

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ НА БАЗІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПІД ЧАС РОЗГОНУ

Островецький М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я.

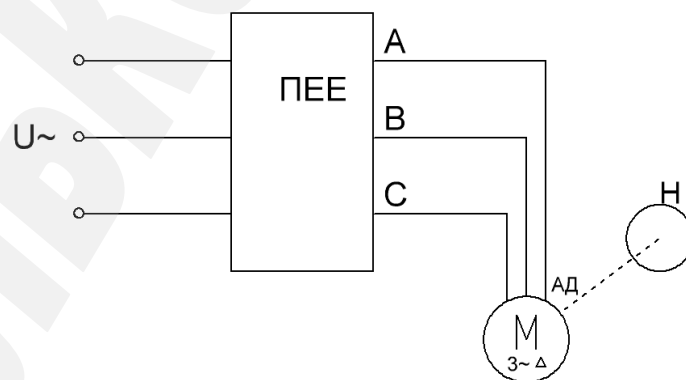
### 1. Вступ

Електродвигуни відомі своїм дуже високим ККД (80–90 %) порівняно з іншими можливими приводними механізмами. Але варто зазначити, що така цифра справедлива лише для усталеної роботи в номінальних режимах, під час перехідних процесів же втрати суттєво зростають. Одним з найбільш витратних процесів є розгін: для виходу на необхідну швидкість двигуна варто забезпечити підвищений момент, що призводить до зростання струму і, відповідно, квадратичного збільшення електричних втрат. Особливо це важливо для приводів, які працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, тобто з частими зупинками та пусками. До таких механізмів відносяться, наприклад, електромобілі або гібридні автомобілі, енергоефективність яких є одним з їхніх ключових показників. Це підтверджує актуальність даної роботи.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є електропривід на базі асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором (рис. 1), який працює у режимах частих пусків та зупинок. Цей привід складається з:

- джерела живлення ( $U\sim$ ), яке подає електричну енергію;
- перетворювача електричної енергії (ПЕЕ), який за рахунок перетворення енергії та керування напругою на виході визначає режим роботи електропривода;
- електромеханічного перетворювача енергії, яким є АД;
- навантаження (Н).



**Рис. 1.** Схема електроприводу на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:  $U\sim$  – джерело живлення, ПЕЕ – перетворювач електричної енергії, АД – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, Н – навантаження

Під час перехідних процесів розгону навантаження є збільшеним, електро-рушійна сила (ЕРС), спрямована проти струму (протиЕРС), яку створює магнітне поле двигуна, – зменшеною, а тому струми в електричному колі сильно зростають. Втрати на нагрівання обмоток двигуна ж ростуть пропорційно до квадрату цих струмів, а значить і ККД такого електропривода сильно падає під час перехідних процесів.

Одним із проблемних місць такого електроприводу є значне споживання енергії при перехідних процесах, зокрема під час розгону двигуна. За рахунок високих пускових струмів багато спожитої енергії втрачається на нагрівання обмоток двигуна. Для того, аби зменшити втрати при розгоні необхідно зменшити пусковий струм, що можна досягти штучним збільшенням часу перехідного процесу. Однак, якщо ж розгін триватиме занадто довго, то це призведе до збільшення витрат енергії на подолання статичного моменту та зростання сумарних статичних втрат двигуна. Значить, має бути певна оптимальна точка: час розгону, при якому буде спожита мінімальна енергія.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою даного дослідження є пошук цієї оптимальної точки – часу розгону, визначеного керуючим пристроєм, за якого буде спожита найменша кількість енергії. Для досягнення поставленої мети необхідно:*

1. Створити математичну та комп'ютерну моделі електропривода зі системою керування, яка задаватиме різний час розгону.
2. Експериментально підтвердити описану проблему.
3. Провести чисельні розрахунки, за допомогою яких і можна буде визначити оптимальний час розгону та переконатись, що у такий спосіб можна покращити енергоефективність електропривода.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Дослідження енергоефективності пусків електричних двигунів проводилися і раніше. Підвищені втрати під час пуску були продемонстровані в роботі [1], щоправда там розглядався реактивний синхронний двигун. Ідеї покращених пусків з меншими втратами були запропоновані в роботах [2, 3], але також лише для синхронних двигунів.

Дослідження ж [4] показують, що для режимів частих стартів та зупинок, наприклад, в електромобілях, найефективнішим двигуном є саме асинхронний двигун (АД). Але навіть вибравши для застосування АД, енергоефективність пусків все ще може бути покращена. Для таких досліджень можна використовувати методи, запропоновані в [5, 6]. Автори цих робіт добре досліджують пуски АД, щоправда не приходять до висновку, яким же чином покращити енергоефективність.

Втрати в АД при пуску зменшуються шляхом зниження пускового струму. Це показано в роботах [7, 8]. Але зменшення пускового струму призводитиме і до зменшення пускового моменту, а значить, і до збільшення тривалості розгону [9]. Отже, необхідно знайти певну оптимальну точку для величини пускового струму. Прикладом такого повного дослідження є робота [10], в якій чітко дана відповідь на питання: яким же чином розігнати АД до номінальної швидкості з найменши-

ми втратами. Єдиною проблемою цього дослідження є те, що для реалізації представленого методу необхідні складні системи керування двигуном на базі нечіткої логіки, що може бути дорогим для загального впровадження.

Таким чином, питання знаходження простого методу контролю енергоефективного пуску АД, яке досліджується в даній роботі, залишається перспективним.

## 5. Методи досліджень

В перехідному режимі струми, що протікають в обмотці статора асинхронного двигуна (АД), суттєво перевищують номінальні значення і викликають підвищені втрати енергії, а відповідно і перегрів двигуна. Найбільші втрати виділяються в АД, які працюють в режимі частих пусків. Розрахунок пуску АД включає в себе визначення залежності швидкості обертання від часу протягом розгону, визначення його тривалості і втрат енергії в статорі та роторі за час перехідного процесу. Загальний момент на валу двигуна можна представити у вигляді суми статичного та динамічного моментів:

$$M = M_c + M_{дин}, \quad (1)$$

де  $M_c$  – статичний момент – це сума корисного моменту навантаження та моменту опору;  $M_{дин}$  – динамічний момент, який визначається за формулою:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (2)$$

де  $J$  – приведений момент інерції системи АД – виконавчий механізм,  $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ ;  $\omega_2$  – кутова швидкість обертання ротора,  $\text{рад}/\text{с}$ .

Час розгону електродвигуна визначається електромеханічними процесами, оскільки електромагнітні перехідні процеси, що відбуваються в двигуні, мають значно меншу сталу часу. Значення електромеханічної сталої часу  $\tau_m$  визначається з умови розгону двигуна при статичному моменті на валу двигуна  $M_c=0$ .

Тривалість пуску електродвигуна визначається за формулою:

$$t_n = \int_0^{\omega_{2роб}} J \frac{d\omega_2}{(M^* - M_{ст}^*)}, \quad (3)$$

де  $M^* = M/M_n$  і  $M_{ст}^* = M_{ст}/M_n$  – відносні значення електромагнітного і статичного моментів;

$M_n$  – номінальний момент двигуна;

$\omega_{2роб}$  – значення кутової швидкості обертання ротора, при якій перехідний процес розгону вважається завершеним (прийmemo його як 0,95 від номінальної частоти обертання ротора).

Враховуючи великі значення пускових струмів, під час розгону двигуна статичними втратами (магнітними та механічними) можна знехтувати, а тому загальні втрати визначатимуться як сума втрат в обмотках ротора та статора:

$$\Delta W = \int_0^{t_n} (\Delta P_{ел2} dt + \Delta P_{ел1} dt), \quad (4)$$

де  $P_{ел2}$  – електричні втрати на активному опорі обмотки ротора, Вт;  $P_{ел1}$  – електричні втрати на активному опорі обмотки статора.

Втрати енергії в роторі за весь період розгону  $t_n$  від  $s=1$  до номінального значення  $s_n$  визначаються за формулою [1]:

$$\Delta W_2 = \frac{J\omega_1^2}{2} \left[ (1 - s_n^2) + 2 \int_{s_n}^1 \left( \frac{M_{cr*}}{(M_* - M_{cr*})} \right) s ds \right]. \quad (5)$$

Перший член рівняння визначає втрати енергії, обумовлені дією прикладеного до валу двигуна динамічного моменту, а другий – статичного, для визначення якого необхідно знати механічні характеристики двигуна і виконавчого механізму.

Втрати енергії в обмотці статора за час розгону:

$$\Delta W_1 = 1,16^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \Delta W_2 \approx 1,35 \Delta W_2, \quad (6)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – активний опір обмотки статора і приведений опір обмотки ротора.

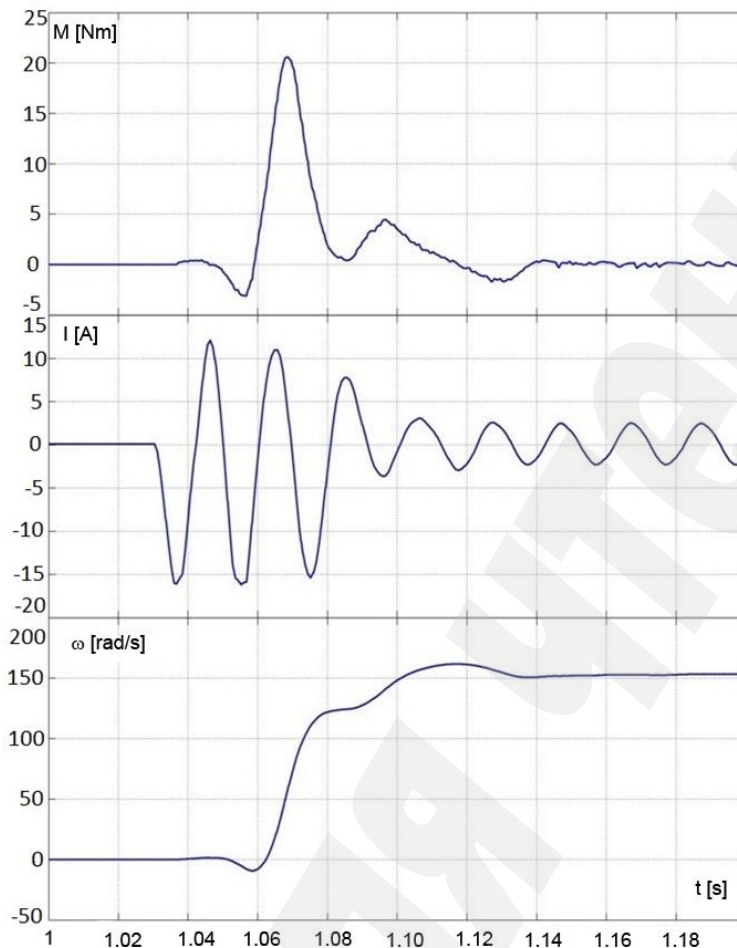
## 6. Результати дослідження

Найбільш розповсюдженим способом пуску АД малої і середньої потужності є прямий пуск. Це обумовлено його простотою. Були проведені дослідження динаміки такого пуску на спеціально виготовленому дослідницькому стенді за допомогою системи тестування електроприводів змінного струму (СТЕП). Ця система дозволяє отримати електричні параметри струму і напруги однієї фази двигуна і частоту обертання валу ротора в функції часу з дискретністю 8 мс.

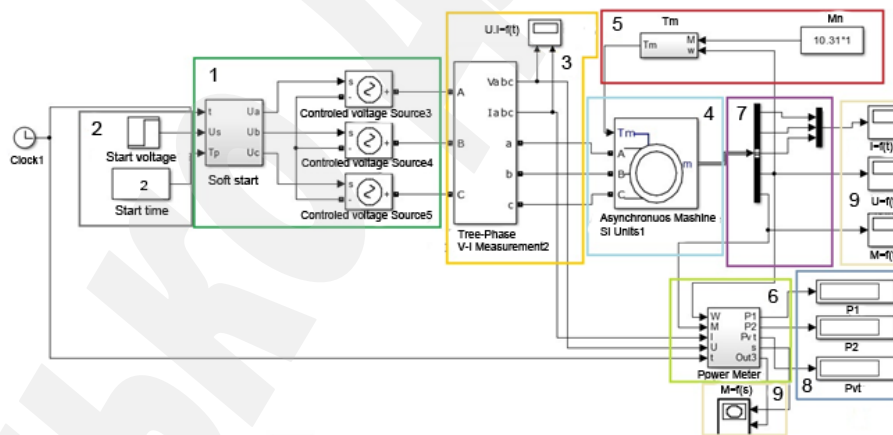
Для дослідження був обраний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором марки MS9024 (Італія), номінальною потужністю 1,5 кВт, номінальною частотою обертання ротора 1390 об/хв. Залежності струму, моменту, частоти обертання від часу при прямому пуску наведені на рис. 2.

За умови відсутності навантаження на валу ударні значення струму і моменту досягають 16,5 А і 20 Н·м відповідно. Час розгону складає 0,13 с.

В середовищі Matlab Simulink була розроблена модель пристрою плавного пуску (ППП), який забезпечує лінійне наростання напруги кола обмотки статора АД від нуля до номінального значення. За рахунок цього зменшуються механічні навантаження на двигун і виконавчий механізм, а також пускові струми та втрати в обмотках. Модель представлена на рис. 3.



**Рис. 2.** Експериментальні залежності моменту  $M$ , струму  $I$  та частоти  $\omega$  обертання ротора від часу  $t$  при прямому пуску асинхронного двигуна

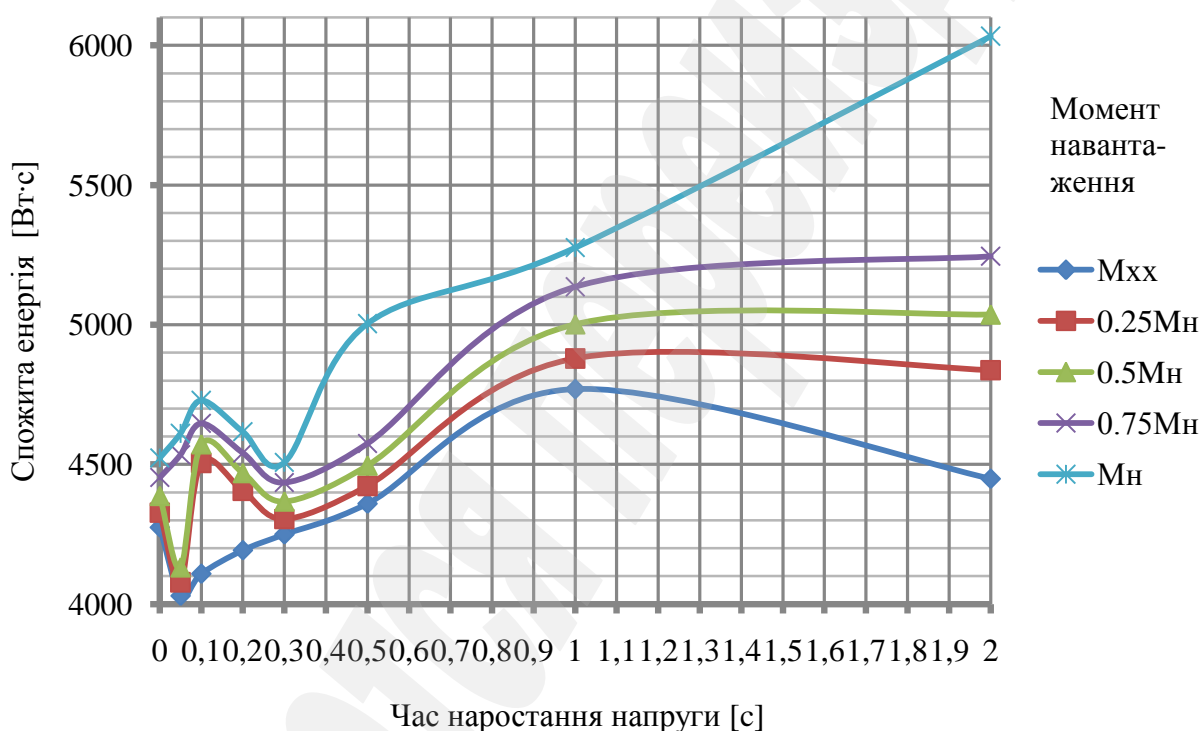


**Рис. 3.** Модель електроприводу на базі асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором разом із пристроєм плавного пуску (ППП) в середовищі Matlab Simulink: 1 – трифазне джерело живлення АД, що регулюється PPP; 2 – блоки завдання PPP; 3 – блок вимірювання напруг та струмів кола статора АД; 4 – модель АД з короткозамкненим ротором; 5 – блок розрахунку статичного моменту навантаження на АД, що моделює вентиляторний характер навантаження, при якому момент на валу пропорційний квадрату частоти обертання, а також при номінальній частоті обертання до валу прикладене номінальне навантаження; 6–9 – блоки виміру електричних та механічних параметрів приводу

Дослідження енергоощадних режимів пуску АД типу MS9024 потужністю 1,5 кВт,  $U_{\phi}=220$  В,  $n_{2H}=1390$  об/хв було проведено для навантажень на валу  $M_{Hx}$ ;  $0,25M_H$ ;  $0,5M_H$ ;  $0,75M_H$ ;  $M_H$  вентиляторного типу. Час наростання напруги на обмотці статора складав 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2 с, напруга наростала від 0 до 220 В.

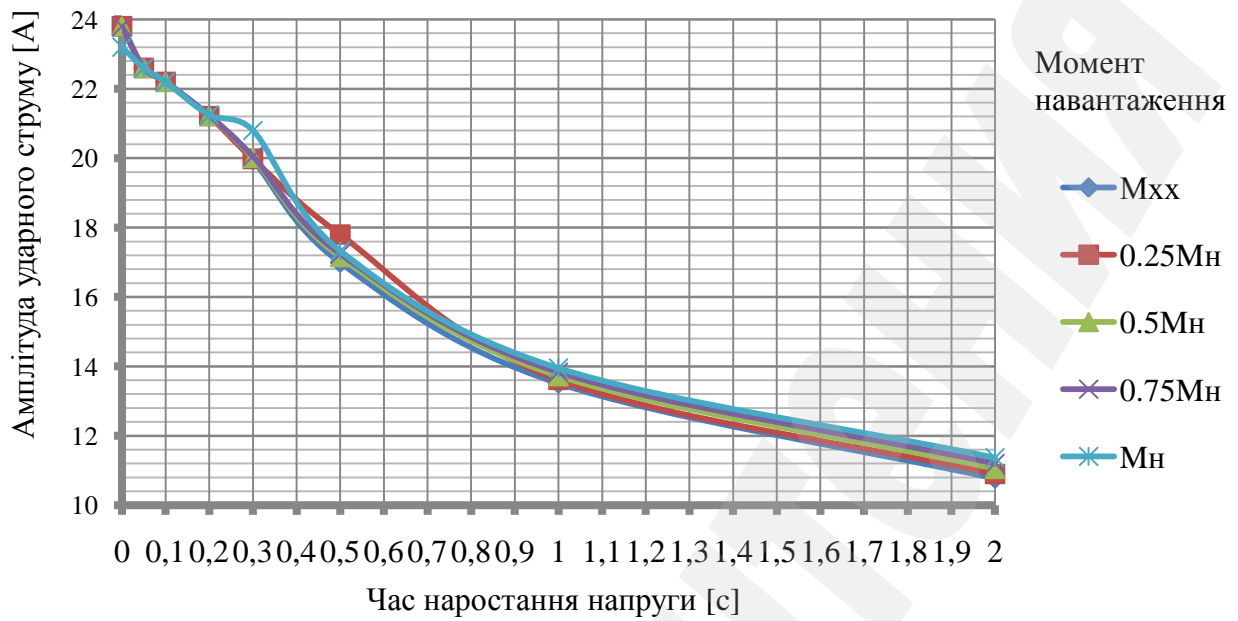
Аналіз більше 160 пускових режимів АД дав можливість побудувати залежності спожитої енергії від часу наростання напруги на обмотці статора АД (рис. 4).

Велика кількість спожитої енергії при прямому пуску обумовлена великими втратами, пропорційним квадрату величини пускового струму. Подальше збільшення часу наростання напруги зменшує величину пускового струму і певною мірою обмежує втрати енергії до часу збільшення напруги 0,3 с. Зростання часу наростання напруги живлення більше 0,3 с призводить до збільшення втрат енергії за рахунок зростання часу розгону.

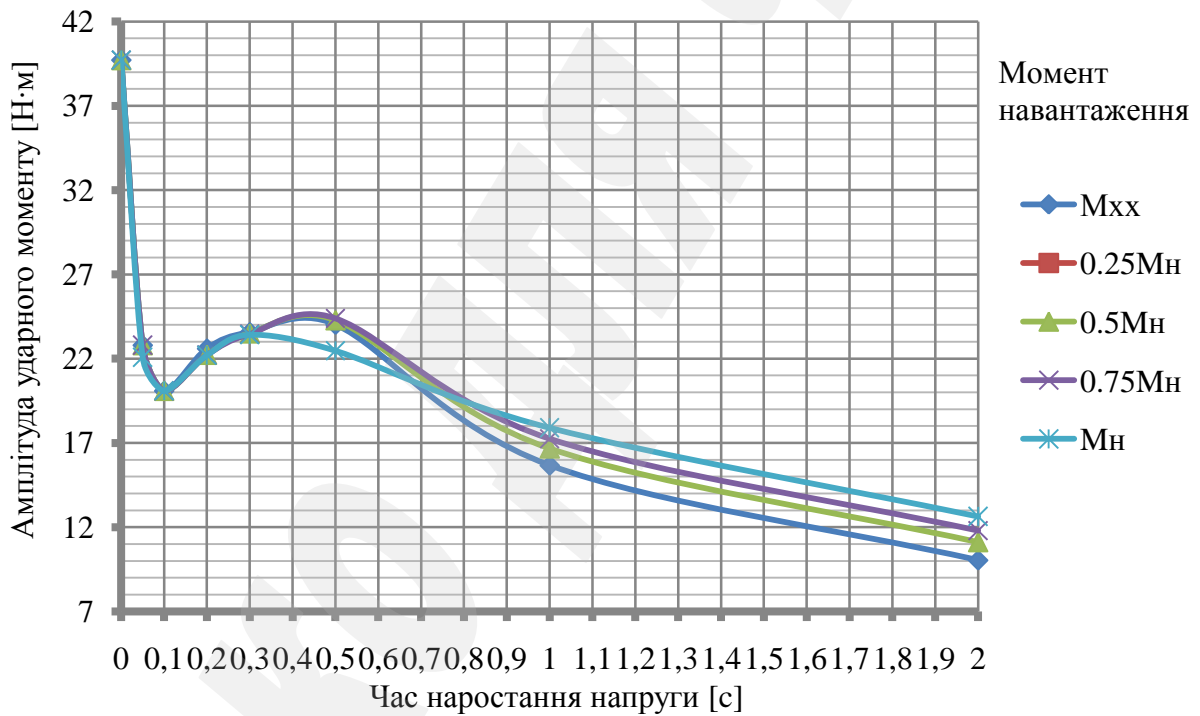


**Рис. 4.** Залежність спожитої електроприводом енергії від встановленого часу наростання напруги для різних значень моменту навантаження при номінальній швидкості

Отже, як і було передбачено, існує точка оптимального часу розгону двигуна. Цей час для даного двигуна – 0,3 с – обумовлений власними характеристиками двигуна і більшою мірою його маховим моментом, який практично не залежить від маси приводного механізму. Для інших приводів з більшою масою обертових частин цей час буде збільшуватись.



*a*



*б*

**Рис. 5.** Залежність: *a* – ударних струму, *б* – моменту асинхронного двигуна від встановленого часу наростання напруги

Варто зазначити, що цей час розгону може бути не оптимальним з точки зору ударного моменту. При вивченні пускових характеристик інших виконавчих механізмів необхідно враховувати цей фактор. При виборі часу пуску необхідно враховувати особливості роботи конкретного механізму, а також величини ударних струмів та моментів. На рис. 5 показана залежність ударних струму та моменту від встановленого часу наростання напруги.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Дані дослідження показують, що за рахунок використання системи плавного пуску та невеликому збільшенні часу розгону двигуна можна покращити енергоефективність електропривода, а значить, зменшити споживання електроенергії та зменшити витрати на охолодження. Визначена під час досліджень особливість показує, що точка оптимуму для часу розгону двигуна залежить виключно від параметрів системи двигун – приводний механізм і не залежить від навантаження. Це значить, що пристрій плавного пуску може бути попередньо налаштований виробником електропривода і не потребуватиме жодних додаткових дій від його оператора. Також, пристрій плавного пуску є доволі простим для виготовлення та застосування.

*Weaknesses.* В точці оптимального споживання електроенергії пусковий момент на валу двигуна є дещо занижений. Це може призвести до неможливості пуску електропривода при підвищених навантаженнях (наприклад, екскаваторному). Тим не менше, дослідження показали, що зменшення споживання енергії можливе і при менш суттєвому пониженні пускового моменту, хоч і не настільки ефективно.

*Opportunities.* Дані дослідження були проведені для найбільш розповсюдженого для подібних електроприводів вентиляторної характеристики навантаження. Тим не менше, інші характеристики (як, наприклад, згадана вище екскаваторна) також заслуговують уваги. Окрім того, запропонований пристрій плавного пуску дозволяє отримати лише лінійне наростання напруги з метою забезпечення його простоти. Дослідження інших кривих наростання також є цікавим і перспективним.

*Threats.* Не зважаючи на продемонстроване покращення енергоефективності, економічного обґрунтування доцільності використання пристрою плавного пуску не було проведено. І хоча він був створений максимально простим, а електроніка на сьогоднішній день не є дорогою, його рентабельність поки що не доведена. Окрім того, існують більш складні системи [10], які виконують дану функцію. І хоча запропонована в дослідженнях система є значно простішою, вона може бути не такою ефективною.

## 8. Висновки

1. В ході даної роботи були проведені дослідження енергоефективності режимів пуску АД з короткозамкненим ротором. Була створена математична модель такого приводу, а також розроблена в програмному пакеті Matlab Simulink його комп'ютерна модель. Також в цьому програмному пакеті розроблений пристрій плавного пуску, який дозволяє лінійно збільшувати напругу навантаження від нуля до номінального значення за встановлений завданням час.

2. Проведені експериментальні дослідження показали суттєві недоліки часто використовуваного режиму прямого пуску. До них відносяться підвищені пускові струми двигуна і, як наслідок, значно збільшені витрати енергії.

3. У створеній комп'ютерній моделі були проведені дослідження, які вказали на пряму залежність спожитої приводом під час розгону енергії від часу наростання напруги. Із цих залежностей визначений оптимальний час наростання напруги.



тання напруги для двигуна, який досліджувався, який склав 0,3 с незалежно від величини прикладеного навантаження.

Результати цього дослідження можуть мати практичне застосування в механізмах, які працюють в режимах частих пусків. Використовуючи пристрій плавного пуску, налаштований на конкретний електропривід, можливо заощадити спожиту під час розгону енергію.

### Література

1. Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications / Castagnini A. et. al. // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Coeur d'Alene. 2015. P. 121–126. doi: <http://doi.org/10.1109/iemdc.2015.7409047>
2. A new starting method for 12/8-pole doubly salient permanent-magnet motors without position sensor / Du J. et. al. // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, 2011. P. 1–5. doi: <http://doi.org/10.1109/icems.2011.6073672>
3. Shehata E. G. Design tradeoffs between starting and steady state performances of line-started interior permanent magnet synchronous motor // 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). 2014. P. 1–6. doi: <http://doi.org/10.1049/cp.2014.0281>
4. Rahman K. M., Ehsani M. Performance analysis of electric motor drives for electric and hybrid electric vehicle applications // Power Electronics in Transportation. Dearborn. 1996. P. 49–56. doi: <http://doi.org/10.1109/pet.1996.565909>
5. Analytical method for starting performance calculation of induction motors considering skin effect and leakage flux saturation / Run-hao P. et. al. // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou, 2014. P. 135–138. doi: <http://doi.org/10.1109/icems.2014.7013452>
6. A study of starting methods for an induction motor using an arbitrary waveform generator / Banerjee A. et. al. // 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). Dhaka, 2015. P. 34–37. doi: <http://doi.org/10.1109/icaee.2015.7506790>
7. Habyarimana M., Dorrell D. G. Methods to reduce the starting current of an induction motor // 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). Chennai, 2017. P. 34–38. doi: <http://doi.org/10.1109/icpsi.2017.8392319>
8. Li X., Xu J., Zhang H. Research on torque ramp current limit starting of induction motor based on dsPIC30F6014 // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, 2017. P. 1627–1630. doi: <http://doi.org/10.1109/itnec.2017.8285069>
9. The torque oscillation study in the motor soft starting process with discrete variable frequency method / Hu H.-M. et. al. // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008. P. 1686–1690.
10. Nafeesa K., George S. Starting performance analysis of fuzzy logic based smart motor controller driven induction motor // 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal. Bhubaneswar. 2011. P. 1–5. doi: <http://doi.org/10.1109/iceas.2011.6147099>