

УКД 621.314.214

Жаркін Андрій Федорович, чл.-кор. НАН України
Новський Володимир Олександрович, докт. техн. наук
Пазєєв Андрій Георгійович, канд. техн. наук
Бойко Петр Семенович,

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна, пр. Перемоги, 56, Київ-57, Україна, 03680. тел. +38-044-366-26-90. E-mail: novsky@ied.org.ua.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ
 РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В
 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ**

Проведено імітаційне моделювання електромагнітних процесів при підключенні до електроенергетичної системи статичних тиристорних компенсаторів (СТК) реактивної потужності. Аналіз впливу на якість напруги в системі гармонічного складу струмів СТК дозволив визначити оптимальні значення параметрів елементів його фільтрокомпенсуючих ланцюгів.

Ключові слова: статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності, гармонічний склад струму, імітаційне моделювання.

Жаркин Андрей Федорович, член-корр. НАН Украины
Новский Владимир Александрович, докт. техн. наук
Пазеев Андрей Георгиевич, канд. техн. наук
Бойко Петр Семенович,

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина, пр. Победы, 56, Киев-57, Украина, 03680. тел. +38-044-366-26-90. E-mail: novsky@ied.org.ua.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ
 РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В
 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

Проведено имитационное моделирование электромагнитных процессов при подключении к электроэнергетической системе статических тиристорных компенсаторов (СТК) реактивной мощности. Анализ влияния на качество напряжения в системе гармонического состава токов СТК позволил определить оптимальные значения параметров элементов его фильтрокомпенсирующих цепей.

Ключевые слова: статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности, гармонический состав тока, имитационное моделирование.

Zharkin Andrey Fedorovich, Corr. Mem. NAS of Ukraine,
Novskiy Vladimir Alexandrovich, Dr. Sc. (Eng.),
Pazyeyev Andrey Georgyevich, Cand. Sc. (Eng.),
Boyko Petr Semenovich,

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine, 03680. tel. +38-044-366-26-90. E-mail: novsky@ied.org.ua.

**INVESTIGATION OF THE IMPACT OF STATIC THYRISTOR COMPENSATORS OF REACTIVE
 POWER ON A QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE POWER SYSTEM**

The simulation modeling of electromagnetic processes at connected to electroenergy system of static thyristor compensators (STC) of reactive power was held. The analysis of the impact on the quality of the voltage in the power supply system of harmonic composition of current of STC allowed defining the optimal parameters of its filter-chain elements.

Keywords: static thyristor compensators of reactive power, Static Var Compensator, harmonic composition of current, imitating modeling.

Вступ

Серед перспективних пристроїв силової електроніки, які знаходять застосування при побудові гнучких систем передачі змінного струму, значне місце займають статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (СТК), що широко використовуються для вирішення задач передавання та розподілу електричної енергії при значних і швидких

коливаннях рівня і перетоках реактивної потужності [1, 2, 3]. Узагальнену схему СТК, наприклад, типу TCR (Thyristor Controlled Reactor) наведено на рис.1 [4, 5].

Основними силовими елементами схеми є реактор ($L1$), який комутується за рахунок зустрічно-паралельно включених тиристорів $VS1$ - $VS2$, фазове управління кутом вмикання яких дозволяє регулювати струм реактора, батарея конденсаторів БК, а також фільтро-компенсувальні ланцюги ФКЛ1- ФКЛп, налаштовані на певні гармоніки. При відповідному виборі параметрів LC - елементів СТК може працювати як в режимі генерування, так і в режимі споживання реактивної потужності.

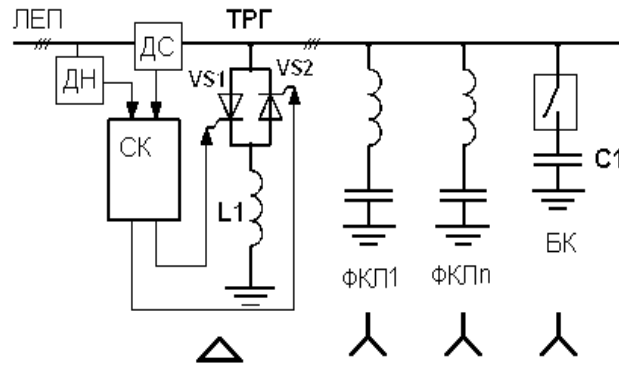


Рис.1. Узагальнена схема СТК типу TCR

Застосування СТК в електроенергетичних системах забезпечує підвищення статичної і динамічної стійкості, зниження відхилень напруги при великих збуреннях в системі, стабілізацію напруги, обмеження внутрішніх напруг, збільшення передавальної здатності електропередачі, за рахунок поліпшення стійкості при великій потужності, що передається [2, 5]. Крім того, завдяки наявності в СТК достатньо потужних ФКЛ зменшується рівень вищих гармонік в електричних мережах.

Постановка задачі дослідження

При відомих перевагах використання СТК має і деякі недоліки. Фазове управління кутом вмикання тиристорів для регулювання струму реактора призводить до наявності у струмі СТК вищих гармонік, що негативно впливає на якість напруги мережі (враховуючи достатньо значний рівень повної потужності СТК) [1, 2]. Наявність у струмі СТК вищих гармонік обумовлює використання ФКЛ, що призводить до зростання вартості обладнання. Відмітимо, що необхідність зниження рівнів гармонік до нуля практично відсутня, тому досить понизити їх до рівня, встановленого стандартами. Якщо прийняти до уваги, що система "мережа-СТК-навантаження" може мати не детерміновані в часі (або нелінійні) параметри активних та реактивних елементів, вибір параметрів ФКЛ може бути достатньо складною задачею.

Виконаний аналіз розробок відомих фірм-виробників СТК, а також принципів оформлення ними контрактів на проектування, показав, що кожна з цих фірм має свої досвід та рекомендації по проектуванню СТК, а також програмне забезпечення для розрахунків режимів роботи [6, 7]. Однак очевидно, що до замовлення СТК у конкретного виробника необхідно мати інформацію щодо основних параметрів електромагнітних процесів у самому пристрої та впливу його роботи на електромережу у місці підключення СТК. Таку інформацію може забезпечити використання імітаційного моделювання режимів роботи СТК в стандартних прикладних пакетах схемотехнічного моделювання.

Задачею роботи є дослідження впливу СТК на якість напруги в точці підключення для пошуку значень параметрів елементів ФКЛ, що забезпечують обрані показники несинусоїдальності напруги.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводилось в пакеті схемотехнічного моделювання МС9 (MikroCap9) з використанням розробленої імітаційної моделі СТК, що підключений до ідеалізованої ЛЕП

на стороні навантаження.

Розглянемо ЛЕП-330 кВ довжиною 200 км з наступними параметрами: $z_0 = 0,048 + j0,328$ (Ом/км), $b = 3,41 \cdot 10^{-6}$ (См/км), $U_{nom} = 330$ кВ, $I_{max.don} = 1420$ А (дані наведені для ЛЕП-330, виконаної проводами 2·АС 300/39). ЛЕП приєднана до джерела нескінченної потужності та живить навантаження $S_n = P_n + jQ_n$, де P_n та Q_n – активне та реактивне навантаження. За даними роботи [8] для цієї ЛЕП з натуральною потужністю $P_{nat} = 343$ МВт при $Q_n = 0$ дані граничного режиму наступні: гранична потужність $P_{gp} = 730$ МВт, критична напруга $U_{kp} = 0,68U_{nom}$, критичний кут передачі $\delta_{kp} = 40^\circ$.

Для спрощення розрахунків прийmemo, що в лінії існує симетричний режим. Використаємо П-образну схему заміщення лінії та паралельно підключені активне та реактивне навантаження. Схема отриманої однолінійної моделі лінії представлена на рис. 2.

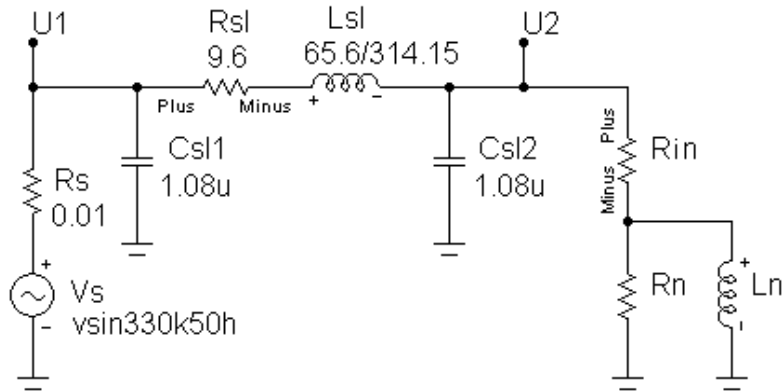


Рис. 2. Схема однолінійної моделі ЛЕП 330 кВ

На схемі позначено: V_s – джерело синусоїдальної напруги з опором R_s , R_{sl} та L_{sl} – еквівалентні опір та індуктивність лінії, C_{sl1} та C_{sl2} – еквівалентні ємності П-образної схеми заміщення лінії, R_n та L_n – еквівалентні опір та індуктивність навантаження, R_{in} – шунт для вимірювання струму навантаження, U_1 та U_2 – точки вимірювання напруг на початку та в кінці лінії.

Так як у пакеті МС9 розрахунки проводяться при заданих значеннях RLC - елементів, тут і далі для прийнятих при аналізі процесів в лініях активної та реактивної потужностей їх значення перераховувались в конкретні значення опору, індуктивності та ємності. За номінальне значення активного опору навантаження прийнято значення в режимі передачі натуральної потужності (при $Q_n = 0$), діючі значення напруг U_{U1} в точці U_1 та U_{U2} в точці U_2 однакові, а активна потужність навантаження дорівнює номінальній $P_{nnom} = P_{nat}$. Значення номінальної індуктивності навантаження розраховувалось з умови, коли номінальна реактивна потужність навантаження $Q_{nnom} = 0,48P_{nnom}$ (МВАр), $\text{tg} \varphi_n = 0,48$, $\cos \varphi_n = 0,9$. При цьому номінальна повна потужність навантаження $S_{nnom} = P_{nnom} + jQ_{nnom}$. Так як прийнята однолінійна модель, напруга джерела V_s визначалась виразом

$$u_{v_s}(t) = \frac{330000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin \omega t = 269442 \sin \omega t, \text{ що відповідає діючому значенню фазної напруги}$$

трифазної мережі 190,5кВ. Тоді номінальне діюче значення напруги $U_{nomU2} = 190,5$ кВ. При цьому для моделі $P_{nnom} = 343/3 = 114$ МВт, $R_{nnom} = 318,34$ Ом.

На рис. 3 наведені результати розрахунків на моделі у МС9 для двох значень повної потужності навантаження – $P_n = P_{nnom}$, $Q_n = 0$ (графіки 1) та $P_n = P_{nnom}$, $Q_n = Q_{nnom}$ (графіки 2).

Тут і далі на рисунках позначено: $v(U1)$, $v(U2)$ – миттєві напруги та $RMS(v(U1))$, $RMS(v(U2))$ – діючі напруги відповідно на початку та в кінці лінії; $I(Rsl)$, $I(Rin)$ – миттєві струми лінії та RL навантаження, $RMS(I(Rsl))$, $RMS(I(Rn))$, $RMS(I(Rin))$ – відповідно діючі струми лінії, активного та RL – навантаження; $AVG(PD(Rn))$ – активна потужність навантаження.

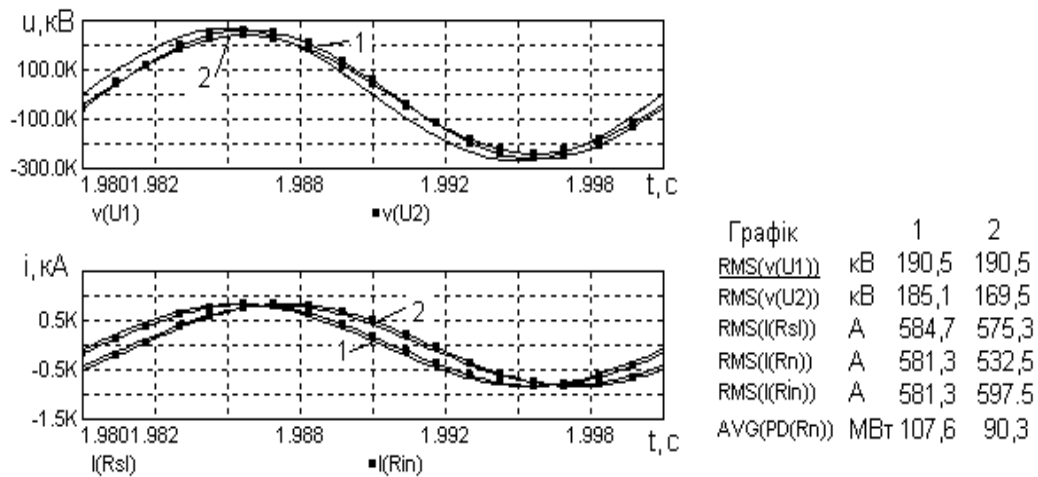


Рис. 3. Результати розрахунків на моделі ЛЕП. (1) – $R_n=318,34 \text{ Ом}$, $L_n=\infty$, (2) – $R_n=318,34 \text{ Ом}$, $L_n=2,11 \text{ Гн}$

Результати розрахунків показали, що в першому випадку при $Q_n=0$ для прийнятого значення $R_n = R_{nom}$ напруга U_{U2} складає близько 97 % від номінальної напруги, а потужність навантаження становить 94,4% номінальної потужності. У другому випадку, при $Q_n = Q_{nom}$ значення напруги та активної потужності навантаження зменшуються (відповідно до 89 % та 79 %), зростають втрати в лінії, що обумовлено реактивною складовою струму навантаження. Отримані результати відповідають відомим результатам аналізу процесів в лініях електропередач, що свідчить про адекватність прийнятої моделі ЛЕП.

На основі наведеної вище однолінійної моделі лінії була розроблена імітаційна модель, що включає СТК з системою керування СК (узагальнена схема цієї моделі представлена на рис. 4), причому силова схема СТК побудована на основі найбільш поширеної структури типу TCR. Вона складається з конденсатора C_k , дроселя L_k , тиристорної групи ТГ, датчиків напруги ДН1 ДН2, системи керування СК та послідовних резонансних фільтрів вищих гармонік, які представлені ланцюгами $Cf3, Lf3, Rf3$ – фільтр 3-ї гармоніки, $Cf5, Lf5, Rf5$ – фільтр 5-ї гармоніки. Так як одним з головних завдань, що вирішуються при застосуванні СТК є стабілізація рівня напруги у вузлі мережі, в СК введено зворотний зв'язок по напрузі. При цьому C_k та фільтри мають визначену потужність та постійно підключені до мережі, а регулювання напруги в точці підключення ведеться за рахунок регулювання струму дроселя L_k від нуля до перекомпенсації ємнісного струму конденсатора C_k . Схема моделі побудована на базі елементів зі стандартної бібліотеки елементів МС9. Параметри лінії ті самі, що і в схемі на рис. 2.

Вхідна напруга, тобто напруга в точці підключення U_2 , вимірюється датчиком напруги ДН1, випрямляється та згладжується, а сигнал, що їй пропорційний, подається до системи порівняння СП, де він порівнюється з еталонною напругою U_{em} . Сигнал різниці підсилюється підсилювачем П1 та через коригувальний ланцюг КЛ подається до імпульсного модулятора ІМОД, причому елементи СП, П1 та КЛ схемотехнічно виконано на операційному підсилювачі.

В каналі синхронізації вхідна напруга вимірюється датчиком напруги ДН2 і поступає в синхронізатор СИНХР, який формує на виході сигнал про перехід вхідної напруги через нульове значення. В ІМОД на основі сигналів від СИНХР та сигналу після КЛ формуються імпульси вмикання відповідного тиристора тиристорної групи з кутом вмикання β таким чином, щоб забезпечити стабілізацію напруги в точці підключення СТК.

Розроблена імітаційна модель дозволяє проводити дослідження режимів роботи СТК та впливу його роботи на режимні параметри електричної мережі, впливу варіювання значень параметрів силових елементів СТК, фільтро-компенсуючих ланцюгів, а також

алгоритмів роботи та значень параметрів СК на якість напруги в точці підключення СТК до мережі .

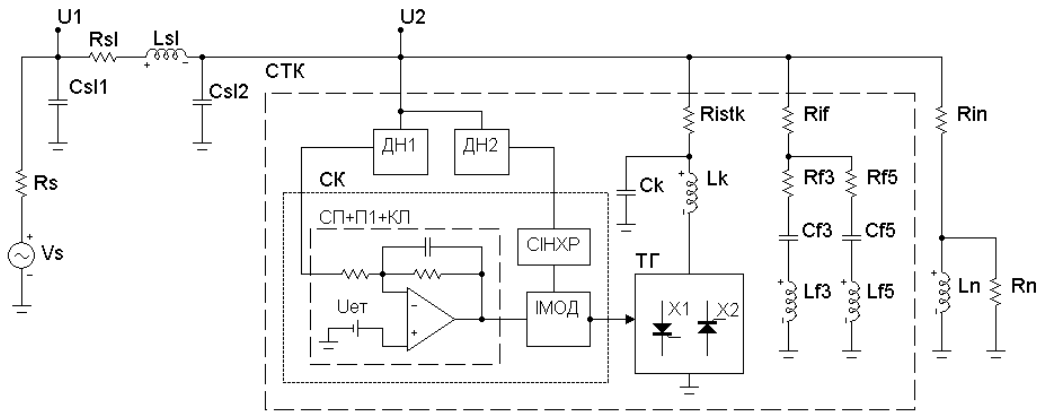


Рис. 4. Узагальнена схема імітаційної моделі СТК

Аналіз результатів імітаційного моделювання роботи СТК

За допомогою розробленої моделі було проведено комплекс розрахунків статичних режимів роботи СТК.

На представлених нижче рисунках прийняті наступні позначення. $V(U1)$, ..., $I(Lsl)$, ... – миттєві значення напруг та струмів, $RMS(V(U1))$, ... , $RMS(I(Lsl))$, ... – діючі значення, $AVG(PD(Rn))$ – середнє значення активної потужності навантаження. В усіх випадках розраховувались значення індуктивності Lk з урахуванням того, що реактивна потужність Lk в моделі дорівнює $Q_{Lk} = (450/3)MVAp$, а реактивна потужність ємності $Ck - Q_{Ck} = ((350 - \sum Q_{fn}(50Hz)) / 3)MVAp$, де $\sum Q_{fn}(50Hz)$ – сумарна потужність фільтрів на основній частоті. Вплив СТК на мережу ілюструють графіки, що представлені на рис. 5.

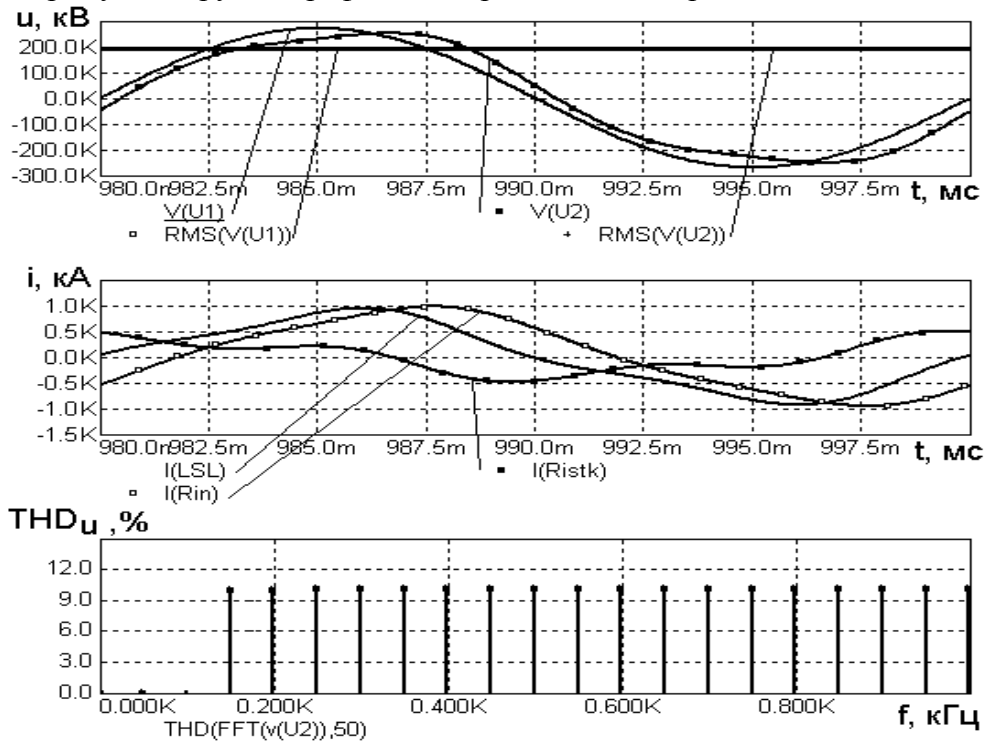


Рис. 5. Результати розрахунків у МС9 при відключених фільтрах

Криві розраховані при відключених фільтрах та номінальній повній потужності навантаження. Для стабілізації напруги U_{U2} ($RMS(V(U2))$) в СК виробляється такий сигнал

вмикання тиристорів ТГ, аби реактивна потужність СТК мала ємнісний характер для компенсації індуктивної складової потужності навантаження і падіння напруги в лінії. При цьому для обраних параметрів елементів СТК кут вмикання тиристорів ТГ дорівнює приблизно 120 ел. град., що обумовлює несинусоїдальність струму СТК $I(Ristk)$ і струму в лінії $I(LSL)$. Несинусоїдальний струм в лінії визиває спотворення миттєвої напруги $V(U2)$ в точці підключення СТК. При цьому коефіцієнт спотворення напруги $THD(V(U2))$ становить 10,5 % та визначається в основному наявністю третьої гармоніки.

Для аналізу характеру впливу СТК на мережу звернемося до рис. 6 та рис. 7.

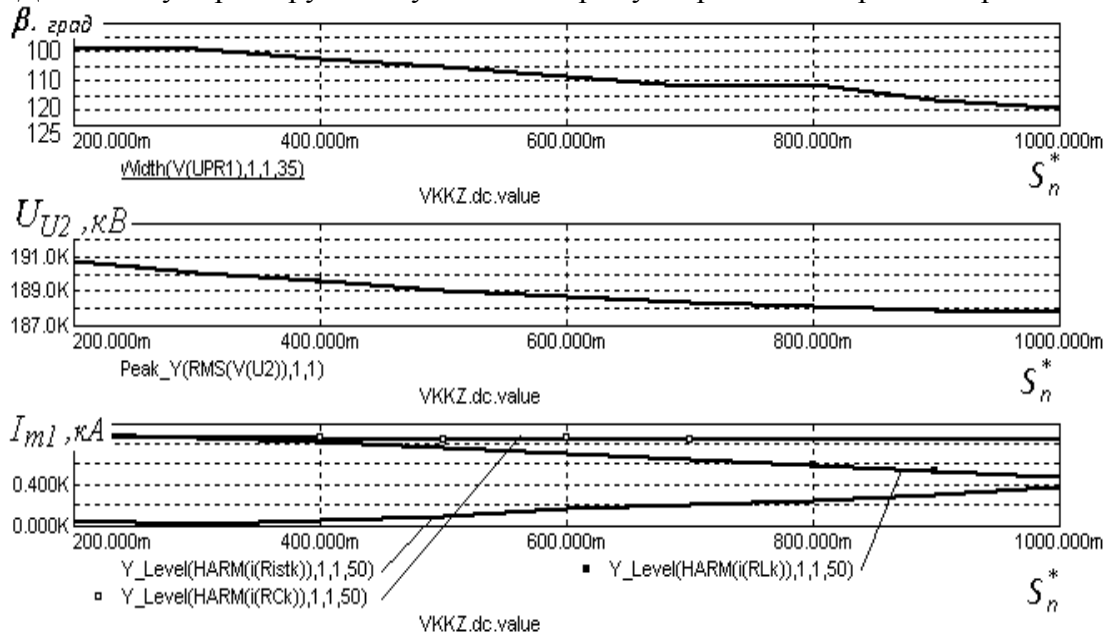


Рис. 6. Розрахунки на імітаційній моделі значень β , напруги в точці підключення СТК U_{U2} та амплітуд першої гармоніки струмів СТК, Lk та Ck

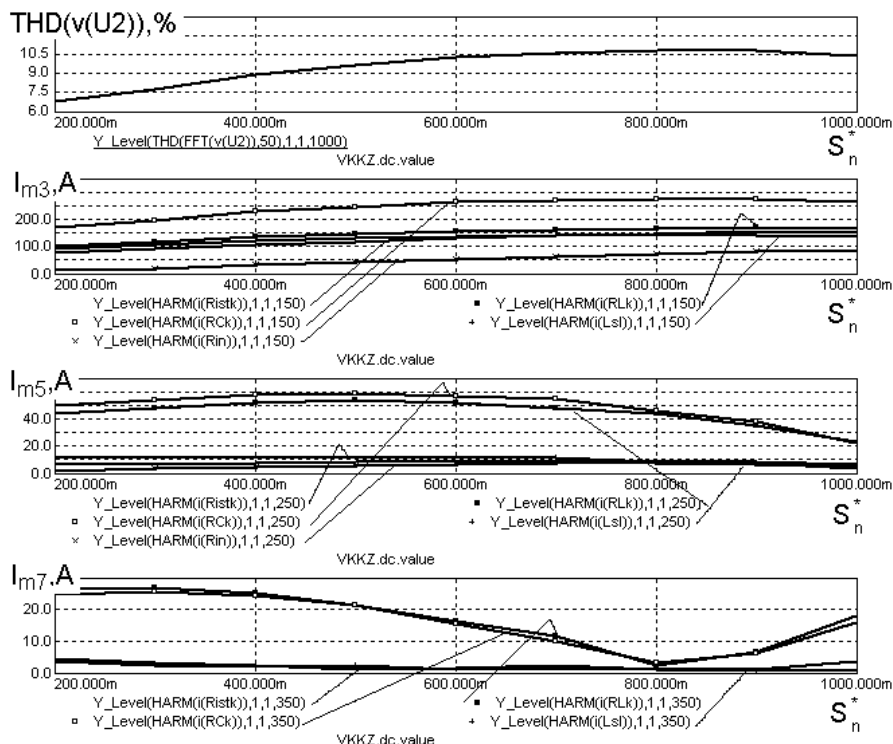


Рис.7. Розрахунки на імітаційній моделі значень $THD(v(U2))$ та амплітуд трьох вищих гармонік струмів елементів моделі

На рис. 6 представлено розраховані кут вмикання β тиристорів ТГ, діюче значення напруги U_{U2} та I_{m1} – амплітуди першої гармоніки струмів СТК (струм шунта $I(Ristk)$ на рис. 4), реактору Lk і ємності Ck , а на рис.7 – коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги в точці $U2$ $THD(v(U2))$, амплітуди трьох вищих гармонік струмів СТК, реактору Lk , ємності Ck , струмів лінії (струм $I(Lsl)$) та загального струму навантаження (струм шунта $I(Rin)$) в залежності від значень відносної повної потужності навантаження $S_n^* = S_n/S_{nnom}$. Розрахунки проводились при відключених фільтрах, а значення S_n^* змінювались в діапазоні 0,2–1,0.

Проаналізуємо отримані результати. З графіка діючого значення напруги U_{U2} (рис. 6) видно, що застосування СТК дозволяє стабілізувати напругу U_{U2} на номінальному рівні. Для номінального навантаження лінії без СТК ($S_n^* = 1$, рис. 3) спостерігається 11 % зниження напруги, в той час як при підключеному СТК для прийнятого діапазону зміни навантаження напруга U_{U2} знаходиться в межах 187,9 кВ – 190,8 кВ, а максимальне відхилення від номіналу становить 1,4 %. Стабілізація напруги забезпечується за рахунок регулювання рівня основної гармоніки струму СТК. Як видно з аналізу кривих, що відображують значення I_{m1} (рис. 6), при збільшенні навантаження від значень $S_n^* = 0,2$ до 1,0 основна гармоніка струму ємності Ck не змінюється, основна гармоніка струму дроселя Lk зменшується, а основна гармоніка струму СТК спочатку має індуктивний характер і зменшується до нуля при значенні $S_n^* = 0,333$, а потім збільшується, маючи ємнісний характер. За рахунок цього напруга U_{U2} підтримується на заданому рівні (рис.6), а її відхилення від номіналу δ_{U2} лежить в межах $-1,4\%$ – $+0,4\%$ для всього діапазону зміни навантаження.

Зміна струмів вищих гармонік СТК та його елементів визначається не тільки кутом керування тиристорів ТГ, а і шунтуючою дією включених паралельно Lk ємності Ck та еквівалентної ємності лінії $Csl2$ (рис. 4). Струми третьої гармоніки (I_{m3} , рис. 7) в схемі мають максимуми в області номінальних значень навантаження ($S_n^* \approx 0,9$), знижуючись при його зменшенні. При цьому максимальні значення амплітуд 3-ї гармоніки струмів дорівнюють: для струму СТК $I(Ristk)$ – 150 А, для струмів дроселя Lk $I(RLk)$ та конденсатора Ck $I(RCk)$ відповідно 175 А та 275 А, тобто більші на 17 % та 83 % ніж максимальне значення амплітуди 3-ї гармоніки струму СТК $I(Ristk)$. Амплітуди п'ятої і сьомої гармонік струму СТК та струмів Lk і Ck відрізняються ще сильніше, причому зі зростанням номерів гармонік різниця між амплітудою гармонік струму СТК та дроселя Lk зростає, а різниця між амплітудою гармонік струму дроселя Lk та конденсатора Ck зменшується. Так, максимальні амплітуди п'ятих гармонік струмів Lk і Ck більші за максимальну амплітуду п'ятої гармоніки струму СТК відповідно у 4,5 та 4,8 разів (при $S_n^* \approx 0,5$), а максимальні амплітуди сьомих гармонік струмів Lk і Ck більші за максимальну амплітуду цієї ж гармоніки струму СТК відповідно у 6,75 та 6,25 разів (при $S_n^* \approx 0,3$). Такі результати пояснюються фільтрацією струмів цих гармонік конденсаторами Ck та $Csl2$, які підключені паралельно дроселю Lk .

Загалом, з аналізу результатів розрахунків, що представлені на рис. 7, можна зробити висновок, що при відключених фільтрах струм СТК та струм в лінії мають суттєво несинусоїдальну форму. Несинусоїдальний струм в лінії визиває спотворення напруги в точці підключення СТК. Для вказаного діапазону зміни навантаження значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності напруги THD_{U2} складають 6,75 – 10,95 %. Це свідчить, що використання фільтрів при застосуванні СТК є обов'язковим.

Наведені результати дозволили визначити реальні значення струмів вищих гармонік СТК, які підлягають фільтрації у ФКЛ. Так як у нашому випадку значення гармонік, що не скомпенсовані ємністю Ck , починаючи з сьомої, відносно малі, можна обмежитися використанням фільтрів третьої та п'ятої гармонік, що і було прийнято надалі.

Представляє інтерес порівняння результатів, що отримано при даному імітаційному моделюванні з відомими, які отримані за допомогою аналітичних викладок [1]. Розглянемо

графік залежності значень кута β керування тиристорами ТГ (верхній графік на рис.6). З його аналізу отримаємо, що для прийнятих параметрів лінії, силових елементів СТК та діапазону зміни навантаження значення кута β знаходяться в межах (98 – 119) ел. град. Маючі дані про значення кута β можна оцінити рівні вищих гармонік струму, що генеруються СТК при роботі. Як відомо з [1], значення відносних амплітуд струмів керованого тиристорами реактора при підключенні до джерела синусоїдальної напруги в залежності від кута керування β визначаються з виразів:

$$\frac{I_1}{I_m} = \frac{1}{\pi} (2(\pi - \beta) - \sin 2(\pi - \beta)); \tag{1}$$

$$\frac{I_h}{I_m} = \frac{2}{\pi h} \left(\frac{\sin(h-1)(\pi - \beta)}{h-1} - \frac{\sin(h+1)(\pi - \beta)}{h+1} \right), \tag{2}$$

$$h = 2k + 1, k = 1, 2, 3 \dots$$

де I_1 та I_h – амплітуди струмів першої та вищих гармонік,

h – номер гармоніки,

$I_m = U_m / \omega L_k$ – максимально можлива амплітуда струму реактора при повному відкритті тиристорів, тобто коли кут керування $\beta = 90$ ел. град. Графіки, що розраховані за наведеними виразами, представлені на рис. 8.

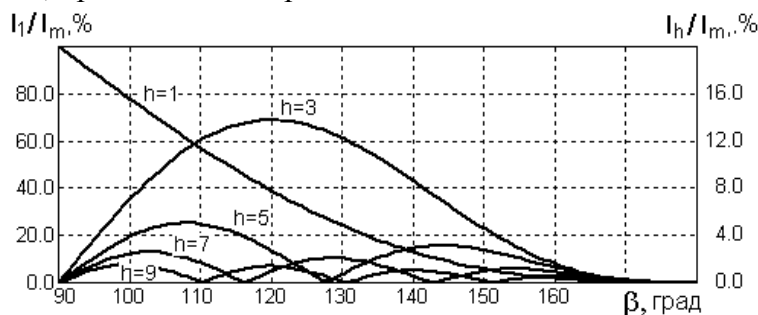


Рис. 8. Залежності відносних амплітуд гармонік струму реактора від β , що розраховані за аналітичними виразами

Порівняння результатів розрахунку значень відносних амплітуд гармонік струмів реактора за виразами (1) і (2) (рис. 8) з відповідними розрахунками струму дроселя Lk на моделі СТК (рис. 6, рис. 7) показало, що амплітуди першої гармоніки струму дроселя Lk приблизно відповідають виразу (1), в той час як амплітуди третьої гармоніки струму дроселя Lk дещо вищі, ніж розраховані за виразом (2). Відмінність амплітуд струмів в схемі від ідеалізованого випадку, що описується виразом (2), наявна і для інших вищих гармонік. Так для $S_n^* = 1$ з рис. 6 отримаємо, що кут β дорівнює 119° . Як видно з рис. 8 при цьому відносна амплітуда третьої гармоніки струму керованого тиристорами реактора становить приблизно 14 %, п'ятої гармоніки – 2,5 % та сьомої гармоніки – 1 % від I_m . Враховуючи, що для прийнятих параметрів схеми $I_m = 1113,56$ А, отримаємо: $I_3 = 155,9$ А, $I_5 = 27,8$ А, $I_7 = 11$ А.

Порівняємо ці результати з розрахованими за допомогою зазначеної моделі. З рис. 7 визначимо, що для $S_n^* = 1$ амплітуди третьої, п'ятої та сьомої гармонік струму дроселя Lk ($I(RLk)$ на рис. 7) дорівнюють відповідно 170 А (більше, ніж в ідеальному випадку на 9 %), 22 А (менше на 20 %) та 18 А (більше на 63 %). Як видно розбіжності досить великі і пояснюються вочевидь ідеалізацією процесів при виводі формул (1) та (2). В реальній схемі напруга в точці підключення СТК, а значить і напруга на дроселі відрізняється від синусоїди, а її гармонічний склад залежить від параметрів всіх елементів СЕЖ, тому залежності рівнів гармонік струму дроселя від β відрізняються від зображених на рис. 8. Тому при визначенні параметрів ФКЛ результати розрахунків за допомогою імітаційної моделі забезпечують

більш точні значення наявних в схемі струмів вищих гармонік, які треба компенсувати, щоб забезпечити необхідну якість напруги мережі.

Використовуючи отримані вище результати, проведемо вибір параметрів резонансних фільтрів третьої та п'ятої гармонік, що входять до складу ФКЛ СТК (рис. 4). Для визначення необхідних параметрів фільтрів з метою дотримання вимог стандартів щодо якості напруги були проведені розрахунки роботи схеми при підключених фільтрах при різних їх потужностях. Аналіз отриманих результатів показав, що вже при потужностях фільтрів третьої та п'ятої гармонік, що дорівнюють відповідно одному МВАр та двом десятим МВАр, значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності напруги $THD(v(U2))$ не виходять за межі одного відсотку для всього діапазону зміни навантаження. Однак при цьому напруга на конденсаторі фільтру має недопустимо високі значення. Наприклад, при вказаних потужностях фільтрів і номінальній потужності навантаження діюче значення напруги на конденсаторах фільтрів третьої $RMS(v(Cf3))$ та п'ятої $RMS(v(Cf5))$ гармонік складає відповідно 1010 кВ та 262 кВ. В той же час при потужностях фільтрів відповідно 25 МВАр та 5 МВАр значення напруги на зазначених конденсаторах фільтрів дорівнюють 210 кВ та 193 кВ.

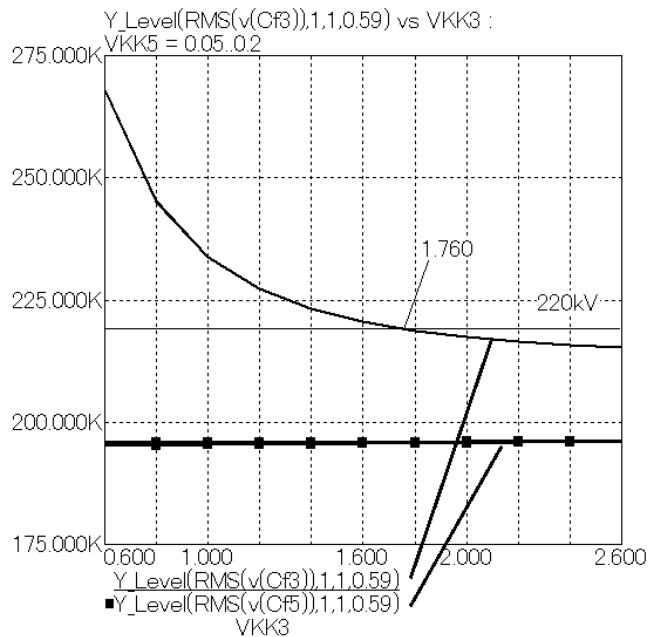


Рис. 9. Напруга на конденсаторах фільтрів для номінального RL - навантаження при різних потужностях фільтрів

Були розраховані залежності, що дозволяють провести обґрунтований вибір параметрів фільтрів, щоб напруга на конденсаторах фільтрів не перевищувала обраного рівня, які наведені на рис.9. Криві розраховані для значень реактивної потужності батареї конденсаторів (БК) фільтру третьої гармоніки $Q_{БК3}$ з діапазону 6,84 МВАр – 29,64 МВАр та значень реактивної потужності фільтру п'ятої гармоніки $Q_{БК5}$ з діапазону 0,57 МВАр – 2,28 МВАр, що моделювалось при розрахунках зміною коефіцієнтів $vkhh$ (для $h = 3,5$ відповідно $vk3$ та $vk5$), які визначали значення $Q_{БКh}$ згідно виразу $Q_{БКh} = vkhh * 11,4$ МВАр. У всіх розрахунках були отримані значення $THD(v(U2))$ менші за 1 %.

Наприклад при обмеженні напруги на БК на рівні 220 кВ було отримано потужність фільтру третьої гармоніки у 20,064 МВАр. При цьому з рис. 9 видно, що напруга $RMS(v(Cf5))$ дорівнює 195 кВ для всього діапазону зміни $Q_{БКh}$. Тому можна обрати наприклад $Q_{БК5} = 1,14$ МВАр.

Порівняємо отримані результати з відомими з літератури. Наприклад у [9] наведено досить широко вживаний вираз для визначення мінімальної реактивної потужності БК $Q_{БК}$ фільтру h -ї гармоніки у вигляді

$$Q_{БКh} \geq 1,2K_C U_{номБК} I_h, \quad (3)$$

де K_C – дорівнює $\sqrt{3}$ при з'єднанні конденсаторів у "трикутник" та 3 при з'єднанні у "зірку", $U_{номБК}$ – номінальна лінійна напруга БК, I_h – діюче значення струму h -ї гармоніки. Як зазначено в [9] нерівність (3) є наближеною, проте її виконання повинно забезпечувати не перевищення максимально можливої напруги в усіх режимах роботи ФКЛ. Визначимо, врахувавши схему імітаційної моделі та отримані вище значення відповідних струмів гармонік, мінімальні значення потужності БК фільтрів для $h = 3$ та $h = 5$ за виразом (3). Прийнемо, що конденсатори з'єднані в "зірку" ($K_C = 3$), а також, що $U_{номБК} = 1,2U_{номU2} = 228,6$ кВ. Підставимо у (3) відповідні дані та отримаємо для однолінійної моделі $Q_{БК3} = 29,391$ МВАр, $Q_{БК5} = 2,351$ МВАр. Як бачимо, розраховані за виразом (3) значення $Q_{БКh}$ значно більші, ніж отримані з використанням імітаційного моделювання. Тому зробимо висновок, що при використанні виразу (3) отримується результат зі значним запасом по потужності, а використання імітаційної моделі дозволяє більш точно визначати значення параметрів ФКЛ СТК.

На рис. 10 наведено результати розрахунків на імітаційній моделі миттєвих напруг в точках $U1$ і $U2$, струмів лінії ($I(Lsl)$), СТК і фільтрів ($I(RistkF)$) та струму навантаження ($I(Rin)$) при номінальному навантаженні та знайдених вище значеннях параметрів фільтрів. Як видно з рисунку, форма кривих струмів та напруг практично не відрізняється від синусоїди, що свідчить про забезпечення високих показників якості електроенергії в точці підключення СТК з розрахованими параметрами ФКЛ.

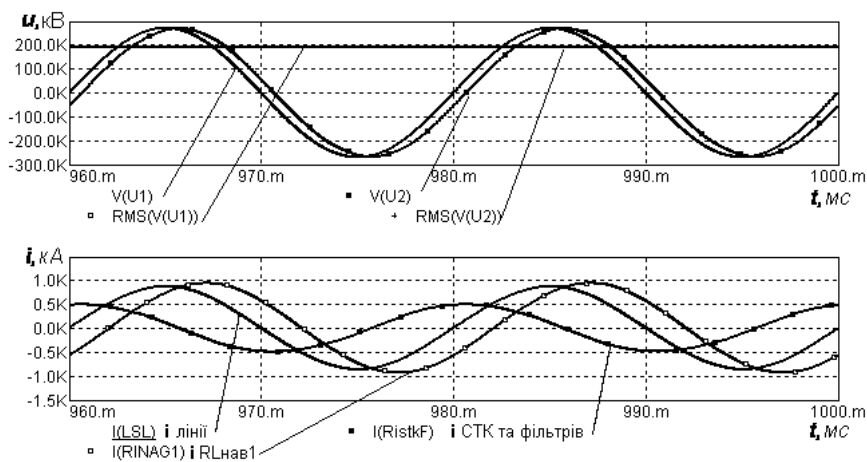


Рис.10. Результати розрахунків режимів роботи СТК на імітаційній моделі при номінальному навантаженні та знайдених значеннях параметрів ФКЛ

Слід відзначити, що за допомогою стандартних процедур пакету МС9 можливо в наведеній імітаційній моделі проводити розрахунки багатьох режимів, а відносна простота комбінування моделей ЛЕП, джерел напруги та різних навантажень дозволяє легко розповсюдити розрахунки на більш складні конфігурації енергосистеми.

Висновки

Розроблено однолінійну імітаційну модель для аналізу електромагнітних процесів в силових елементах СТК та визначення гармонічного складу струмів і напруг в СТК та елементах електроенергетичної системи. Показано, що при роботі СТК типу TCR без ФКЛ значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності напруги $THDU$ в точці підключення СТК складають 6,75% – 10,95%, що значно перевищує вимоги діючих стандартів. Представлено приклад розрахунків на запропонованій імітаційній моделі ЛЕП-330 кВ зі значенням

натуральної потужності $P_{\text{нам}} = 343$ МВт, до якої підключено навантаження потужністю до $S_{\text{ном}} = 343 + j165$ МВА та СТК з потужностями $+350/-100$ МВАр. Визначено оптимальні (мінімально можливі) значення ємності конденсаторів ФКЛ СТК для дотримання як вимог стандартів щодо якості напруги ($THD_{U2} < 1\%$), так і допустимого рівня напруги на конденсаторах ФКЛ.

Список використаної літератури

1. Матур, Р. М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности; под ред. Р. М. Матура; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
2. Дементьев, Ю. А., Кочкин, В. И., Мельников, А. Г. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 2–10.
3. Гвоздев Д. Б., Дроздов А. В., Кочкин В. И., Крайнов С. В. Статические устройства управления режимами энергосистем // Электрические станции. – 2011. – №8. – С. 32–45.
4. Давидов О. Ю., Бялобржеський О. В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах // Вісник КрДУ імені Михайла Остроградського. – Вип. 3/2010 (62). Частина 1. – 2010. – С. 132–136.
5. Noroozian, M., Petersson, A. N., Thorvaldson, B., Nilsson, B. A., Taylor, C.W. (2003), "Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application", *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES*, P. 1192–1199.
6. ABB Group – Automation and Power Technologies, <http://www.abb.com>.
7. Siemens AG – Power Distribution, <http://www.energy.siemens.com>.
8. Павловський, В. В. Аналіз та методи управління режимами електричних систем з гнучкими передачами змінним струмом: дис. ... докт. техн. наук. – Інститут електродинаміки НАН України. – Київ. – 2010. – 451 с.
9. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

References:

1. Mathur, R.M. (1987), *Static compensators for reactive power control*. Editor: R.M. Mathur, trans. from eng. [Статические компенсаторы для регулировки реактивной мощности; под ред. Р. М. Матура, пер. с англ.], Энергоатомиздат, Moscow, 160 p.
2. Dement'ev, Y. A., Kochkin, V. I., Melnikov, A. G. (2003), "Application operated static compensating devices in electrical networks" ["Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях"], *Electricity*, № 9, P. 2–10.
3. Gvozdeff, D. B., Drozdov, A. V., Kochkin V. I., Krainov, S. V. (2011), "Static control units by modes of power grids" ["Статические устройства управления режимы энергосистем"], *Electric Station*, № 8, pp. 32-45.
4. Davydov, O.Y., Byalobrzhesky, O.V. (2010), "Analysis of compensation of reactive power in electrical systems" ["Анализ засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах"], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Issue 3/2010 (62)*. Part 1, P. 132 –136.
5. Noroozian, M., Petersson, A.N., Thorvaldson, B., Nilsson, B.A., Taylor, C.W. (2003), "Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application", *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES*, P. 1192–1199.
6. ABB Group - Automation and Power Technologies, <http://www.abb.com>.
7. Siemens AG - Power Distribution, <http://www.energy.siemens.com>.
8. Pavlovsky, V. V. (2010), Analysis and methods of management electric systems with flexible AC transmissions: dissertation [Аналіз та методи управління режимами електричних систем з гнучкими передачами змінним струмом: дис. ... докт. техн. наук], Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 451 p.
9. Zhezhelenko, I. V. (2000), *The higher harmonics in systems of electrosupply of industrial enterprises. - 4th ed., reslave. and supplemented. [Vyisshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. – 4-e izd., pererab. i dop.]*, Energoatomizdat, Moscow, 331 p.

Поступила в редакцію 20.07 2014 г.