

УДК 621.311 + 621.3.001.57

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.031>

## МІНІМІЗАЦІЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ПУСКОВИХ СТРУМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ПАРАМЕТРИ РЕЖИМУ «СЛАБКОЇ» ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

**О.Ф. Буткевич**<sup>1,2</sup>, докт. техн. наук, **О.І. Чиженко**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **І.В. Трач**<sup>1</sup>, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна

2 – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна.

e-mail: [butkevych@ied.org.ua](mailto:butkevych@ied.org.ua) [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net) [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)

*Запропоновано схему технічного рішення пристрою для прямого пуску асинхронного двигуна (АД) від «слабкої» електричної мережі (ЕМ). Такий пристрій зменшує негативний вплив пускового струму АД на параметри режиму ЕМ. Показано, що запропоноване рішення має переваги у порівнянні з відомими рішеннями такого ж призначення. Бібл. 9, рис. 4, таблиця*

**Ключові слова:** електрична мережа, прямий пуск асинхронного двигуна, тиристорний регульований компенсатор.

**Загальна характеристика проблеми.** В основі парадигми сучасного етапу розвитку світової енергетики знаходиться концепція Smart Grid, практична реалізація основних положень якої має національні та регіональні відмінності й особливості. Зазначений розвиток енергетики відбувається на базі застосування широкого спектра інноваційних технологій та засобів, до яких належать і пристрої, реалізовані з використанням елементів силової електроніки для цілеспрямованого впливу на режими електроенергетичних систем. Такі пристрої набувають поширення і у вузлах навантаження електричних мереж (ЕМ) різного призначення. Розподільні мережі та системи електропостачання забезпечують виконання кінцевого етапу електроенергетичного виробництва, що стосується «доведення» електроенергії до кінцевих споживачів. У таких ЕМ перманентно існує проблема забезпечення якості електроенергії у споживачів, насамперед у сільській місцевості (особливо «дошкульними» є низькі рівні напруги). Стан справ із забезпеченням якості електроенергії в таких ЕМ може значно погіршуватися у разі використання споживачами засобів та систем виробничого призначення, значну частку потужності яких становлять асинхронні двигуни (АД). Оскільки ж значна кількість малих та середніх підприємств України, насамперед акціонерної та приватної форм власності, реєструє та розташовує свої виробничі фонди за межами великих міст (переважно в сільській місцевості), то гострота проблеми негативного впливу прямих пусків АД на режими ЕМ (зростання перехідних надструмів в лінії електроживлення, просідання напруги у вузлах приєднання суміжних навантажень та інше) лише посилюється. Невідповідність значень напруги таких «слабких» ЕМ нормативним вимогам негативно впливатиме на працездатність та стан електрообладнання і у самого споживача, зокрема безпосередньо стосуватиметься і АД, оскільки пускові струми АД призводитимуть до зниження напруги, тривалість пуску буде збільшуватися (пусковий момент АД пропорційний квадрату напруги), АД перегріватиметься і втрачатиме працездатність.

Для зменшення надструмів в ЕМ, що виникають під час пусків АД, використовують різні підходи та відповідні засоби. Один із таких підходів передбачає обмеження пускових струмів та забезпечення плавних пусків АД завдяки застосуванню так званих *soft starters* [1, 2]. Проте їхнє застосування можливе лише за певних умов (наприклад, запуск АД зі значним моментом інерції буде неможливим у разі напруг, менших від номінальної). Інший підхід до вирішення зазначеної проблеми передбачає застосування перетворювачів частоти [3]. Однак у разі такого застосування зменшується надійність електроживлення АД у порівнянні з випадком, коли пристрій, що забезпечує пуск АД, вмикається паралельно з ним, оскільки перетворювач частоти вмикається послідовно з АД, і у разі виходу із ладу послідовно приєднаного перетворювача припиняється живлення АД від ЕМ. На відміну від прямого пуску АД, використання як *soft starters*, так і перетворювачів частоти пов'язане з їх придбанням і відпові-

дними матеріальними (фінансовими) витратами (вартість перетворювачів частоти суттєво перевищує вартість *soft starters* в усьому діапазоні потужностей АД, для запуску яких їх використовують [3]). Однак використання будь-яких напівпровідникових пристроїв, що забезпечують зменшення впливу пускових струмів АД на параметри режиму ЕМ, загострює проблему електромагнітної сумісності обладнання таких споживачів електроенергії, оскільки використання зазначених пристроїв погіршує синусоїдність форми струмів живлення (споживання). Вирішенню проблеми електромагнітної сумісності електроспоживачів присвячено значну кількість досліджень та розробок, зокрема і [4, 5], переважна більшість яких стосується споживачів, що окрім технологічних особливостей функціонування мають і «свої» діапазони потужності електроспоживання.

Не дивлячись на існуючі підходи та відповідні технічні засоби для запобігання виникненню в ЕМ надструмів, обумовлених пусками АД, та погіршенню показників якості електроенергії, розробка ефективних засобів, що сприяють надійнішому та ефективнішому вирішенню зазначеної проблеми, не втрачає актуальності. У розробленні раціональних схемно-технічних рішень для забезпечення прямого пуску АД з мінімізацією впливу пускових струмів АД на режими ЕМ «чинник потужності» теж належить до основних – тих, що визначають характеристики та показники функціонування відповідних засобів. Тому, враховуючи викладене вище та більшу увагу, яка приділяється розвитку ЕМ внаслідок реалізації концепції Smart Grid, потребу забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв, що функціонуватимуть в ЕМ, **метою даної роботи** є дослідження розробленої схеми технічного рішення пристрою для прямого пуску АД від низьковольтної «слабкої» ЕМ, що зменшує негативний вплив пускового струму АД на режимні параметри зазначеної ЕМ і не має недоліків, притаманних відомим пристроям аналогічного призначення, та доведення результатами модельно-розрахункових досліджень ефективності такого рішення.

**Основні результати досліджень.** Один з підходів до зменшення надструмів у ЕМ, що виникають під час прямих пусків АД, базується на паралельному підключенні до АД допоміжного пристрою, основою якого є одно- чи багатомостовий тиристорний регульований компенсатор (ТРК). Для забезпечення прямого пуску АД від відносно «слабкої» ЕМ можна використати паралельне підключення допоміжного пристрою, що складається з одномостового ТРК (по схемі з відсікаючими діодами й комутуючими конденсаторами) та фільтрів вищих гармонік (ФВГ) струму. Такий ТРК, що відносно першої гармоніки струму поводить себе як конденсатор з регульованою у широкому діапазоні ємністю, під час прямого пуску АД забирає на себе реактивну (індуктивну) складову його пускового струму, яка становить значну частину цього струму. Внаслідок цього ЕМ значною мірою «розвантажується» від пускового струму АД. Такий підхід було використано у роботі [6] для запуску від мережі АД зіставної з нею потужності. Слід зазначити, що тривалість пускових струмів АД потужністю від 110 кВт становить більш ніж 23 періоди напруги живлення. Якщо не використовувати ТРК, то протягом часу, що відповідає 23 періодам напруги живлення, в ЕМ матимуть місце надструми. Використання ж ТРК обмежує тривалість надструмів у ЕМ до 1,5 періоди напруги живлення та істотно зменшує амплітуду пускового струму, значна частина якого на цьому проміжку часу відгалужується в ТРК. Тобто використання ТРК суттєво зменшує вплив пускового струму АД на параметри перехідного режиму ЕМ, виникнення якого зумовлено запуском АД. Однак недоліком такого схемно-технічного рішення є те, що для придушення вищих гармонік струму, які генерує ТРК, потрібно використовувати потужні ФВГ. Наприклад, в ЕМ напругою 0,4 кВ, потужність якої визначається силовим трансформатором ТМ 250/10/0,4 і від якої запускається АД потужністю 110 кВт, для забезпечення задовільного значення коефіцієнта гармонік напруги знадобляться ФВГ потужністю 144 кВАр. Такі ФВГ в усталених режимах генеруватимуть в ЕМ значну реактивну потужність ( $Q_{\text{ФВГ}}$ ), що в деяких випадках може призводити до режимів перекомпенсації реактивної потужності в ЕМ. З цього випливає, що наведене в [6] схемно-технічне рішення не позбавлене недоліків, які перешкоджають його використанню.

За результатами досліджень, що стосувалися забезпечення прямих пусків потужних АД з мінімізацією їхнього впливу на режимні параметри ЕМ живлення, було запропоновано схемно-технічні рішення з використанням двомостової схеми ТРК [7,8], позбавившись недоліків одномостової схеми ТРК [6], хоча потреба у використанні ФВГ і залишилася. Разом з тим, як показали результати подальших досліджень, пов'язаних з прямими пусками АД, що живляться від низьковольтної ЕМ обмеженої потужності, істотне зменшення негативного впливу пускового струму АД на режимні параметри зазначеної мережі можна забезпечити з використанням двомостової схеми ТРК (рис. 1) та ФВГ значно меншої потужності.

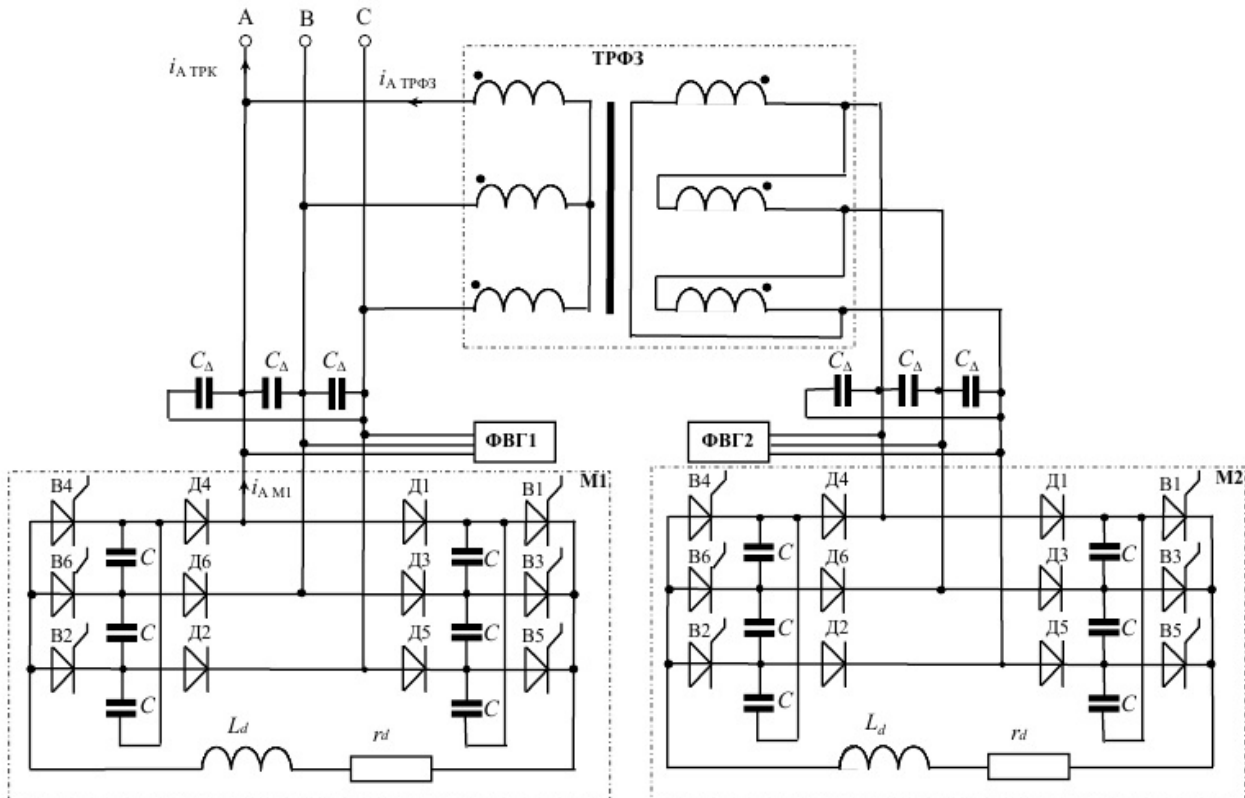


Рис. 1

У цій схемі (рис. 1), як і у працях [7, 8], ТРК складається з двох тиристорних мостів (М1 і М2). Перший з тиристорно-діодних мостів (М1) підключено безпосередньо до фаз ЕМ живлення, а другий (М2) – через фазозсувний трансформатор (ТРФ3), первинні обмотки якого зібрані у зірку, а вторинні – у зворотний трикутник. У разі такого виконання обмоток ТРФ3 вхідні фазні напруги мосту М2 за фазою випереджають на 30 електричних градусів (*гр.ел.*) вхідні фазні напруги мосту М1. Якби у схемі силові конденсаторні батареї (на схемі рис. 1 їх позначено трикутниками конденсаторів  $C_{\Delta}$ ) та фільтри ФВГ1 і ФВГ2 були відсутні, то струм на вході такого ТРК ( $i_{АТРК}$ ) формувався б виключно зі струмів тиристорно-діодних мостів М1 та М2, тобто зі струмів  $i_{АМ1}$  та  $i_{АТРФ3}$  так, як це показано на часових діаграмах цих струмів на рис. 2, де  $i_{АТРК} = i_{АМ1} + i_{АТРФ3}$ . При побудові діаграм на рис. 2 враховано процеси, що відбуваються у ТРФ3. На рис. 2 видно, що форма кривої сумарного струму  $i_{АТРК}$  на півперіоді ближче до синусоїди, ніж криві струмів  $i_{АМ1}$  та  $i_{АТРФ3}$  ( $i_{АМ1}$  за формою співпадає зі струмом одномостового ТРК, розглянутого у роботах [6, 9]), оскільки в  $i_{АТРК}$  суттєво зменшені амплітуди найвагоміших (5-ї, 7-ї та інших) гармонік струму, що їх генерує ТРК в ЕМ [7]. Присутність у схемі рис. 1 силових конденсаторних батарей та фільтрів ФВГ1 і ФВГ2 сприяють подальшому покращенню форми струму  $i_{АТРК}$ , наближаючи її до синусоїдної.

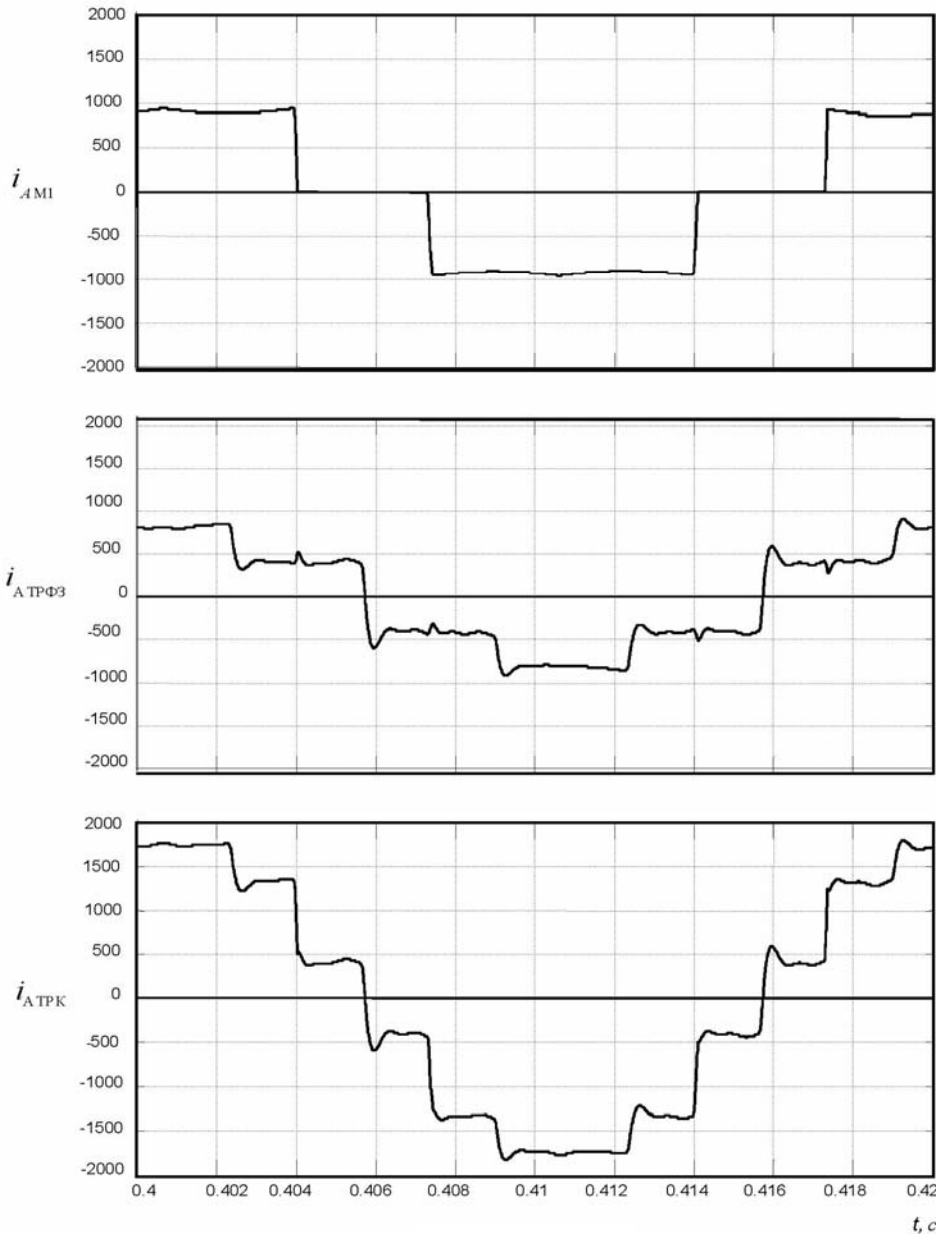


Рис. 2

чну реактивну потужність, яку генерує ТРК у мережу, у двомостовому перетворювачі (рис. 1) перебирають на себе силові конденсаторні батареї.

Регулювання струму ТРК здійснюється регулюванням кута управління тиристорами ( $\alpha$ ). Тиристри у запропонованій схемі розраховані на лінійну напругу та час встановлення їхніх запираючих властивостей (час вимикання)  $\tau_q < 30$  мкс (при більших значеннях  $\tau_q$  виникає проблема запирання тиристорів у режимах максимальних струмів).

З метою дослідження перехідних режимів у мережі з ТРК за схемою рис. 1, які виникають внаслідок пуску АД, було розроблено комп'ютерну модель, структурну блок-схему якої наведено на рис. 3, де ЕРС – трифазна симетрична електрорушійна сила нескінченної потужності, якою подано електричну систему; РТ – трансформатор обмеженої потужності (у конкретному випадку – 250 кВА), ЛП – лінія передачі електроенергії, Н – стаціонарне активно-індуктивне навантаження (у дослідженнях моделювалося зіркою з паралельно з'єднаними у кожному промені опорами – активним  $r_H$  та реактивним  $x_H$ ), АД – асинхронний двигун, який моделює електромеханічну складову вузлового комплексного навантаження мережі; ТРК – тиристорний регульований компенсатор за схемою, показаною на рис. 1.

Діаграми на рис. 2 побудовані для значення кута управління тиристорами  $\alpha = -74$  гр.ел. (відлік кута  $\alpha$  в обох мостах здійснюється від перетину синусоїд фазних електрорушійних сил) та параметрів моделі ТРК, які наводяться нижче.

Вочевидь, що за такого схемно-технічного рішення потужність ФВГ (яка у разі одномостового ТРК досить значна) суттєво зменшується. Однакові за структурою ФВГ1 та ФВГ2 у цьому випадку лише забезпечують належне функціонування конденсаторів силових батарей у мостах М1 та М2 відповідно. У порівнянні з одномостовим ТРК, потужність самих діодно-тиристорних мостів теж зменшується, оскільки знач-

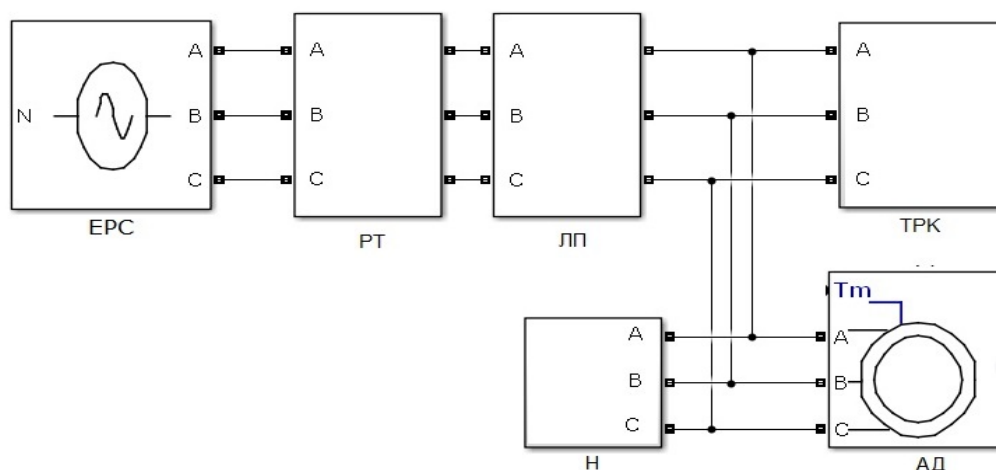


Рис. 3

Для дослідження впливу на параметри перехідних режимів ЕМ, що виникають під час прямих пусків АД, схемно-технічного рішення з реалізації пристрою за схемою рис. 1 було використано розроблену модель (рис. 3) з параметрами, значення яких наведено нижче.

### 1. Параметри ЕМ:

– опори мережі на частоті напруги живлення ( $f = 50$  Гц), що складаються із опорів РТ та ЛП  $r_{РТ+ЛП} = 0.0172$  Ом,  $x_{РТ+ЛП} = 0.0674$  Ом.

### 2. Параметри стаціонарного $r$ - $L$ навантаження (Н) на частоті напруги живлення:

– фазні опори у промені зірки паралельного  $r \parallel L$  навантаження  $r_H = 1.21$  Ом,  $x_H = 1.6133$  Ом,  $z_H = 0.968$  Ом;  
 – активна та реактивна потужності, які споживаються трьома фазами стаціонарного навантаження в усталеному режимі  $P_H = 120$  кВт,  $Q_H = 90$  кВАр.

### 3. Параметри ТРК:

– ємність комутуючого конденсатора становить  $10$  мкФ;  
 – параметри кола випрямленого струму  $L_d = 9.4$  мГн,  $r_d = 10^{-3}$  Ом;  
 – активні опори відкритих вентилів – тиристорів та діодів  $r_T = r_D = 10^{-4}$  Ом;  
 – ємності в плечах трикутників силових конденсаторних батарей  $C_\Delta = C_{сек1} + C_{сек2} = 850$  мкФ, де  $C_{сек1} = 250$  мкФ – ємність в плечі трикутника секції силової конденсаторної батареї, яка постійно підключена до мережі,  $C_{сек2} = 600$  мкФ, – ємність в плечі трикутника секції силової конденсаторної батареї, яка підключається лише на інтервалі пуску АД у момент часу  $t = 0.14 - 10^{-3}$  с, упереджуючи запуск АД, що відбувається в момент  $t = 0.14$  с;  
 – потужність фази однієї конденсаторної батареї в усталеному режимі, тобто коли до ЕМ підключено лише секції батарей ємністю  $C_{сек1}$ , становить  $Q_{C_{сек1}} = 11398,2$  ВАр (фазна напруга мережі синусоїдальна і становить  $U = 220$  В);  
 – потужність однієї секції силових конденсаторних батарей ємністю  $C_{сек1}$  становить  $Q_{\Delta сек1} = 3Q_{C_{сек1}} = 34194,6$  ВАр, а потужність двох (сумарно) –  $2Q_{\Delta сек1} = 68389,2$  ВАр, (порівнюючи з одномостовим ТРК, який у роботі [9] використовується з тією ж метою, зазначимо, що у двомостовому ТРК (рис. 1) ємності у плечах трикутників силових конденсаторних батарей, а відповідно й потужності цих батарей, суттєво менші: у роботі [9] в одномостовому ТРК у конденсаторній батареї ємності секцій у плечі складають  $C_{сек1} = 400$  мкФ та  $C_{сек2} = 2600$  мкФ, тобто у  $(400 \text{ мкФ} + 2600 \text{ мкФ}) / (2 \times 850 \text{ мкФ}) = 1,764$  разів більше, ніж у двомостовому ТРК);  
 – параметри трифазних з'єднаних у зірки послідовних  $r - L - C$  однакових фільтрів ФВГ1 та ФВГ2 наведено в таблиці, там же наведено значення реактивних потужностей складових фільтрів, розраховані для перших гармонік напруги і струму:  $Q_{\phi k \text{ ФВГ}}$  – реактивна потужність, яка генерується у мережу на першій гармоніці струму однією фазою фільтра, налаштованого на  $k$ -ту гармоніку;  $Q_{3\phi k \text{ ФВГ}}$  – реактивна потужність, яка генерується у мережу на першій гармоніці струму трьома фазами однієї зірки фільтрів  $k$ -ї гармоніки;  $Q_{6\phi k \text{ ФВГ}}$  – реактивна потуж-

ність, яка генерується у мережу на першій гармоніці струму обома зірками фільтрів  $k$ -ї гармоніки, що містяться у ФВГ1 та ФВГ2);

– реактивна потужність, що генерується у мережу на першій гармоніці струму фільтрами ФВГ1 та ФВГ2, становить  $\sum_{k=5,7,11,13} Q_{6fkФВГ} = 10,264$  кВАр;

– активна потужність, що споживається фільтрами ФВГ1 та ФВГ2 на першій гармоніці струму, становить  $P_{(1)ФВГ} = 16,3$  Вт.

Фільтри	$r_{ФВГ},$ [Ом]	$L_{ФВГ},$ [мГн]	$C_{ФВГ},$ [мкФ]	$Q_{fkФВГ},$ [кВАр]	$Q_{3fkФВГ},$ [кВАр]	$Q_{6fkФВГ},$ [кВАр]
5-ї гармоніки	0.2	107	3.79	0.06	0.18	0.36
7-ї гармоніки	0.2	63.3	3.27	0.051	0.152	0.305
11-ї гармоніки	0.2	2.9	29.8	0.457	1.371	2.742
13-ї гармоніки	0.0675	0.83	74.7	1.143	3.428	6.857

Отже, у запропонованому схемно-технічному рішенні (рис. 1) використовуються ФВГ, потужність яких у  $144$  кВАр/ $10,264$  кВАр  $\approx 14,03$  разів менша, ніж у випадку застосування одномостового ТРК.

Проаналізуємо деякі результати, одержані внаслідок виконання досліджень з використанням розробленої моделі (рис. 3), що свідчать про досягнення поставленої в роботі мети. На рис. 4 наведено часові діаграми струмів і напруги в перехідному режимі ЕМ, що виникає у разі прямого пуску АД потужністю  $110$  кВт: миттєвих значень фазних струму ( $i_{мер}$ ) і напруги ( $u_{мер}$ ) ЕМ; миттєві значення сумарного струму АД і Н ( $i_{АД+Н}$ ); миттєві значення вхідних фазних струмів ТРК ( $i_{ТРК}$ ). Потовщеними лініями на рис. 4 показано струм і напругу фази А. На діаграмах рис. 4 можна виділити три режими.

**Режим № 1** має місце при  $0 \leq t \leq 0,1$  с. До моменту часу  $t = 0$  в ЕМ був усталений режим живлення активно-індуктивного навантаження (Н). У момент  $t = 0$  з метою компенсації реактивної потужності, яка споживається в ЕМ, здійснюється вмикання ТРК. У ньому встановлюється такий кут керування  $\alpha = -94,3$  гр.ел., щоб ТРК компенсував реактивну потужність навантаження  $Q_H$  та реактивну потужність  $Q_{РТ+ЛП}$ . За час  $0 \leq t \leq 0,05$  с закінчується перехідний процес, який виник після ввімкнення ТРК, і в мережі встановлюється усталений режим зі струмами відповідно  $I_{мер} = 264$  А,  $I_H = 320$  А,  $I_{ТРК} = 225$  А та кутом  $\alpha = \alpha_{уст.№1} = -94,3$  гр.ел.

**Режим № 2** – режим ударних струмів, що має місце на інтервалі  $0,1 \leq t \leq 0,17$  с. Упереджуючи запуск АД, який відбувається у час  $t = t_{зд} = 0,14$  с, у момент  $t = t_{ф} = 0,11$  с у ТРК здійснюється форсована зміна кута управління тиристорами  $\alpha$  до максимально можливого його значення  $\alpha = \alpha_{max} = 83$  гр.ел., а перед самим запуском АД у момент  $t = 0,14 - 10^{-3}$  с паралельно обом вентильно-діодним мостам вмикається друга секція силової конденсаторної батареї з ємністю у плечі трикутника  $C_{сек2} = 600$  мкФ. Внаслідок цього починається процес швидкого зростання реактивного струму ТРК. Параметри цього режиму такі:

– ударне значення струму мережі, що виникає внаслідок прямого пуску АД, має місце в момент  $t = 0,1484$  с і становить  $1525$  А;

– ударне значення струму навантаження (Н та АД сумарно), що виникає внаслідок прямого пуску АД, має місце в момент  $t = 0,1495$  с і становить  $2142$  А;

– максимальне значення струму ТРК, що супроводжує прямий пуск АД, має місце в момент  $t = 0,151$  с і становить  $1000$  А;

– максимальне перевищення фазної напруги мережі у точці підключення навантаження, що відбувається внаслідок форсування потужності ТРК, а саме форсованого збільшення кута управління ТРК ( $t = t_{\phi} = 0,11$  с), має місце у момент часу  $t = 0.1265$  с і становить 57 В;

– максимальне просідання напруги у точці підключення навантаження, що відбувається внаслідок прямого пуску АД, має місце в момент часу  $t = 0.1643$  с і становить 43,12 В.

Як видно з наведених даних, форсоване збільшення кута управління тиристорів ТРК та вмикання секцій  $C_{сек2}$  у його силових конденсаторних батареях призводять до відгалуження на ТРК значної частини пускового струму АД, тим самим зменшуючи (у  $2142$  А /  $1525$  А =  $1.4$  рази) у мережі (РТ та ЛП) надструми перехідного режиму. У свою чергу це зменшує і «просідання» (до некритичних значень) напруги у місці підключення навантаження (Н та АД), забезпечуючи успішний запуск АД та скорочуючи час виходу АД на номінальний (усталений) режим.

**Режим № 3** – квазіусталений пусковий режим (КУПР), настає після  $t > 0.17$  с. У цьому режимі амплітуда активно-індуктивного струму АД протягом 20-ти періодів (а саме на інтервалі  $0.17$  с  $\leq t \leq 0.54$  с) змінюється несуттєво – від 1710 до 1640 А, тобто в середньому не більш ніж на 70 А (4 % від максимального значення). Відповідно амплітуда струму ЕМ на цьому ж інтервалі змінюється від 600 до 530 А, тобто в середньому теж не більше ніж на 70 А, що складає 11.7 % від максимального значення.

З урахуванням таких даних, зазначені струми та сам режим можна вважати квазіусталеними (усталений режим настає після  $t > 0.54$  с, і відповідна частина часових діаграм «залишає межі» рис. 4). Виходячи з наявної інформації, яку містять часові діаграми рис. 4 на інтервалі  $0.46$  с  $\leq t \leq 0.50$  с, вважатимемо за можливе поширити на КУПР для повних струмів і напруг та їхніх складових згасаючих коливань основної частоти такі характеристики параметрів режиму, якими є амплітуди та діючі значення, а також коефіцієнти гармонік струмів і напруги.

Діючі значення струму ЕМ та напруги у місці приєднання навантаження відповідно становлять:  $I_{мер,КУПР} = 407.73$  А,  $U_{НКУПР} = 213,17$  В.

Діючі значення складових коливань основної частоти струму ЕМ та напруги у місці

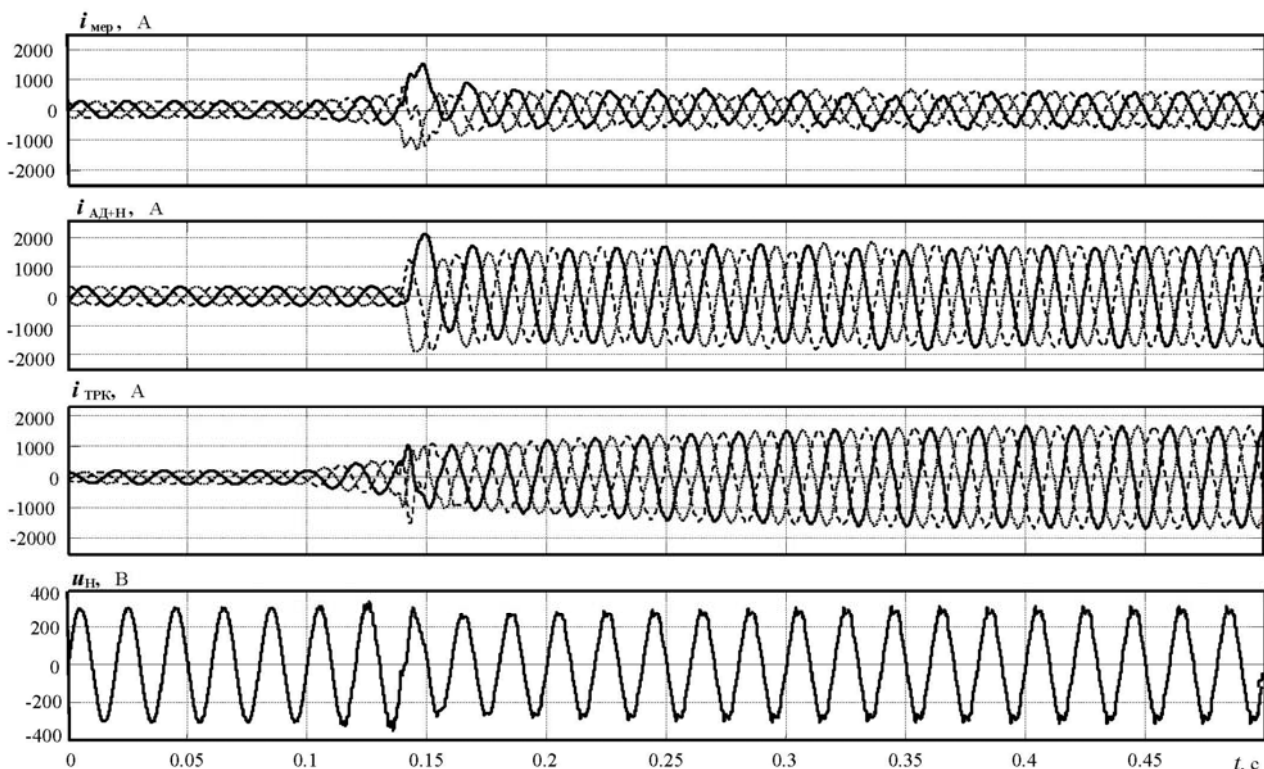


Рис. 4

приєднання навантаження відповідно становлять:  $I_{(1)\text{мер.КУПР}} = 406.8 \text{ А}$ ,  $U_{(1)\text{нКУПР}} = 212,77 \text{ В}$ . Зазначимо, що максимального значення ємнісний за характером струм ТРК досягає в момент  $t = 0.46 \text{ с}$  і становить  $i_{\text{ТРК max}} = 1670 \text{ А}$ .

Коефіцієнти спотворення ( $v$ ) та «гармонік» ( $K_G$ ) струму ЕМ та напруги у місці приєднання навантаження становлять:

$$v_{i_{\text{мер.КУПР}}} = I_{(1)\text{мер.КУПР}} : I_{\text{мер.КУПР}} = 0.9977;$$

$$v_{u_{\text{нКУПР}}} = U_{(1)\text{нКУПР}} : U_{\text{нКУПР}} = 0.9981;$$

$$K_{Gi_{\text{мер.КУПР}}} = [(1 - v_{i_{\text{мер.КУПР}}}^2)^{0.5} : v_{i_{\text{мер.КУПР}}}] \cdot 100\% = 6.8\%;$$

$$K_{Gu_{\text{нКУПР}}} = [(1 - v_{u_{\text{нКУПР}}}^2)^{0.5} : v_{u_{\text{нКУПР}}}] \cdot 100\% = 6.2\%.$$

Як впливає із наведених даних, на більшому інтервалі перехідного процесу в ЕМ, що відповідає КУПР, застосування в ЕМ напівпровідникового ТРК суттєво зменшує (у  $1710 \text{ А} / 600 \text{ А} = 2.85$  разів) частину пускового струму, що протікає в мережі (РТ та ЛП). З часових діаграм рис. 4 видно, що на перших шести та на останніх дванадцяти періодах коливань перехідного струму ЕМ цей струм у точці підключення навантаження до ЕМ співпадає за фазою з напругою, тобто на цих періодах в ЕМ відсутня реактивна складова пускового струму АД (вона відгалужується в силове коло ТРК й замикається по контуру, який утворюють кола АД та ТРК).

**Висновки.** Розроблене на базі двомостового ТРК схемно-технічне рішення пристрою для зменшення негативного впливу пускових струмів АД на параметри режиму ЕМ обмеженої потужності є ефективнішим у порівнянні з використанням одномостового ТРК: у 1.76 рази зменшено потужність силових конденсаторних батарей та у 14 разів – потужність фільтрів вищих гармонік, що містяться у колах ТРК, а частина ударного значення пускового струму АД, яка потрапляє в ЕМ, зменшується в 1,4 рази у порівнянні з ударним значенням пускового струму АД; найбільше значення струму, який відгалужується в ЕМ, на ділянці квазіусталеного пускового режиму в 2.85 разів менша, ніж у пусковому струмі АД.

Використання розробленого пристрою забезпечило на останніх 12 періодах інтервалу пуску АД, що розглядався, зменшення до нуля реактивної складової струму ЕМ (внаслідок чого у цей час в ЕМ протікає лише активний струм) та задовільну в кінці квазіусталеного режиму якість струму в ЕМ та напруги у місці приєднання навантаження ( $K_{Gi_{\text{мер.КУПР}}} = 6.8\%$ ,  $K_{Gu_{\text{нКУПР}}} = 6.2\%$ ).

Фінансується за рахунок держбюджетної теми «Методи та засоби моделювання й обробки інформації при моніторингу електроенергетичних систем» (шифр «ІНТЕЛМЕР- 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 08.11.2016 р., протокол № 16. Державний реєстраційний номер теми 0117U002583.

1. Softstarter Handbook. URL: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>
2. 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](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf)
3. 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>
4. Singh B., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D.P. A review of Single-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Trans. On indust. Electron.* 2003. Vol. 50. Issue 5. Pp. 962–981.
5. Singh B., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D.P. A review of three-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Trans. on indust. electron.* 2004. Vol. 51. No 3. Pp. 641–660.
6. Чиженко О.І., Трач І.В. Коригування режиму слабкої електричної мережі при запуску від неї електродвигуна зіставної потужності. *Праці Інституту електродинаміки НАН України.* 2017. Вип. 48. С. 27–32.
7. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка.* 2018. № 6. С. 62–68.



8. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. *Energy Smart Systems (ESS) 2019 IEEE 6<sup>th</sup> International Conference*. 2019. Pp. 261–266.
9. Чиженко О.І., Рибіна О.Б., Трач І.В. Напівпровідниковий регулятор для керування режимами мережі в разі прямого запуску асинхронних двигунів зіставної потужності. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 95–102.

УДК 621.311 + 621.3.001.57

#### МИНИМИЗАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ПУСКОВЫХ ТОКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА «СЛАБОЙ» ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.Ф. Буткевич<sup>1,2</sup>, докт. техн. наук, А.И. Чиженко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, И.В. Трач<sup>1</sup>, канд. техн. наук

1 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

2 – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского”,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

*Предложена схема технического решения устройства для прямого пуска асинхронного двигателя (АД) от «слабой» электрической сети (ЭС). Такое устройство уменьшает негативное влияние пускового тока АД на параметры режима ЭС. Показано, что предложенное решение имеет преимущества по сравнению с известными решениями такого же назначения. Библиограф. 9, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, прямой пуск асинхронного двигателя, тиристорный регулируемый компенсатор.

#### NEGATIVE INFLUENCE MINIMIZATION OF ASYNCHRONOUS MOTORS' START-UP CURRENTS ON THE MODE PARAMETERS OF THE “WEAK” ELECTRIC NETWORK

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

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

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

*The scheme of the device's technical solution for direct starting of an induction motor (IM) from a “weak” electric network (EN). Such device reduces the negative influence of the start-up current of the IM on the EN mode's parameters. It is shown that the proposed solution has advantages over known solutions of the same purpose. References 9, figures 4, table.*

**Key words:** electric network, direct start-up of asynchronous motor, thyristor adjustable compensator.

1. Softstarter Handbook. URL: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>
2. 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](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf)
3. Selecting the right strategy for starting large motors. Application edge. 2016, vol. 1, issue 3. URL: <https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/Application%20Edge-v1i3-Starting%20Large%20Motors.pdf>
4. Singh B., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D.P. A review of Single-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Trans. On indust. Electron.* 2003. Vol. 50. No 5. Pp. 962–981.
5. Singh B., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., Kothari D.P. A review of three-phase improved power quality AC-DC converters. *IEEE Trans. on indust. electron.* 2004. Vol. 51. No 3. Pp. 641–660.
6. Chyzenko O.I., Trach I.V. Correction of the regime of a weak electric network when starting the electric motor with comparable power. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. No 48. Pp. 27–32. (Ukr)
7. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the FACTS upon an electric network's mode during direct start-up asynchronous machine in the complex load's composition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62–68. (Ukr)
8. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. *Energy Smart Systems (ESS) 2019 IEEE 6<sup>th</sup> International Conference*. 2019. Pp. 261–266.
9. Chyzenko O.I., Rybina O.B., Trach I.V. Semiconductive regulator for managing the network modes running in direct start of the asynchronous machine of the comparable capacity. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 54. Pp. 95–102. (Ukr)

Надійшла 28.02.2020

Received 28.02.2020