

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ «ПРИСТРІЙ ПЛАВНОГО ПУСКУ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН» В РЕЖИМІ РОБОТИ ІЗ ЗНИЖЕНОЮ ШВИДКІСТЮ

В статті проведено дослідження роботи системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» із зниженою швидкістю. Відносна дешевизна тиристорних пристроїв пуску асинхронних двигунів у порівнянні з перетворювачами частоти приводить їх все частішого встановлення на виробництві. Проте реалізація деяких режимів роботи, таких як обертання із пониженою тестовою швидкістю, не завжди може бути здійснена для певної технологічної установки. Особливо це стосується збільшення амплітуди коливань швидкості при збільшенні крутного моменту двигуна. В роботі приведені налаштування серійного пристрою плавного пуску SSW900 від компанії WEG, що впливають на роботу асинхронного двигуна із зниженою швидкістю. Для дослідження впливу в роботі складена модель у програмному середовищі MATLAB із використанням додатку Simulink. При цьому визначена відповідність параметрів функціональних моделей налаштуванням існуючого пристрою плавного пуску. Зниження швидкості обертання двигуна забезпечується за рахунок зменшення частоти і, відповідно, амплітуди напруги, що прикладається. Для зменшення несучої частоти відносно частоти живлення використовується режим пропуску певних напівхвиль напруги. В MATLAB це реалізується завдяки використанню блоків Pulse_generator, які пропускають імпульси керування лише в дозволені проміжки часу. Шляхом зміни кута відпирання тиристорів були отримані графіки перехідних процесів за швидкістю та визначені амплітуди коливань при вентиляторному характері навантаження. Крім того, були отримані результати дослідження системи на фізичній моделі та здійснений порівняльний аналіз результатів. Так, формування зниженої частоти, запропоноване при розробці математичної моделі в MATLAB забезпечує зниження швидкості роботи двигуна до 1/7 від номінальної. Амплітуда коливань швидкості при завданні максимального крутного моменту сягає значень, що значно обмежують можливість використання даного режиму для тривалої роботи обладнання, що підтверджується також експериментальними дослідженнями.

Ключові слова: пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, швидкість тестування, кут відпирання, математичне моделювання

Вступ. В сучасному виробництві для регулювання швидкості асинхронних двигунів найчастіше використовуються перетворювачі частоти. Вони забезпечують досить широкий діапазон регулювання, практично незмінний крутний момент двигуна, високу жорсткість статичних характеристик. В той же час, коли швидкість регулювати не потрібно, а лише здійснювати плавний розгін та сповільнення двигуна, на виробництві досить успішно використовуються пристрої плавного пуску. Фактично, вони є тиристорними регуляторами напруги, що зазвичай мають два сталі значення напруги на виході – напруга повна або відсутня. Зміна напруги від одного сталого значення до іншого може здійснюватись за різними законами, відповідно до характеру механізму та мережі живлення [1,2]. Так, наприклад, при обмеженні потужності джерела живлення використовується функція обмеження струму статора і тиристори відкриваються в залежності від сигналів замкненої системи керування [3].

Крім спеціалізованих функцій пуску та зупинки багатфункціональні пристрої плавного пуску можуть реалізувати, так звані «сервісні» функції. До них відносяться прогрів обмоток двигуна, реалізація реверсу, гальмування постійним та пульсуючим струмом, а також робота із зниженою швидкістю (JOG - режим) [4]. В останньому режимі роботи двигун обертається із суттєво нижчою швидкістю та розвиває до 75% крутного моменту. Він використовується для тестування працездатності обладнання та двигуна після ремонту, переміщення механізму у потрібне положення тощо.

Недоліком роботи двигуна в цьому режимі є суттєвий перегрів обмоток внаслідок погіршення обдування його поверхні та суттєві коливання крутного моменту і, відповідно, швидкості двигуна. Якщо перегрів обмоток двигуна можна уникнути шляхом встановлення часового обмеження на роботу в цьому режимі, то коливання швидкості можуть привести до поломки виконавчого механізму та обладнання в цілому. Цей факт необхідно враховувати інженерам при наладці обладнання для роботи із пониженою швидкістю.

В пристроях плавного пуску одного із відомих виробників двигунів та пристроїв плавного пуску WEG для налаштування режиму виведено лише один параметр C7.3.2 JOG і значення задається в діапазоні 10..100%, як можна побачити на рис.1. Допустимий час роботи при цьому розраховується відповідно до заданих параметрів двигуна і не може коригуватися напряму [5].

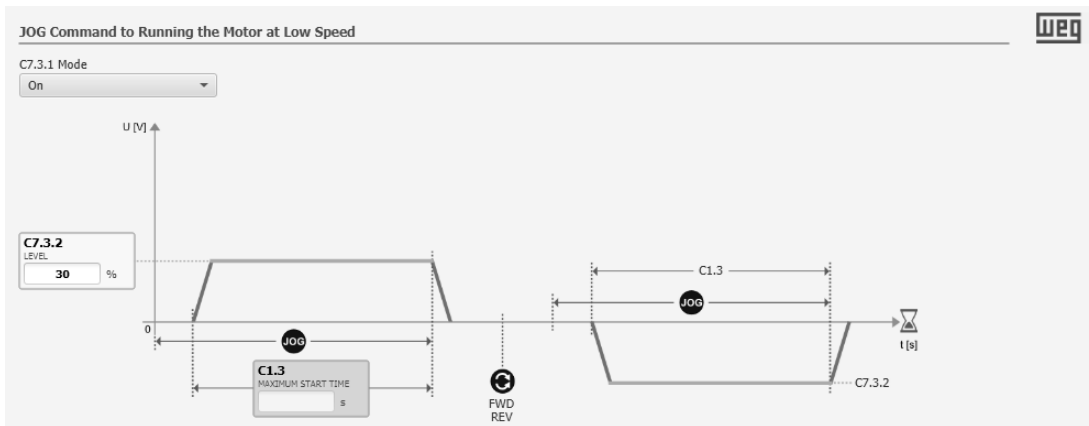


Рисунок 1 - Параметри налаштування режиму JOG в програмному забезпеченні WPS для пристрою плавного пуску SSW900 WEG.

Рекомендацій щодо встановлення значення JOG, а також якихось пояснень що відповідає 100% значення виробник не дає, що суттєво ускладнює налаштування системи інженерно – технічним персоналом. Одним із способів врахування можливих коливань та їх впливу на механічну частину обладнання є дослідження роботи асинхронного двигуна методом цифрового моделювання. Амплітуда коливань, що отримані в результаті моделювання двигуна можуть бути в подальшому використані для аналізу можливості реалізації цього режиму для певного технологічного обладнання взагалі. Тому отримання моделі, за допомогою якої інженери зможуть враховувати можливі коливання двигуна є актуальною проблемою.

Мета та завдання. Метою даної статті є розробка математичної моделі системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску» з реалізацією функції роботи на пониженій швидкості.

Матеріал і результати досліджень Внаслідок широкого розповсюдження та впізнаності доцільно для математичного моделювання використовувати програмне забезпечення MATLAB та його додатку Simulink [6]. Наповненість готових рішень та моделей дозволяє не розробляти модель «з нуля», а застосовувати базу з реалізацією необхідних окремих функцій. Аналіз пуску асинхронних двигунів від пристрою плавного пуску із лінійною зміною напруги саме із цим програмним забезпеченням в літературі досить популярний і дає можливість досліджувати одночасно декілька параметрів двигуна [7-9]. Ми використаємо модель електромеханічної системи, представлену [10], в якій забезпечується розімкнене та замкнене керування напругою при вентиляторному характері навантаження. Зовнішній вигляд моделі представлений на рис.2.

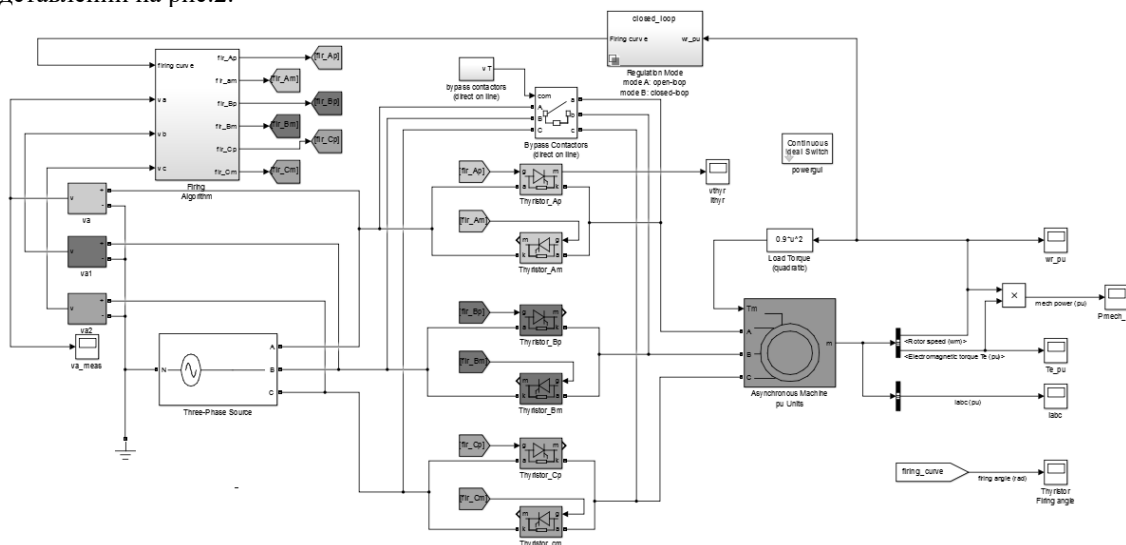


Рисунок 2. Вихідна схема системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску»

Вибір способу керування, а також спосіб зміни кута відпирання тиристорів реалізується в блоці Regulation_mode. Відповідне значення кута відпирання подається на блок Firing_algorithm, де він перетворюється на імпульси для керування окремими тиристорами. Оскільки в режимі JOG плавний розгін або сповільнення двигуна не використовуються, на вхід firing_curve будемо подавати фіксоване значення кута відпирання. Також потребує зміни і блок Firing_algorithm для реалізації пониженої швидкості.

Оскільки тиристорний регулятор напруги не вміє змінювати частоту живлення двигуна шляхом зміни кута відпирання, то єдиним способом зниження частоти є пропуск декількох напівхвиль напруги мережі. При цьому послідовність фаз на обмотках двигуна повинна бути незмінною. Розглянемо роботу такої системи відповідно до графіків, представлених на рис.3. Для рівномірного обертання двигуна в додатному напрямку повинна виконуватись послідовність подачі напруг AB+, CA-, BC+,AB-,CA+,BC-. При цьому швидкість обертання відповідатиме частоті живлення 50Гц.

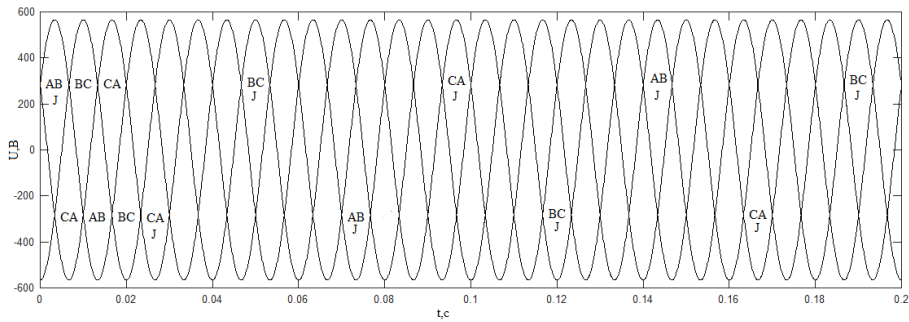


Рисунок 3. Графік послідовності подачі напруги на обмотки двигуна.

При необхідності зниження швидкості перша напівхвиля CA пропускається системою керування і проходить лише наступна від'ємна CA(J) починаючи з 0,02с. Далі блокуються перші дві додатні напівхвилі BC і проходить лише третя BC(J) починаючи з 0,04с. Алгоритм повторюється аналогічним чином, причому додатня напівхвиля AB пропускається системою керування на 0,14с, що свідчить про зменшення реальної частоти напруги в 7 разів.

Оскільки процес «вирізання» зайвих імпульсів має періодичний характер найпростіше його реалізувати за допомогою блоку Pulse_generator. При цьому схема розподілення імпульсів з урахуванням впливу блокування генераторів імпульсів має вигляд, представлений на рис.3.

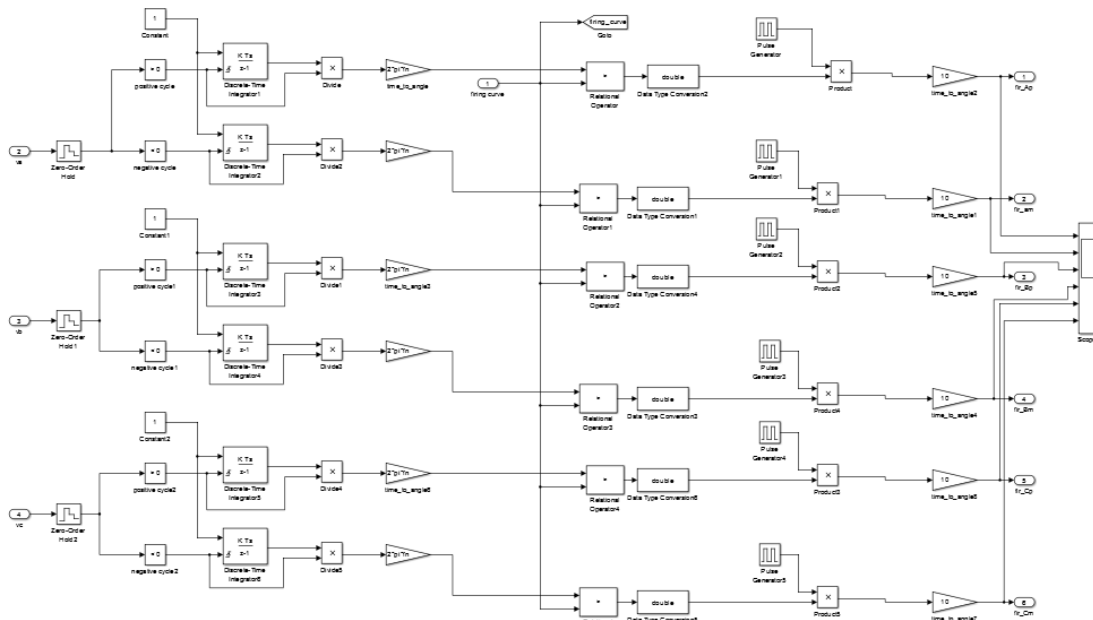


Рисунок 3. – Блок реалізації розподілення імпульсів Firing_algorithm з «вирізанням» зайвих імпульсів керування

При зниженні частоти живлення двигуна для уникнення перегріву обмоток та для збереження крутного моменту необхідно відповідно керувати напругою. За умовою збереження постійного

співвідношення амплітуди і частоти напруги за законом Костенко крутний момент двигуна залишатиметься постійним. В той же час відповідно до [підручник] рівнодіюча амплітуда напруги повзучої швидкості не може перевищувати 22% від амплітуди напруги мережі при куті відпирання $\alpha > \pi/3$.

Вікно налаштування блоків Pulse_generator представлено на рис.4. Період спрацьовування сигналу на передачу імпульсу встановлюємо відповідно новій несучій частоті, при цьому дозвіл діє лише 10% від цього періоду, тобто 0,014с. Для кожного з каналів керування тиристорів налаштуємо своє значення phase_delay (для додатної напівхвилі фази А це значення складатиме 0.000).

Після налаштування блоків Pulse_generator здійснювалось математичне моделювання системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску» із зміною кута відпирання тиристорів α від $\pi/3$ до π . При цьому для різних значень α були отримані графіки перехідних процесів за швидкістю, представлені на рис.5-7.

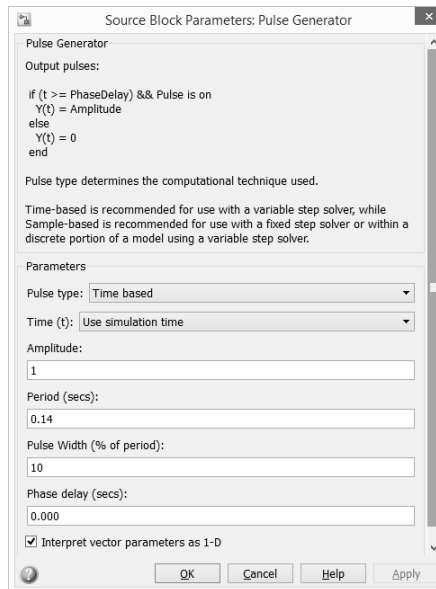


Рисунок 4 – Вікно налаштування параметрів спрацьовування каналу передачі імпульсів

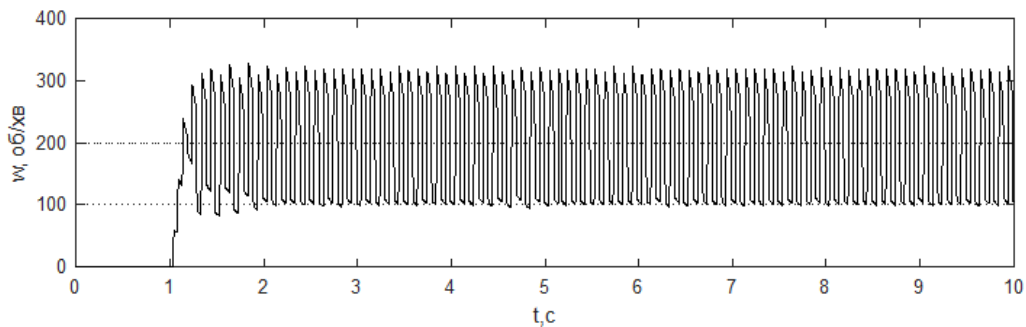


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання $\alpha=1,2$ рад

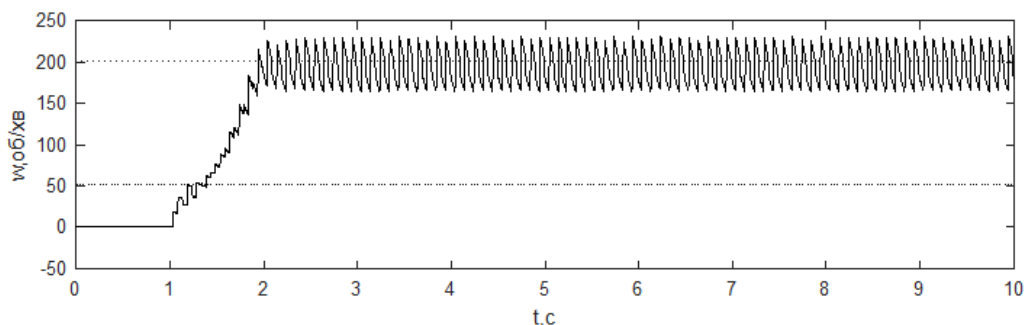


Рисунок 6 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання $\alpha=1,5$ рад

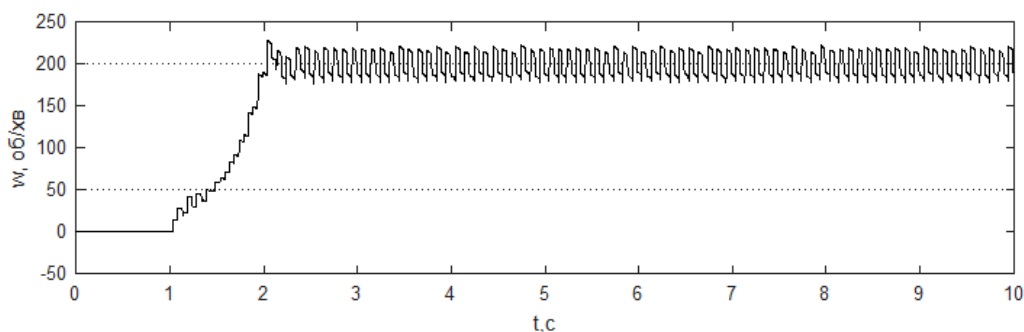


Рисунок 7 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання $\alpha=1,7$ рад

Для перевірки результатів моделювання використовувалось також дослідження системи на фізичній моделі з використанням пристрою плавного пуску SSW900A0010T5E2 WEG та асинхронного двигуна MDEMAIG063-42C1C Lenze із встановленим інкрементальним енкодером на 2048 імп/оберт. Вихід енкодера був під'єднаний до частотного входу пристрою з функцією осцилографа і часом опитування сигналу з швидкістю 5мс. В якості навантаження використовувався вентилятор, встановлений безпосередньо на валу двигуна.

Змінюючи значення параметру C7.3.2 пристрою плавного пуску у відсотках були отримані графіки перехідного процесу за швидкістю. При встановленні потужності JOG=100% мають місце суттєві коливання швидкості, проте середнє значення складає близько 200 Об/хв., що становить 1/7 номінальної швидкості підключеного двигуна. Графік перехідного процесу за швидкістю представлений на рис.8.

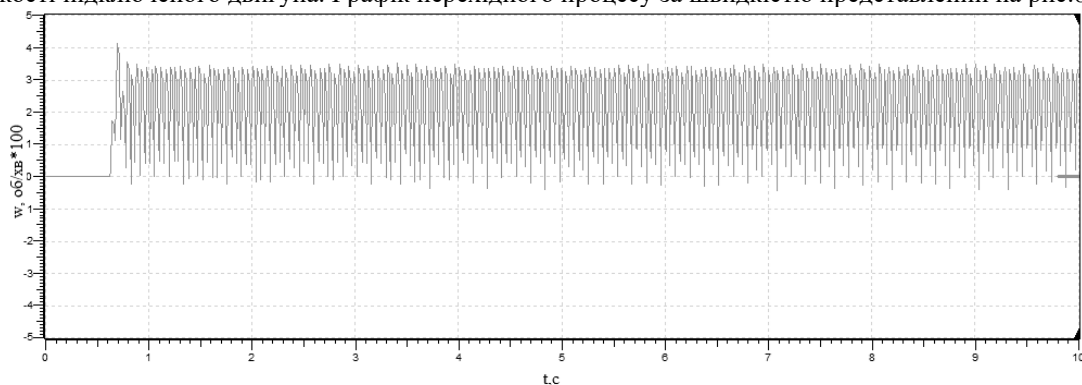


Рисунок 8 - Графік перехідного процесу за швидкістю при JOG=100%

При зменшенні значення JOG до 30% та 10% відповідно відбулося зниження пульсацій швидкості, проте швидкість руху залишилася незмінною, що можна побачити з графіків на рис.9 та рис.10 відповідно.

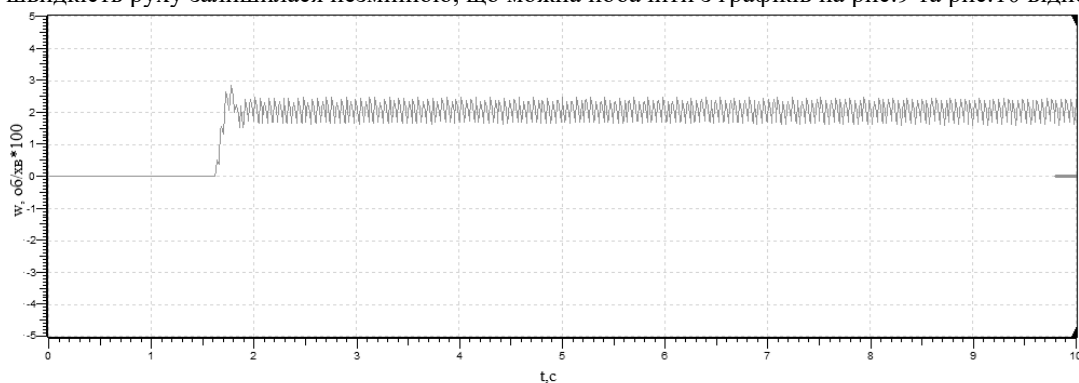


Рисунок 9 - Графік перехідного процесу за швидкістю при JOG=30%

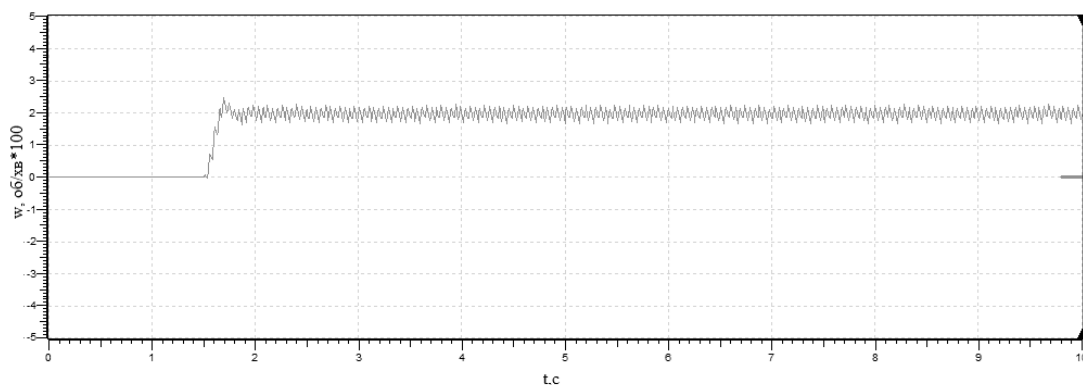


Рисунок 10 - Графік переходного процесу за швидкістю при JOG=10%

Висновки

1. При зміні кута відпирання швидкість обертання двигуна не змінювалась, проте значно збільшувалась амплітуда її амплітуда коливань і складала до 50% від заданої швидкості.
2. Встановлення значення JOG=100% або відповідному ньому кута відпирання в моделі коливання сягають до 10% від номінального значення швидкості двигуна, що значно ускладнює використання цього режиму для електромеханічних систем із суттєвою пружністю, наприклад при послабленні передаточного реміня. В той же час при вентиляторному характері навантаження таке значення не є доцільним, оскільки стійкий рух вентилятора на зниженій швидкості відбувався вже при JOG=10%.
3. Подальший аналіз можливості реалізації досліджуваного режиму можливий з урахуванням не тільки статичних, а й динамічних властивостей виконавчого механізму або всієї установки.

Список використаної літератури

1. Мясовский В.А. Сравнение режимов задания напряжения при пуске асинхронного двигателя с устройством плавного пуска и прямого пуска / В. А. Мясовский// Молодой ученый. — 2020. — № 21 (311). — С. 520-527.
2. Петрушин В.С. Исследование плавного пуска асинхронного двигателя/ В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев// Технічна електродинаміка - №1 – 2018 – с. 56 – 61 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.056>
3. Голодный И.М. Исследование пуска электропривода насоса дождевальной установки с функцией ограничения потребляемой мощности/И.М. Голодный, А.В.Торопов //Вісник Національного університету біоресурсів та природокористування. Серія: Техніка та енергетика АПК. - №268.-2018. - с.180-188 <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>
4. І.М. Голодний та ін. «Регульований електропривод», К. Україна: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. - 509с.
5. Soft Starter Induction Motor Model. – Режим доступу: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb9/h36/WEG-programing-manual-10003989140-SSW900-en.pdf>
6. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
7. Акопян К.А. Исследование режима работы асинхронного двигателя с устройством плавного пуска в среде MATLAB/ К.А. Акопян , А.Е. Власов, Б.Н. Кантлоков.// Тенденции развития науки и образования. Серия: VII Технические науки. -№.1. с.9-11 doi:10.18411/lj-07-2018-28
8. Назаренко В.Н. Моделирование устройств плавного пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в среде MATLAB SIMULINK/ В.Н.Назаренко, К.В. Назаренко//Збірник наукових праць ШУУЯЕтаП. Розділ «Інформаційні системи і технології», 2018 - с.207–217.
9. Ещин Е.К. Работа асинхронного электродвигателя с устройством плавного пуска /Е.К. Ещин, И.А. Соколов// Известия вузов. Электромеханика. - №5 (547)- 2016. - с.53-58 DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-53-58
10. Soft-Starter SSW900 Programming Manual – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49605-soft-starter-inductionmotor-model>

A. Toropov, Ph.D. (Eng), associate professor, ORCID 0000-0001-8505-0266
L. Toropova, assistant, ORCID 0000-0001-6882-2295
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DYNAMIC CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF THE SYSTEM "SOFTSTARTER - INDUCTION MOTOR" IN THE MODE OF OPERATION WITH REDUCED SPEED

In the article operation of the system "softstarter - induction motor" with reduced speed is carried out. The relative cheapness of thyristor starting devices for induction motors in comparison with frequency inverters leads to their increasing of industry installation. However, the implementation of some modes of operation, such as rotation at a reduced test speed, may not always be possible for particular processes. This is especially true of increasing the amplitude of speed fluctuations with increasing motor torque. The paper presents the settings of the serial starter SSW900 from WEG, which affect the operation of the induction motor at low speed. To study the impact in the work, a model was compiled in the MATLAB software environment using the Simulink application. The correspondence of the parameters of the functional models to the settings of the existing soft-start device is determined. The reduction of the motor speed is provided by reducing the frequency and, accordingly, the amplitude of the voltage applied to the motor windings. To reduce the carrier frequency relative to the supply frequency, the mode of passing certain voltage half-waves is used. In MATLAB, this is achieved through the use of Pulse_generator blocks, which pass control pulses only at permitted intervals. By changing the opening angle of the thyristors, graphs of transients in velocity were obtained and the amplitudes of oscillations at the fan nature of the load were determined. In addition, the results of the study of the system on a physical model were obtained and a comparative analysis of the results was performed. Thus, the formation of reduced frequency, proposed in the development of a mathematical model in MATLAB provides a reduction in engine speed to 1/7 of the nominal. The amplitude of speed fluctuations when setting the maximum torque reaches values that significantly limit the possibility of using this mode for long-term operation of the equipment, which is also confirmed by experimental studies.

Keywords: softstarter, induction motor, test speed, firing angle, mathematical modeling.

References

1. Myasovsky V.A. Comparison of voltage setting modes when starting an induction motor with a device for smooth start and direct start / V.A. Myasovsky // *Young Scientist*. - 2020. - № 21 (311). – p.520-527.
2. Petrushin V.S. Research of smooth start of the asynchronous engine / V.S. Петрушин, А.М. Yakimets, Yu.R. Plotkin, R.N. Enoktaev // *Technical electrodynamics* - №1 - 2018 - p. 56 - 61 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.056>
3. Golodny I.M. Investigation of the start of the electric drive of the sprinkler pump with the function of limiting the power consumption / I.M. Golodny, A.V. Toropov // *Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex*. - №268.-2018. - p.180-188 <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>
4. I.M. Golodny and others. "Adjustable electric drive", K. Ukraine: LLC "CP" Comprint ", 2015. - 509p.
5. Soft Starter Induction Motor Model – Access mode: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb9/h36/WEG-programing-manual-10003989140-SSW900-en.pdf>
6. Herman-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC / S.G. German-Galkin. - SpB. : CORONA-Vek, 2008. - 368 c.
7. Hakobyan K.A. Investigation of the mode of operation of an induction motor with a soft-start device in a MATLAB environment / K.A. Hakobyan, A.E. Vlasov, BN Kantlokov.// *Trends in the development of science and education. Series: VII Technical sciences*. -№.1. pp.9-11 doi: 10.18411 / lj-07-2018-28
8. Nazarenko V.N. Modeling of devices of smooth start-up of asynchronous motors with a short-circuited rotor in the MATLAB SIMULINK environment / V.N. Nazarenko, K.V. Nazarenko // *Collection of scientific works SNUYAETA.P. Section "Information systems and technologies"*, 2018 - p.207-217.
9. Eschin E.K. Operation of the asynchronous electric motor with the device of smooth start / E.K. Eshchin, I.A. Sokolov // *Notices of universities. Electromechanics*. - №5 (547) - 2016. - p.53-58 DOI: 10.17213 / 0136-3360-2016-5-53-58
10. Soft-Starter SSW900 Programming Manual. - Access mode: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49605-soft-starter-inductionmotor-model>

Надійшла 22.11.2021
Received 22.11.2021