

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-17>

УДК 621.316

**БУРБЕЛО МИХАЙЛО**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4510-2911>

e-mail: [burbelom@ukr.net](mailto:burbelom@ukr.net)

**БАБЕНКО ОЛЕКСІЙ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2773-6571>

e-mail: [oleksij\\_babenko@ukr.net](mailto:oleksij_babenko@ukr.net)

**БУРБЕЛО СЕРГІЙ**

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-8554-2292>

e-mail: [smburbelo@gmail.com](mailto:smburbelo@gmail.com)

## ПОРІВНЯННЯ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ УНІФІКОВАНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ У ВУЗЛІ НАВАНТАЖЕННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

У статті виконано порівняння трьох стратегій керування уніфікованим регулятором якості електроенергії (УРЯЕ) з лівим приєднанням його шунтового (паралельного) компенсатора для зменшення коливань напруги, що зумовлені нестабільністю напруги живлення. Першою стратегією є забезпечення напруги регулятором, яка є квадратурною по відношенню до струму навантаження (УРЯЕ Q-типу). Другою стратегією (застосування УРЯЕ P-типу) є генерування уніфікованим регулятором напруги, яка є синфазною по відношенню до струму навантаження. Третя стратегія керування використовується в регуляторах S-типу, які забезпечують генерування напруги з фазою відносно струму навантаження в діапазоні між 0 та  $\pi/2$ . Отримано закони керування у вигляді залежностей ЕРС послідовного та паралельного компенсаторів УРЯЕ Q-, P-, S-типів від напруги живлення, які забезпечують стабільне значення напруги у вузлі навантаження. Проаналізовано процес стабілізації напруги в вузлі приєднання навантаження за умови зміни напруги джерела живлення в межах 10,5...10,0 кВ і відповідного закону керування УРЯЕ, що передбачає використання таких інформативних параметрів, як поточне та базове значення ЕРС джерела живлення, параметри мережі. Моделювання проведено для уніфікованих регуляторів Q-, P- та S-типу за двох умов: з максимальною компенсацією реактивної потужності паралельним компенсатором, а також з мінімальною компенсацією реактивної потужності паралельним та послідовним компенсаторами. Показано, що перевагою УРЯЕ Q-типу порівняно з УРЯЕ S-типу та P-типу є можливість істотного підвищення напруги на навантаженні. В УРЯЕ P-типу та S-типу таке підвищення складно реалізувати внаслідок неідентичності залежностей споживання та генерування активної потужності паралельного і послідовного компенсаторів. Показано, що за зміни напруги в межах 10,5...10,0 кВ меншою є активна потужність УРЯЕ S-типу, а за зміни напруги в межах 10,5...10,3 кВ меншою є активна потужність УРЯЕ P-типу.

**Ключові слова:** уніфікований регулятор якості електроенергії (УРЯЕ), стабілізація напруги.

**BURBELO MYKHAILO, BABENKO OLEKSIJ**

Vinnitsia National Technical University

**BURBELO SERHIJ**

Zhytomyr Military Institute named after S. P. Korolyov

## COMPARISON OF CONTROL STRATEGIES FOR UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONERS FOR VOLTAGE STABILIZATION AT THE DISTRIBUTION NETWORK LOAD BUS

The paper presents a comparison of three control strategies for a Unified Power Quality Conditioner (UPQC) with a left-shunt configuration (parallel compensator connected on the source side) aimed at mitigating voltage fluctuations caused by supply voltage instability. The first strategy (Q-type UPQC) ensures that the regulator injects a voltage in quadrature with the load current. The second strategy (P-type UPQC) involves generating a voltage that is in phase with the load current. The third control strategy is employed in S-type conditioners, which generate a voltage with a phase angle relative to the load current ranging between 0 and  $\pi/2$ . Control laws were derived as dependencies of the series and shunt compensator EMFs on the supply voltage for Q-, P-, and S-type UPQCs to maintain a stable voltage at the load node. The voltage stabilization process at the load connection point was analyzed under supply voltage variations within the range of 10.5–10.0 kV, utilizing a corresponding UPQC control law based on informative parameters such as the current and base source EMF values and network parameters. Simulations were conducted for Q-, P-, and S-type UPQCs under two conditions: maximum reactive power compensation by the shunt compensator, and minimum reactive power compensation by both the shunt and series compensators. It is shown that the advantage of the Q-type UPQC compared to the S-type and P-type is the capability for a significant load voltage boost. In P-type and S-type UPQCs, such an increase is difficult to implement due to the non-identity of the active power consumption and generation dependencies of the shunt and series compensators. It is demonstrated that for voltage variations within 10.5–10.0 kV, the S-type UPQC exhibits lower active power, whereas for variations within 10.5–10.3 kV, the P-type UPQC has lower active power.

**Keywords:** unified power quality conditioner (UPQC), voltage stabilization.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 21.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бурбело Михайло, Бабенко Олексій, Бурбело Сергій

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В сучасних системах розподілу змінного струму стикаються з серйозними проблемами: коливаннями напруги, її небалансом та несинусоїдністю. Для критичних споживачів – таких як 1) лікарняне обладнання:

системи життєзабезпечення у реанімаціях та операційних; діагностичне обладнання (МРТ, КТ, рентген-апарати); лабораторні аналізатори, 2) фінансовий сектор: серверні системи та центри обробки даних; торгові термінали та платіжні системи; системи безперервного зберігання критичних даних, 3) високотехнологічне виробництво: виробництво напівпровідників; фармацевтична промисловість; прецизійна механічна обробка з використанням верстатів з числовим програмним керуванням; текстильна промисловість (безперервні технологічні цикли); харчова промисловість (пастеризація, стерилізація) – стабільність напруги живлення є надзвичайно важливим фактором. Навіть короткочасні провали, коливання або гармонічні спотворення можуть призвести до спрацювання систем захисту, зупинки технологічних процесів та значних економічних втрат.

Універсальним рішенням для забезпечення безперебійної роботи таких навантажень є уніфікований компенсатор якості електроенергії (УРЯЕ) [1-5]. Це складний пристрій, що базується на двох інверторах із ШІМ-керуванням, об'єднаних спільною шиною постійного струму. Шунтовий інвертор відповідає за корекцію струму (балансування, компенсація реактивної потужності), тоді як послідовний інвертор виступає безпосереднім інструментом стабілізації напруги, вводячи компенсуючу напругу між джерелом та споживачем для відновлення її опорного значення.

Ефективність стабілізації напруги за допомогою УРЯЕ безпосередньо залежить від вибору його топології. Зокрема, конфігурація з лівим шунтуванням (де послідовний компенсатор стоїть після шунтового) вважається ідеальним варіантом для захисту чутливого обладнання. Вона дозволяє одночасно нейтралізувати напругу зворотної послідовності та гармоніки, забезпечуючи «чисту» енергію на клеммах споживача. Незважаючи на вищу вартість та складність керування, така топологія дозволяє знизити номінальні параметри перетворювачів, що робить систему надійнішою в довгостроковій перспективі.

Використання стратегії УРЯЕ-Q (введення напруги в квадратурі до струму) є енергоефективним, оскільки потребує лише реактивної потужності.

Для комплексного захисту від усього спектру збурень (включаючи перенапруги та глибокі перепади) доцільно застосовувати стратегію УРЯЕ-P, де напруга вводиться у фазі зі струмом живлення, що забезпечує стабільність навіть за складних мережевих умов.

#### Аналіз досліджень та публікацій

В [6-10] розглянуто питання мінімізації номінальної потужності УРЯЕ. Переважно використовують УРЯЕ з правим приєднанням паралельного компенсатора для стабілізації напруги. Такий УРЯЕ краще компенсує спотворення, які виникають у навантаженні. Найвищий рівень оптимізації досягається за допомогою стратегії УРЯЕ-S, яка через керування оптимальним фазовим кутом дозволяє мінімізувати потужність обох інверторів, забезпечуючи ідеальний баланс між активною та реактивною компенсацією.

Водночас за наявності спотворень в мережі дещо кращим є УРЯЕ з лівим приєднанням паралельного компенсатора. Дослідження таких УРЯЕ практично не проводились.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи** є розробка математичних моделей прямого керування УРЯЕ з лівим приєднанням паралельного компенсатора для стабілізації напруги і порівняння ефективності різних стратегій керування.

#### Виклад основного матеріалу

Для аналізу роботи УРЯЕ в режимі стабілізації напруги на рис. 1 зображено схему заміщення вузла мережі з лівим приєднанням паралельного компенсатора УРЯЕ.

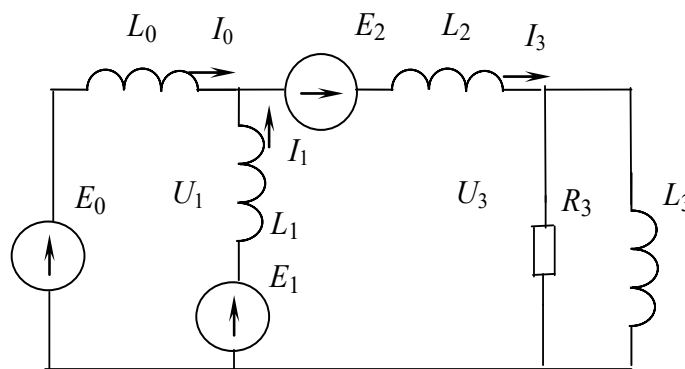


Рис. 1. Схема заміщення вузла мережі з УРЯЕ

Напруги  $U_1$  та  $U_3$  розраховують за формулою:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 + Y_1 + Y_2 & -Y_2 \\ -Y_2 & Y_2 + Y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_0 E_0 + Y_1 E_1 - Y_2 E_2 \\ Y_2 E_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Умова відсутності генерування реактивної потужності паралельного компенсатора, наприклад, за  $E'_0 = 10,5$  кВ, формується у такому вигляді:

$$E'_1 = U'_1 = \frac{Y_0 \cdot (E'_0 + E'_2)}{Y_0 + Y_{23}} - E'_2, \quad (2)$$

де  $E'_2$  – значення ЕРС послідовного компенсатора, яке задається в процесі регулювання.

Умова відсутності споживання та генерування активної потужності послідовного компенсатора для

УРЯЕ Q-типу формується у такому вигляді [11]:

$$E_2 = E'_2 \left(1 + j \frac{X_3}{R_3}\right), \tag{3}$$

де  $E'_2$  – початкове значення ЕРС послідовного компенсатора, яке задається в процесі регулювання.

Для налаштування автоматичного режиму роботи УРЯЕ Q-типу (за відсутності споживання та генерування активної потужності послідовного компенсатора) можна використати такі залежності [11]:

$$\begin{aligned} E_1 &= E'_1 + k_1 \cdot (E'_0 - E_0) \left(\frac{X_1}{X_0} + jq\right); \\ E_2 &= (E'_2 + k_2 \cdot (E'_0 - E_0)) \cdot \left(1 + j \frac{X_3}{R_3}\right), \end{aligned} \tag{4}$$

де  $k_1, k_2$  – значення коефіцієнтів паралельного та послідовного компенсаторів, які задаються в процесі регулювання, відповідно, з метою компенсації заданого значення реактивної потужності та стабілізації напруги;  $q$  – значення коефіцієнта, які задаються в процесі регулювання з метою отримання заданого значення активної потужності паралельного компенсатора.

Для реалізації компенсатора P-типу в другому виразі (4) замість  $j \frac{X_3}{R_3}$  вибирається  $-j \frac{R_3}{X_3}$ , а для реалізації компенсатора S-типу замість  $j \frac{X_3}{R_3}$  вибирається проміжне значення між  $j \frac{X_3}{R_3}$  та  $-j \frac{R_3}{X_3}$ , наприклад, нуль.

Для покращення ефективності роботи УРЯЕ умову відсутності генерування реактивної потужності паралельного компенсатора (2), слід сформулювати таким чином:

$$E'_1 = U'_1 = \frac{Y_0 \cdot (E'_0 + E_2)}{Y_0 + Y_{23}} - E_2. \tag{5}$$

Вираз (5) відрізняється від (2) тим, що використовується не задане значення  $E'_2$ , а поточне значення  $E_2$ . У такому разі за формулами (4) спочатку визначається  $E_2$ , а потім  $E_1$ , для визначення якого використовується  $E'_1$  з (5).

Перевагою УРЯЕ Q-типу порівняно з УРЯЕ S-типу та P-типу є можливість підвищення напруги на значення  $E'_2$ . В УРЯЕ P-типу та S-типу таке підвищення складно реалізувати внаслідок неідентичності залежностей споживання та генерування активної потужності, відповідно, паралельного і послідовного компенсаторів. Водночас в УРЯЕ Q-типу відсутня можливість зниження напруги на значення  $E'_2$ .

Для налаштування автоматичного режиму роботи УРЯЕ P-типу та S-типу в режимі підвищення та зниження напруги можна використати такі залежності:

$$\begin{aligned} E_1 &= E'_1 + k_1 \cdot (E'_0 - E_0) \left(\frac{X_1}{X_0} + jq\right) + k_3 \cdot jq; \\ E_2 &= (E'_2 + k_2 \cdot (E'_0 - E_0)) \cdot \left(1 - j \frac{R_3}{X_3}\right), \end{aligned} \tag{6}$$

де  $k_3$  – значення коефіцієнта паралельного компенсатора, які задаються в процесі регулювання з метою отримання ідентичних характеристик активної потужності паралельного та послідовного компенсаторів.

Для визначення параметрів стабілізації напруги за умов змін ЕРС джерела живлення проведено моделювання роботи STATCOM за таких умов: навантаження потужністю  $P_2=6$  МВт,  $Q_2=4$  МВАр живиться від силового трансформатора напругою 110/10 кВ, потужністю 10 МВ·А,  $u_k=10,5\%$ . Потужність трансформатора STATCOM 2,5 МВ·А,  $u_k=5,5\%$ . Значення параметрів вузла мережі з УРЯЕ:  $X_0=1,158$  Ом;  $X_1=2,646$ ;  $X_2=0,015$  Ом;  $R_3=18,375$  Ом;  $X_3=27,563$  Ом.

Розглянемо три варіанти реалізації системи керування УРЯЕ: Q-, P- та S-типу з максимальною компенсацією реактивної потужності паралельним компенсатором (а) і з мінімальною компенсацією реактивної потужності обома компенсаторами (б).

1а. Для УРЯЕ Q-типу, задавши значення  $k_1 = 0,3$ ;  $q = -0,28$ ;  $E'_2 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,462$ , дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 1):

Таблиця 1

Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ Q-типу, умова (а)

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,049-j0,631	10,401-j0,701
$E_2$ , кВ	0,250+j0,375	0,481+j0,721
$ U_3 $ , кВ	10,247	10,246
$S_0$ , МВ·А	5,723+j4,094	5,717+j1,541
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,002+j2,161
$S_2$ , МВ·А	-0,010+j0,302	-0,001+j0,581
$S_3$ , МВ·А	5,713+j3,809	5,714+j3,809

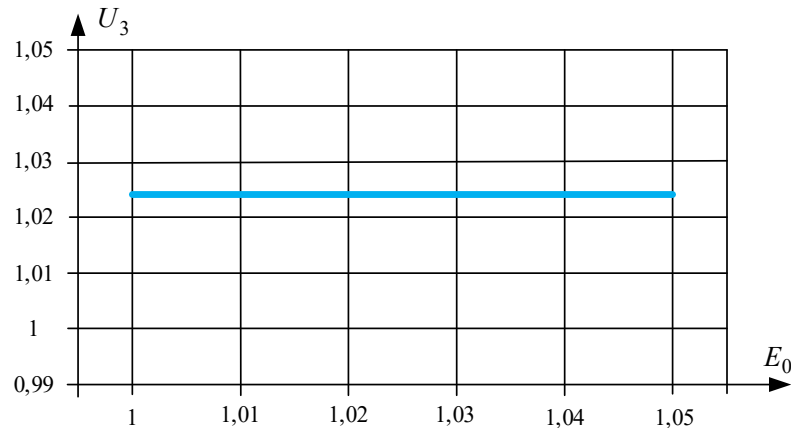
1б. Задавши  $k_1 = -0,3$ ;  $q = -0,11$ ;  $E'_2 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,835$  для УРЯЕ Q-типу, дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 2).

Таким чином, реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ Q-типу зменшилась з 2,161 до 0,349 МВАр, однак реактивна потужність послідовного компенсатора збільшилась з 0,581 до 0,806 МВАр за тієї самої напруги на шинах ПС (рис. 2).

Таблиця 2

Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ  $Q$ -типу, умова (б)

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,049-j0,631	9,723-j0,666
$E_2$ , кВ	0,250+j0,375	0,667+j1,001
$ U_3 $ , кВ	10,245	10,246
$S_0$ , МВ·А	5,723+j4,094	5,693+j3,215
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,001+j0,349
$S_2$ , МВ·А	-0,010+j0,302	-0,020+j0,806
$S_3$ , МВ·А	5,713+j3,809	5,712+j3,808

Рис. 2. Залежність напруги на навантаженні від напруги джерела живлення у вузлі навантаження з УРЯЕ  $Q$ -типу

2а. Для УРЯЕ  $P$ -типу, задавши значення  $k_1 = 0,3$ ;  $q = -0,74$ ;  $E'_2 = 0$ ;  $k_2 = 0,49$ , дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 3).

Таблиця 3

Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ  $P$ -типу, умова (а)

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,038-j0,600	10,361-j0,718
$E_2$ , кВ	0,0+j0,0	0,245-j0,163
$ U_3 $ , кВ	10,001	10,002
$S_0$ , МВ·А	5,444+j4,189	5,440+j1,895
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,188+j2,166
$S_2$ , МВ·А	0,0+j0,0	0,192+j0,017
$S_3$ , МВ·А	5,444+j3,629	5,445+j3,630

2б. Задавши значення  $k_1 = -0,3$ ;  $q = 0,8$ ;  $E'_2 = 0$ ;  $k_2 = 0,9$  для УРЯЕ  $P$ -типу дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 4).

Таблиця 4

Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ  $P$ -типу, умова (б)

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,038-j0,600	9,658-j0,733
$E_2$ , кВ	0,0+j0,0	0,450-j0,300
$ U_3 $ , кВ	10,000	10,001
$S_0$ , МВ·А	5,444+j4,189	5,439+j3,790
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,349+j0,379
$S_2$ , МВ·А	0,0+j0,0	0,352+j0,036
$S_3$ , МВ·А	5,444+j3,629	5,442+j3,628

Реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ  $P$ -типу зменшилась з 2,166 до 0,379 МВАр, однак активна потужність обох компенсаторів збільшилась з 0,188 до 0,350 МВт за тієї самої напруги на шинах ПС.

3а. Для УРЯЕ  $S$ -типу, задавши значення  $k_1 = 0,3$ ;  $q = -0,58$ ;  $E'_2 = 0$ ;  $k_2 = 0,49$ , дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 5).

Таблиця 5

**Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ S-типу, умова (а)**

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,038-j0,600	10,370-j0,701
$E_2$ , кВ	0,0+j0,0	0,245-j0,000
$ U_3 $ , кВ	10,000	10,001
$S_0$ , МВ·А	5,444+j4,189	5,441+j1,812
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,126+j2,163
$S_2$ , МВ·А	0,0+j0,0	0,127+j0,098
$S_3$ , МВ·А	5,444+j3,629	5,442+j3,628

36. Задавши значення  $k_1 = -0,3$ ;  $q = 0,5$ ;  $E'_2 = 0$ ;  $k_2 = 0,915$ , дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 6).

Таблиця 6

**Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ S-типу, умова (б)**

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,038-j0,600	9,675-j0,701
$E_2$ , кВ	0,0+j0,0	0,458-j0,000
$ U_3 $ , кВ	10,001	10,001
$S_0$ , МВ·А	5,444+j4,189	5,442+j3,640
$S_1$ , МВ·А	0,0+j0,0	-0,235+j0,367
$S_2$ , МВ·А	0,0+j0,0	0,237+j0,183
$S_3$ , МВ·А	5,444+j3,629	5,444+j3,629

Реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ S-типу зменшилась з 2,163 до 0,367 МВАр, однак активна потужність обох компенсаторів збільшилась з 0,127 до 0,237 МВт за тієї самої напруги на шинах ПС. Перевагою УРЯЕ S-типу порівняно з УРЯЕ P-типу є менше значення активної потужності за тієї самої напруги на шинах ПС.

Необхідно відмітити, що у разі коливань напруги 2% (від 10,5 до 10,3 кВ), потужності паралельного і послідовного компенсаторів УРЯЕ P-типу:  $S_1 = -0,073 + j0,078$  МВ·А;  $S_2 = 0,071 + j0,005$  МВ·А, а S-типу:  $S_1 = -0,097 + j0,150$  МВ·А;  $S_2 = 0,095 + j0,073$  МВ·А, що свідчить про меншу потужність УРЯЕ P-типу за малих коливань напруги.

4а. Розглянемо можливість підвищення напруги УРЯЕ P-типу. Задавши значення  $k_1 = 0,3$ ;  $q = -0,82$ ;  $E'_2 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,467$ ,  $k_3 = 0,084$  дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 7).

Таблиця 7

**Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ P-типу за підвищення напруги, умова (а)**

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,027-j0,683	10,337-j0,806
$E_2$ , кВ	0,25-j0,167	0,484-j0,322
$ U_3 $ , кВ	10,244	10,243
$S_0$ , МВ·А	5,712+j4,358	5,709+j2,000
$S_1$ , МВ·А	-0,201+j0,042	-0,387+j2,257
$S_2$ , МВ·А	0,201+j0,017	0,387+j0,040
$S_3$ , МВ·А	5,710+j3,808	5,710+j3,807

4б. Задавши значення  $k_1 = -0,3$ ;  $q = 0,84$ ;  $E'_2 = 0,25$ ;  $k_2 = 0,9$ ;  $k_3 = -0,09$  для УРЯЕ P-типу дістанемо такі значення ЕРС, напруг і потужностей (табл. 8).

Таблиця 8

**Результати моделювання роботи системи керування УРЯЕ P-типу за підвищення напруги, умова (б)**

Параметр	Напруга джерела живлення	
	$E_0=10,5$ кВ	$E_0=10,0$ кВ
$E_1$ , кВ	10,018-j0,683	9,638-j0,821
$E_2$ , кВ	0,25-j0,167	0,695-j0,463
$ U_3 $ , кВ	10,241	10,241
$S_0$ , МВ·А	5,709+j4,383	5,706+j3,972
$S_1$ , МВ·А	-0,202+j0,016	-0,554+j0,394
$S_2$ , МВ·А	0,201+j0,017	0,556+j0,066
$S_3$ , МВ·А	5,708+j3,805	5,707+j3,805

З порівняння дослідів 2б та 4б, можна зробити висновок, що підвищення напруги на 0,24 кВ УРЯЕ Р-типу досягнуто збільшенням активної потужності обох компенсаторів з 0,350 до 0,555 МВт.

#### Висновки з даного дослідження

##### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проаналізовано роботу УРЯЕ в режимі стабілізації напруги вузла електричної мережі. Запропоновано закон керування, який передбачає визначення ЕРС компенсатора на основі інформації про базову напругу в вузлі живлення. Проведене моделювання роботи УРЯЕ з використанням запропонованої математичної моделі за умови змін напруги джерела живлення від 10,5 кВ до 10,0 кВ. Показано, що за стабілізованої напруги 10,25 кВ і потужності навантаження  $5,7+j3,8$  МВ·А, реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ Q-типу знаходиться в межах від 2,161 до 0,349 МВАр, а реактивна потужність послідовного компенсатора – в межах від 0,581 до 0,806 МВАр. Показано, що за стабілізованої напруги 10,0 кВ і потужності навантаження  $5,44+j3,63$  МВ·А, реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ Р-типу знаходиться в межах від 2,166 до 0,379 МВАр, активна потужність обох його компенсаторів – від 0,188 до 0,352 МВт; а реактивна потужність паралельного компенсатора УРЯЕ S-типу знаходиться в межах від 2,163 до 0,367 МВАр, активна потужність обох компенсаторів – від 0,127 до 0,237 МВт за тієї самої напруги на шинах ПС. У разі зміни напруги джерела живлення в межах від 10,5 до 10,3 кВ активні потужності паралельного і послідовного компенсаторів УРЯЕ Р-типу, відповідно дорівнюють: -0,073, 0,071 МВт, а S-типу, відповідно дорівнюють: -0,097, 0,095 МВт, що свідчить про меншу потужність УРЯЕ Р-типу за малих коливань напруги.

В подальшому потрібно дослідити ефективність компенсації гармонічних спотворень в розглянутих режимах стабілізації напруги.

#### Література

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press ; Willy-Interscience, 2007. 379 p.
2. Bollen M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York : IEEE Press, 2000. 543 p.
3. Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. 460 p.
4. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. Chichester : John Wiley & Sons, 2015. 600 p.
5. Fujita H., Akagi H. The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1998. Vol. 13, no. 2. P. 315–322. doi: 10.1109/63.662847.
6. Steady state power flow analysis of unified power quality conditioner (UPQC) / V. Khadkikar et al. // *Proc. 2005 International Conference on Industrial Electronics and Control Applications*, Quito, Ecuador, 2005. 6 p. doi: 10.1109/ICIECA.2005.1644367.
7. Ye J. Optimal design and control implementation of unified power quality conditioner : Doctoral thesis. Nanyang Technological University, Singapore, 2018. 114 p.
8. Sztajmec E., Szcześniak P. A Review on AC Voltage Variation Compensators in Low Voltage Distribution Network. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 17. Art. 6293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176293>
9. Gade S., Agrawal R., Munje R. Recent Trends in Power Quality Improvement: Review of the Unified Power Quality Conditioner. *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications*. 2021. Vol. 19, No. 3. P. 268–288. DOI: 10.37936/ecti-eec.2021193.244936.
10. Remya V. K., Parthiban P., Ansal V., Babu B. C. Dynamic Voltage Restorer (DVR) – A Review. *Journal of Green Engineering*. 2018. Vol. 8, Iss. 4. P. 519–572. doi: 10.13052/jge1904-4720.844
11. Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю. Аналіз процесу керування уніфікованим регулятором якості електроенергії за швидких змін напруги. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. № 1. С. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-79-85>

#### References

1. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press ; Willy-Interscience, 2007. 379 p.
2. Bollen M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York : IEEE Press, 2000. 543 p.
3. Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. 460 p.
4. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. Chichester : John Wiley & Sons, 2015. 600 p.
5. Fujita H., Akagi H. The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1998. Vol. 13, no. 2. P. 315–322. doi: 10.1109/63.662847.
6. Steady state power flow analysis of unified power quality conditioner (UPQC) / V. Khadkikar et al. // *Proc. 2005 International Conference on Industrial Electronics and Control Applications*, Quito, Ecuador, 2005. 6 p. doi: 10.1109/ICIECA.2005.1644367.
7. Ye J. Optimal design and control implementation of unified power quality conditioner : Doctoral thesis. Nanyang Technological University, Singapore, 2018. 114 p.
8. Sztajmec E., Szcześniak P. A Review on AC Voltage Variation Compensators in Low Voltage Distribution Network. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 17. Art. 6293. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176293>
9. Gade S., Agrawal R., Munje R. Recent Trends in Power Quality Improvement: Review of the Unified Power Quality Conditioner. *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications*. 2021. Vol. 19, No. 3. P. 268–288. DOI: 10.37936/ecti-eec.2021193.244936.
10. Remya V. K., Parthiban P., Ansal V., Babu B. C. Dynamic Voltage Restorer (DVR) – A Review. *Journal of Green Engineering*. 2018. Vol. 8, Iss. 4. P. 519–572. doi: 10.13052/jge1904-4720.844
11. Burbelo M. Y., Lebed D. Yu. Analiz protsesu keruvannia unifikovanym rehuliatorom yakosti elektroenerhii za shvydkykh zmin napruhy. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2025. № 1. S. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-79-85>