

ВПЛИВ FACTS НА РЕЖИМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ПРЯМОГО ПУСКУ ПОТУЖНОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ У СКЛАДІ КОМПЛЕКСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О.Ф. Буткевич*, докт.техн.наук, **О.І. Чиженко**, докт.техн.наук, **О.М. Попович****, докт.техн.наук,
І.В. Трач***, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: butkevych@ied.org.ua, alivchizh@ukr.net, popovich1955@ukr.net, igor.trach@ied.org.ua

Досліджено вплив запропонованої гнучкої системи передачі змінного струму (FACTS) на процеси прямого пуску потужної асинхронної машини (АМ), що входить до складу комплексного навантаження (КН) вузла електричної мережі (ЕМ). Побудову та дослідження моделі ЕМ, що містить КН та FACTS, виконано в середовищі MATLAB-Simulink. Одержані результати свідчать, що FACTS суттєво обмежує вплив пускового струму АМ на параметри режиму ЕМ. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрична мережа, прямий пуск асинхронної машини, FACTS.

Вступ. До засобів, що можуть істотно впливати на ефективність функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС), належить створене з використанням пристроїв силової електроніки статичне обладнання різного функціонального призначення, спроможне цілеспрямовано змінювати значення таких взаємопов'язаних параметрів, як напруга, струм, повний опір, кут фазового зсуву між векторами напруги на кінцях лінії електропередачі (ЛЕП) та ін. Таке обладнання називають по-різному (*гнучкі системи передачі електроенергії змінним струмом, гнучкі системи передачі змінного струму, керувані гнучкі електропередачі змінного струму*), що є наслідком довільного перекладу англійського словосполучення *Flexible alternating current transmission systems*. З урахуванням цього факту, щоб уникнути неоднозначності трактувань, далі такі системи позначатимемо аббревіатурою FACTS [5].

В ЕЕС FACTS використовують з різною метою, зокрема для перерозподілу потоків потужності по ЛЕП, регулювання напруги, демпфірування коливань параметрів режиму ЕЕС, підвищення статичної та динамічної стійкості ЕЕС, виконання функцій активних фільтрів (компенсації неактивної потужності) та іншого [4–6]. Більшість відомих прикладів ефективного використання FACTS в ЕЕС стосуються магістральних ЛЕП та дещо менше – розподільних електричних мереж (РЕМ). В [1] із використанням тестової моделі (схеми) ЕЕС, що містить як магістральні ЛЕП, так і РЕМ, показано можливість забезпечення максимальної пропускної здатності електричних мереж на базі застосування FACTS.

Більшість FACTS орієнтовано на використання в усталених (квазіусталених) режимах ЕЕС, зокрема і для демпфірування коливань параметрів режиму ЕЕС. Однак *усталений режим ЕЕС* – це певна ідеалізація стану ЕЕС, оскільки в дійсності час від часу відбуваються «експлуатаційні» збурення режиму, які не є загрозливими для обладнання ЕЕС та споживачів електроенергії. Такі збурення переважно обумовлюються змінним характером технологічних процесів у вузлах навантаження з відповідною зміною потужності електроспоживання та *введенням/виведенням* обладнання *в роботу/з роботи* на електричних станціях та підстанціях. З огляду на значення, яких можуть набувати окремі параметри режиму ЕЕС, далеко не усі із зазначених «експлуатаційних» збурень є допустимими. Характерним прикладом «експлуатаційних» збурень режиму електричної мережі (ЕМ), які можуть бути недопустимими, є збурення, обумовлені прямим пуском електродвигунів (ЕД), потужність яких є зіставною з потужністю мережі електроживлення ЕД. За таких умов в ЕМ протікатимуть пускові струми ЕД, що становитимуть, згідно з [8], 600–650% від номінальних (300–500% – у разі модифікованих роторів ЕД) і значно перевищуватимуть допустимі струми ЕМ з усіма негативними наслідками для обладнання таких мереж та інших складових комплексного навантаження (КН). Зокрема пускові струми можуть призводити до такого зниження напруги, що пусковий момент ЕД знизиться пропорційно квадрату напруги, тривалість пуску збільшиться, що призведе до перегріву двигуна і втрати

© Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В., 2018
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-6613-0911>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-3345-2324>

його працездатності. Крім того, значна просадка напруги негативно позначатиметься на роботі іншого обладнання, що входить до складу КН таких вузлів.

Щоб запобігти недопустимим збуренням режиму ЕМ у таких випадках, залежно від потужності та кількості ЕД вводять відповідні обмеження, зокрема у вигляді послідовності пусків ЕД. Інший підхід базується на використанні пристроїв (так званих *soft starters* [9,10]), що забезпечують плавний пуск ЕД, тим самим обмежуючи пусковий струм. Однак для ЕД, що мають значний момент інерції, застосування таких пристроїв може не забезпечити пуск ЕД за напруг, менших від номінальної. Не зважаючи на можливі варіанти використання технічних засобів для забезпечення пуску ЕД, особливо потужних, основною альтернативою прямому пуску ЕД є частотний пуск, пов'язаний із застосуванням перетворювачів частоти [8]. На відміну від прямого пуску ЕД зі значними пусковими струмами і відповідними просадками напруги, частотний пуск забезпечує плавність пуску і може застосовуватися за різних умов (у разі як сильних, так і слабких ЕМ, з повним чи частковим навантаженням). Разом із тим використання частотного пуску має і свої недоліки. Один із них стосується вартості: у порівнянні з прямим пуском потужних ЕД витрати у разі використання частотного пуску зростають у 2,5 рази [8]. Інший – стосується надійності: оскільки пристрої частотного пуску вмикаються послідовно з ЕД, то при пошкодженні перетворювача ЕД втрачає електроживлення (вочевидь, надійність електроживлення двигуна буде вищою, якщо перетворювач приєднуватиметься до нього паралельно). Зазначимо, що одне з рішень із паралельним приєднанням допоміжного пристрою, який забезпечує прямий пуск ЕД, розглянуто в роботі [3]: такий пристрій складається з тиристорного мостового регульованого компенсатора (ТРК) та фільтрів вищих гармонік (ФВГ), і відносно основної (першої) гармоніки струму проявляє себе як конденсатор із регульованою у широкому діапазоні ємністю. У разі пуску ЕД він замикає на себе реактивну (індуктивну) складову пускового струму ЕД, внаслідок чого елементи ЕМ значною мірою розвантажуються від пускового струму. Протягом пуску в елементах ЕМ спостерігатимуться надструми, якщо не використовувати ТРК у поєднанні з ФВГ (такі пристрої за основними ознаками можна класифікувати як FACTS, тому далі ТРК у поєднанні з ФВГ вважатимемо FACTS). Використання такої FACTS зменшує тривалість та амплітуду надструму в елементах ЕМ. Тобто використання FACTS суттєво зменшує вплив пускового струму ЕД та покращує якість перехідного режиму, що виникає в ЕМ внаслідок пуску ЕД.

На підставі викладеного вище можна дійти висновку, що розробка ефективних технічних рішень з використанням FACTS для надійного забезпечення допустимих параметрів режиму ЕМ за прямого пуску потужних ЕД є актуальною задачею. Оскільки асинхронні машини (АМ) є найпоширенішими електричними машинами, які використовують у різних галузях економіки та побуті (переважно як ЕД, рідше – як генератори), то далі для визначеності замість ЕД використовуватимемо дещо «конкретнішу» аббревіатуру АМ, а у дослідженнях – модель АМ.

Мета роботи – довести результатами модельно-розрахункових досліджень принципів можливості використання запропонованої в роботі FACTS для надійного забезпечення прямого пуску потужної АМ від електромережі із суттєвим обмеженням впливу пускового струму АМ на параметри режиму ЕМ.

Для досягнення зазначеної мети в середовищі MATLAB-Simulink було розроблено: схемо-технічне рішення та модель нової FACTS, детальну математичну модель динаміки АМ у складі електромеханічної системи насосної установки, з використанням яких створено комплексну модель для дослідження впливу FACTS на режим ЕМ за прямого пуску АМ.

Особливості ТРК – основної складової FACTS. Під час вибору пристроїв FACTS слід враховувати схемо-параметричні та режимні особливості конкретних об'єктів. Недоліком розглянутого в [3] одномостового ТРК за схемою з відсікаючими діодами є те, що для придушення вищих гармонік струму, які генеруються під час роботи ТРК, потрібно було використовувати потужні ФВГ. Такі ФВГ в усталених режимах генерують в ЕМ значну реактивну потужність, що у деяких випадках може призвести до режимів значної перекомпенсації реактивної потужності в ЕМ. Щоб запобігти цьому, пропонується використовувати FACTS, утворену двомостовим ТРК із ФВГ (загальну схему ТРК показано на рис. 1, де позначено: М1, М2 – перший та другий міст відповідно; ПЕЗ – пристрої захисту).

ТРК приєднано до ЕМ через узгоджувальний триобмотковий трансформатор (ТРФЗ), де первинну трифазну обмотку з'єднано у зірку; одну вторинну трифазну обмотку, до якої приєднано перший міст (М1), теж з'єднано у зірку, а другу вторинну трифазну обмотку, до якої приєднано другий міст (М2), з'єднано у зворотний трикутник. За такої схеми вхідні фазні напруги М2 на 30 електричних градусів випереджають вхідні фазні напруги М1, наслідком чого є зменшення амплітуд найбільш

вагомих (5-ї, 7-ї та інших) гармонік струму, що генеруються ТРК і «проникають» в ЕМ. Це дає змогу суттєво зменшити потужність пасивних ФВГ. Особливістю таких FACTS, яка відсутня в інших альтернативних ТРК, є те, що для генерування реактивної потужності вони не потребують силових косинусних конденсаторів. Значення генерованої реактивної потужності електричного кола таких ТРК залежить від алгоритму керування встановленими тиристорами і обмежується лише активним опором електричного кола та швидкістю тиристорів, що використовуються (якщо точніше, то часом вимикання цих тиристорів). Слід підкреслити, що у разі аварійного виходу з роботи одного із мостів FACTS залишається працездатною, лише збільшуються коефіцієнти гармонік напруги та струму ($K_{ГН}$ та $K_{ГІ}$).

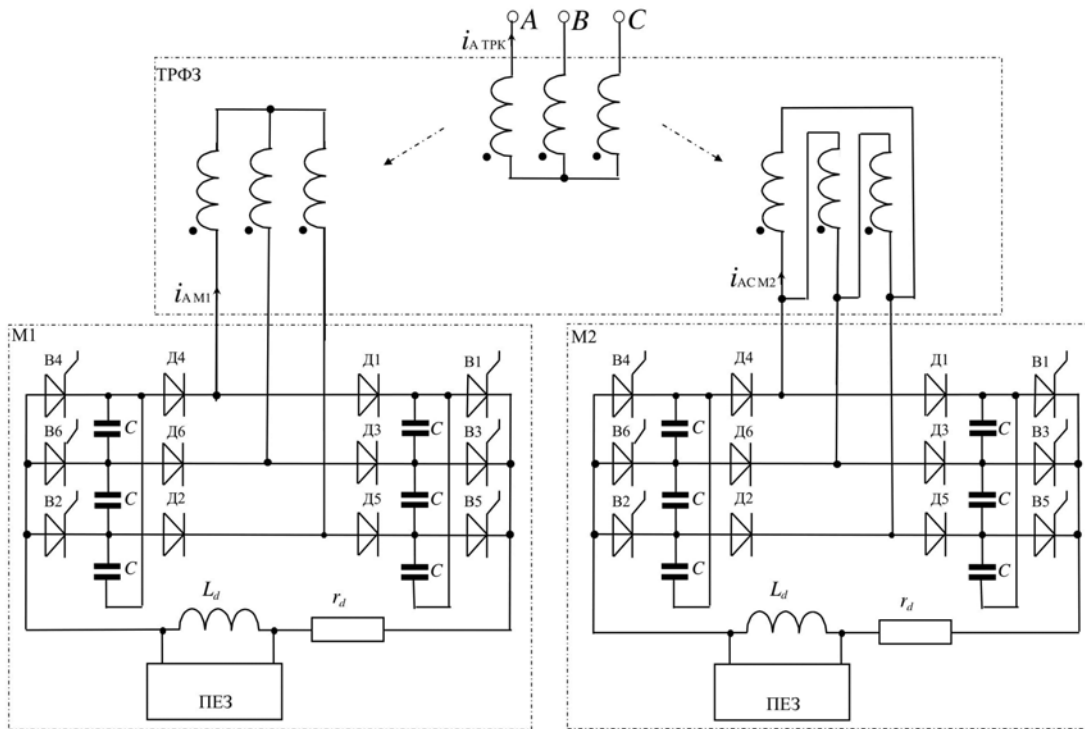


Рис. 1

Комплексна модель для дослідження впливу FACTS на перехідні режими в ЕМ, що виникають за прямого пуску АМ. Загальну структурну схему зазначеної моделі показано на рис. 2. Зв'язок ЕМ з електричною мережею номінальної напруги 110 кВ (її позначено РЕМ) забезпечує трифазний двообмотковий трансформатор номінальною потужністю 80 МВА (позначено символом Т) типу ТДН-80000/110-У1 (у дослідженнях використано каталогові дані). Навантаження у вузлах ЕМ у більшості випадків є комплексним, тому під час досліджень КН вузла ЕМ було подано у вигляді двох складових – на рис. 2 їх позначено Н та АМ. Складову Н подано паралельним з'єднанням активно-індуктивних елементів R_H-L_H ($R_H=0,756$ Ом, $X_H=0,96$ Ом), її активна та реактивна потужність в усталеному режимі становили відповідно 52,5 та 41,3 МВАр. Складову АМ подано моделлю електромеханічної системи насосної установки з асинхронним трифазним електродвигуном типу АВ-8000/6000У3 (такі двигуни використовують на теплових електростанціях як привод пускорезервних насосів живлення котельних агрегатів блоків потужністю 300 МВт). Значення лінійної напруги на шини приєднання КН (FACTS приєднано до цих самих шин) в усталеному режимі ЕМ становило 6,3 кВ.

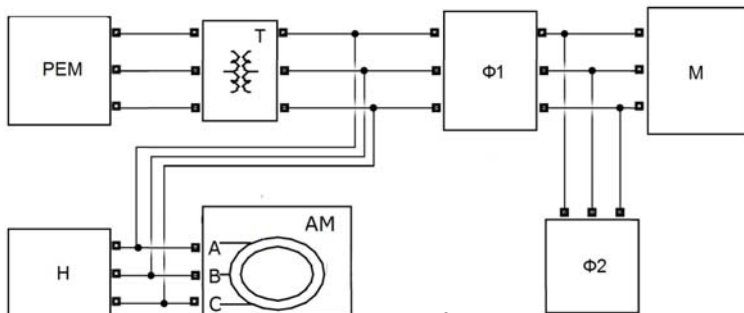


Рис. 2

Зупинимося детальніше на деяких особливостях реалізації та характеристиках моделей FACTS та АМ.

Модель FACTS містить складові: ТРК (на рис. 2 позначено символом М), послідовний фільтр (позначено Ф1) у вигляді активно-індуктивного дроселя та паралельний фільтр (позначено Ф2) у складі паралельно ввімкнутих резонансних LC фільтрів (другого порядку) 7-ї, 11-ї, 13-ї, 23-ї та 25-ї гармонік з добротністю 50 та фільтра верхніх частот. Реактивна ємнісна потужність фільтрів для першої гармоніки становить 16,9 МВАр, а втрати активної потужності – 64,1 кВт. Основу ТРК (рис. 1) складають два тиристорних мости (М1 та М2) за схемою з відсікаючими діодами (розраховані на подвійну лінійну напругу) та комутуючими конденсаторами ($C = 10$ мкФ). Регулювання струму ТРК здійснюється розрахованими на лінійну напругу тиристорами, час вимикання яких $\tau_q < 30$ мкс (при більших значеннях τ_q виникає проблема запирання тиристорів у режимах максимальних струмів). Індуктивність та активний опір дроселів у колах випрямленого струму мостів М1 та М2 відповідно становить $L_d = 4,7$ мГн та $r_d = 0,0156$ Ом. Значення активних опорів відкритих вентилів: тиристорів – $r_T = 10^{-4}$ Ом, діодів – $r_D = 10^{-4}$ Ом. Передбачається, що керування встановленими тиристорами мостів ТРК має здійснювати відповідна система керування, але для суттєвого зменшення часу розрахунків під час виконання модельно-розрахункових досліджень таке керування здійснювалося в ручному режимі (його не можна вважати оптимальним).

Модель АМ побудовано на основі математичної моделі АМ електромеханотронних систем у середовищі MATLAB-Simulink із використанням результатів польового аналізу для визначення залежностей параметрів заступної схеми відповідно до вимог комплексного дослідження динамічних процесів в ЕМ. Модельно-розрахункові дослідження процесів в ЕМ під час пуску АМ потребували адекватного відтворення зміни струмів фаз статора АМ, на які впливають напруга живлення, зміна швидкості ротора АМ (обумовлюється співвідношенням значень моментів: корисного на валу АМ, опору механізму, інерції), зміна електромагнітних параметрів АМ за зміни ковзання ротора і насичення магнітного кола. Адекватність математичної моделі динаміки АМ оцінювалася за інформацією про статичні залежності зміни струмів статора та моменту АМ у функції ковзання (наведено у довідниковій літературі) та «кидки» значень струмів і моментів внаслідок електромагнітних перехідних процесів (останні визначалися з використанням співвідношень активних та індуктивних параметрів АМ). Модель АМ адекватно враховує зміну електромагнітних параметрів ротора і розсіювання статора – у функції ковзання, а головного індуктивного опору – у функції ковзання і сумарної магнітної сили завдяки визначенню за результатами польового аналізу зміни еквівалентного немагнітного проміжку між статором та ротором, що є необхідною умовою отримання розрахункових кратностей пускових струмів і моменту, які відповідають довідниковим [7]. У моделі використано інформацію щодо конструктивних параметрів асинхронного двигуна АТД-8000 (які є вихідними для розрахунку електромагнітних параметрів), струмів, моментів, енергетичних коефіцієнтів у пускових та робочих режимах відповідно до [2].

		Номінальний режим					Пусковий режим			
		P_2 , МВт	ω_r , с ⁻¹	M_2 , Н·м	I_s , А	ККД	$\cos \varphi$	M_2 , Н·м	I_s , А	$\cos \varphi$
Дані довідника		8	303.7	26343	876.6	0.965	0.91	25026	5259.7	–
Результати розрахунку з параметрами	номінальними	8.0028	304.3	26300	876.2	0.958	0.9179	19151	4105	0.1556
	пусковими	7.8137	297	26300	2929	0.906	0.2834	25560	5272	0.1651

У таблиці наведено для порівняння дані довідника [2] і відповідні результати розрахунку номінального і усталеного короткого замикання режимів зі сталими параметрами, де позначено: P_2 – корисна потужність АМ; ω_r – частота обертання ротора; M_2 – корисний момент на валу; I_s – діюче значення струму фази статора; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності; ККД – коефіцієнт корисної дії.

Результати розрахунку статичних пускових характеристик зі змінними параметрами показано на рис. 3, де представлено залежності у функції частоти обертання ротора таких величин: I_s , M_2 та пасивного моменту опору механізму – насоса (M_0), що складається з двох частин. Перша частина є

сталою величиною у разі швидкості, більшої від граничного значення (під час моделювання було задано значення: моменту – 5% від моменту навантаження наприкінці розгону насосного агрегату із закритою засувкою напірного патрубка, який прийнято 60% від моменту двигуна, обраного з коефіцієнтом запасу 1,1; швидкості – $0,5 \text{ c}^{-1}$), а у разі меншої швидкості момент лінійно зменшується до нуля. Друга частина моменту опору змінюється пропорційно квадрату швидкості від нуля до значення моменту наприкінці розгону. Використання змінних параметрів забезпечує достатню точність розрахунків у всьому діапазоні зміни ковзання. З рис. 3 видно, що розрахункова кратність максимального моменту відповідає довідниковому значенню 2,5.

Результати розрахунку динамічного режиму пуску АМ з моментом опору (рис. 3) і моментом інерції $300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ представлено на рис. 4 – часові залежності зміни корисного моменту АМ, діючого значення струму фази А, частоти обертання ротора, моменту опору.

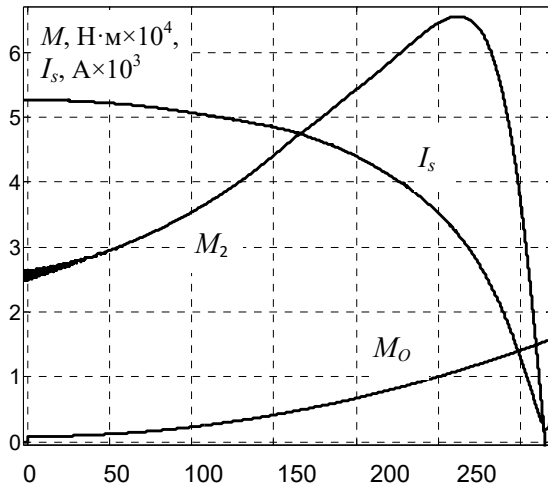


Рис. 3

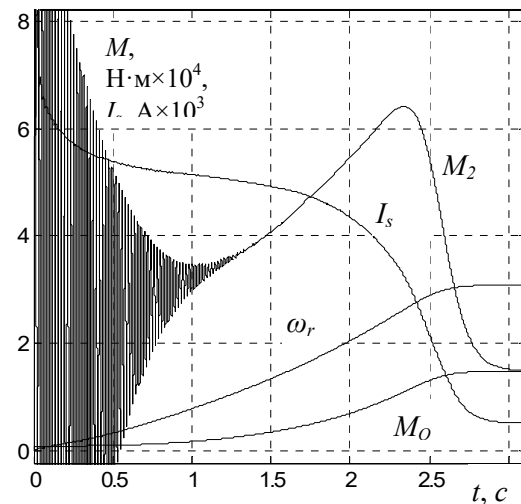


Рис. 4

Розрахунковий час пуску становить 3 с, ударний пусковий момент перевищує його усталене значення у 4,5 рази, ударне значення амплітуди пускового струму перевищує амплітуду усталеного пускового струму в 1,9 рази.

Результати досліджень, одержані з використанням комплексної моделі. Насамперед зазначимо, що потужність навантаження Н у складі КН значно перевищує потужність АМ. Однак, якщо брати до уваги вплив пускового струму АМ на параметри режиму ЕМ, то останні можуть сягати критичних значень. Використання ж FACTS забезпечує прямий пуск АМ, компенсуючи значну частку пускового струму АМ у струмі ЕМ, без перевищення допустимого рівня гармонік у параметрах режиму ЕМ (під час досліджень в усталеному режимі ЕМ сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги становив 3,47%, що відповідає вимогам чинного вітчизняного стандарту ДСТУ EN 50160:2014, згідно з яким зазначений сумарний коефіцієнт не має перевищувати 8 %).

На рис. 5 показано графіки, що відтворюють зміну фазних струмів (у кА) – ЕМ (рис. 5, а), КН (рис. 5, б), FACTS (рис. 5, в) – та фазної напруги (у кВ) на шинах приєднання КН (рис. 5, г) до та під час пуску АМ (пуск АМ почався о 0,12 с), потовщеною суцільною лінією виділено графіки струмів і напруги фази А.

З рис. 5, б видно, що пусковий струм АМ спричинив збільшення струму КН (сума струмів Н та АМ) фактично вдвічі (до пуску АМ в ЕМ був усталений режим живлення лише активно-індуктивного навантаження Н), але завдяки FACTS, що замикає на себе реактивну складову пускового струму АМ, зростання струму в ЕМ склало лише частину від пускового струму АМ. Максимальна реактивна потужність генерування FACTS під час прямого пуску АМ становила 112,5 МВАр. На підставі результатів аналізу графіків на рис. 5, б та рис. 5, в можна дійти висновку, що кут увімкнення FACTS з метою компенсації реактивної потужності в ЕМ не є оптимальним, що обумовлено використанням «ручного керування» тиристорами мостів ТРК. Внаслідок незначної перекомпенсації реактивної потужності в ЕМ відбулося деяке зростання напруги на шинах приєднання КН (рис. 5, г). Тривалість перехідного процесу, спричиненого прямим пуском АМ, становила 3,5 с (на рис. 5 показано результати моделювання процесів в ЕМ лише протягом перших 0,4 с).

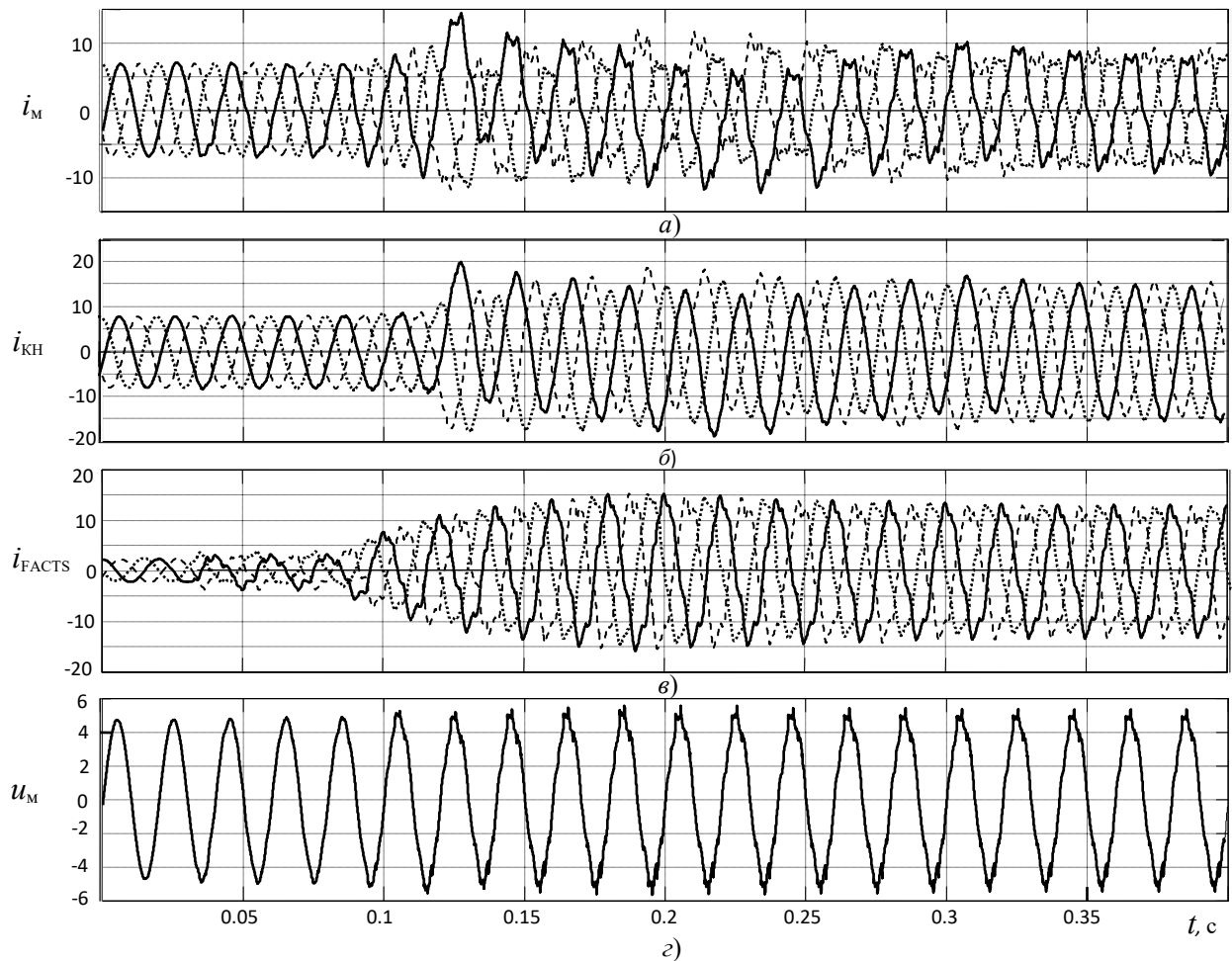


Рис. 5

Висновки. Результати модельно-розрахункових досліджень свідчать, що запропонована в даній роботі FACTS може забезпечувати прямий пуск потужної АМ, яка входить до складу КН вузла ЕМ, суттєво обмежуючи вплив пускового струму АМ на параметри режиму ЕМ.

1. Буткевич О.Ф., Костира І.А. Використання FACTS для підвищення пропускної здатності електричних мереж. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 44. С. 5-12.
2. Справочник по ремонту крупных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.
3. Чиженко О.І., Трач І.В. Коригування режиму слабкої електричної мережі при запуску від неї електродвигуна зіставної потужності. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 48. С. 27-32.
4. Dubey R.K., Suman S.K. Control of Power System Stability through FACTS. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*. 2015. Vol. 1. No 8. Pp. 352-359.
5. Hingorari N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 p.
6. Padiyar K.R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. Published by New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 532 p.
7. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 69-72.
8. Selecting the right strategy for starting large motors. *Application edge*. 2016. Vol. 1. No 3. URL: <https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/Application%20Edge-v1i3-Starting%20Large%20Motors.pdf>
9. Softstarter Handbook. URL: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>
10. When to use a Soft Starter or an AC Variable Frequency Drive. Rockwell Automation Publication 150-WP007A-EN-P. October 2014. 22 p. URL: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ FACTS НА РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ПРЯМОМ ПУСКЕ МОЩНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ

А.Ф. Буткевич, докт.техн.наук, А.И. Чиженко, докт.техн.наук, А.Н. Попович, докт.техн.наук, И.В. Трач, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: butkevych@ied.org.ua, alivchizh@ukr.net, popovich1955@ukr.net, igor.trach@ied.org.ua

Исследовано влияние предложенной гибкой системы передачи переменного тока (FACTS) на процессы прямого пуска мощной асинхронной машины (АМ), входящей в состав комплексной нагрузки (КН) узла электрической сети (ЭС). Построение и исследование модели ЭС, содержащей КН и FACTS, выполнено в среде MATLAB-Simulink. Полученные результаты свидетельствуют, что FACTS существенно ограничивает влияние пускового тока на параметры режима ЭС. Библиограф. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электрическая сеть, прямой пуск асинхронной машины, FACTS.

AN INFLUENCE OF THE FACTS UPON AN ELECTRICAL NETWORK'S MODE DURING DIRECT START-UP OF AN ASYNCHRONOUS MACHINE IN THE COMPLEX LOAD'S COMPOSITION

O.F. Butkevych, O.I. Chyzenko, O.M. Popovych, I.V. Trach

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: butkevych@ied.org.ua, alivchizh@ukr.net, popovich1955@ukr.net, igor.trach@ied.org.ua

An influence of the proposed Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) on the processes of direct start-up of a powerful asynchronous machine (AM) included in the complex load's node of the electrical network (EN) has been studied. The construction and study of the EN model containing AM and FACTS were performed in the MATLAB-Simulink environment. Obtained results indicate that FACTS significantly limits an influence of the AM start-up current on the parameters of the EN's mode. References 10, table 1, figures 5.

Key words: electrical network, direct start-up of an asynchronous machine, FACTS.

1. Butkevych O.F., Kostyrya I.A. Using FACTS to increase a throughput of electrical networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 44. Pp. 5-12. (Ukr)
2. Handbook on the repair of large electric motors. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 272 p. (Rus)
3. Chyzenko O.I., Trach I.V. An adjustment of a weak electrical network's mode when starting an electric motor of comparable power. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. No 48. Pp. 27-32. (Ukr)
4. Dubey R.K., Suman S.K. Control of Power System Stability through FACTS. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*. 2015. Vol. 1. No 8. Pp. 352-359.
5. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 p.
6. Padiyar K.R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. Published by New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 532 p.
7. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 69-72.
8. Selecting the right strategy for starting large motors. *Application edge*. 2016. Vol. 1. No 3.
URL: <https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/Application%20Edge-v1i3-Starting%20Large%20Motors.pdf>
9. Softstarter Handbook.
URL: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>
10. When to use a Soft Starter or an AC Variable Frequency Drive. Rockwell Automation Publication 150-WP007A-EN-P. October 2014. 22 p.
URL: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf

Надійшла 28.02.2018

Остаточний варіант 31.08.2018