

А.В. Торопов¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-8505-0266Л.К. Лістовщик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3413-1802Л.В. Торопова¹, асистент, ORCID 0000-0001-6882-2295О.М. Терентьєв¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2523-2804¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІРТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ «АСИНХРОННИЙ ДВИГУН - ПРИСТРІЙ ПЛАВНОГО ПУСКУ ІЗ ДВОМА РЕГУЛЬОВАНИМИ ФАЗАМИ»

Одним з найчастіше використовуваних способів пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором є запуск шляхом плавного підвищення напруги живлення. При цьому використовуються пристрої плавного пуску на основі тиристорів або симисторів, що значно дешевші перетворювачів частоти на основі IGBT – транзисторів. В свою чергу, недоліком такого способу пуску є зменшення пускового моменту, тому можливість використання таких пускачів для різних виконавчих механізмів потребує ретельного дослідження. При наявності обмеження потужності джерела живлення, особливо в умовах військового часу питання обмеження пускових струмів, особливо у випадку використання пускачів з двома регульованими фазами, є актуальним. Для врахування кратності пускових струмів для різних типів механізмів створена математична модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома керованими фазами». Модель відрізняється від відомих можливістю обмеження потужності мережі живлення, вигляду механічної характеристики виконавчого механізму та пускового моменту при лінійній зміні напруги. Перехідні процеси представляються у відносних одиницях для можливості оцінки кратності пускових струмів для визначення необхідної потужності автономного джерела живлення. Для оцінки адекватності математичної моделі був створений дослідницький стенд із вимірюванням струмів в обмотці двигуна за допомогою трансформатора струму та мікропроцесорного пристрою із функцією осцилографування. В роботі здійснено порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних досліджень на фізичній моделі, при цьому розбіжність результатів не перевищувала 10%. Визначено, що при використанні пристрою плавного пуску із двома регульованими фазами навіть при незначних навантаженнях кратність струмів є досить високою і потребує використання джерела живлення більшої потужності, але меншої, ніж у випадку прямого пуску. Сформульовані висновки по результатах дослідження та рекомендації щодо подальшого зменшення пускових струмів.

Ключові слова: пристрій плавного пуску, лінійна зміна напруги, математична модель, обмеження потужності, керування тиристорами

Вступ. В сучасних умовах воєнного стану на виробництві все частіше виникає проблема обмеження електропостачання. Для забезпечення безперервності технологічного процесу або підтримання системи у стані очікування найбільш важливі вузли при зникненні основного живлення запускають від автономних генераторів електричної енергії. Проблемою такого підходу є те, що такі генератори мають низьку перевантажувальну здатність і для запуску асинхронних двигунів вентиляторів, компресорів та інших механізмів, необхідно використовувати генератори більшої потужності, ніж це потрібно для роботи в стаціонарному режимі. Зменшення навантаження на дизельні та бензинові генератори під час пуску механізмів із асинхронними двигунами є використання напівпровідникових пускачів та регуляторів швидкості. У випадку використання регуляторів швидкості на основі перетворювачів частоти пускові струми обмежуються допустимим значенням струму перетворювача і лежить в межах 110..150 % від номінального значення [1]. В той же час вартість перетворювача частоти є співрозмірною із вартістю генератора і його варто використовувати в установках із підвищеними вимогами до запуску, коли неспрацювання системи пуску може призвести до великих економічних збитків [2].

Іншим підходом до обмеження пускових струмів під час розгону асинхронних двигунів є використання напівпровідникових пристроїв плавного пуску на основі тиристорів [3,4]. Для середніх і великих потужностей ці пристрої значно дешевші ніж перетворювачі частоти аналогічної потужності [5]. Принцип дії цих пускачів зумовлює зміну лише напруги живлення обмоток, що не дозволяє керувати електромагнітним моментом двигуна з високою точністю [6].

Пристрої плавного пуску відрізняються як за схемними рішеннями [7], так і програмним функціоналом [1]. Основною характеристикою, що впливає як на вартість цих пристроїв, так і на можливість їх застосування, є кількість регульованих фаз при живленні асинхронного двигуна. При використанні тиристорів лише у двох фазах вартість пускача суттєво зменшується, проте це, в свою чергу,

приводить до неможливості точного керування струмом двигуна та забезпечення достатнього крутного моменту при пуску навіть для невеликих навантажень. Можливість використання таких напівпровідникових пускачів для більшості механізмів в умовах обмеження потужності системи електропостачання потребує докладного аналізу. При цьому використання формули для визначення пускового моменту асинхронного двигуна, що виводиться на основі схеми заміщення фази двигуна неможливе внаслідок нерівності фазових напруг, що прикладаються до кожної з обмоток в довільний момент часу[8]:

$$M_n = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_c [(R_1 + R_2')^2 + X_K^2]} \quad (1)$$

де U_1 - напруга живлення обмоток двигуна, R_1 , R_2' - активний опір статора і приведений активний опір ротора, відповідно, X_K - сумарний індуктивний опір.

Для аналізу можливості використання пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами необхідно використовувати уточнену математичну модель, що враховує динамічні характеристики системи при живленні обмоток двигуна несинусоїдальною напругою. При цьому доцільно використовувати прикладне програмне забезпечення, що є загально –доступним і інтуїтивно зрозумілим для користувачів.

Мета та завдання дослідження. Розробити математичну модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома регульованими фазами» в програмному забезпеченні MATLAB Simulink із врахуванням можливості вибору потужності джерела живлення, а також характеристики виконавчого механізму.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

1. Шляхом використання готових блоків додатку Simulink середовища MATLAB розробити схему силової частини системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску» із живленням від джерела живлення обмеженої потужності.

2. Розробити схему вмикання тиристорів для двофазної схеми керування пристроєм плавного пуску із вмиканням тиристорів при напруги переході через нуль.

3. Для визначення та аналізу перевантажень двигуна розробити функціональний блок обчислення середнього значення струму під час пуску.

Матеріал і результати дослідження. В якості основи моделі в MATLAB Simulink використані функціональні блоки бібліотеки PowerSims. Наразі існує велика кількість моделей для пристроїв плавного пуску із трьома регульованими фазами саме із використанням цих блоків. При цьому є можливість дослідження як роботи пристроїв плавного пуску в режимі обмеження струму, й відповідно потужності [9]. Проте слід відзначити, що функція обмеження струму й, відповідно, моменту реалізована далеко не у всіх пристроях плавного пуску. В якості базового режиму роботи моделі доцільно досліджувати режим лінійного наростання напруги.

Запропонована уточнена математична модель, реалізована в програмному середовищі MATLAB Simulink, представлена на рисунку 1.

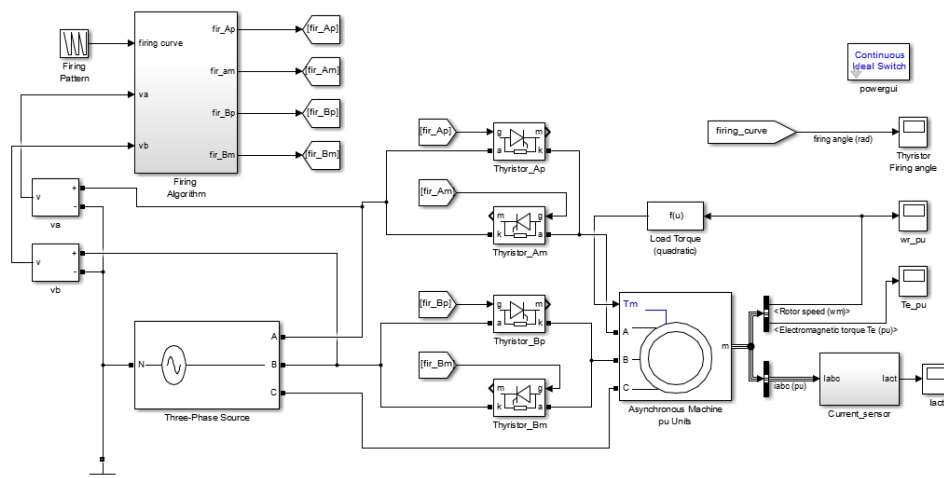


Рисунок 1. *Модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску із двома регульованими фазами»*

В якості некерованої фази використовується фаза С (L3), тобто між генератором змінної напруги обмеженої потужності і однією з обмоток двигуна встановлена перемичка. Алгоритм вмикання тиристорів в керованих фазах реалізується в функціональному блоці Firing Algorithm і докладно описаний в роботі [9]. Особливістю блоку, представленого на рисунку 2, є те, що в якості вхідних сигналів він використовує лише напруги за керованими фазами. Алгоритм лінійної зміни напруги реалізований у функціональному блоці Firing pattern. В ньому задаються початковий кут відпирання, який визначає величину стартового моменту, і зміна кута від початкового до кінцевого значення. Також в блоці Firing Algorithm реалізовано функцію синхронізації по фазі напруги. Це забезпечує вмикання тиристорів про проходженні нуля, а не в довільний момент часу, як це реалізовано в сучасних пристроях плавного пуску.

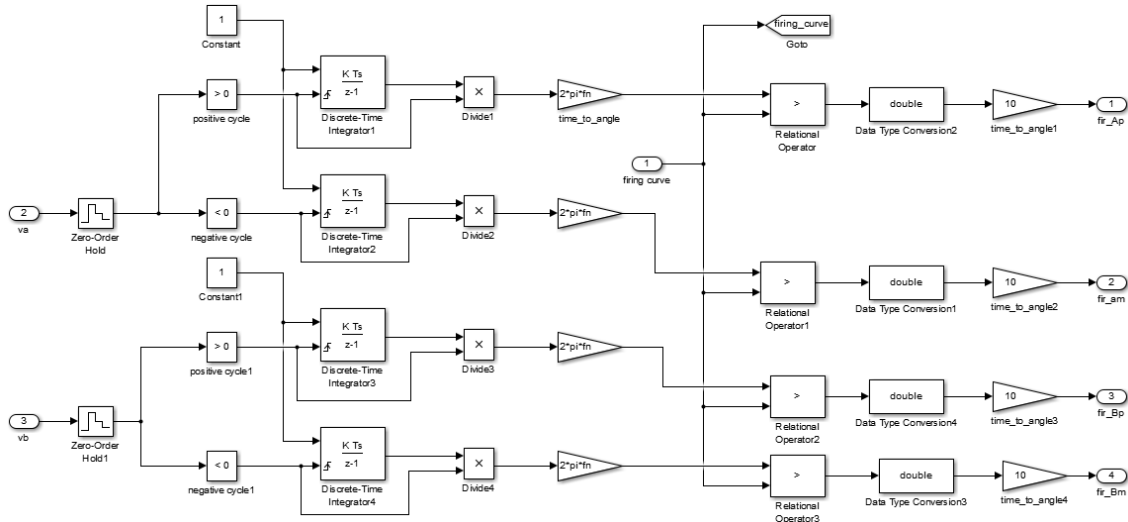


Рисунок 2. Функціональний блок вмикання тиристорів в керованих фазах

Визначимо перевантаження системи електропостачання за струмом при використанні пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами при запуску двигунів співвимірної потужності. В якості моделі виконавчого механізму прийнято квадратичний характер навантаження із великим моментом інерції, що відповідає роботі двигуна на відцентровий вентилятор. Навантаження формується в блоці Load torque (quadratic) в вигляді функції від відносного значення швидкості. При цьому використана модель асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором потужністю 7.5кВт, що може бути вибрана в налаштуваннях функціонального блоку Asynchronous_machine_pu_units. При використанні цього блоку графіки за швидкістю і струмом формуємо у відносних значеннях відносно номінальних. Перехідний процес за швидкістю при лінійній зміні напруги на виході пристрою плавного пуску має вигляд, представлений на рисунку 3.

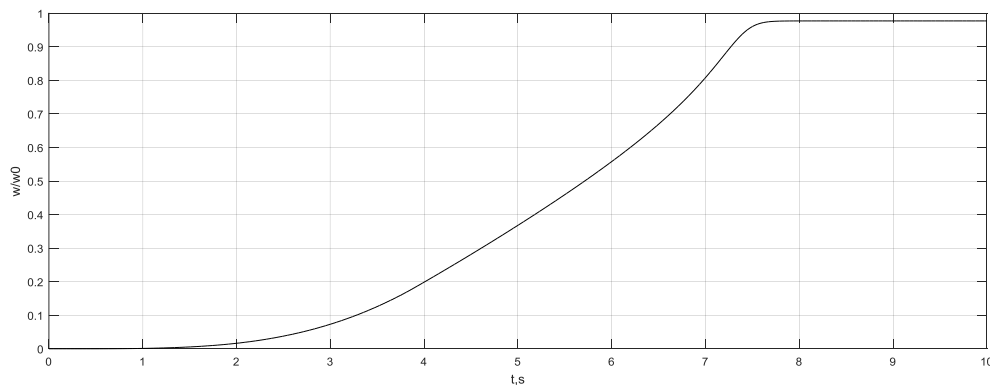


Рисунок 3. Графік зміни відносної швидкості при пуску двигуна шляхом лінійної зміни напруги

При квадратичному характері навантаження, вибраному в налаштуванні математичної моделі, з урахуванням (1) швидкість визначитиметься за виразом:

$$\omega = \sqrt{K_{вент} \cdot M_{нав}} \sim U, \tag{2}$$

де $K_{вент}$ - коефіцієнт впливу вентиляторної характеристики; $M_{нав}$ - момент навантаження.

При лінійній зміні напруги на обмотках двигуна, швидкість має змінюватися за законом, близьким до лінійного, що підтверджується результатами математичного моделювання.

Для оцінки перевантажень мережі живлення під час пуску використовується середнє арифметичне дійсних значень струмів по всіх трьох фазах. Розрахунок цього значення здійснюється в розробленій математичній моделі за допомогою блоку Current_sensor. Графік перехідного процесу по перевантаженню представлений на рисунку 4.

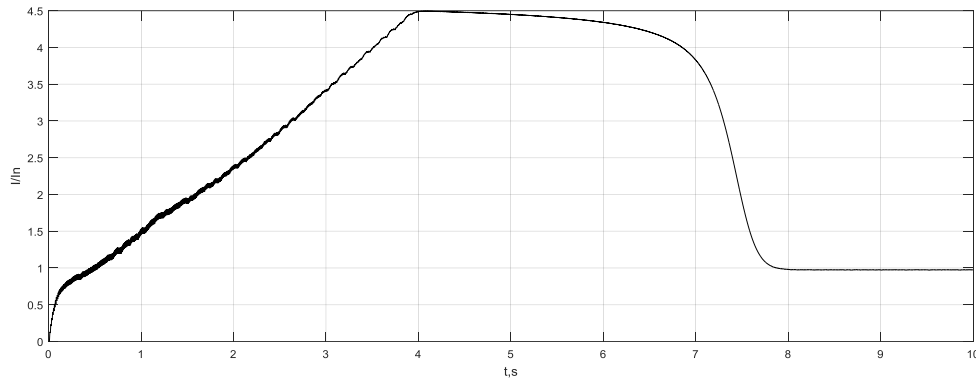


Рисунок 4. *Графік зміни середнього значення електроспоживання за струмом при пуску двигуна із вентиляторним навантаженням*

Можна побачити, що навіть для вентиляторного характеру навантаження, при якому пускові струму зазвичай є мінімальними [1], максимальна кратність струму під час розгону двигуна складає 4.5. Це, в свою чергу, приводить до необхідності використання автономних джерел живлення більшої потужності, оскільки їх перевантажувальна здатність зазвичай лежить в межах 120..150 %. При використанні пристрою плавного пуску із двома регульованими фазами для інших механізмів із більш важкими умовами пуску, кратність струму буде збільшуватись. Важливо відзначити, що внаслідок несинусоїдальності струмів в початковий момент пуску двигуна середнє значення струму в обмотках не дорівнює нулеві і призводить до нагріву двигуна ще до зрушення двигуна з місця.

Для оцінки відповідності запропонованої моделі реальному електроприводу порівняємо отримані результати математичного моделювання із натурними. Для отримання натурних характеристик був створений дослідницький стенд із пристроєм плавного пуску, асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором потужністю 7.5кВт и регульованим навантаженням для формування вентиляторних характеристик. В якості досліджуваного пристрою плавного пуску використаний пристрій ADXL від компанії Lovato electric із двома регульованими фазами. За замовчуванням для цього пристрою плавного пуску вибраний режим лінійного збільшення напруги. Особливістю налаштувань цього пристрою плавного пуску є те, що при перевищенні допустимого значення навантаження, він переходить в режим обмеження струму. При цьому він припиняє збільшувати напругу, що не враховується в розробленій математичній моделі в MATLAB. Для уникнення цього впливу на роботу системи режим обмеження був відключений і при перевищенні допустимого струму пристрій плавного пуску ADXL зупиняє двигун із індикацією помилки.

Спрощена схема дослідного стенду представлена на рисунку 5.

На схемі ТА – трансформатор струму із вбудованим перетворювачем сигналу 4...20 мА типу ССТ40-200, UZ – перетворювач типу Lenze 8400 Vector із вбудованою функцією осцилографування аналогового сигналу 4...20 мА, ПК – персональний комп'ютер із програмним забезпеченням L-force Engineer, у якому відображаються перехідний процес за струмом. Слід відзначити, що ця система має певну інерційність за рахунок використання трансформатора струму із перетворювачем 4...20 мА, однак вона дозволить порівняти кратність пускових струмів для математичної моделі і досліджуваної електромеханічної системи. Слід відзначити, що на трансформатор струму подає на вхід перетворювача Lenze 8400 Vector абсолютне значення струму, проте для зручності аналізу в налаштуваннях з виходу осцилографа отримуємо нормоване значення.

Графік перехідного процесу за перевантаженням має вигляд, представлений на рисунку 6.

Із рисунка 6 можна визначити, що при наявності великого моменту інерції механізму кратність пускового моменту теж перевищує значення 4.5, що може призводити до перевантаження електричної мережі.

Висновки.

1. При використанні пристроїв плавного пуску із двома регульованими фазами при малих пускових моментах і суттєвому моменту інерції механізму кратність пускових струмів перевищує значення 4.5.

2. У випадку застосування систем резервного живлення обмеженої потужності, таких як джерела безперебійного живлення та дизельні або бензинові генератори, останні повинні вибиратися із подвійним запасом по вихідному струму з метою уникнення перевантаження.

3. Подальше зниження пускових струмів і, відповідно, потужності пристроїв резервного живлення можливе лише при використанні напівпровідникових перетворювачів частоти.

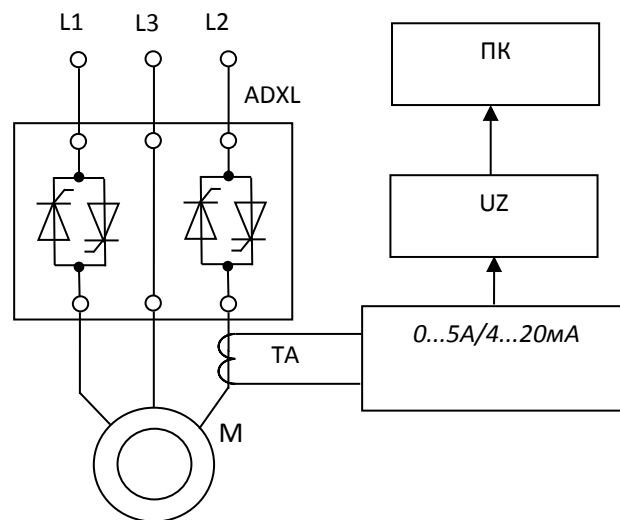


Рисунок 5. Спрощена схема дослідного стенду для отримання перехідних процесів за струмом при пуску двигуна на холостому ході

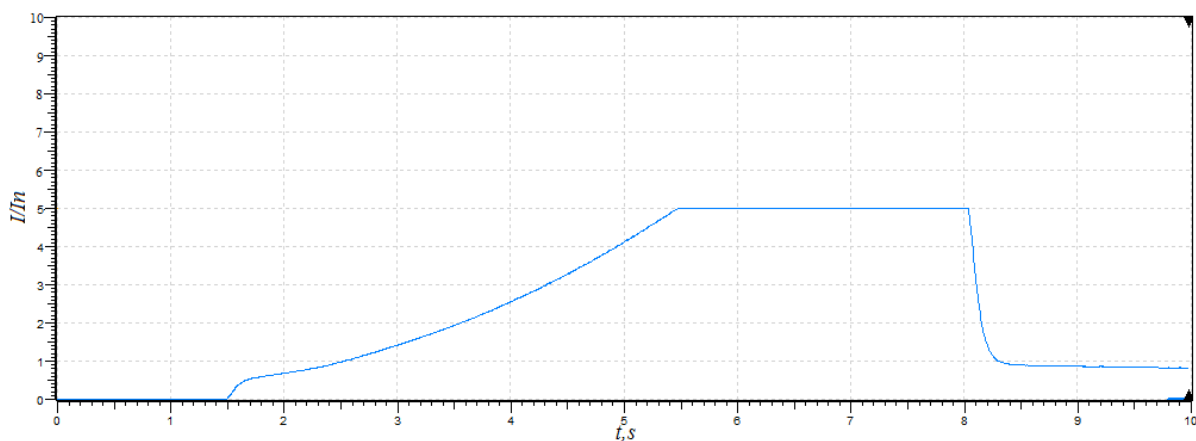


Рисунок 6. Графік перехідного процесу за перевантаженням

Список використаної літератури

1. Регульований електропривод: підручник / І.М. Голодний та ін. Київ: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. 509 с.
2. Abhay M Halmare, Ashish Karnase and Swapnil Kourati. Comparative study of induction motor starters using Matlab Simulink/ International Journal of Advance Research , Ideas and Innovations in Technology. Volume2, Issue2 ISSN: 2454-132X [Online] Available: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v2i2/V2I2-1143.pdf> Accessed on: June 27, 2023
3. Голодний І.М., Лаврінченко Ю.М. Моделювання в MatLab процесу динамічного гальмування асинхронного електропривода. *Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*, 2011. Вип.116, С.73–75.
4. Majid Ghadimi, Amin Ramezani and Mohsen Mohammadimehro. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant// Conference: Proceedings of the UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, EMS 2011, Madrid, Spain, November 16-18, 2011 DOI:10.1109/EMS.2011.57
5. U.Sri Anjaneyulu, T.Satish Babu, Y. Sumith and Y.Narendra Kumar (2019) The Impact of Three Phase Soft Starter Controller on Asynchronous Machine Response to Transients using MATLAB/ International Journal of Scientific Research and Reviews Simulink Volume 8(2), 1320-1334 https://www.ijssr.org/down_82426.php
6. Magnus Kjellberg, Sören Kling. Softstarter handbook. 2004. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/2985284834bcff7fc1256f3a00274038/1SFC132002M0201.pdf> Accessed on: June 22, 2023
7. Калінов А.П., Мельников В.О. Елементи автоматизованого електропривода: навч. посіб. Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В, 2014. 276 с. ISBN 978-617-639-054-1.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М. Г. Попович та ін. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

9.Торопов А.В., Торопова Л.В. Дослідження пуску компресора шарошкового бурового верстату з функцією обмеження струму. *Геоінженерія*. 2021. №5. С. 24-29. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676> (дата звернення: 02.07.2023).

A. Toropov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8505-0266

L. Listovshchik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3413-1802

L. Toropova¹, asst., ORCID 0000-0001-6882-2295

O.Terentiev¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2523-2804

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VIRTUAL MODEL OF THE SYSTEM "INDUCTION MOTOR - SOFTSTARTER WITH TWO CONTROLLED PHASES"

One of the most commonly used start methods of induction motors is starting by gradually increasing the supply voltage. At the same time, softstarters based on thyristors or triacs are used, which are cheaper in comparison with frequency inverters based on IGBT - transistors. In turn, the disadvantage of this method of starting with significant reduction of the starting torque, so the possibility of using such starters for various executive mechanisms requires careful research. In the presence of a limitation of power source power, especially in wartime conditions, the problem of limitation of starting currents, especially in the case of using starters with two adjustable phases, is actual. To take into account the multiplicity of starting currents for different types of mechanisms, a mathematical model of the system " induction motor - softstarter with two controlled phases" was created. The model differs from the known ones by the possibility of limiting the power of the power supply network, the appearance of the mechanical characteristics of the executive mechanism and the starting moment at voltage ramp start mode. Transient processes in relative units for the possibility of estimating the multiplicity of starting currents to determine the required power of the autonomous power source are presented. To assess the adequacy of the mathematical model, a research stand with measuring of motor winding currents using a current transformer and a microprocessor device with an oscillography function was created. In the work, a comparative analysis of the results of modeling and experimental studies on a physical model is carried out, herewith the discrepancy of the results did not exceed 10%. It was determined that when using a soft-start device with two adjustable phases, even with small voltages, the current multiplicity is quite high and requires the use of a power source of greater power, but less than in the case of direct start. Formulated conclusions based on research results and recommendations for further reduction of starting currents.

Keywords: softstarter, voltage ramp, mathematical model, power limitation, thyristor control

References

- [1] Adjustable electric drive/ Edited by Ivan Golodnyi. - K. Ukraine: LLC "CP" Comprint ", 2015. - 509p
- [2] Abhay M Halmare, Ashish Karnase and Swapnil Kourati. Comparative study of induction motor starters using Matlab Simulink/ International Journal of Advance Research , Ideas and Innovations in Technology. Volume2, Issue2 ISSN: 2454-132X [Online] Available: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v2i2/V2I2-1143.pdf> Accessed on: June 27, 2023
- [3] Ivan Golodnyi, and Yury Lavrinenko, "MatLab simulation of the process of dynamic braking of an asynchronous electric drive", Bulletin of KhNTUSG. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine", 2011, Issue 116, pp. 73–75.
- [4] Majid Ghadimi, Amin Ramezani and Mohsen Mohammadimehro. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant// Conference: Proceedings of the UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, EMS 2011, Madrid, Spain, November 16-18, 2011 DOI:10.1109/EMS.2011.57
- [5] U.Sri Anjaneyulu, T.Satish Babu, Y. Sumith and Y.Narendra Kumar (2019) The Impact of Three Phase Soft Starter Controller on Asynchronous Machine Response to Transients using MATLAB/ International Journal of Scientific Research and Reviews Simulink Volume 8(2), 1320-1334 https://www.ijssr.org/down_82426.php
- [6] Magnus Kjellberg, Sören Kling. Softstarter handbook. (2004). [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/2985284834bcff7fc1256f3a00274038/1SFC132002M0201.pdf> Accessed on: June 22, 2023
- [7] Kalinov A., and Melnikov V. (2014) Elements of an automated electric drive: study guide/– Kremenchuk: Shcherbatykh O.V, -276p. ISBN 978-617-639-054-1
- [8] Electromechanical automatic control systems and electric drives/Edited by Myhailo Popovych and Orest Lozynskyi. — K.: Lybid, 2005. — 680 p.
- [9] Toropov, A., and Toropova, L. (2021). Investigation of compressor start-up of cone drilling rig with current limiting function. *Geoengineering*, (5), 24–29. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>

Надійшла: 29.06.2023

Received: 29.06.2023