its purpose at the design stage.

Keywords: induction drive, energy performance, vector control