

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАТИЧНИХ СИНХРОННИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ФАЗОПОВОРОТНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГНУЧКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ В ОЕС УКРАЇНИ

**А.К. Шидловський**, акад. НАН України, **А.Ф. Жаркін**, чл.- кор. НАН України, **В.О. Новський**, докт. техн. наук, **Д.О. Малахатка**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Наведено основні результати досліджень, що отримані у відділі стабілізації параметрів електромагнітної енергії ІЕД НАН України при виконанні в 2013 році першого етапу наукового проекту «Розробка перспективних засобів компенсації реактивної потужності та стабілізації рівня напруг для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України» в рамках комплексної програми наукових досліджень НАН України «ОБ'ЄДНАННЯ-2». Бібл. 9, рис. 18.*

**Ключові слова:** статичний синхронний компенсатор реактивної потужності, фазоповоротний трансформаторний пристрій, імітаційне моделювання, якість електричної енергії.

На сьогодні в розвинених країнах все більше уваги приділяється питанням впровадження в електроенергетиці «інтелектуальних» технологій *Smart Grid*, як основи майбутнього розвитку електроенергетики для надійного, якісного і ефективного енергозабезпечення споживачів за рахунок гнучкої взаємодії всіх видів генерації, електричних мереж і споживачів на базі єдиної «інтелектуальної» ієрархічної системи управління. Це обумовлено, в першу чергу, тим, що досягнення сучасної силової та інформаційної електроніки дозволяють забезпечити як технічну та економічну ефективність перетворення параметрів електричної енергії, так і оптимізацію управління електроенергетичними системами [7].

Важливим елементом реалізації концепції *Smart Grid* є «технологія» гнучких систем передачі змінного струму (ГСПЗС), яка передбачає застосування сучасних перетворювальних пристроїв потужністю від десятків до тисяч мегавольт-ампер. Зазначені пристрої здатні одночасно впливати на три основні параметри електропередачі, а саме рівень напруги  $U$ , індуктивний опір лінії  $X_L$  і кут передачі  $\delta$ , що підвищує ефективність роботи та пропускну здатність високовольтних ліній електропередачі, оптимізує управління потоками активної та реактивної потужностей в електричних мережах і тим самим забезпечує гнучке управління режимами енергосистем [4].

На сьогодні проведено аудит сучасного стану існуючих технічних засобів, що реалізують «технологію» ГСПЗС за допомогою основних її елементів – статичних синхронних компенсаторів (СТАТКОМ) реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв (ФПТП), що дасть змогу обґрунтовано скласти відповідні технічні вимоги та тендерну документацію, оцінити технічну частину тендерних пропозицій щодо подальшої закупівлі зазначених пристроїв ДП «НЕК «Укренерго»» з метою модернізації та перспективного розвитку ОЕС України. Визначено провідні світові компанії – виробники технічних засобів для реалізації зазначеної «технології» ГСПЗС на основі використання сучасних СТАТКОМів з швидкодіючими напівпровідниковими ключовими елементами та ФПТП з електромеханічними перемикачами. До зазначених компаній в першу чергу належать: *ABB* (Швеція), *Siemens* (Німеччина), *Mitsubishi electric power products* (Японія), *Electric Power Research Institute (EPRI – США)*, *AREVA* (Франція), *Alstom Grid* (США), *TMT & D (Toshiba – Mitsubishi)*, *Chenan Electric Company* (КНР), *American Electric Power* (США), *Hyosung FACTS & Power Quality Solution* (Республіка Корея), *ALSTOM Corporation* (США – Фінляндія), а також АО "Ансальдо – ВЭИ" (Італія – Росія), *ABS Holdings* (Росія), ОАО "НТЦ ФСК ЕЭС" (Росія), ПуАТ "Запоріжтрансформатор" (Україна).

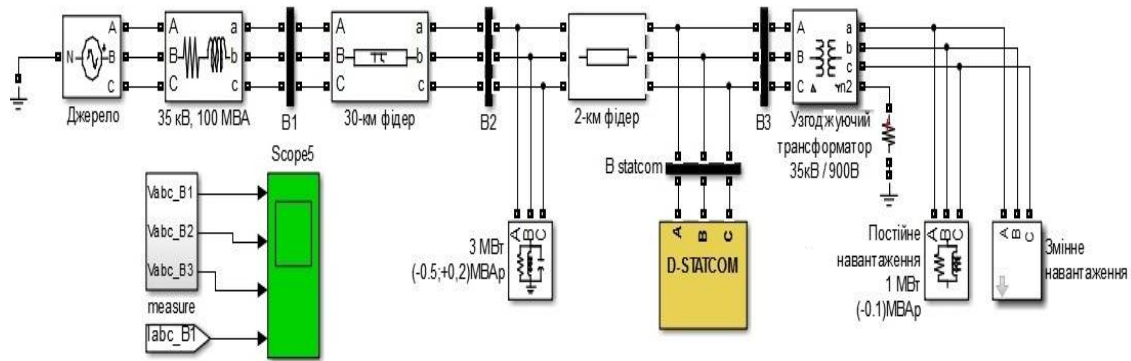


Рис. 1

Слід зазначити, що СТАТКОМ є найбільш досконалим напівпровідниковим пристроєм ГСПЗС, який призначений для регулювання реактивної потужності (РП) в широких межах ( $\pm 100\%$ ), має високу швидкодію в режимах споживання і генерування РП, забезпечує якісний гармонічний склад мережевих струмів, має відносно малі габарити, може використовуватися практично в будь-яких електричних мережах. Використання СТАТКОМ дає змогу не лише регулювати напругу, але і збільшувати пропускну здатність мережі та оптимізувати потоки потужності. Крім того, в якості силового активного фільтра СТАТКОМ дає змогу покращувати форму кривої струмів у мережі за рахунок компенсації практично всіх вищих їх гармонік, причому особливо ефективним є його застосування в «слабких» мережах [4].

СТАТКОМ відрізняється від статичних компенсаторів реактивної потужності (СКРП) і статичних тиристорних компенсаторів (СТК) підвищеними функціональними можливостями, швидкодією та поліпшеними динамічними характеристиками. По суті, СТАТКОМ – це перетворювач напруги, виконаний на силових транзисторах або повністю керованих тиристорах і ввімкнений через трансформатор зв'язку паралельно лінії у вузлі мережі. Перспективною є схема СТАТКОМ, що виконана на основі трирівневого перетворювача напруги з ШІМ-управлінням. Принцип роботи СТАТКОМ полягає в тому, що з напруги джерела постійного струму за рахунок ШІМ і використання фільтра гармонік формується синусоїдальна напруга основної частоти мережі. Головною перевагою СТАТКОМ є здатність генерувати струм будь-якої фази відносно напруги мережі, оскільки він забезпечує регулювання рівня напруги, що здійснюється за рахунок зміни величини і знаку реактивної потужності, яку спожито або видано в мережу, тобто він є швидкодіючим джерелом РП індуктивного або ємнісного характеру [6]. В основу реалізації цифрової системи управління СТАТКОМ покладені елементи сучасної теорії миттєвих потужностей і методів прямого перетворення трифазних систем координат у двофазні та зворотного (перетворення двофазних систем координат в трифазні), зокрема, принцип векторного управління, який передбачає перетворення вимірюваних трифазних струмів і напруг у сигнали управління, наприклад, за допомогою  $d-q$ -складових, виконання необхідних математичних операцій з ними і перетворення отриманих  $d-q$ -складових у відповідну систему трифазних сигналів для управління ключовими елементами силової схеми СТАТКОМ [9].

Для визначення оптимальних значень параметрів елементів силових структур СТАТКОМ та ФПТП і реалізації раціональних алгоритмів керування зазначеними перетворювачами в нормальних і різних критичних режимах з метою підвищення ефективності їх функціонування та надійності перемикання комутуючих елементів, а також оптимізації режимів електричних мереж розроблено адаптовані *Simulink*-моделі СТАТКОМ і ФПТП та проведено імітаційне моделювання сталих електромагнітних процесів і режимів роботи відповідних електричних мереж середньої та високої напруг.

Найбільш придатним для вирішення поставлених задач щодо проведення відповідних досліджень визначено графічне середовище *Simulink* для імітаційного моделювання режимів електричних мереж різної напруги при підключенні до них СТАТКОМ і ФПТП [2].

На рис. 1 показано імітаційну модель лінії електропередачі середньої напруги, до якої підключено змінне (наприклад, типу електродугової сталеплавильної печі (ДСП) малої або

середньої потужностей) та декілька незмінних навантажень, при підключенні/відключенні «розподільного» СТАТКОМ, який призначений для роботи в розподільних мережах. До складу цієї імітаційної моделі входять: блок, що імітує трифазне джерело електроенергії напругою 35 кВ та потужністю 100 МВА; блоки, що імітують 30- та 2-км фідери; блок, що імітує роботу трифазного узгоджуючого трансформатора 35кВ/900В потужністю 10 МВА; блоки, що імітують незмінне навантаження (активна потужність 1,0 МВт та індуктивна реактивна потужність  $-0,1$  Мвар, активна потужність 3,0 МВт та індуктивна і ємнісна реактивна потужність  $-0,5/+0,2$  Мвар); блок, що імітує змінне навантаження керованими джерелами струму; блок «*D-STATCOM*» імітує роботу «розподільного» СТАТКОМ.

СТАТКОМ такого типу реалізує алгоритм регулювання (стабілізації) напруги в мережі. На рис. 2 *а, б, в* наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  мережі при відключеному СТАТКОМ. Трифазні напруги в системі вимірюються в точках В1 (рис. 2 *а*), В2 (рис. 2 *б*) і В3 (рис. 2 *в*) мережі у відносних одиницях (в.о.), тобто тут «1,0» відповідає амплітудному значенню напруги 35 кВ мережі.

З розгляду цих діаграм випливає, що при заданих значеннях параметрів мережі та навантажувального вузла (струм змінного навантаження  $I_{zn}=2500$  А в кожній фазі) вимірювані напруги у точках В1, В2 та В3 мають явно виражену амплітудну модуляцію з частотою 5 Гц і розмахом обвідної, наприклад, у вузлі В2 понад  $\pm 5100$  В, що значно перевищує допустимий рівень коливань напруги, які обумовлюють виникнення низькочастотного явища флікери.

На рис. 3 *а, б, в* наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  мережі з тими ж параметрами при увімкненому СТАТКОМ. Трифазні напруги в системі також вимірюються в точках В1 (рис. 3 *а*), В2 (рис. 3 *б*) і В3 (рис. 3 *в*).

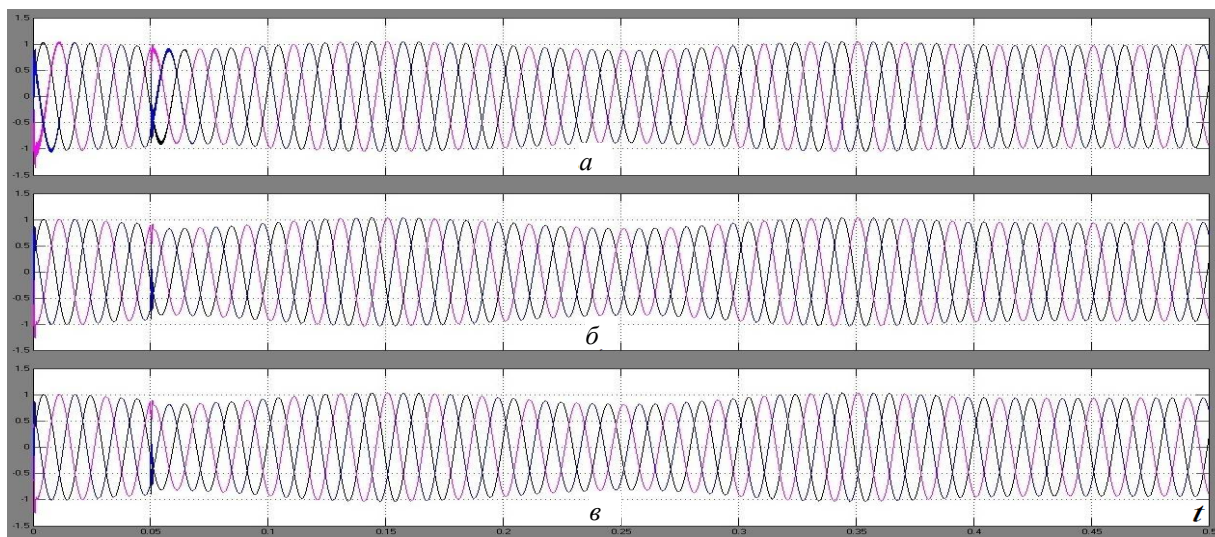


Рис. 2

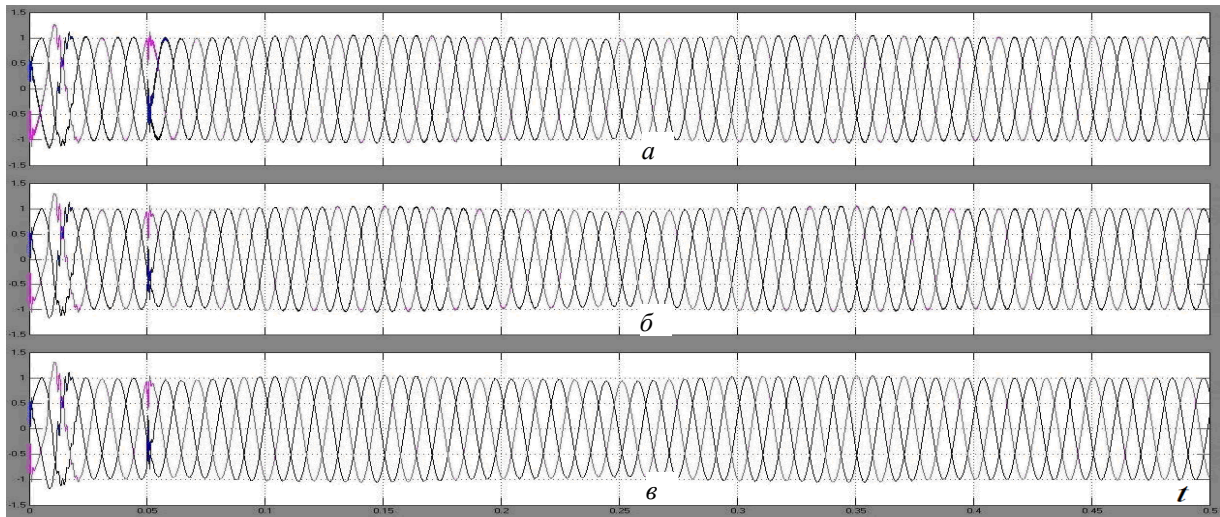


Рис. 3

З розгляду наведених на рис. 3 часових залежностей видно, що амплітуда обвідної при такій модуляції напруг у точках В1, В2 та В3 значно зменшилась. Це свідчить про високу ефективність роботи СТАТКОМ цього типу в мережі напругою 35 кВ, до якої підключена зазначена ДСП.

На рис. 4 представлено адаптовану імітаційну модель лінії електропередачі високої напруги (330 кВ), до якої підключено потужне незмінне навантаження.

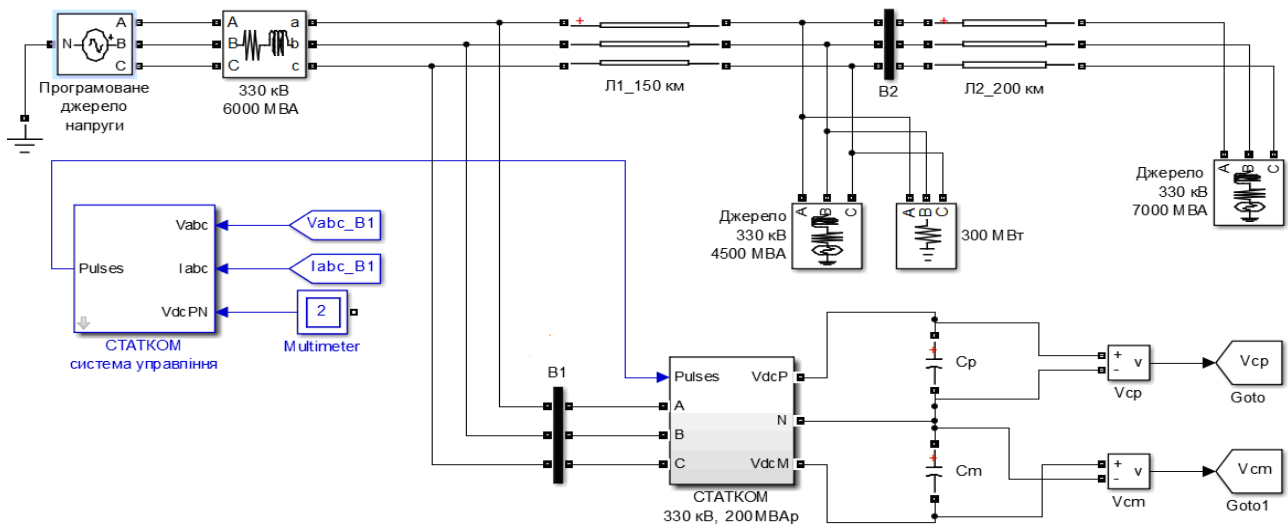


Рис. 4

До складу імітаційної моделі входять блоки, що імітують три трифазні джерела електроенергії напругою 330 кВ та потужністю 6000, 4500 та 7000 МВА; блоки, що імітують фідери протяжністю 150 і 200 км; блоки, що імітують незмінне трифазне навантаження потужністю 300 МВт; блок, що імітує роботу силової частини СТАТКОМ потужністю  $\pm 200$  Мвар, а також блок системи управління СТАТКОМ.

На рис. 5 а, б наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , а на рис. 5 в – графік зміни реактивної потужності СТАТКОМ при відключенні його від мережі. Трифазні напруги в системі вимірюються в точках В1 (рис. 5 а) і В2 (рис. 5 б) мережі у в.о., тобто «1,0» тут відповідає амплітудному значенню напруги 330 кВ мережі.

З розгляду рис. 5 видно, що при зазначених параметрах генераторів, ліній та навантаження системи в точках В1 (рис. 5 а) та В2 (рис. 5 б) мають місце значні «провали» напруги та «тимчасові перенапруги» при відключеному СТАТКОМ, а реактивна потужність СТАТКОМ  $Q_{ст} = 0$ .



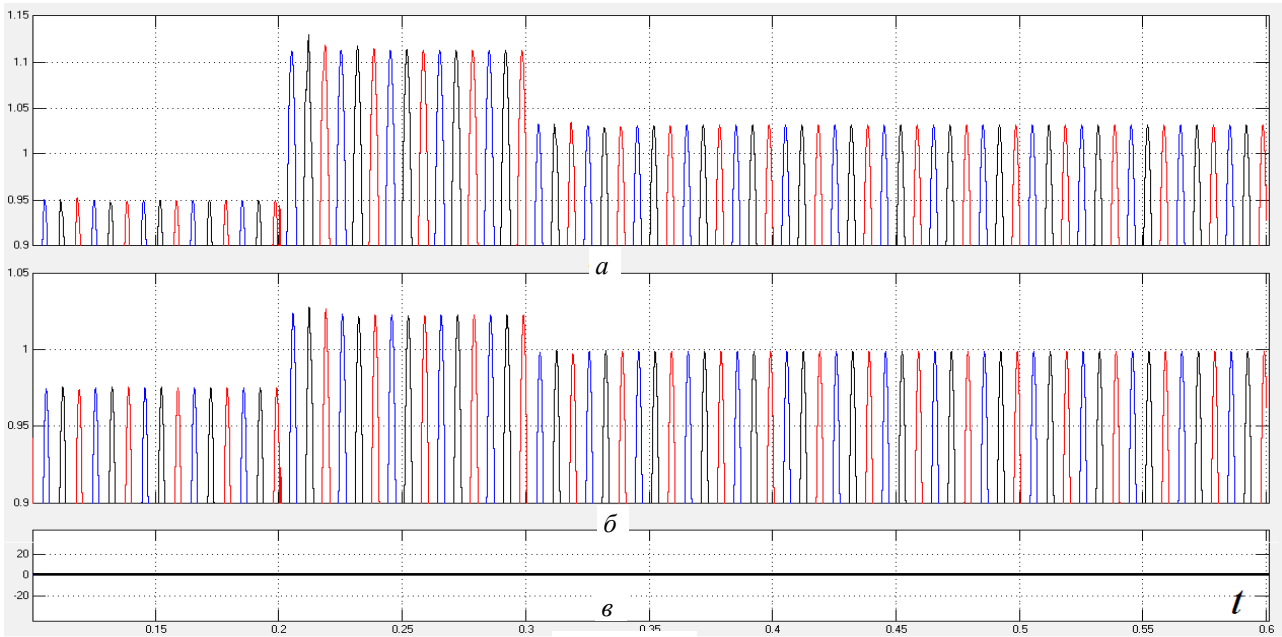


Рис. 5

На рис. 6 *a, б* наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , а на рис. 6 *в* – графік зміни реактивної потужності  $Q_{ст}$  (у Мвар) СТАТКОМ при його увімкненні до мережі.

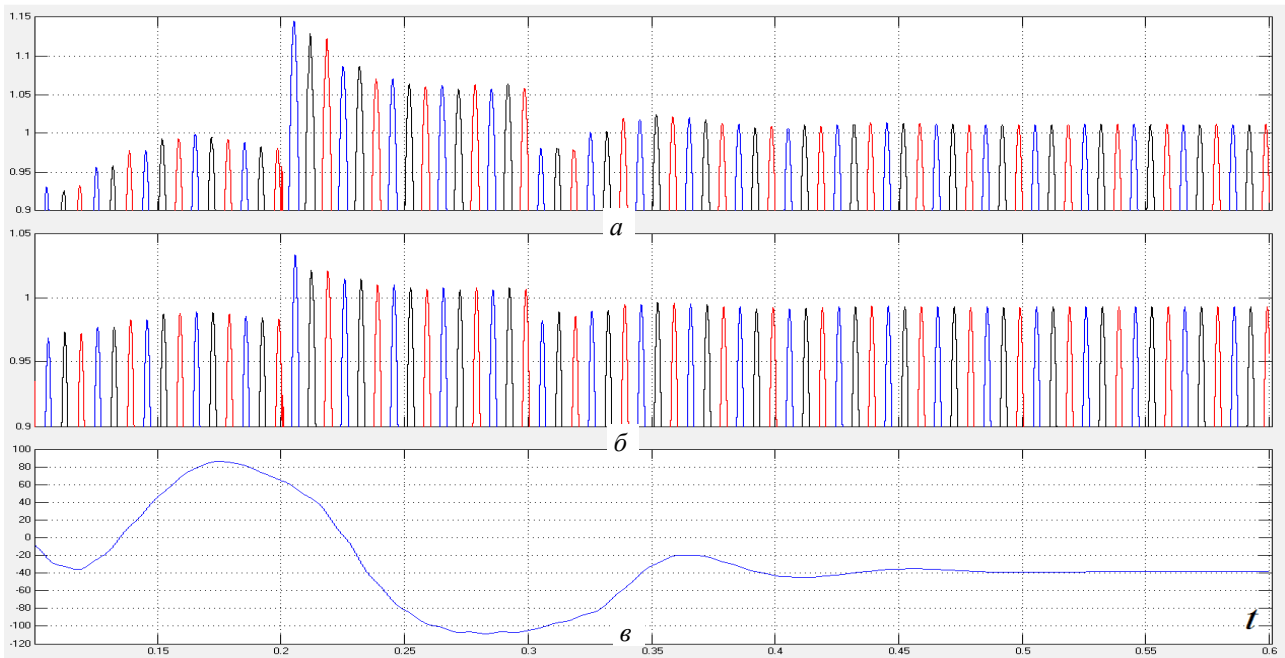


Рис. 6

З розгляду рис. 6 видно, що при увімкненому СТАТКОМ встановленою потужністю  $\pm 200$  Мвар та зазначених параметрах генераторів, ліній і навантаження системи в точках В1 (рис. 6 *a*) та В2 (рис. 6 *б*) «провали» напруг і «тимчасові перенапруги» стають значно меншими порівняно з наведеними на рис. 5 *a, б*, що свідчить про суттєву ефективність роботи СТАТКОМ цього типу в мережі напругою 330 кВ.

Важливою перевагою СТАТКОМ порівняно з СКРП і СТК при введенні додаткових блоків у його систему керування і реалізації відповідних алгоритмів управління є можливість забезпечення активної фільтрації (АФ) неосновних гармонік струмів у мережі. На рис. 7 наведено імітаційну модель лінії електропередачі середньої напруги (35 кВ), до якої підключено нелінійне та несиметричне навантаження, при увімкненні/вимкненні аналогічного компонента РП типу СТАТКОМ-АФ, який окрім регулювання напруги мережі додатково працює в режимі потужного активного фільтра.

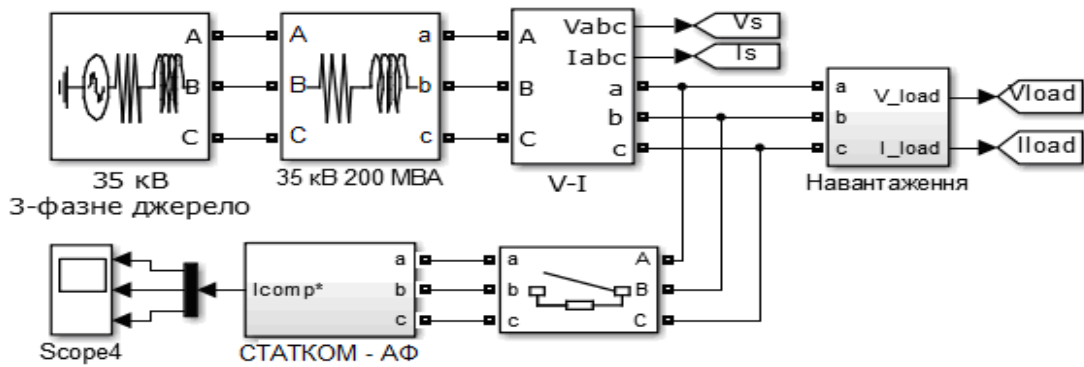


Рис. 7

До складу цієї імітаційної моделі входять: блок, що імітує трифазне джерело електроенергії напругою 35 кВ та потужністю 200 МВА; блоки, що імітують нелінійне (трифазний мостовий випрямляч потужністю 28 МВА, навантажений на  $RC$ -коло) та несиметричне активне навантаження (за схемою включення «трикутник» з активними опорами  $R_a=20$  Ом,  $R_b=40$  Ом,  $R_c=80$  Ом); блок, що імітує роботу СТАТКОМ-АФ потужністю  $\pm 100$  Мвар.

На рис. 8 а наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , а на рис. 8 б, в, г – струми (в амперах) відповідно у фазах А, В і С мережі при вимкненому СТАТКОМ-АФ та увімкненому тільки нелінійному навантаженні. Трифазні напруги в системі вимірюються у в.о., тобто «1,0» тут відповідає амплітудному значенню напруги 35 кВ мережі.

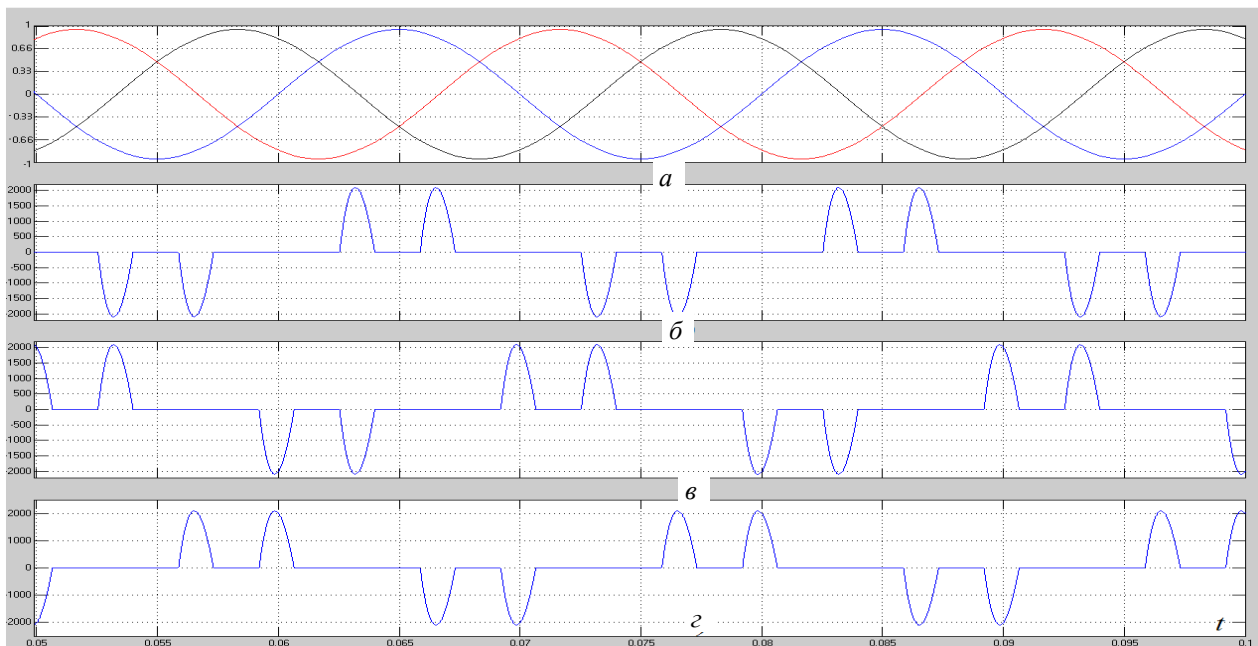


Рис. 8

З розгляду рис. 8 б, в, г видно, що криві струмів мережі мають яскраво виражену не-синусоїдальну форму, що обумовлено впливом роботи мостового випрямляча з  $RC$ -фільтром.

На рис. 9 а наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , де «1,0» відповідає амплітудному значенню напруги 35 кВ мережі, а на рис. 9 б, в, г – струми (в амперах) відповідно у фазах А, В і С мережі при увімкненому СТАТКОМ-АФ та увімкненому тільки нелінійному навантаженні.

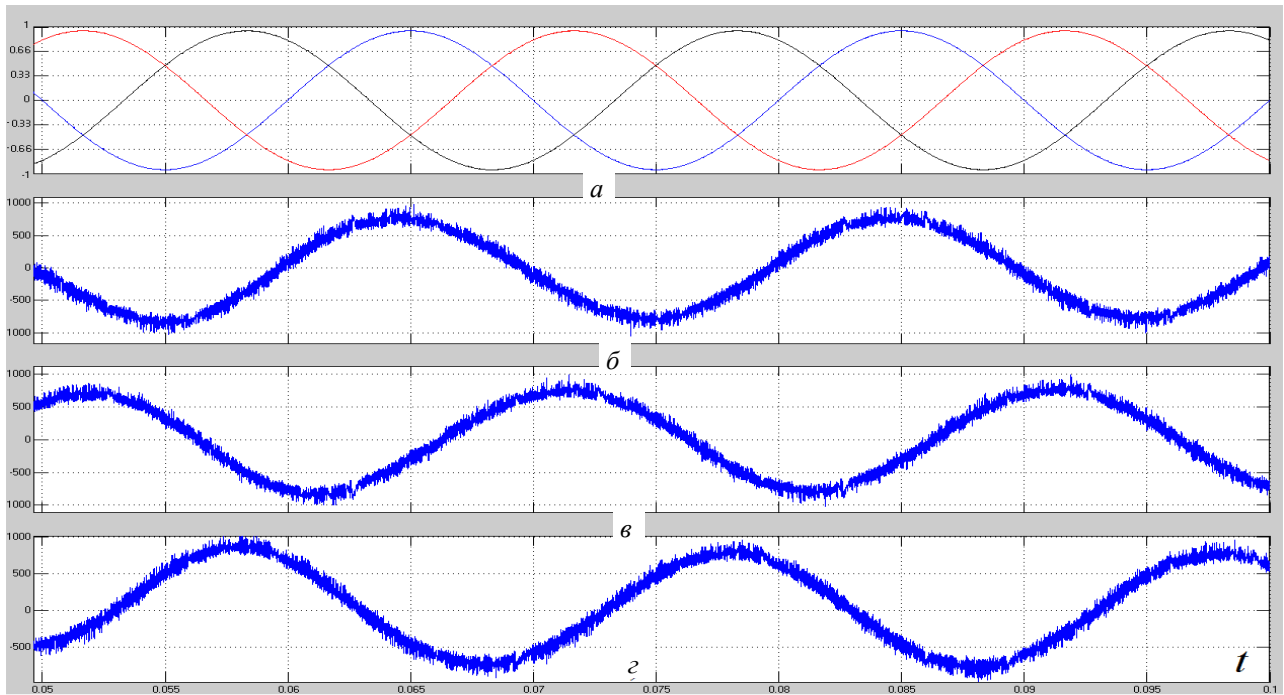


Рис. 9

З розгляду рис. 9 б, в, г видно, що в цьому випадку криві струмів мережі симетричні та мають практично синусоїдальну форму. Високочастотні коливання цих струмів у достатній мірі можна подавити відповідними реактивними фільтрами.

На рис. 10 а наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  («1,0» тут відповідає амплітудному значенню напруги 35 кВ мережі), а на рис. 10 б, в, г – струми (в амперах) відповідно у фазах А, В і С мережі при вимкненому СТАТКОМ-АФ та увімкнених нелінійному і несиметричному навантаженнях.

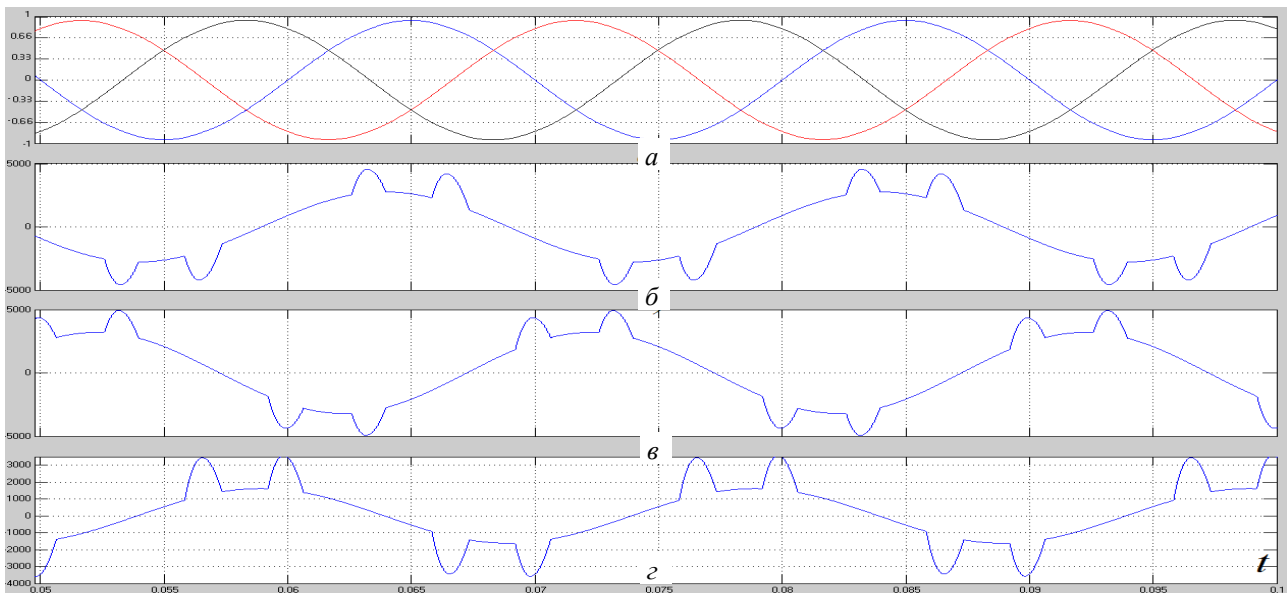


Рис. 10

З розгляду рис. 10 б, в, г видно, що криві струмів мережі також мають явно несинусоїдальну форму через зазначені вище обставини.

На рис. 11 а наведено часові залежності миттєвих значень лінійних напруг  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , де «1,0» відповідає амплітудному значенню напруги 35 кВ мережі, а на рис. 11 б, в, г –

струми (в амперах) відповідно у фазах *A*, *B* і *C* мережі при увімкненому СТАТКОМ-АФ та увімкнених нелінійному і несиметричному навантаженнях.

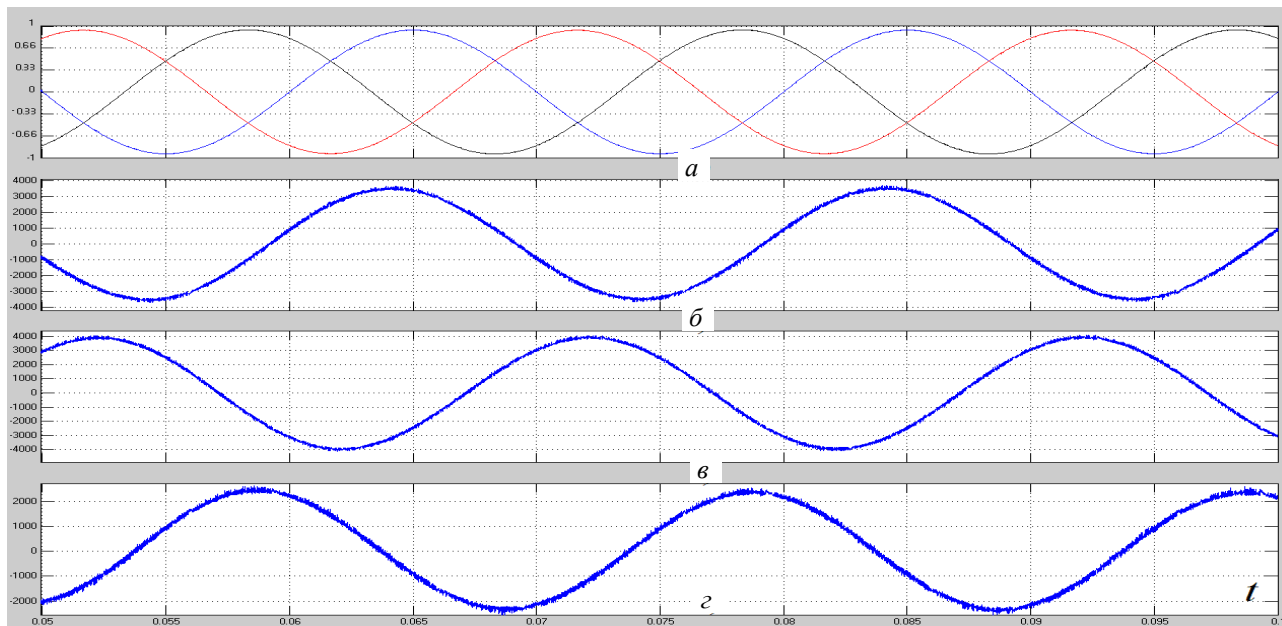


Рис. 11

З розгляду кривих мережевих струмів, зображених на рис. 11 *б*, *в*, *г*, видно, що в цьому випадку порівняно з кривими, зображеними на рис. 10 *б*, *в* і *г*, їх форма є практично синусоїдальною. При цьому забезпечуються стабілізація рівня і симетрія напруг, а також фільтрація вищих гармонік струмів мережі. Це свідчить про значну ефективність роботи цього СТАТКОМ з точки зору комплексного підвищення якості електроенергії в електричних мережах. Тобто компенсатор РП типу СТАТКОМ-АФ при підключенні нелінійних та несиметричних навантажень великої потужності до мереж різного рівня напруги функціонує в режимі силового активного фільтра гармонік струмів електричної мережі.

Крім того, було розглянуто фазоповоротні трансформаторні пристрої, що забезпечують підвищення пропускної спроможності високовольтних ліній електропередачі та оптимізацію управління потоками активної потужності в електричних мережах. Принцип управління енергопотоками в мережі за допомогою ФПТП ґрунтується на тому, що потік активної потужності в лінії змінного струму пропорційний синусу кута передачі, тобто ФПТП забезпечує регулювання величини та напрямку потоків потужності в лініях електропередачі змінного струму. ФПТП створює фазовий зсув між напругами на його вході та виході на кут  $\pm\alpha$  шляхом введення вольтододаткової напруги в місці його встановлення і тим самим виконує функцію примусової зміни значення кута передачі. ФПТП дає змогу також підвищити надійність електропостачання споживачів електроенергії при коротких замиканнях в лініях. Крім того, при пофазному регулюванні напруги за допомогою ФПТП можна також достатньою мірою симетрувати режимні параметри в системі [1, 4].

Для проведення імітаційного моделювання режимів електричних мереж з ФПТП найбільш придатним для вирішення поставлених задач щодо імітаційного моделювання режимів магістральних мереж з ФПТП визначено графічне середовище *Simulink* (*Simulink* – модель *OLTC Phase Shifting Transformer*). За допомогою адаптованої для зазначеної мети *Simulink*-моделі «трифазного дельта-гексагонального фазозсувного трансформатора» з електромеханічним перемикачем відводів обмоток проведено імітаційне моделювання сталих електромагнітних процесів в лінії електропередачі при зміні значень його потужності та параметрів лінії в нормальних та аварійних режимах [2, 3].



На рис. 12 показано імітаційну модель енергосистеми напругою 330 кВ. До її складу входять блоки, що імітують два трифазні джерела електроенергії потужністю 3000 МВА; блок, що імітує аварійний режим в мережі (одно-, дво- і трифазне КЗ) та блок, що імітує роботу ФПТП потужністю 750 МВА. Виконано імітаційне моделювання режимів роботи ФПТП у нормальних та аварійних режимах, причому моделювання струмів, напруг, перето-

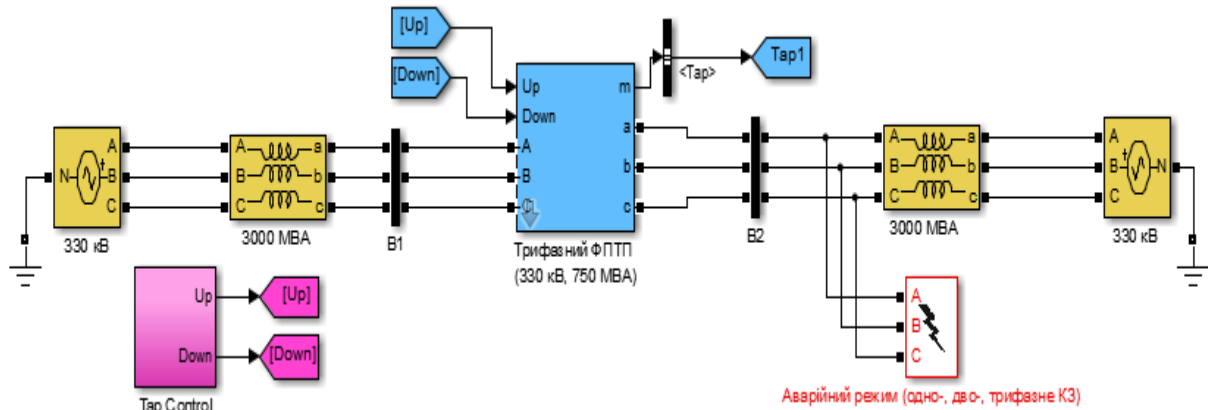


Рис. 12

ків активної потужності та ін. проводилось у реальному масштабі часу для різних кутів зсуву ( $\alpha = 0 \pm 30$  ел. град.) векторів напруг.

На рис. 13 наведено часові залежності деяких функціональних і режимних параметрів, що характеризують роботу ФПТП потужністю 750 МВА (аварійний режим відсутній). Тут на рис. 13 а зображено графік, що ілюструє зміну ступенів переключення відводів обмоток ФПТП в часі; на рис. 13 б – зміну значення напруги (у вольтах) прямої послідовності у точці В1 моделі системи; на рис. 13 в – фазовий зсув (в ел. град.) між напругами на вихідних та вхідних затискачах ФПТП (точка В2 та В1 відповідно), що складає  $\pm 28$  ел. град. для наведеного варіанту переключення ступенів регулювання; на рис. 13 г – зміну активної потужності (у мегаватах) у точці В1 моделі енергосистеми; на рис. 13 д – зміну струмів (у амперах) у фазах

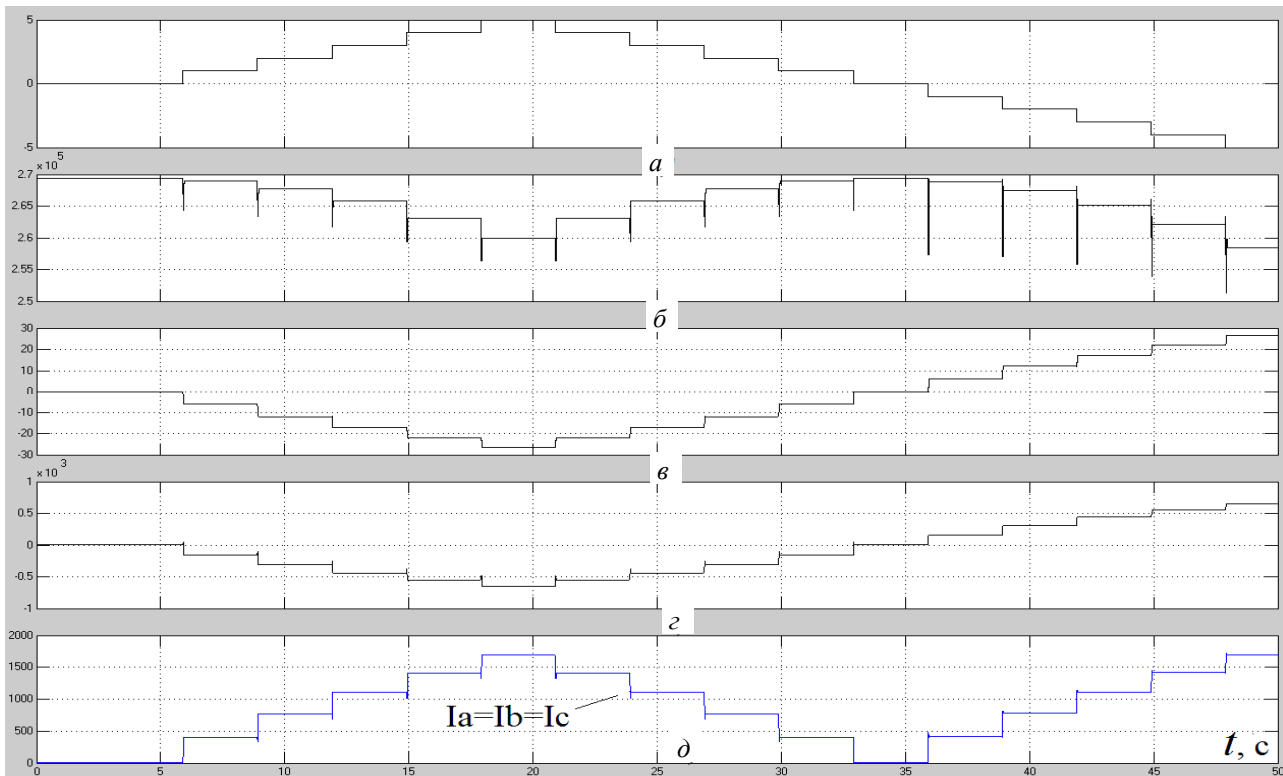


Рис. 13

мережі в точці В1 моделі системи.

На рис. 14 *a–d* наведено аналогічні показаням на рис. 13 *a–d* залежності деяких функціональних і режимних параметрів, що характеризують роботу ФПТП потужністю 750 МВА за наявності аварійного режиму: «однофазне КЗ у фазі А» тривалістю 20 с.

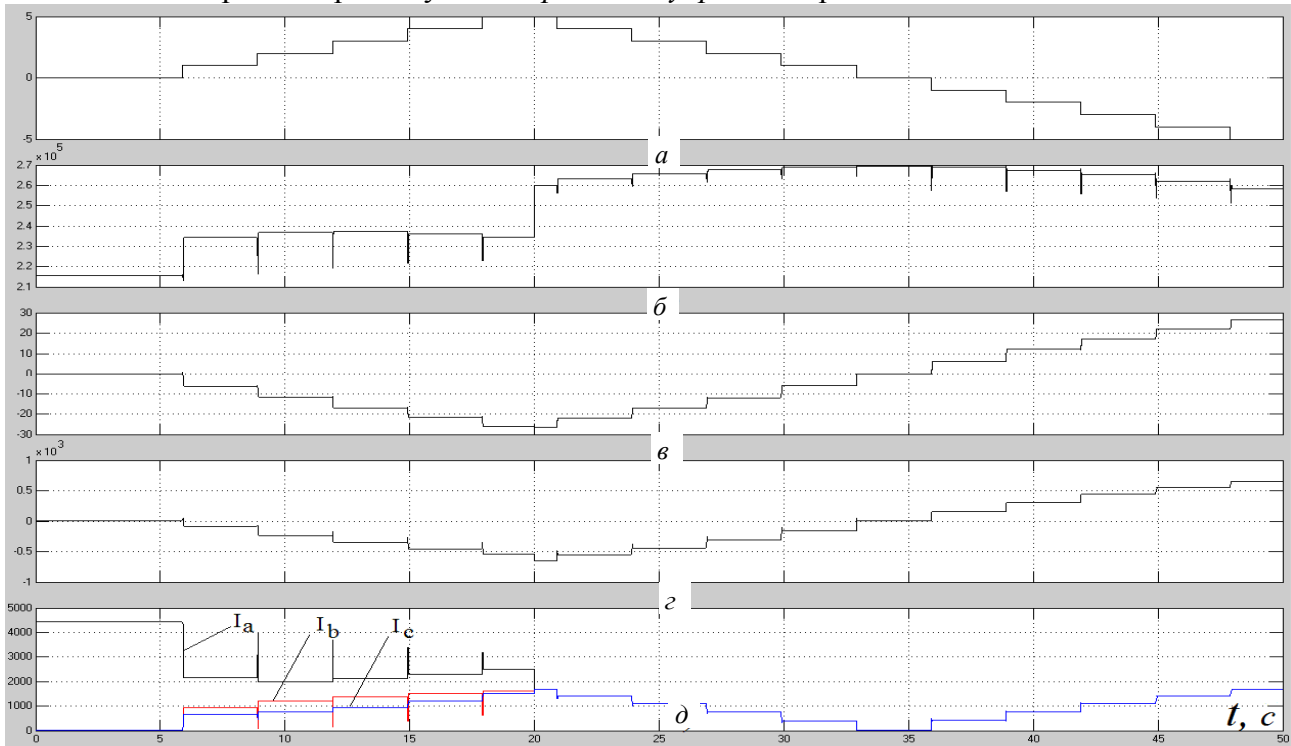


Рис. 14

З розгляду залежностей, наведених на рис. 14, слідує, що рівні напруг у цьому аварійному режимі підтримуються в усіх трьох фазах відхідної мережі в системі. Це свідчить про досить прийнятні рівні надійності електропостачання при використанні ФПТП.

На рис. 15 *a–d* наведено аналогічні показаням на рис. 13 *a–d* зазначені залежності, що характеризують роботу ФПТП потужністю 750 МВА за наявності аварійного режиму: «міжфазне КЗ між фазами А і В» тривалістю 20 с.

З розгляду залежностей, наведених на рис. 15, слідує, що під час аварійного режиму рівні напруг помітно знижуються, але це не призводить до повного їх зникнення у відповідних фазах відхідної розподільної мережі. Це забезпечує аварійне електропостачання вузлів навантажень мереж, які під'єднані до магістральних ліній енергосистеми. Результати імітаційного моделювання дають змогу провести якісну та кількісну оцінку впливу ФПТП на функціонування енергосистеми в нормальному та аномальних режимах. В останньому випадку, якщо є низка ліній різної потужності, то примусово змінюючи значення кута передачі між векторами напруг в одній або декількох лініях, можна перерозподіляти потоки активної потужності між лініями енергосистеми.

У сучасній світовій практиці ФПТП досить широко застосовуються в енергосистемах, але усі вони побудовані на основі застосування електромеханічних перемикачів відводів електромагнітних елементів ФПТП, що обумовлює невисоку швидкодію перемикачів (декілька секунд) і відносно низьку надійність перемикаючого пристрою. Сьогодні в світі експлуатуються понад сто ФПТП з електромеханічними та вакуумними комутаторами (встановлена потужність окремого ФПТП варіюється від сотень до тисяч мегавольт-ампер).

Застосування тиристорних перемикаючих пристроїв (ТПП) з природною або штучною комутацією (ШК) тиристорів у складі ФПТП дасть змогу багаторазово збільшити швидкодію перемикачів відводів електромагнітних елементів ФПТП та підвищити його надійність і термін служби. На рис. 16 зображено векторні діаграми напруг ФПТП, який здійснює, напри-

клад, «поздовжньо-поперечне» регулювання напруги мережі, в результаті чого змінюється кут між векторами напруг на вході та виході лінії електропередачі та відбувається бажана зміна значень активної потужності, що передається, причому вектор поперечної складової напруги утворюється з лінійної, а поздовжньої – з фазної напруги мережі [8]. За допомогою трифазних трансформаторів живлення (ТТЖ) формуються вектори напруг, які зсунуто щодо напруг мережі  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  на 90 ел. град. («поперечне регулювання»), а також протифазні напруги («поздовжнє» регулювання), модуль яких регулюється за допомогою силових тиристорів ТПП. Зазначені напруги через відповідні вольтододаткові трансформатори (ВДТ) «вводяться» в лінію як поперечні  $\Delta\dot{U}'_A, \Delta\dot{U}'_B, \Delta\dot{U}'_C$  і поздовжні складові  $\Delta\dot{U}''_A, \Delta\dot{U}''_B, \Delta\dot{U}''_C$  напруг. Внаслідок «введення» вольтододаткових напруг вектори вихідних напруг мережі змінюють модуль і фазу по відношенню до векторів вхідних напруг  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  [3, 5]. Одночасне «введення» обох складових напруг за допомогою ТПП і ВДТ (у кожній фазі мережі) дає змогу здійснити «поздовжньо-поперечне» регулювання. Запропоновано перспективні силові схеми ФТПП з ШК тиристорів ТПП для поперечного, поздовжнього та поздовжньо-поперечного векторного регулювання напруг в системі з метою навмисного впливу на кут передачі. Наприклад, на рис. 17 наведено схему (однофазний еквівалент) регулятора «поперечної складової» напруг ФТПП, в якому використовуються відповідні ТПП- «А» («В», «С»).

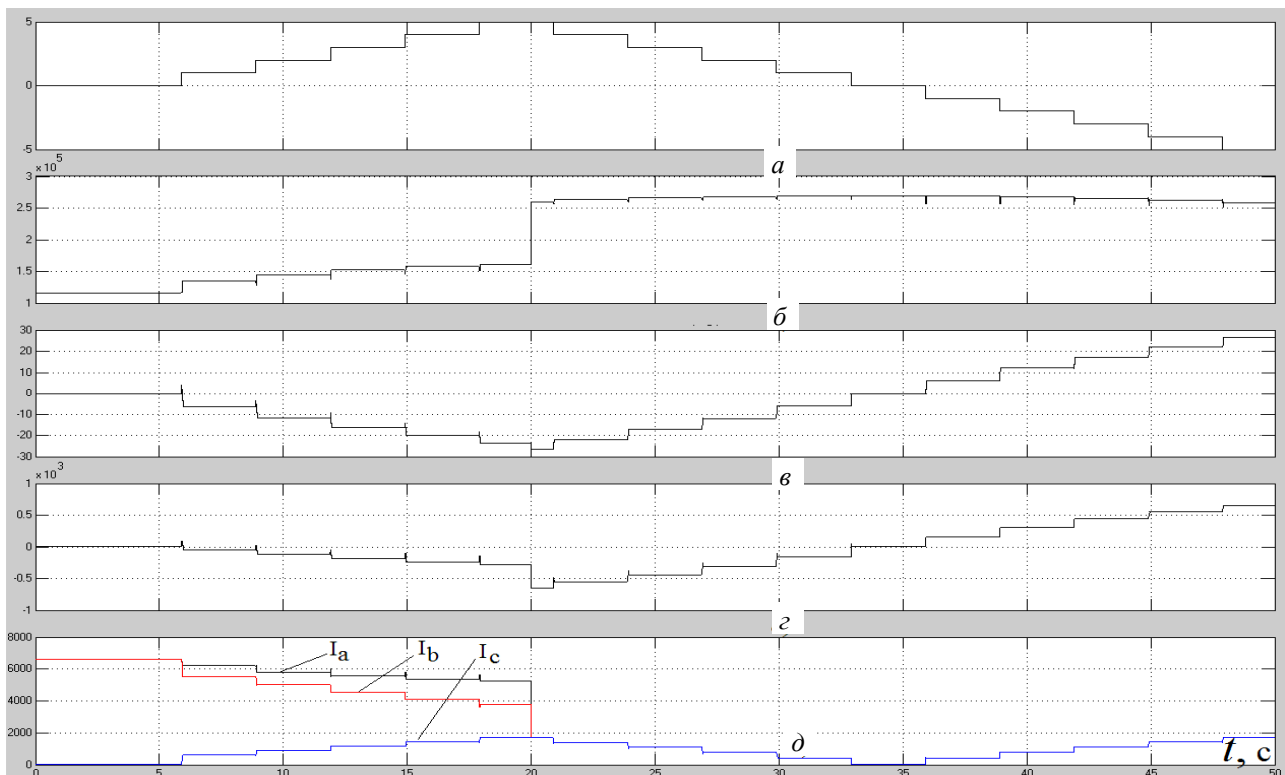


Рис. 15

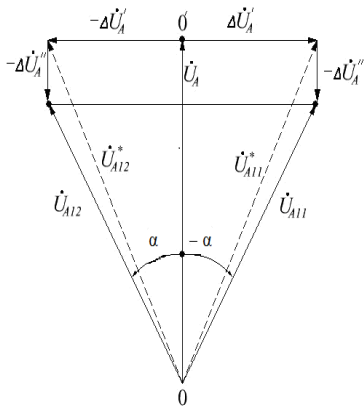


Рис. 16

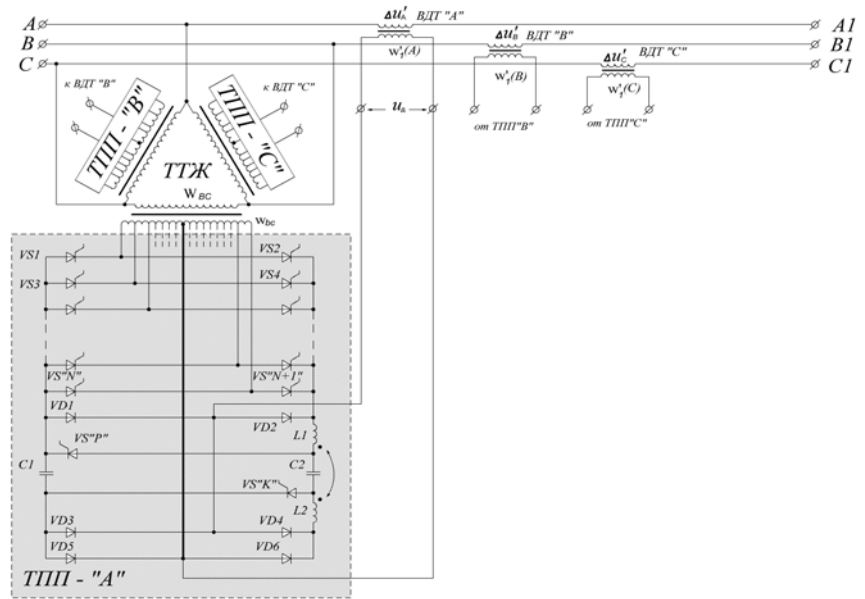


Рис. 17

На рис. 18 представлено однофазний еквівалент регулятора «повздовжньо-поперечних» складових напруг ФПТП з використанням ТПП аналогічного виду.

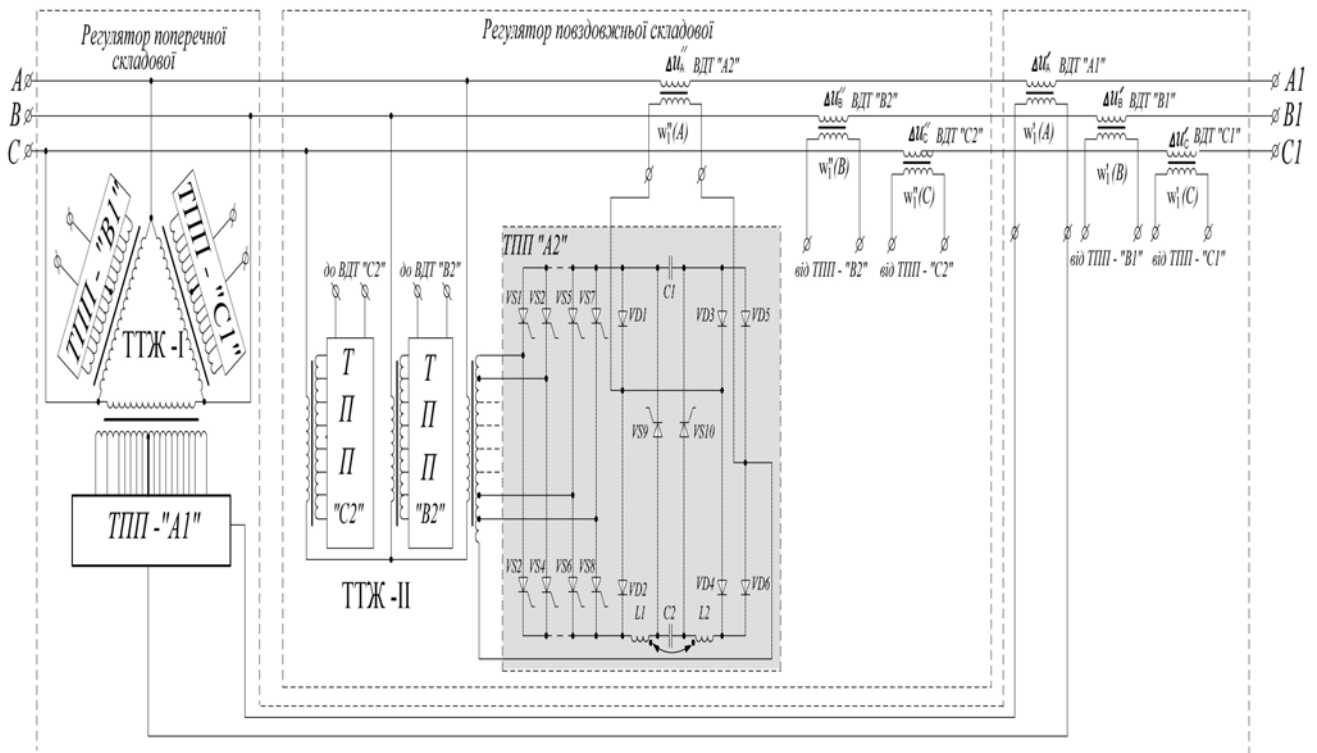


Рис. 18

У наведених схемах ТПП вузол штучної комутації характеризується високою комутаційною здатністю і стійкістю в процесі перемикання ступенів регулювання напруг за рахунок здійснення «жорсткої» паралельної комутації силового  $VS9$  і комутуючого  $VS10$  тиристорів імпульсним джерелом напруги, для якої характерна відсутність накопичення енергії в контурі комутації, що сприяє значному підвищенню надійності ФПТП [7].

Слід зазначити, що доцільність конкретного застосування СТАТКОМ і ФПТП в електричних мережах ОЕС України має визначатися на основі результатів техніко-економічних розрахунків і аналізу показників ефективності їх роботи в кожному конкретному випадку з

урахуванням вихідних розрахункових даних та відповідних значень параметрів і характеристик енергосистеми в точці приєднання СТАТКОМ або ФПТП.

1. Добрусин Л.А. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Сб. докл. IV Междунар. симпозиума «Электротехника 2010 год». – М., 2010. – 26 с.
2. Дьяконов В., Пеньков А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 816 с.
3. Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Исследование алгоритмов переключения вентилей мощного фазоповоротного устройства // Электро. – 2010. – № 5. – С. 27–33.
4. Кочкин В.И. Традиционные и новые технологии управления режимами работы электрических сетей на основе устройств силовой электроники // Электротехника. – 2009. – № 6. – С. 3–14.
5. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.
6. Нудельман Г.С, Иванов А.Г., Матисон В.А. и др. Силовая электроника в промышленности и энергетике // 36. пр. VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств” (EPQ – 2008). – Маріуполь: PROCEEDINGS, 2008. – С. 412–417.
7. Стогній Б.С., Павловський В.В., Сопель М.Ф. Проблема інтеграції гнучких передач змінного струму в електричній системі. Аналіз та керування режимами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр., – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – № 29. – С. 47–54.
8. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2013. – 378 с.
9. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning – Hoboken, New Jersey: Wiley. – 2007. – 379 p.

УДК 311:621.316

**А.К. Шидловский**, акад. НАН Украины, **А.Ф. Жаркин**, чл.- корр. НАН Украины, **В.А. Новский**, докт. техн. наук, **Д.А. Малахатка**

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Моделирование режимов работы статических синхронных компенсаторов реактивной мощности и фазоповоротных трансформаторных устройств для создания гибких систем передачи переменного тока в ОЭС Украины**

*Приведены основные результаты исследований, которые получены в отделе стабилизации параметров электромагнитной энергии ИЭД НАН Украины при выполнении в 2013 году первого этапа научного проекта "Разработка перспективных средств компенсации реактивной мощности и стабилизации уровня напряжений для создания гибких систем передачи переменного тока в ОЭС Украины" в рамках комплексной программы научных исследований НАН Украины "ОБЪЕДИНЕНИЕ-2". Библиограф. 9, рис. 18.*

**Ключевые слова:** статический синхронный компенсатор реактивной мощности, фазоповоротное трансформаторное устройство, имитационное моделирование, качество электрической энергии.

**A.K. Shydlovskiy, A.F. Zharkin, V.O. Novskiy, D.O. Malakhatka**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Simulation modes of static synchronous compensators of reactive power and phase-shifting transformer devices for development of flexible AC transmission systems for Ukrainian power grid**

*Basic research results that were obtained in the department of stabilization parameters of electromagnetic energy IED NAS of Ukraine when performing in 2013 year first stage of science project "Development of advanced reactive power compensation devices and stabilization of voltage levels for flexible AC transmission systems for Ukrainian power grid" through an integrated research program NAS of Ukraine "Objednanya-2" were presented. References 9, figures 18.*

**Key words:** static synchronous var-compensator, phase-shifting transformer, simulation, power quality.

Надійшла 4.04.2014

Received 4.04.2014