

**А.В. Торопов, к.т.н., доц.,
Л.В. Торопова, асс.
КПИ ім. Ігоря Сікорського**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКУ КОМПРЕСОРА ШАРОШКОВОГО БУРОВОГО ВЕРСТАТУ З ФУНКЦІЄЮ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМУ

**A. Toropov, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.,
L. Toropova, assistant
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute**

INVESTIGATION OF COMPRESSOR START-UP OF CONE DRILLING RIG WITH CURRENT LIMITING FUNCTION

У статті розглядається задача дослідження системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» для компресорного обладнання шарошкового бурового комплексу. Також розроблена уточнена математична модель системи з урахуванням характеру компресорного навантаження, а також існуючих алгоритмів роботи блоку контролю струму статора. Розглянуто проблеми вибору режиму запуску компресорної установки, визначено необхідність повного дослідження системи електроприводу методами цифрового моделювання. Визначено основні параметри, що повинні уточнюватись та коректуватись проектувальником електро механічної системи компресора при вводі в експлуатацію. Далі в моделі реалізований алгоритм управління кутом відмикання силових тиристорів, що застосовуються в сучасних пристроях плавного пуску виробництва компанії WEG. Для цього сформований програмний блок обмеження середньоквадратичного значення струму статора при пуску асинхронного двигуна. Після цього, виконане моделювання процедури пуску асинхронного двигуна компресора від тиристорного пристрою плавного пуску з активованою функцією обмеження струму статора. В результаті моделювання в додатку Simulink програмного середовища MATLAB отримані графіки перехідних процесів за найбільш важливими параметрами роботи, таких як струм в обмотках статора, швидкість обертання валу, момент навантаження та значення куту відпирання. Здійснено аналіз отриманих результатів, в результаті якого сформульовані висновки щодо можливості застосування пристроїв плавного пуску для компресорів шарошкових верстатів. Визначено, що при близькому до лінійного характері навантаження компресора пуск двигуна відбувається з плавною зміною швидкості без суттєвих стрибків струму статора електродвигуна. Запропоноване використання функції обмеження струму для легких режимів пуску та функції керування струмом з початковим збільшенням крутного моменту.

Ключові слова: шарошковий буровий верстат; асинхронний двигун компресора; функція обмеження струму; пристрій плавного пуску; математичне моделювання

ВСТУП

Актуальність теми. В теперішній час все частіше виникає задача модернізації електроустаткування шарошечних бурових верстатів. При цьому замінюються як приводу ходу і бура, так і електрообладнання компресорних станцій [1]. Застарілі

системи реостатного пуску асинхронних двигунів з фазним ротором, внаслідок їх низької енергетичної ефективності та необхідності частого обслуговування, замінюються на системи «тиристорний плавний пускач – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором». Такі системи електроприводу істотно дешевше, ніж з перетворювачами частоти аналогічної потужності, і, в той же час, дозволяють істотно знизити навантаження на мережу живлення при запуску компресора, забезпечують захист двигуна від пікових струмів і саму компресорну установку від механічних перевантажень [2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливим аспектом вибору пристрою плавного пуску є його функціонал, як з точки зору можливості інтеграції в існуючу систему автоматизації, так і в наявності функцій управління вихідним струмом.

Так, більшість пристроїв плавного пуску (УПП) асинхронних двигунів в своєму функціоналі містять лише дві функції розгону [4, 5]:

- плавне збільшення вихідної напруги за лінійною або параболічною залежністю;
- із функцією обмеження струму статора.

Застосування функції лінійного зміни напруги в компресорах вкрай небажано, оскільки при заклинюванні або істотного перевантаженні з боку механіки, струми на виході не контролюються. При цьому відбувається або відключення ППП при спрацьовуванні струмового захисту, або перегорають тиристори силових ланцюгів.

Використання функції обмеження струму статора при пуску асинхронного електродвигуна також є складним, внаслідок неконтрольованого наростання електромагнітного моменту в початковий момент роботи. Одним з рішень є використання датчика інтенсивності по обмеженню струму статора, що забезпечує і плавне збільшення моменту. В цьому випадку проектувальник стикається зі складним завданням підбору часу наростання струму. З одного боку, затягування часу наростання струму призведе до тривалої перевантаження мережі живлення і значного перегріву стоїть двигуна, а, з іншого боку, зі зменшенням часу розгону істотно збільшується величина механічного навантаження при пуску.

Унаслідок значної вартості обладнання, а також відсутності можливості тривалого дослідження параметрів роботи на діючому шарошечні верстаті, єдиним рішенням стає підбір часу розгону при цифровому моделюванні.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розробка уточненої моделі системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» і дослідження процедури пуску з реалізацією функції обмеження струму статора.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Функцію обмеження струму можна реалізувати як в пристроях плавного пуску з двома регульованими фазами, так і з трьома регульованими фазами. Недоліком двох регульованих фаз є наявність постійної складової струму статора на низьких швидкостях обертання валу двигуна, що призводить до додаткового загальмування двигуна. Для важких режимів пуску таке загальмування стає критичним і може привести до відмови силових тиристорів через перевантаження по струму. Таким чином, дослідження можливості застосування пристрою плавного пуску для компресора шарошечного верстата доцільно тільки в разі трьох регульованих фаз. Для дослідження електромеханічних систем широко застосовується математичний пакет MATLAB і його додаток Simulink [6, 7, 8]. Ми використовуємо готову модель УПП з можливістю розімкненого управління і замкнутого по швидкості [5].

Відразу слід зазначити, що використовувана в вихідній моделі система регулювання з ПП – регулятором і зворотним зв'язком за швидкістю в реальних системах не використовується. Контур регулювання струму статора в існуючих пристроях плавного

пуску, наприклад [4] не містить ПІ – регулятор вихідний координати, а працює в режимі двохпозиційного управління. Відмінності також мають місце в способі обчислення струму статора – по датчику однієї з фаз або за середнім значенням від датчиків всіх трьох фаз [10].

Алгоритм пуску з функцією обмеження струму відбувається в наступній послідовності. Від задатчика інтенсивності по зміні кута відмикання тиристорів відбувається зменшення кута відмикання і здійснюється розгін двигуна. При досягненні максимального заданого значення по струму значення кута відмикання фіксується на останньому значенні до спадання струму до нижнього порога, після чого продовжується процес збільшення вихідної напруги. Після зменшення кута відмикання до мінімального значення перевіряється значення струму статора. Якщо це значення впало нижче 120% від номінального струму, то пуск вважається виконаним і замикається обхідний контактор [10]. Схема системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун», реалізована в додатку Simulink прикладного пакета MATLAB, представлена на рис.1. В якості досліджуваного двигуна компресора використовувався двигун потужністю 200 кВт, параметри якого були в блоці Asynchronous_machine_pu_units.

Особливістю представленої моделі, на відміну від реалізованої в [2], є реалізація функції обмеження струму в блоці Control_system і компресорного характеру навантаження для асинхронного двигуна [10]. Обчислення струму статора проводиться за виміряними величинами струму у всіх трьох фазах і визначенню середнього значення. У використовуваній моделі цю функцію виконує блок current_calc.

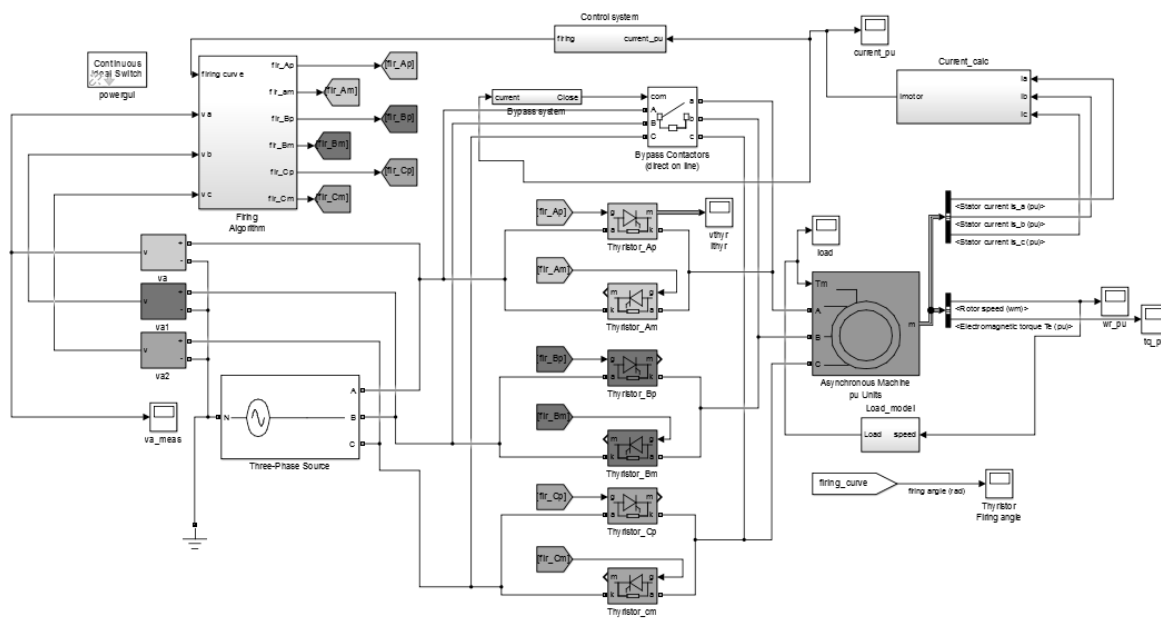


Рисунок 1 – Математична модель системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» в додатку MATLAB

Залежність навантаження двигуна від його швидкості представлена виразом:

$$M = M_{\text{пуск}} + k \cdot \omega^n,$$

де $M_{\text{пуск}}$ – початкове значення моменту навантаження, k – коефіцієнт навантаження компресора, ω – швидкість обертання валу двигуна, $n = 1,25$ – коефіцієнт, що визначає компресорний характер навантаження.

Блок обмеження струму реалізований у вигляді схеми, представленої на рисунку 2.

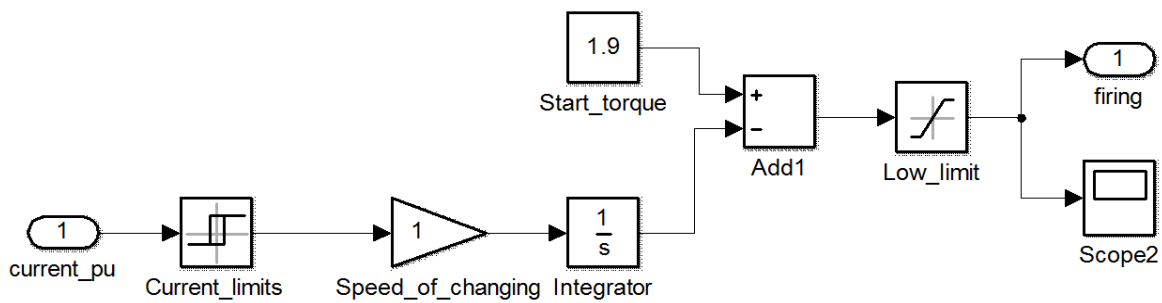


Рисунок 2 – Математична модель блоку обмеження струму статора при пуску асинхронного двигуна

Значення початкового пускового моменту $start_torque$ задається в радіанах та відповідає початковому куту відпирання тиристорів. У більшості випадків інженерами – електромеханіками воно визначається емпіричним методом та залежить від початкового моменту навантаження. Блок Low_limit забезпечує позитивне значення величини кута відпирання в кінці пуску.

Значення граничного струму статора при пуску визначається в функціональному блоці $Current_limits$ і визначається проектувальником в першу чергу виходячи з потужності джерела напруги, а також величини просідання напруги під час пуску. Оскільки потужність шарошkových бурових верстатів є співрозмірною з потужністю джерела живлення, тому кратність пускового струму прагнуть зробити мінімальною. З іншого боку при установці малого значення пускового струму двигун може не запуститися і «зависнути» на максимальному струмі. Контроль «зависання» пуску здійснюється перед замиканням обхідного контактора блоком $Bypass_control$. Якщо по закінченню, встановленого проектувальником часу, струм статора спав до значення, пуск вважається виконаним і обхідний контактор замикається, в іншому випадку тиристори відключаються. В реалізованій моделі час, що відводиться на пуск двигуна, становить 8 секунд. Кратність граничного значення струму статора становить 3,8 при включенні режиму обмеження і 3,7 при виключенні цього режиму. Початковий момент навантаження складає 10 % від номінального, що відповідає легкому пуску.

Графік перехідного процесу за середнім значенням струму статора, швидкості, навантаження і розі відмикання тиристорів представлені на рисунках 3–6.

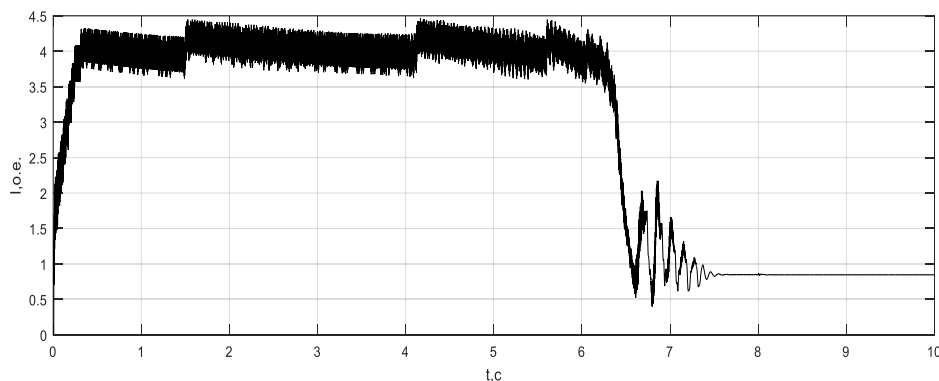


Рисунок 3 – Графік перехідного процесу за струмом статора при пуску

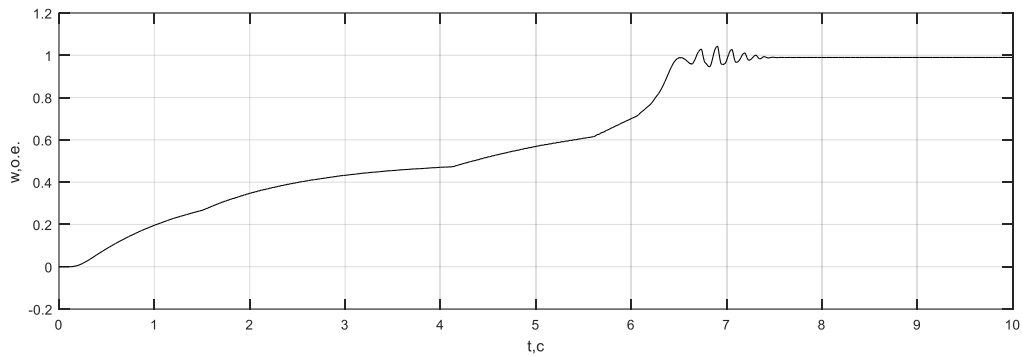


Рисунок 4 – Графік перехідного процесу за швидкістю при пуску

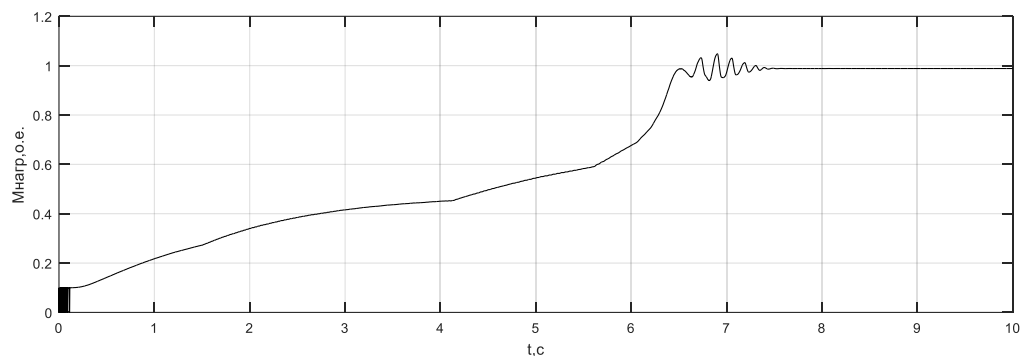


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу за моментом навантаження при пуску

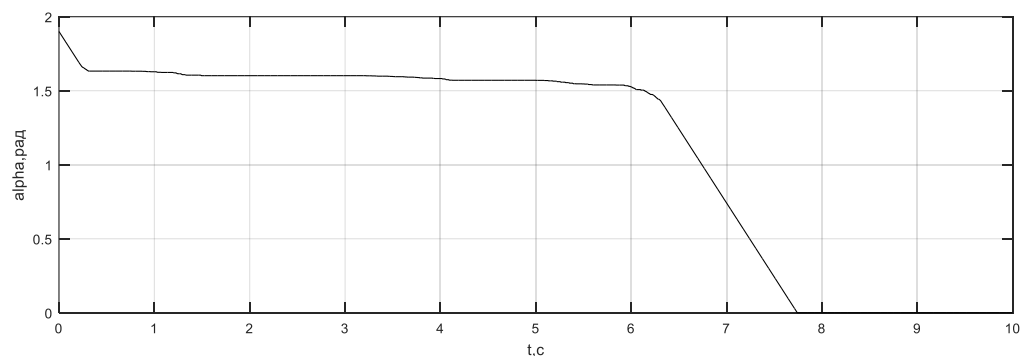


Рисунок 6 – Графік перехідного процесу за кутом відпирання при пуску

ВИСНОВКИ та перспективи подальших досліджень

Виходячи з отриманих графіків перехідних процесів, а також в результаті додаткових досліджень, по найбільш важливим механічними та електричними параметрами роботи двигуна, можна зробити ряд важливих висновків.

1. Застосування ППП дозволяє знизити значення пускових струмів більш, ніж в 2 рази для компресорної установки. Так, в умовах легкого пуску значення кратності струму статора 3,8 досить для розгону двигуна до номінальної швидкості.

2. Реальне значення струму двигуна, внаслідок інерційності електромагнітної частини, може істотно перевищувати задану межу і може становити до 4,5 від номінального.

3. Розгін двигуна по швидкості для компресорної навантаження при реалізації функції обмеження струму здійснюється рівномірно без істотних стрибків і коливань в процесі розгону.

4. При збільшенні початкового моменту навантаження до 20 % від номінального

двигун може не розігнатися до номінальної швидкості, тобто повноцінний запуск двигуна не здійснюється. В цьому випадку рекомендується використовувати функцію початкового кидка по току для зсуву двигуна з місця і досліджувати динаміку системи з урахуванням впливу цього впливу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.С. Хілов, *Системи керування автоматизованими електроприводами кар'єрних верстатів шарошкового буріння*. Дніпро, Україна: Національний гірничий університет, 2013.
- [2] А.В. Чермалих, В.М. Чермалих, та І.Я. Майданський, «Вибір раціональних систем автоматизованого управління компресорних станцій теплового насосу», *Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»*, 2012, №50 (956), с.107–116.
- [3] А.В. Торопов, «Підвищення рівня автоматизації шахтних водовідливних установок при живленні насосів від пристроїв плавного пуску», *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", Серія «Гірництво»*, 2014, №26, с. 110–115. DOI: <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2014.26.52972>
- [4] І.М. Голодний, та Ю.М. Лавріненко, «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.
- [5] А.П. Калинов, М.Ю. Юхименко, та С.В. Исаев, «Исследование эффективности формирования пусковых режимов асинхронного двигателя», *Електротехнічні і енергозберігаючі системи: Сб. Кременчуг. гос.политех. ун-та им. М. Остроградского*, 2007. No2(2), с.15–21.
- [6] С.Г. Герман–Галкин, *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0*. СПб. Росія: Корона принт, 2001.
- [7] С.Г. Герман–Галкин, *Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab– Simulink*. СПб.Росія: Лань, 2013.
- [8] А.К. Акопян, А.Е. Власов, и Б.Н. Кантлоков, «Исследование режима работы асинхронного двигателя с устройством плавного пуска в среде MATLAB», *Тенденции развития науки и образования, вып.1., 2018, часть 2*, 2018, с. 9–11.
- [9] В.Н. Назаренко, и К.В. Назаренко, «Моделирование устройств плавного пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в среде MATLAB SIMULINK», *Збірник наукових праць СНУАЕтаП. Розділ «Інформаційні системи і технології»*, 2018, с. 207–217.
- [10] І.М. Голодний та ін. *«Регульований електропривод»*, К. Україна: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015.

Дата надходження статті до редакції 12.03.2021.