

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ПРИВОДА РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

В. Г. Горобець, доктор технічних наук, професор

А.М. Сердюк, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: gorobetsv@ukr.net

Анотація. Метою дослідження було проведення математичного моделювання для дослідження перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна для приводу роторно-пульсаційного апарату для приготування водозернових кормів за наявності та відсутності частотного перетворювача.

Проведено математичне моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна для приводу роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів при відсутності та за наявності частотного перетворювача за допомогою пакету прикладних програм Matlab Simulink. Отримано такі пускові параметри асинхронного двигуна: струм в обмотках статора, швидкість обертання ротора та електромагнітний момент на валу двигуна. Отримано динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна при його пуску. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання з використанням та за відсутності частотного перетворювача. Показано, що використання частотного перетворювача суттєво покращує пускові характеристики асинхронного двигуна.

Ключові слова: *роторно-пульсаційний апарат, асинхронний двигун, частотний перетворювач, перехідні процеси при пуску*

Перелік умовних скорочень:

АД – асинхронний двигун;

ЧП – частотний перетворювач;

РПА – роторно-пульсаційний апарат.

Актуальність. Сільськогосподарські машини та агрегати через особливості своїх технологічних характеристик, неякісну електричну енергію в сільській мережі та некваліфікований персонал за статистикою мають часті аварійні режими роботи, наявність тривалих або короткочасних перевантажень та велику кількість відмов електродвигунів. Такі режими характерні для асинхронних двигунів дробарок,

подрібнювачів кормів, змішувачів кормів, транспортерів, тощо. Електричні двигуни мають досить високий коефіцієнт корисної дії (близько 80-90 %) порівняно з іншими приводними механізмами. Проте слід зазначити, що ці показники є справедливими лише для роботи в номінальному режимі, під час перехідних процесів електричні втрати суттєво підвищуються. Одним з найбільш затратних процесів є пуск електродвигуна: для досягнення необхідної швидкості двигуна треба забезпечити підвищення моменту на валу, який призводить до зростання електричного струму i , відповідно, до квадратичного збільшення електричних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для захисту електричних двигунів в перехідних режимах створено велику кількість засобів захисту. Захисне обладнання при виникненні тривалого перевантаження, як правило, відключає двигун від електричної мережі. Внаслідок цього зупиняється технологічний процес, що призводить до значних економічних збитків. Перевантаження може виникати не лише в процесі роботи електропривода, але й при його включенні в мережу, коли пусковий момент електродвигуна стає меншим за момент навантаження. У такому випадку ротор двигуна загальмований, що є досить небезпечним аварійним режимом. Загальмування ротора електродвигуна також може відбуватися у випадках, коли під час його роботи момент навантаження стає більшим за максимальний момент. У цих випадках виявляється неможливим запуск двигуна до усунення усіх причин його перевантаження. Покращити пускові властивості перевантаженого в момент пуску асинхронного двигуна можна змінюючи початкові умови включення двигуна в мережу – початкову фазу напруги живлення, кутове положення ротора тощо [1, 2, 3].

Трифазні асинхронні двигуни мають не зовсім задовільні пускові характеристики. Сила пускового струму трифазного асинхронного двигуна перевищує номінальну силу струму в 6-8 разів. Також у момент пуску обертальний момент двигуна є малим, тому запуск двигуна необхідно здійснювати без навантаження. Для розрахунку перехідних параметрів при пуску реальний асинхронний електродвигун замінюється еквівалентною схемою його заміщення, в

якій електромагнітний зв'язок замінюється на електричний. При цьому параметри ланцюга ротора приводяться до відповідних параметрів ланцюга статора. У асинхронного двигуна є Т-подібна та Г-подібна схеми його заміщення. Більш зручною при практичних розрахунках є Г-подібна схема. Як правило, в каталогах на асинхронні двигуни приводяться такі технічні дані: номінальна потужність, напруга і струм; номінальна частота обертання та ковзання машини; ККД і коефіцієнт потужності; кратність пускового струму та моменту. Ці дані дозволяють розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна з тим нюансом, що активні опори обмоток ротора і статора є незалежними від режиму роботи АД, тобто ефекти витіснення струму не враховуються [4, 5].

Мета дослідження – проведення математичного моделювання для дослідження перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна (АД) для приводу роторно-пульсаційного апарату (РПА) для приготування водозернових кормів за наявності та відсутності частотного перетворювача (ЧП).

Матеріали та методи дослідження. При моделюванні роботи асинхронного електродвигуна струми та напруги фаз статора і ротора асинхронного електродвигуна можна представити в якості просторового вектору, який призводить до спрощення структури та кількості рівнянь, які описують робочі процеси асинхронної машини. Суть методу просторового вектора полягає в тому, що миттєві значення симетричних трифазних змінних, таких як напруга, струм, потокозчеплення, можна математично перетворити так, щоб вони були представлені одним просторовим вектором. При побудові реальних систем електропривода змінного струму майже завжди в систему керування вводиться фазний перетворювач $3/2$ та $2/3$. Основне призначення цього перетворювача координат полягає в заміні реальної трифазної машини еквівалентною двофазною моделлю, яка має аналогічні значення просторового вектора. Ця заміна змінних величин широко застосовується при математичному дослідженні електричних машин з метою спрощення систем диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл ротора і статора. З метою вираження перехідних процесів для асинхронних машин використовується система координат, яка є нерухомою відносно статора машини.

Математична модель асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором включає систему рівнянь рівноваги напруги статора і ротора, які записуються у відповідності до закону Кірхгофа у трифазній системі координат. Диференційні рівняння електричної рівноваги кола як статора, так і ротора для миттєвих значень напруги, струму та потокозчеплення, що записані у матричній формі [6], для двигуна мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} u_s &= R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ 0 &= R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} ; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \psi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $[u_s], [i_s], [\psi_s]$ – матриці миттєвого значення прикладеної напруги, струму та потокозчеплення фаз A, B, C обмотки статора; $[i_r], [\psi_r]$ – матриці миттєвого значення струму та потокозчеплення фаз a, b, c обмотки ротора. Матриці активних опорів статора і приведених до статора активних опорів ротора мають такий вигляд:

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix}; [R_r] = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обертовий магнітний потік взаємоіндукції створює потокозчеплення машини, обумовлене протіканням струму намагнічування. Потокозчеплення будь-якої фази статора або ротора визначаються величиною власної індуктивності обмоток і взаємної індуктивності з усіма іншими обмотками.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1 представлено схему моделювання процесу пуску асинхронного двигуна для привода роторно-пульсаційної установки в програмному пакеті Matlab Simulink. При моделюванні роботи асинхронного двигуна використовується такий алгоритм. Віртуальна модель

асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (Asynchronous Machine) була вибрана із розділу бібліотеки SimPowerSystem в абсолютних одиницях (SI Units). У рядку Rotor type даного блоку вибираємо варіант Squirrel cage – короткозамкнений двигун (з білячою кліткою). У рядку Reference frame вибираємо варіант вибору системи координат – Stationary (нерухома система). Розраховані параметри схеми заміщення АД записуються у вікні Parameters. На вкладці Configuration вибираємо пункт Use signal names to identify bus labels.

У властивостях шини Bus Selector вибираємо значення струмів фаз обмотки ротора (i_{ar} , i_{br} , i_{cr}), швидкість обертання ротора (ω) та електромагнітний момент двигуна (T_e). Значення струмів фаз обмотки статора та напруги виводиться за допомогою блоків From (Signal routing). До входу T_m задається активний момент навантаження в Н·м. Час моделювання пуску АД прийнято 1,4 секунди. Повний час моделювання процесу складає 2 секунди. Для переведення величини вимірювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна з рад/с в об/хв було використано блок Gain.

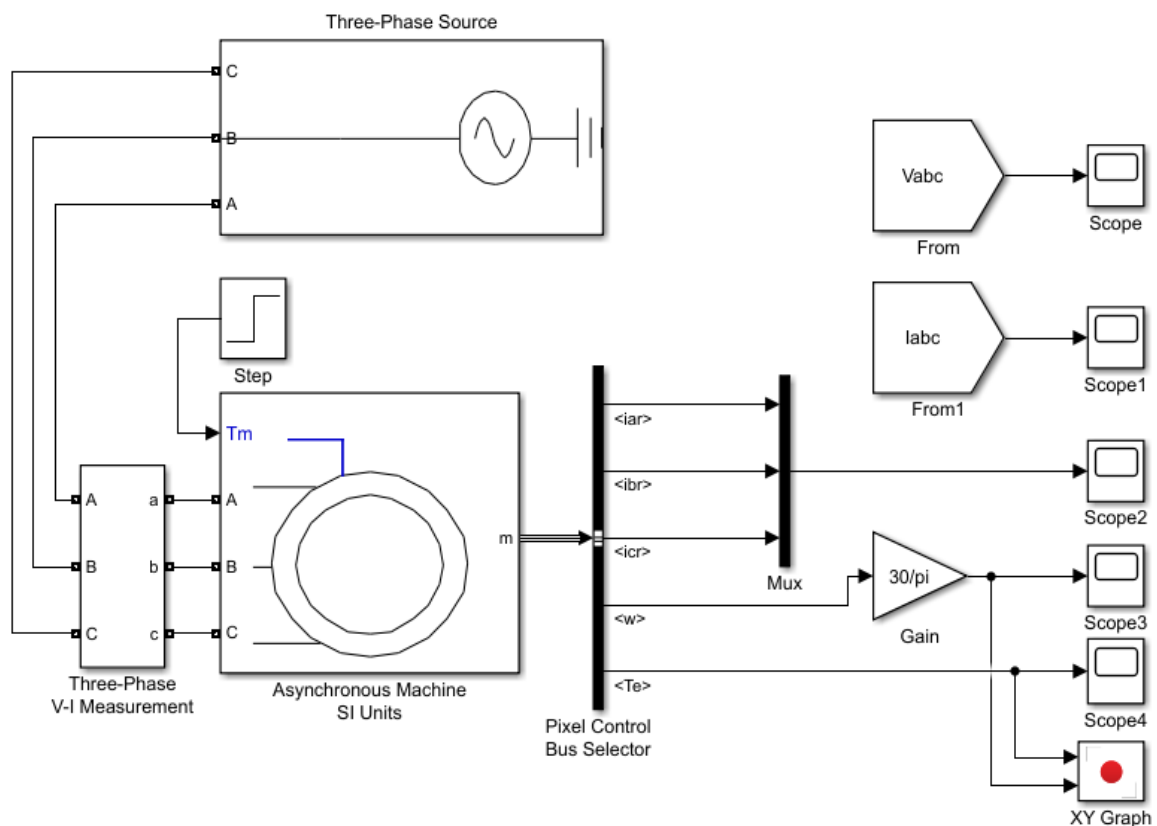


Рис. 1. Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмному пакеті Matlab Simulink

Результати досліджень та їх обговорення. Динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна можна отримати тільки за результатами розрахунків перехідних процесів швидкості обертання ротора асинхронного двигуна та його електромагнітного моменту. На рис. 2-4 показано отримані результати моделювання перехідних процесів струму в обмотках статора, моменту та швидкості обертання ротора асинхронного двигуна серії 4АМУ90L2, який вибраний для приводу роторно-пульсаційної установки без використання частотного перетворювача.

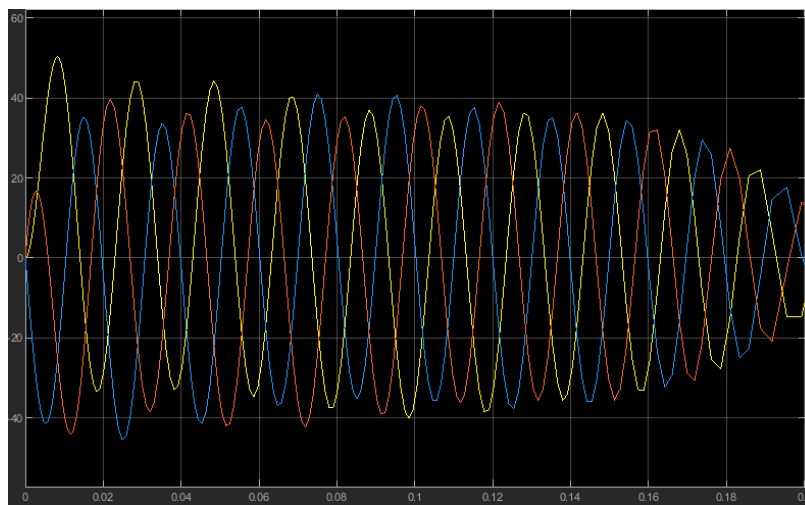


Рис. 2. Струми в обмотці статора при пуску АД

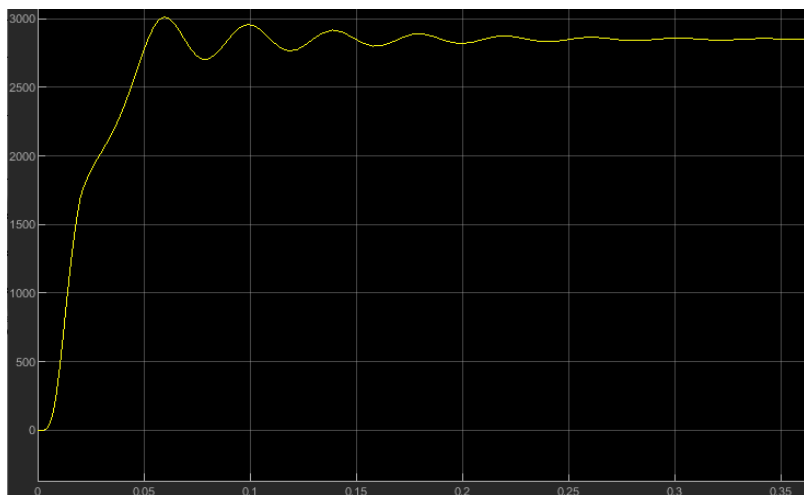


Рис. 3. Швидкість обертання ротора АД

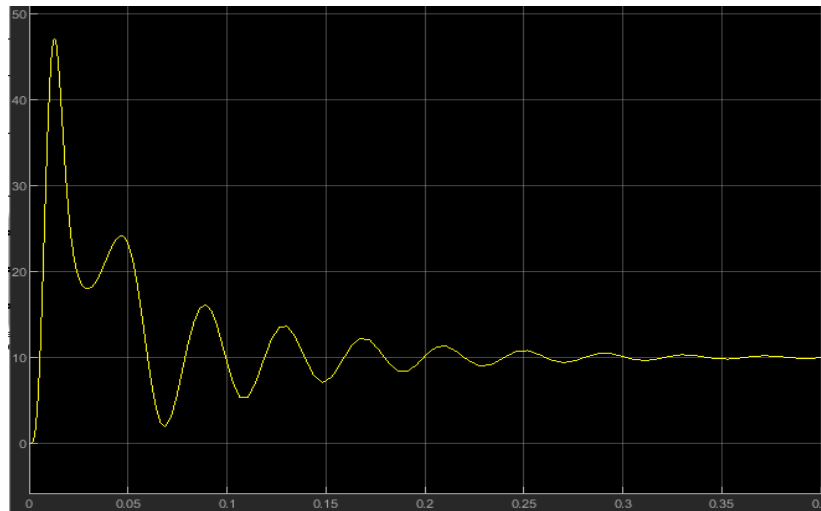


Рис. 4. Електромагнітний момент на валу асинхронного двигуна

При пуску асинхронного двигуна на нього подається напруга з прямим чергуванням фаз, починається процес розгону двигуна під номінальним навантаженням 10,05 Н·м. Пусковий струм в обмотці статора досягає свого амплітудного значення в 41,75 А. Приблизно такого ж значення досягає струм в обмотці ротора, оскільки виводиться приведені значення струму ротора в його обмотці до струму в обмотці статора. Максимальне значення електромагнітного моменту двигуна при пуску становить приблизно 47,15 Н·м. Він носить коливальний характер, що в свою чергу призводить до погіршення пускових характеристик двигуна і є недоліком усіх асинхронних машин. При підвищенні частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна коливання моменту поступово згасають. При цьому струми в обмотках статора зменшуються при сталій частоті в 50 Гц. Струми в обмотці ротора також зменшується, але частота струмів ротора разом з тим зменшується. Це явище пояснюється вибором нерухомої системи координат.

На рис. 5 наведено динамічну механічну характеристику, отриману під час пуску асинхронного двигуна. Динамічна механічна характеристика визначається не лише параметрами схеми заміщення асинхронного двигуна, але й параметрами електропривода, такими як зведений момент інерції та момент опору на валу двигуна. Звідси випливає, що асинхронний двигун при цих параметрах мережі живлення та схемі заміщення має одну статичну і безліч динамічних механічних

характеристик. Слід врахувати, що облік лише статичної характеристики асинхронного двигуна може призвести до не зовсім вірних результатів та спотворення характеру динамічних навантажень при пуску установки [7]. Коливальні процеси моменту при пуску електродвигуна можна побачити на вершині графіка (рис. 5) при пікових значеннях частоти обертання ротора двигуна.

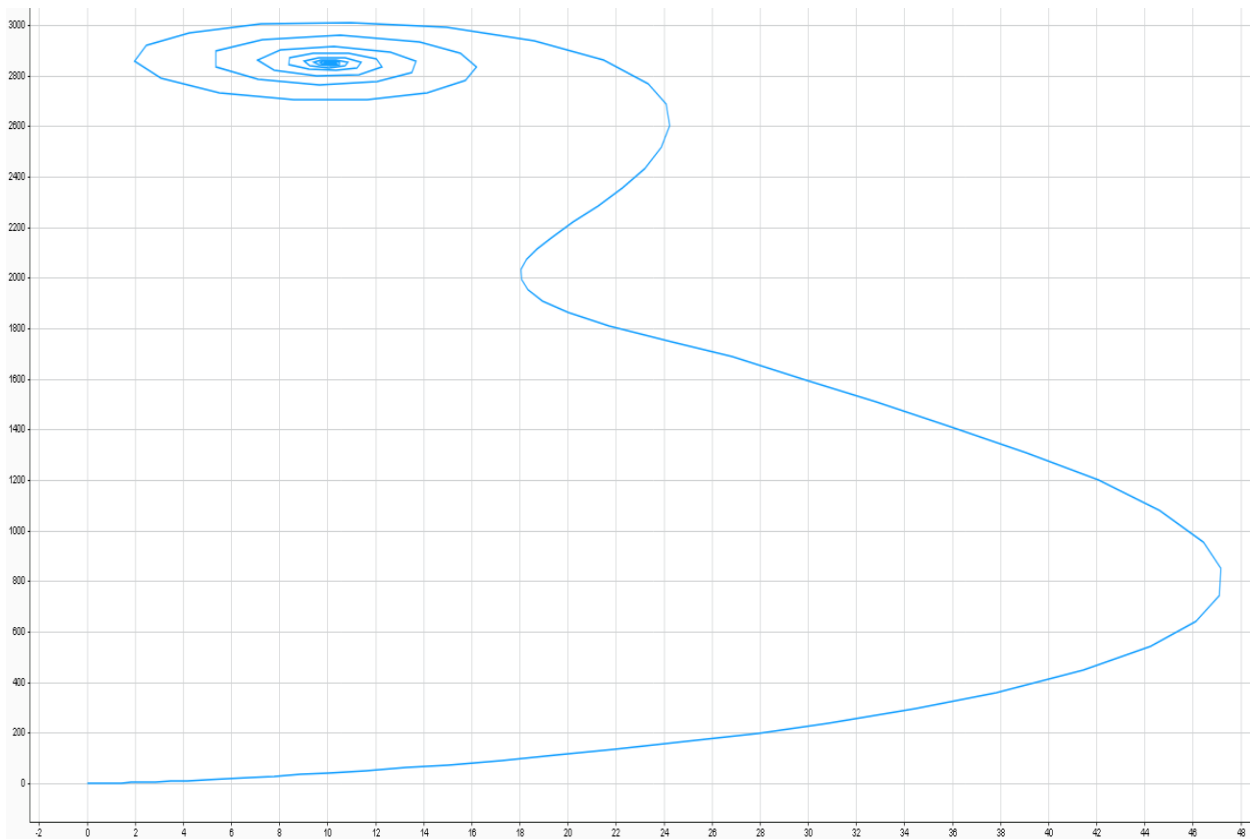


Рис. 5. Динамічна механічна характеристика при пуску АД

Аналіз динамічної механічної характеристики асинхронного двигуна показує, що максимальні ударні моменти при пуску перевищують номінальний момент статичної механічної характеристики більш ніж в 4,5 рази. Ударні моменти при пуску, і особливо при реверсі асинхронного двигуна, призводять до виходу з ладу кінематики виробничих механізмів і самого асинхронного двигуна. На кривій динамічного моменту є негативні провали, внаслідок чого результуючий момент при пуску АД буде меншим максимально можливого моменту. Звідси можна зробити висновок про те, що якщо при пуску двигуна будь-яким чином формувати його динамічні характеристики, виключаючи або зменшуючи негативні провали на

кривій моменту, то можливо істотно підвищити пускову здатність установки. З метою усунення аварійного режиму під час пуску асинхронного двигуна використаний такий прилад як частотний перетворювач. Частотні перетворювачі дозволяють здійснювати м'який пуск електричних машин, обмежувати пускові струми, синхронізувати момент сили на валу з моментом навантаження, здійснювати точне регулювання швидкості обертання, підключати трифазні двигуни в однофазну мережу без конденсаторів.

Далі для порівняльного аналізу проведено моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача.

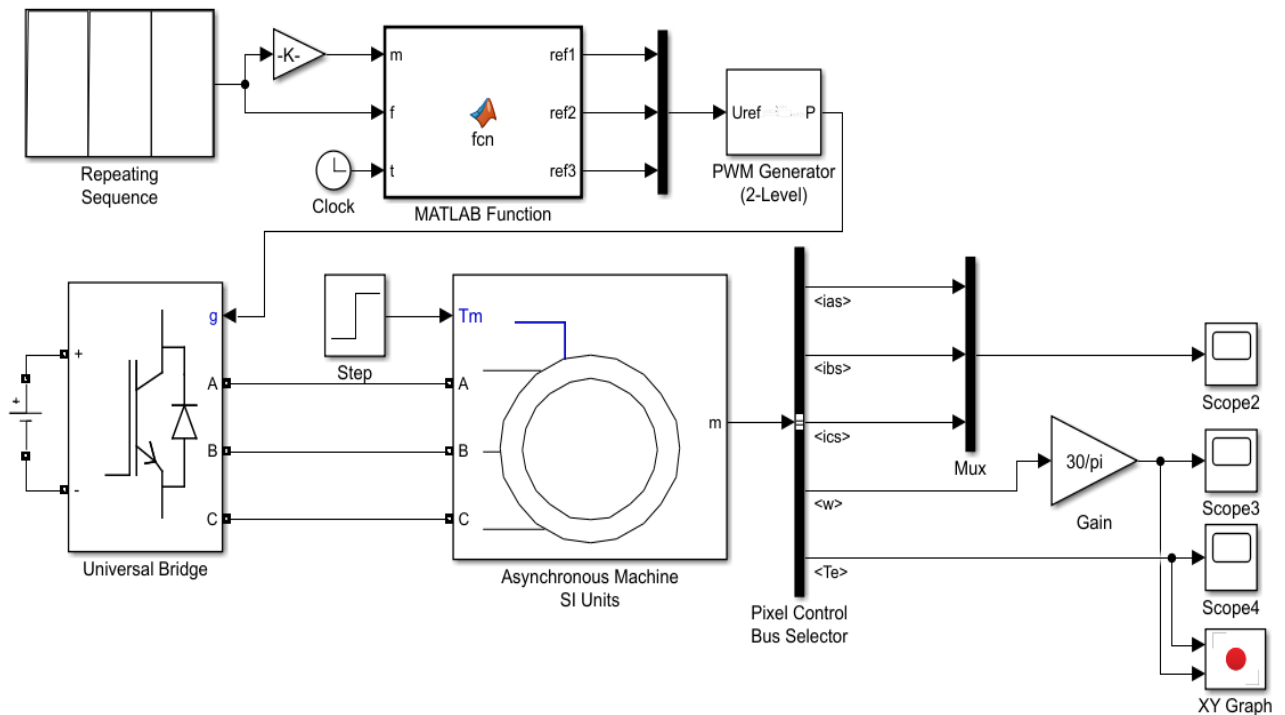


Рис. 6. Схема моделювання пуску АД з частотним перетворювачем

На рис. 6 представлено схему електротехнічного комплексу при моделюванні процесу пуску асинхронного двигуна з використанням частотного перетворювача в програмному пакеті Matlab Simulink. Частотний перетворювач представлений блоками Universal Bridge – універсальний трифазний перетворювач електроенергії та PWM Generator – генератор імпульсів для перетворювача на основі широтно-імпульсної модуляції з використанням дворівневої топології. Блок Repeating

Sequence призначений для виводу періодичного скалярного сигналу із заданою нами формою. В блоці Matlab Function вводяться функції для заданих параметрів коефіцієнту модуляції, часу і частоти. У діалоговому вікні блока Universal Bridge необхідно вибрати потрібний силовий електронний пристрій (Power Electronic device), а саме – IGBT / Diodes.

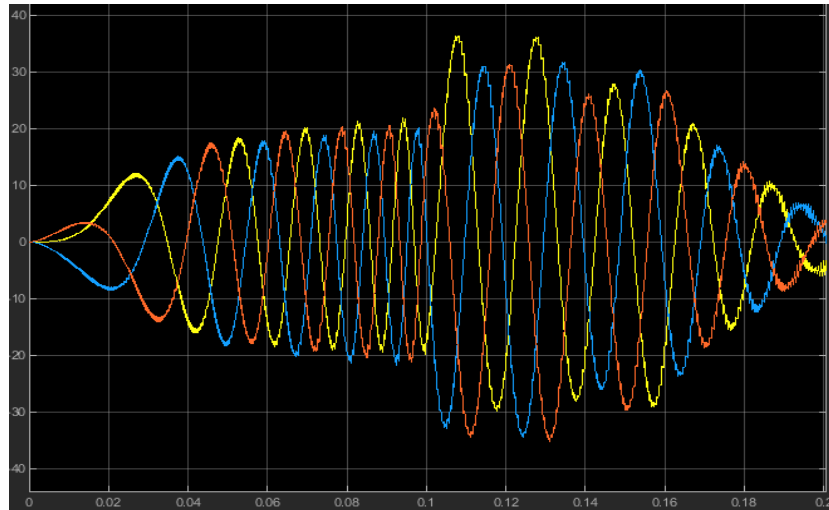


Рис. 7. Струм в обмотках статора при пуску АД з використанням ЧП

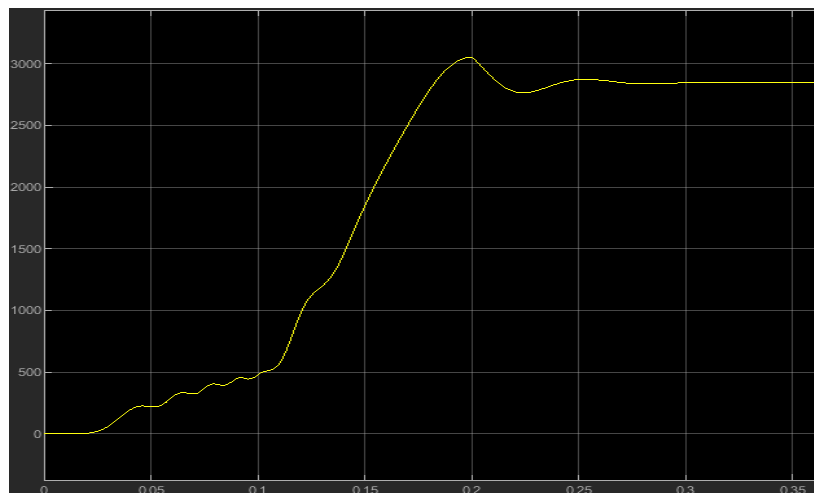


Рис. 8. Швидкість обертання ротора АД при пуску з використанням ЧП

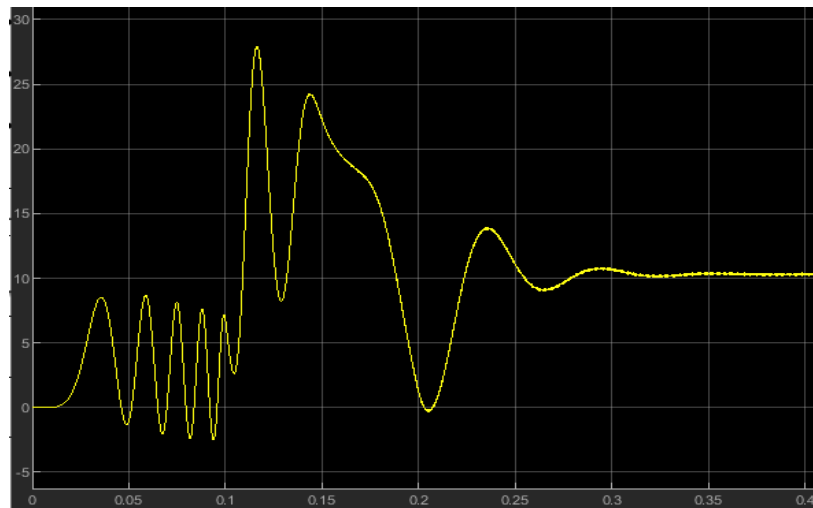


Рис. 9. Електромагнітний момент на валу АД при пуску з використанням ЧП

На рис. 7-10 показані результати моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача.

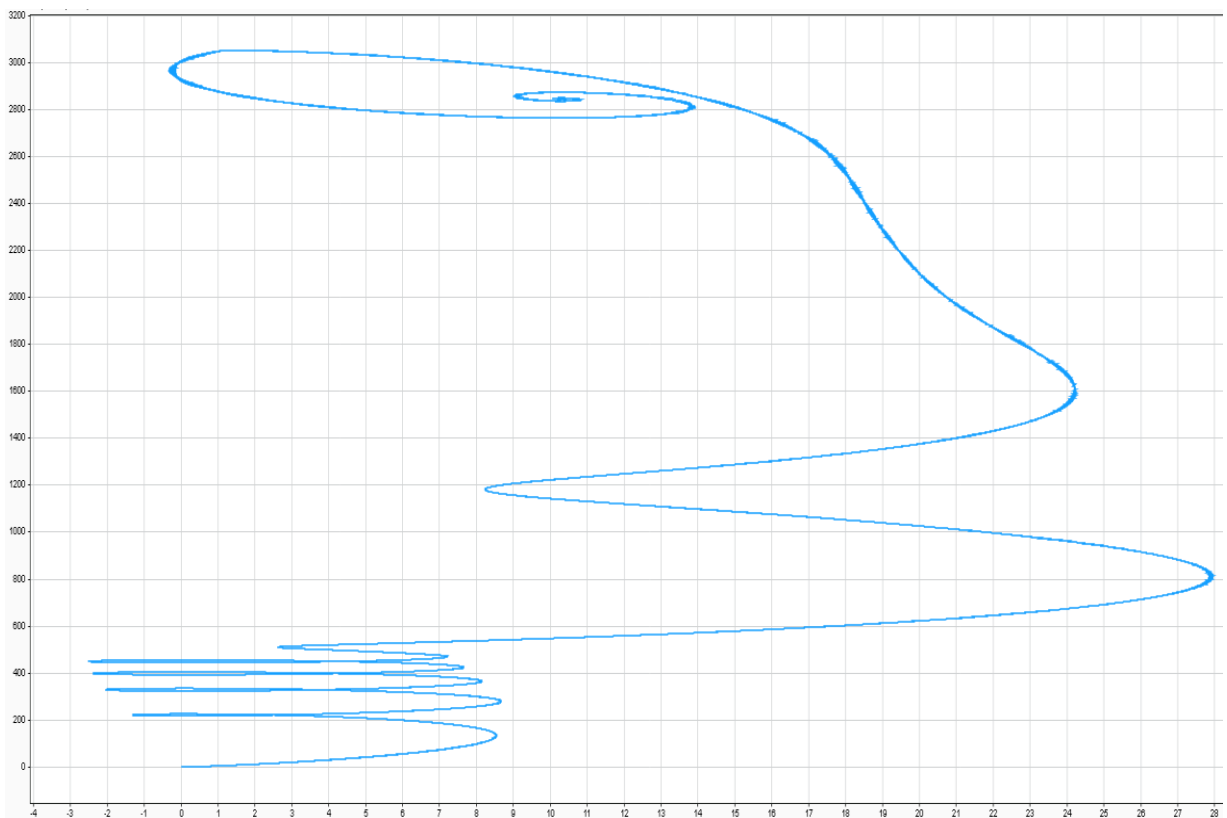


Рис. 10. Динамічна механічна характеристика АД при його пуску з використанням частотного перетворювача

Порівнюючи результати моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна з використанням частотного перетворювача та без

нього можна зробити висновок, що при використанні частотного перетворювача для можливості плавного пуску АД його пускові струми та електромагнітний момент суттєво зменшуються порівняно з результатами без використання частотного перетворювача. Використання частотного перетворювача для покращення пуску асинхронного електродвигуна роторно-пульсаційного апарата дозволяє усунути аварійні режими роботи та забезпечити більшу надійність роботи роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів.

Висновки і перспективи.

1. Проведено моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна для приводу роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів за наявності і відсутності частотного перетворювача з використанням пакету прикладних програм Matlab Simulink.

2. Отримано графіки значень пускових струмів в обмотці статора, зміни швидкості обертання ротора та електромагнітного моменту на валу двигуна при його пуску. На основі останніх отримано динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна в момент його пуску, проведений порівняльний аналіз отриманих результатів.

3. Показано, що використання частотного перетворювача суттєво покращує пускові характеристики асинхронного двигуна, що в свою чергу забезпечує надійність роботи та безперебійність процесу приготування рідких зернових кормів в роторно-пульсаційному апараті.

Список використаних джерел

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: за ред. д-ра техн. наук, професора В. І. Мілих. Київ: Каравела, 2018. 452 с.
2. Sotnik O. V., Sorokin M. S. Research of ways to improve the start of the asynchronous motor of an agricultural machine. Engineering of nature management. 2022. 1(23). pp. 74 - 80.
3. Кондратюк О. Ю., Егоров А. Б. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты. Системы обработки інформації. 2006. Вип. 4 (53). С. 79-86.
4. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Храмшин Р.Я. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных

двигателей. Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3, №1. С. 36 – 40.

5. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: учебное пособие. – омск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 320 с.

6. Anand B., Aspalli M. Dynamic dq model of induction motor using Simulink. Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2015, vol. 24 (5), pp. 252–257.

7. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. International Conference on Applied Sciences. 2015. P.1-6.

References

1. Ostashevskij, M. O., Yur'yeva, O. Yu. (2018). Elektrichni mashini i transformatori: navch. posibnik [Electric machines and transformers]. Kyiv: Karavela, 452.

2. Sotnik, O. V., Sorokin, M. S. (2022). Research of ways to improve the start of the asynchronous motor of an agricultural machine. Engineering of nature management, 1(23), 74 - 80.

3. Kondratyuk, O. Yu., Egorov, A. B. (2006). Analiz avarijnyh rezhimov raboty asinhronnyh dvigatelej k voprosu vybora ih effektivnoj zashity [Analysis of emergency modes of operation of asynchronous motors to the question of choosing their effective protection]. Sistemi obrobki informaciyi, 4 (53), 79-86.

4. Mugalimov, R.G., Mugalimova, A.R., Hramshin, R.Ya. (2016). Sravnitelnyj analiz metodik rascheta parametrov elektricheskikh shem zamesheniya asinhronnyh dvigatelej [Comparative analysis of methods for calculating the parameters of electrical equivalent circuits of asynchronous motors]. Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal, 3, 36 – 40.

5. Terehin, V. B. (2008). Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink [Modeling Drive Systems in Simulink]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 320.

6. Anand, B., Aspalli, M. (2015). Dynamic dq model of induction motor using Simulink. Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 24 (5), 252–257.

7. Chioncel, C. P., Tirian, G. O., Gillich, N., Raduca, E. (2016). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. International Conference on Applied Sciences, 1-6.

INVESTIGATION OF THE STARTING CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR FOR DRIVING A ROTOR-PULSATION APPARATUS USING A FREQUENCY CONVERTER

V. Gorobets, A. Serdiuk

Abstract. *The method was used to carry out mathematical modeling for the follow-up of transitional processes during the start-up of an asynchronous engine to drive a rotary-pulsation apparatus for the preparation of water-grain feed for the clarity and frequency of the frequency changer.*

Mathematical modeling of transient processes during the start-up of an asynchronous electric motor for driving a rotary-pulsation apparatus for the preparation of liquid grain feed in the absence and presence of a frequency converter was carried out using the Matlab Simulink application program package. The following start-up parameters of the asynchronous motor were obtained: the current in the stator windings, the speed of rotation of the rotor and the electromagnetic moment on the motor shaft. The dynamic mechanical characteristics of the asynchronous motor during its start-up are obtained. A comparative analysis of simulation results with and without the use of a frequency converter was carried out. It is shown that the use of a frequency converter significantly improves the starting characteristics of an asynchronous motor.

Key words: *rotor-pulsation apparatus, asynchronous motor, frequency converter, transient processes during start-up*