

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.044>

## ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПОДАВЛЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**В.В. Кучанський\***, канд. техн. наук, **О.В. Савицький\*\***

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [kuchanskiyvladislav@gmail.com](mailto:kuchanskiyvladislav@gmail.com)

*Розглядається явище самозбудження генераторів, приєднаних до ненавантаженої лінії електропередавання. Значення провідності керованих шунтувальних реакторів, які підібрано відповідно до регульовального діапазону, дають змогу уникнути появи самозбудження генераторів. Дається фізичний аналіз процесів, що відбуваються під час самозбудження синхронного генератора, та розроблено розрахункові моделі. Встановлено, що в разі штучного підтримання по всій довжині лінії напруги рівня номінального значення за допомогою керованих компенсуювальних пристроїв електропередача матиме властивості, характерні для порівняно коротких ліній (довжиною до 500 км) незалежно від її геометричної довжини. Визначено, що довжина ділянки лінії, на кінцях якої підтримується постійна напруга, значно менше ніж 500 км, отже, за потужності, що передається, менше натуральної напруги вздовж ділянки буде перевищувати номінальне значення, і в лінії буде надлишок реактивної потужності, який компенсується через її споживання в пристроях проміжної компенсації (струм компенсації мусить мати індуктивний характер). Бібл.8, рис. 4., табл. 4.*

**Ключові слова:** гнучкі системи передачі змінного струму, керований шунтувальний реактор, регулювання напруги та потужності, самозбудження синхронного генератора.

**Загальна характеристика проблеми.** У ненавантаженому режимі роботи лінії електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН) є проблема не тільки автопараметричного самозбудження парних гармонійних складових з резонансним підвищенням напруги, але й самозбудження генераторів. У такому режимі роботи зарядна потужність лінії може значно перевищувати номінальну потужність приєднаних до електропередачі генераторів, що призводить до самозбудження генераторів, за якого на їхніх затискачах і на лінії встановлюється напруга, що не відповідає струму збудження. Тобто, можливість виникнення самозбудження і його характер значною мірою залежать від співвідношення між номінальною потужністю генераторів станції та зарядною потужністю лінії.

Ступінь компенсації зарядної потужності лінії під час проектування розраховується на 60-80 % відповідно до наявних потужностей шунтувальних реакторів, які виготовляються на заводах. Забезпечення необхідного ступеня компенсації зарядної потужності для конкретного вирішення експлуатаційної задачі є проблематичним внаслідок неможливості регулювання індуктивності шунтувального реактора. У такому випадку гостро постає питання регульованої компенсації зарядної потужності для унеможливлення виникнення негативних явищ, зокрема самозбудження генераторів.

У роботах розглядаються питання трактування явища самозбудження [1–3]; математичного опису перехідного [3] і стаціонарного режимів роботи асинхронного генератора. У [1–3] намагалися описати процес самозбудження в режимі холостого ходу та в разі переходу від ємнісного до індуктивно-резистивного навантаження. Водночас математичні вирази стають занадто складними для обчислення та подальшого аналізу. Треба зауважити, що через обмежену потужність на той час обчислювальної техніки провести дослідження та виявити фактори, що понад усе впливають на умови виникнення самозбудження генераторів не було можливості. Також в роботах [1–3] не було зроблено повного математичного опису параметричного резонансу синхронного генератора, а також його якісного аналізу з використанням найпростішого математичного апарату.

У наведених роботах не розглядаються питання розроблення методів та математичних моделей аналізу ненавантаженого режиму ЛЕП НВН з пристроями керованої компенсації

реактивної потужності. Такий підхід дасть змогу виявити першопричини явища генерування електроенергії в синхронних генераторах. Техніко-економічне порівняння керованих пристроїв компенсації реактивної потужності було проведено в [7]. Було обґрунтовано використання саме керованих шунтувальних реакторів порівняно зі СТАТКОМ через більш прийнятні показники.

**Мета статті** – оцінювання впливу зміни провідності керованого шунтувального реактора на виведення ЛЕП НВН із зон самозбудження генераторів у ненавантаженому режимі.

Розглянемо умови регулювання керованого реактора з відхиленням напруги на прикладі схеми рис. 1.

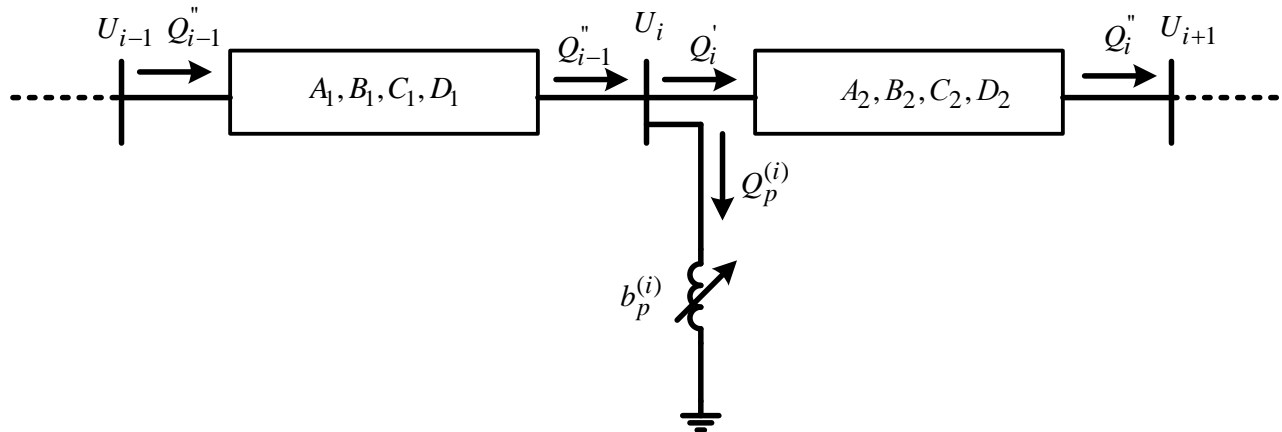


Рис. 1

Головною особливістю режимів ліній електропередачі з компенсованим реактивним опором є необхідність підтримання оптимального співвідношення між напругами на лініях електропередачі через високу чутливість реактивної потужності до цього співвідношення. Визначено взаємозв'язок між умовами регулювання КШР та режимними параметрами передачі електроенергії. Ідеалізоване рівняння управління КШР було прийнято у вигляді:

$$\Delta b_{CSR}^{(i)}(1 + pT_{csr}^{(i)}) = k_{0U}^{(i)} \Delta U_i \quad , \quad (1)$$

де  $b_{CSR}^{(i)}$  – провідність КШР  $i$ -ого вузла мережі;  $T_{csr}^{(i)}$  – стала часу КШР;  $k_{0U}^{(i)} \left[ \frac{C_M}{B} \right]$  – коефіцієнт керування провідності КШР у разі відхилення напруги,  $\Delta U_i = U_i - U_{i(0)}$ ,  $\Delta b_{CSR}^{(i)} = b_{CSR}^{(i)} - b_{CSR0}^{(i)}$ .

Реактивні потужності  $Q_{i-1}''$ ,  $Q_i''$  та  $Q_p^{(i)}$  за нехтування активних опорів лінії визначаються виразом:

$$Q_{i-1}'' = -U_i^2 \frac{A_1}{B_1} + \frac{U_i U_{(i-1)}}{B_1} \cos \delta_{(i-1)} \quad (2)$$

$$Q_i'' = U_i^2 \frac{D_2}{B_2} - \frac{U_i U_{(i+1)}}{B_2} \cos \delta_{(i+1)} \quad (3)$$

$$Q_p^{(i)} = Q_{(i-1)}'' - Q_i' = U_i \left( \frac{U_{(i-1)}}{B_1} \cos \delta_{(i-1)} + \frac{U_{(i+1)}}{B_2} \cos \delta_{(i+1)} \right) - U_i^2 \left( \frac{A_1}{B_1} + \frac{D_2}{B_2} \right) \quad (4)$$

На основі (4) знайдемо вираз для провідності  $b_{CSR}^{(i)}$  реактора, яка необхідна для забезпечення заданого рівня напруги  $U_i$  у вузлі  $i$ :

$$b_{CSR}^{(i)} = \frac{U_{(i-1)}}{U_i B_1} \cos \delta_{(i-1)} + \frac{U_{(i+1)}}{U_i B_2} \cos \delta_{(i+1)} - \frac{A_1}{B_1} - \frac{D_2}{B_2} \quad (5)$$

де  $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$  – параметри ділянок лінії з постійною напругою на кінцях, прилеглих до вузла для підключення реакторів.

Залежність провідності реактора від довжини ділянки лінії й потужності, що передається нею, наводиться на рис. 2. Оцінімо кількісно значення коефіцієнта  $k_{0U}^{(i)}$ , за якого забезпечуватиметься досить високий рівень підтримання напруги в разі зміни потужності, що передається від нуля до  $P_{нат}$  – Активна потужність, що передається лінією, визначається за виразами:

$$P = \frac{U_{(i-1)}U_i}{B_1} \sin \delta_{(i-1)i} \quad (6)$$

$$P = \frac{U_i U_{(i+1)}}{B_2} \sin \delta_{i(i+1)}$$

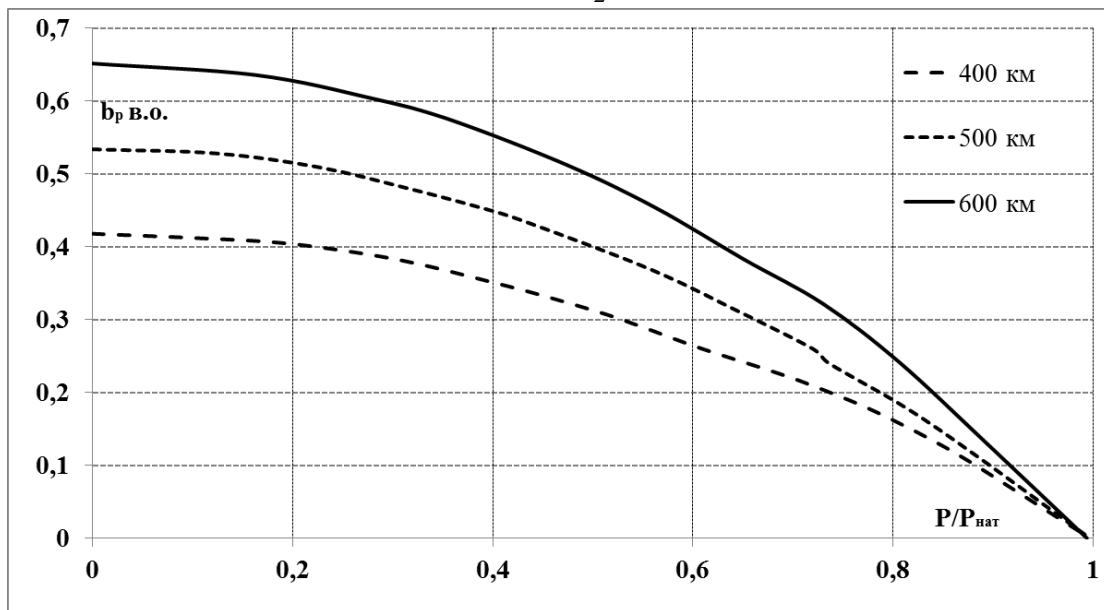


Рис. 2

Після лінеаризації виразів (1.21), (1.24) та (1.26) вилучення з них змінних  $\Delta\delta_{(i-1)i}$  та  $\Delta\delta_{i(i+1)}$ , а також з огляду на  $U_{(i+1)} = U_{(i-1)} = U_i = U$ ,  $\delta_{(i-1)i} = \delta_{i(i+1)} = \delta_y$ ,  $B_2 = B_1$ ,  $D_2 = D_1$ , отримаємо такий вираз:

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta P} = \frac{tg \delta_{y0}}{\frac{U_0}{B_1} (\cos \delta_{y0} + tg \delta_{y0} \sin \delta_{y0} - A_1 - D_1) - U_0 b_{po}^{(i)} - \frac{U_0^2 k_{0U}^{(i)}}{2}} \quad (7)$$

З аналізу виразу (7) випливає, що для відносно коротких ділянок лінії додатному (від'ємному) приросту  $\Delta P$  відповідає приріст  $\Delta U_i$ . Таким чином, для зменшення зміни напруги у вузлі за зміни активної потужності, що передається, коефіцієнт регулювання  $k_{0U}^{(i)}$  для прийнятого запису рівнянь (1) і (5) має бути додатним. Визначимо кількісну зміну напруги у вузлі підключення реактора за зміни потужності, що передається від нуля до  $P_{нат}$  (ця залежність нелінійна, але досить хороше наближення можна отримати за умови її лінеаризації в такому діапазоні в точці  $P_0 = 0.5P_{нат}$ ). Графіки залежності напруги за зміни потужності, що передається, від величини  $k_{0U}^{(i)}$  наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що для підтримання напруги у вузлі підключення КШР у межах  $5\%U_{ном}$  за зміни потужності від нуля до  $P_{нат}$  достатньо встановити значення  $k_{OU}^{(i)}$  не більшим 5 – 10 о.е. Якщо за базисний опір прийняти опір реактора у вихідному режимі  $z_{\delta} = x_{P0}$ , то значення  $k_{OU}^{(i)}$ , виражене в таких одиницях, істотно змінюватиметься залежно від режиму (рис. 3). Під час розрахунків передбачалося, що з  $z_{\delta} = z_{\theta} k_{OU}^{(i)} = 5$  о.е. в усіх режимах довжина ділянки дорівнює 400 км.

У випадку встановлення КШР можна керувати ступенем компенсації зарядної потужності у такий спосіб, щоб відлаштуватися від зони самозбудження генераторів. Це стає можливим завдяки тому, що КШР здатні працювати з нормованим перевантаженням до 130 % і короточасним перевантаженням до 200 % [5–7]. У такому випадку зарядну потужність можна компенсувати у такий спосіб, що синхронний генератор не буде працювати з ємнісним навантаженням.

З аналізу виразу (7) видно, що коефіцієнт регулювання КШР, необхідний для підтримки напруг у  $i$ -му вузлі із заданою точністю, визначається лише параметрами ділянки, що прилягає до вузла підключення реактора і не залежить від довжини лінії. Аналітичні вирази для коефіцієнтів характеристичного полінома, отримані після розширення за потужністю оператора "р" визначника системи рівнянь малих збурень (з ігноруванням перехідних процесів у ланцюгах статора) за відсутності регулювання збудження та нехтування демпферними ланцюгами генераторів мають вигляд [8]:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{T_j T_{d0}}{\omega_0} B_q B_d' & a_1 &= \frac{T_j}{\omega_0} B_q B_d & a_3 &= B_q B_d S_E \\ a_2 &= T_{d0} \left[ B_q B_d' S_E + (x_d - x_d') \left( 2 - \frac{B_d}{B_q} \right) U_2^2 \sin^2 \delta_0 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

де  $T_j, T_{d0}$  – стала часу обмотки збудження та інерційна постійна агрегату.

$S_E = \frac{B_q U_2}{B_d} \cos \delta_0 + \frac{U_2^2}{D} \left( \frac{1}{B_q} - \frac{1}{B_d} \right) \cos 2\delta_0$  – синхронізуюча потужність електропередач,

$B_d = B + D(x_d + x_{T1})$ ,  $B_q = B + D(x_q + x_{T1})$  – сумарні опори електропередачі в поздовжній і поперечній осі;  $B_d' = B + D(x_d' + x_{T1})$  – сумарний перехідний опір електропередавання,  $B, D$  – еквівалентні узагальнені параметри лінії,  $x_q, x_d, x_d'$  – синхронні опори генератора в поздовжній та поперечної осі,  $x_{T1}$  – індуктивний опір трансформатора,  $\delta_0$  – кут лінії електропередавання,  $\omega_0$  – кутова швидкість.

У діапазоні довжин  $l = 150..350$  км можна виділити три найбільш характерні зони, на межі яких відбувається зміна знака  $B_d$ ,  $B_q$ , або  $B_d'$  [8]:

$$\begin{aligned} \text{I зона} &- B_d > 0, B_q > 0, B_d' > 0 & (-z > (x_d + x_{T1})) \\ \text{II зона} &- B_d < 0, B_q > 0, B_d' > 0 & ((x_d + x_{T1}) \geq -z \geq (x_d + x_{T1})) \\ \text{III зона} &- B_d < 0, B_q < 0, B_d' > 0 & ((x_q + x_{T1}) \geq -z \geq (x_d' + x_{T1})), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $z = \frac{B}{D}$  – вхідний опір короткозамкненої на кінці лінії.

На рис. 3 наведені зона 1 синхронного самозбудження та зони 2, 3 асинхронного самозбудження [8].

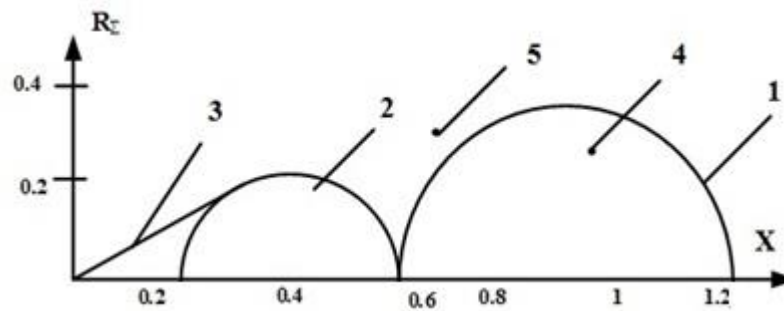


Рис. 3

Щоб виключити ці досить великі зони, необхідно зменшити вплив поперечного демпферного контуру, тобто стала часу цього контуру має бути або дуже малою або досить великою. Повністю виключити поперечний демпферний контур неможливо за умовами саморозкачування генератора в режимах малих навантажень. Збільшення активного опору лінії для придушення самозбудження неефективно, так як це призводить до зниження к.к.д. електропередачі. Тому для максимального збільшення зони стійкої роботи необхідні такі заходи: підбір параметрів демпферних контурів, що забезпечують максимальне зменшення зони асинхронного самозбудження; збільшення перехідного опору генератора; збільшення реактивних опорів кінцевих трансформаторів. Задля аналізу ефективності застосування керованих шунтувальних реакторів було оцінено вплив зміни індуктивності КШР на сумарний індуктивний опір (5).

Значення параметрів некерованих шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110/750-У1 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

$U_{ном}$ , кВ	$X_p$ , Ом	$R_p$ , Ом	$S_{ном}$ , МВАр
750	1880	6	110

Значення параметрів некерованих шунтувальних реакторів типу УШРТ наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Тип КШР	$S_{ном}$ , МВАр	$U_{ном}$ , кВ	Уставка по напрузі, кВ	Уставка по потужності, МВАр	Уставка по опорі, Ом
УШРТ	330 МВАр	750	645÷750	9÷429	8

Значення параметрів синхронних генераторів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

$U_{ном}$ , кВ	$X_d$ , в.о.	$X_q$ , в.о.	$X'_d$ , в.о.	$T_j$	$T_0$
18.75	1,5	0.98	0.32	10	7

Для аналізу самозбудження генераторів було проведено розрахунки для лінії електропередавання надвисокої напруги з такими значеннями параметрів:  $l=300$ , км – довжина лінії,  $U=750$ , кВ – номінальна напруга лінії, конструкція фази проводу 4хАС-400/93, що характеризується такими параметрами:  $r_0=0.019$  Ом/км;  $x_0=0.289$  Ом/км;  $g_0=0.0325$  мкСм/км;  $b_0=4.13$  мкСм/км.

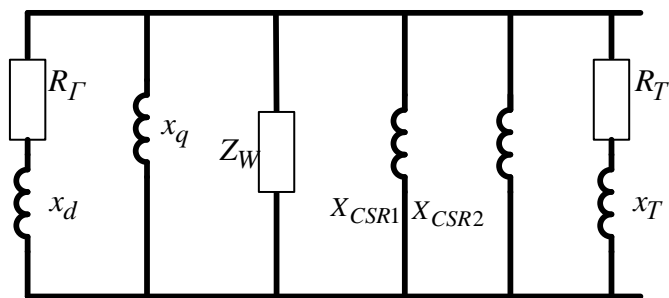


Рис. 4

Для того, щоб запобігти самозбудження генераторів, точки з координатами  $X_{\Sigma}$  та  $R_{\Sigma}$  мають опинитись поза межами ділянок самозбудження. Координати  $X_{\Sigma}$  та  $R_{\Sigma}$  визначаються за такими формулами:

$$X_{\Sigma} = \frac{Z_W(X_1 + X_{CSR})(X_{CSR1} + X_{CSR2})\cos \lambda + (Z_W^2(X_1 + X_{CSR1}) - X_{CSR1}X_1X_{CSR2})\sin \lambda}{(X_{CSR1}X_{CSR2} - Z_W^2)\sin \lambda - Z_W(X_{CSR} + X_{CSR2})\cos \lambda}, \quad (10)$$

де  $X_1$  – еквівалентний опір генератора,  $Z_W$  – хвильовий опір лінії,  $X_{CSR}$  – еквівалентний опір двох груп КШР.  $X_{CSR1}, X_{CSR2}$  – опір першої та другої групи КШР відповідно,  $\lambda$  – хвильова довжина лінії.

Значення  $R_{\Sigma}$  для схеми рис. 4 знаходять за формулою:

$$R_{\Sigma} = R + R_T + R_G \quad (11)$$

Результати розрахунку виведення ЛЕП із зон самозбудження наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Пристрій компенсації реактивної потужності	$R_{\Sigma}$	$X_{\Sigma}$	Точка на рис. 3
КШР	0,31	0,62	4
ШР	0,26	0,94	5

Результати розрахунків у разі встановлення некерованих шунтувальних реакторів в електричній мережі наведено на рис. 2 точкою під номером 4, яка потрапляє в зону синхронного самозбудження.

У статті аналізується самозбудження синхронного генератора під час відновлення енергосистеми, спричиненого ємнісним навантаженням. Використання КШР на лініях (замість ШР) дає змогу усунути причину самозбудження синхронного генератора без застосування спеціальних додаткових заходів. У роботі обґрунтовано застосування КШР у разі виведення синхронного генератора з режиму самозбудження за допомогою одночасного застосування підходу визначення зон і точки з координатами  $X_{\Sigma}$  та  $R_{\Sigma}$ .

*Фінансується за держбюджетною темою "Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії" ("Нова енергетика"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 13.02.2019 № 34. Державний реєстраційний номер роботи 0119U006587.*

1. Электротехнический справочник. Том 3 под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. Производство, передача и распределение электрической энергии. Москва: МЭИ, 2004, 964 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург, Питер, 2008, 350 с.

3. Гуревич Б.Е., Либова Л.Е. Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
4. Кучанський В., Малахатка Д. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж: монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 120 с . DOI: <https://doi.org/10.36074/ztzperrmrm-monograph.2021>
5. Дорожко Л.И., Либкинд М.С. Реакторы с поперечным подмагничиванием. М.: Энергия, 1977. 177 с.
6. Кадомская К. П. Высоковольтные ВЛ. Эффективность и управляемость шунтирующих реакторов. Новости электротехники. 2008. 3(51). С. 70–71.
7. Александров Г.Н. К методике расчета управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа. Электричество, 1998. № 4.
8. Рагозин А.А., Таланов С.Б. Улучшение свойств дальних линий электропередачи без средств промежуточной компенсации. Электричество, 1998. № 10.

## TECHNICAL MEANS FOR SUPPRESSION OF RESONANCE PHENOMENA IN ELECTRICAL NETWORKS

**V.V. Kuchanskyi, O.V. Savytskyi**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [kuchanskiyvladislav@gmail.com](mailto:kuchanskiyvladislav@gmail.com)

*The self-excitation phenomenon of generators connected to an unloaded power line is considered. Accordingly, the selected values of the conductivity of the controlled shunt reactors, following the control range (especially in the overload mode), avoid the occurrence of self-excitation of the generators. The physical analysis of the processes occurring at self-excitation of the synchronous generator is given, and the calculated models are developed. It is established that in the case of artificial support along the entire length of the voltage line at the nominal value using controlled compensating devices, the transmission will have properties characteristic of relatively short lines (up to 500 km) regardless of its geometric length. It is determined that the length of the line section at the ends of which the DC voltage is maintained is much less than 500 km. Therefore, less than the natural voltage along the section length will exceed the nominal value at the transmitted power, and the line will have excess reactive power. Consumption in intermediate compensation devices (compensation current must be inductive). Ref.8, fig. 4, tables 4.*

**Keywords:** flexible alternating current transmission systems, STATCOM, controlled shunt reactor, self-exciting synchronous generator

1. Electrotechnical reference book. Volume 3 total. ed. professors MPEI V.G. Gerasimov and others. Production, transmission and distribution of electrical energy. Moskva: MPEI, 2004, 964 p. (Rus)
2. Voldek A.I., Popov V.V. Electric cars. AC machines. St. Petersburg, Piter, 2008, 350 p. (Rus)
3. Gurevich B.E., Libova L.E. Okin A.A. Stability calculations and emergency automation. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 390 p. (Rus)
4. Kuchansky V., Malahatka D. Measures and technical means to increase the efficiency of the main electrical networks. Vynnytsia: HO Ievropeiska naukova platforma, 2021, 120 p. DOI: <https://doi.org/10.36074/ztzperrmrm-monograph.2021> (Ukr)
5. Dorozhko L.I., Libkind M.S. Transverse bias reactors. M : Energiya, 1977. 177 p. (Rus)
6. Kadomskaya K.P. High-voltage overhead lines. Efficiency and controllability of shunt reactors News of electrical engineering. 2008. 3 (51). Pp. 70–71 (Rus)
7. Alexandrov G.N. On the method of calculating controlled transformer-type reactors. Elektrichestvo, 1998. No 4. (Rus)
8. A.A. Ragozin, S.B. Talanov. Improving the properties of long-distance power lines without intermediate compensation. Elektrichestvo, 1998. No 10. (Rus)

Надійшла: 22.06.2021

Received: 22.06.2021