

Михайленко Олексій Юрійович, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, +38(067)455-47-74, mykhailenko@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2898-6652

*Криворізький національний університет,
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027*

Сінчук Ігор Олегович, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, +38(067)465-55-54, olegovich.s@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7702-4030

*Криворізький національний університет
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027*

Котякова Марина Геннадіївна, аспірант кафедри електричної інженерії, +38(096)640-71-52, kotyakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5667-1354

*Криворізький національний університет
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027*

Федотов Владислав Олександрович, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, +38(097)918-54-05, fedotov@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6536-5591

*Криворізький національний університет,
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027*

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО ВІДНОВЛЮВАЧА НАПРУГИ ДЛЯ АНАЛІЗУ РОБОТИ СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

Анотація. Стаття присвячена рішення актуальної наукової задачі оперативної стабілізації рівня напруги в електромережах підземних рудників при її відхиленнях від стандартизованих значень. Для цього було запропоновано застосування сучасного пристрою гнучкої передачі електроенергії на змінному струмі – динамічного відновлювача напруги. Для встановлення ефективності керування рівнями напруги з застосуванням даного устаткування було розроблено його просторово-станну модель і, з урахуванням номінальних характеристик потенційного споживача підземного рудника для якого потрібно буде здійснювати стабілізацію напруги, як-то скреперної лебідки, було визначено її параметри. Здійснено обчислювальну перевірку, котра дозволила встановити, що модель є повністю керованою і спострігаємою, тобто відсутня необхідність в застосуванні спостерігачів стану. Проведене імітаційне моделювання роботи розімкненої системи динамічного відновлювача напруги показало, що модель має низьку якість перехідних процесів, зокрема, тривалий час перехідних процесів, котрий зумовлений їх коливальністю, та високим перерегулюванням. Аналіз логарифмічних амлітудно-фазових характеристик дозволив встановити, що в цілому модель є стійкою, окрім, декількох каналів, де застосування негативного зворотного зв'язку є обов'язковим. Разом з тим, для застосування пристрою в умовах підземних рудників необхідно розробити та налаштувати замкнену систему автоматизованого керування.

Ключові слова: системи електропостачання, підземний рудник, динамічний відновлювач напруги, просторово-станна модель, моделювання, перехідні процеси.

Mykhailenko Oleksii, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, +38(067)455-47-74, mykhailenko@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2898-6652

11, Vitalii Matusevycha Str., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

Sinchuk Ihor, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, +38(067)465-55-54, olegovich.s@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7702-4030

Kyryvyi Rih National University

11, Vitalii Matusevycha Str., Kyryvyi Rih, Ukraine, 50027

Kotyakova Maryna, PhD student, Department of Electrical Engineering, +38(096)640-71-52, kotyakova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5667-1354

Kyryvyi Rih National University

11, Vitalii Matusevycha Str., Kyryvyi Rih, Ukraine, 50027

Fedotov Vladyslav, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, +38(097)918-54-05, fedotov@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6536-5591

Kyryvyi Rih National University

11, Vitalii Matusevycha Str., Kyryvyi Rih, Ukraine, 50027

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER MODEL FOR ANALYSING THE OPERATIONAL VOLTAGE STABILISATION SYSTEM AT THE UNDERGROUND MINES' POWER GRIDS

Abstract. *The article is devoted to solving the problem of voltage level operational stabilization at the underground mines' power grids when it deviates from standardized values. For this purpose, it was proposed to use a modern flexible alternating current transmission system device – a dynamic voltage restorer. To establish the effectiveness of voltage level control using this equipment, its state-space model was developed. Considering the nominal characteristics of a potential consumer of an underground mine for which voltage stabilization will be required, such as a scraper winch, its parameters were determined. A computational verification was performed, which allowed us to establish that the model is fully controllable and observable, i.e., there are no state observers required in the application. The simulation of the operation of the dynamic voltage restorer open-loop system showed that the model has a low quality of transients, in particular, a long settling time due to their oscillation and high overshoot. The analysis of the Bode plots revealed that the model is generally stable, except for some channels where negative feedback is mandatory. At the same time, it is necessary to develop and configure a closed-loop control system for the use of the dynamic voltage restorer in the underground mines' power grids.*

Keywords: *power systems, underground mine, dynamic voltage restorer, state-space model, modeling, transients.*

Вступ. Гірничі підприємства, в тому числі їх підвиди – гірничорудні, являють собою зразки енергоємних виробництв – споживачів електроенергії (ЕЕ). Однією з системоутворюючих рис в аналізованому аспекті енергетики даних підприємств є те, що обсяги споживання ними ЕЕ не корелюються з обсягами їх виробництв – видобутку залізної руди (ЗР). Більше того, навіть при нульових показниках видобутку ЗР процес споживання ЕЕ даними підприємствами продовжується в значних обсягах. У результаті цього показники енергоємності видобутку ЗР носять відповідну тенденцію з ухилом в бік свого небажаного зростання. Це наносить свій негативний вклад в економіку підприємств [1, 2].

Одним із актуальних і реально досяжних заходів в стримуванні процесу зростання електроенергетичного «тягаря» на загальну енергетику гірничорудних підприємств, а значить і на економічні показники видобутку ними ЗР є зменшення темпів росту рівнів споживання ЕЕ даними видами виробництв. Проте, існуючі технології видобутку ЗР базуються на постійному процесі збільшення – пониження глибин видобутку, що провокує процес збільшення обсягів споживання ЕЕ [3]. Більше того, ряд енергоспрямованих заходів з реалізації процесу стримування зростання ЕЕ, у тому числі заміна експлуатуємого технологічного обладнання на більш енергоощадне, мінімізується процесом роста рівнів споживання електроенергії з переходом на видобуток ЗР на нижчі гірничовидобувні горизонти.

У значній мірі зростання обсягів споживання ЕЕ при переході з одного на інший – більш заглиблений підземний горизонт пов'язано із зростанням втрат ЕЕ при її транспортуванні по внутрішнім лініям електропередачі (ЛЕП). Цей факт зумовлений природним збільшенням протяжності підземних ЛЕП гірничорудних підприємств при збільшенні глибин видобутку ЗР.

В свою чергу одним із системоутворюючих, окрім природних, факторів такого негативу є погіршення показників якості електроенергії (ПЯЕ) і перш за все відхилень напруги в системах електропостачання (СЕП) більше допустимих значень [4].

Цей факт впливає як на загальні втрати ЕЕ, котрі в реаліях сьогодення сягають позначки біля 20%, при її транспортуванні по внутрішніх ЛЕП даних підприємств, так і адресно на режими роботи самих споживачів, знижуючи їх технологічні показники та міжремонтні терміни експлуатації.

Аналіз літературних джерел. Продовжуючи в «рамочному варіанті» аналіз впливу якості ЕЕ на експлуатаційні характеристики споживачів електроенергії зазначимо, що вже в 80-ті роки минулого сторіччя, коли гірничорудні підприємства в Україні функціонували в режимах наближених до проєктних, терміни експлуатації наприклад приводних двигунів станків глибокого буріння (НКР-100М) не перевищував трьох тижнів, вентиляторів місцевого (дільничого)

провітрювання та скрепних лебідок до одного року [2]. Щодо оцінювання цих значень в масштабах сьогодення та вони м'яко кажучи не покращились.

Таке невтішне вищенаведене «резюме», окрім ряду об'єктивних причин, але не суттєвих і не системоутворюючих по рівню їх впливу, є результатом, в основному, факту постійних відхилень реальних значень рівнів напруги живлення споживачів – одного з переліку основних ПЯЕ СЕП аналізуємих видів підприємств від стандартних значень.

Нажаль питання дотримання ПЯЕ взагалі, та, в тому числі, відхилень напруги ΔU від стандартизованих значень в умовах функціонування СЕП гірничорудних підприємств з підземними способами видобутку ЗР, поки-що не стали предметом прискіпливого наукового пошуку. А відомі наукові пошуки в цьому спрямуванні відносяться в більшості своїй до об'єднаного технологією виробництва комплексу – гірничо-металургійного [4].

І, що головне, досягнуті в процесі цього формату пошуку позитивні результати досліджень в більшості своїй не були конвертовані в реальні практичні розробки, тому оцінити реальний рівень їх ефективності в практиці роботи гірничорудних підприємств не можливо. Та все ж, певні пошуки, в тому числі авторів даної статті, вже мають свою конкретику [5–7]. Але, проблема лишається проблемою зі статусом своєї невирішеності.

Тобто, логічним виглядає висновок, що необхідний пошук нових і в значній мірі нетривіальних сучасного рівня ефективності заходів для запобігання відхилень ΔU від стандартних значень в умовах СЕП гірничорудних підприємств. Водночас, і, що логічно, цей процес повинен супроводжуватись превентивним науковим обґрунтуванням та відповідним спрямуванням рішень.

Для того щоб якість напруги залишалася в потрібних межах, обґрунтованим, згідно даних ряду досліджень [8–11], є залучення до підтримки регламентованих її показників пристрою гнучкої передачі електроенергії на змінному струмі – динамічного відновлювача напруги (ДВН). ДВН призначений для компенсування відхилень напруги, таких як відхилення різного розмаху від

стандартизованих значень, гарантуючи, що чутливі до якості напруги споживачі отримують надійне живлення.

Мета роботи полягає в розробці математичної моделі системи компенсації коливань напруги в підземних рудниках на базі динамічного відновлювача напруги та дослідження динаміки її роботи для встановлення необхідності в додатковій побудові системи автоматизованого керування (САК).

Викладення основного матеріалу. Просторово-станна модель динамічного відновлювача напруги (ДВН) потрібна для аналізу його динамічної поведінки, яка визначається взаємодією його компонентів: джерела постійного струму, напівпровідникового інвертора напруги, LC-фільтра [9], а також електромережі підземного рудника. ДВН додає компенсуючу напругу для підтримки стабільної напруги на шахтному споживачеві під час відхилення напруги від стандартизованих значень.

Динамічна поведінка ДВН описується за допомогою законів Кірхгофа, які встановлюються по схемі заміщення (рис. 1) [12]. Змінними стану для ДВН обираємо напругу на конденсаторі ($u_{C\phi}$) та струм індуктивності ($i_{L\phi}$) [13]. Напруга на конденсаторі відображає вихідну напругу навантаження, а струм індуктивності – струм, що протікає через LC-фільтр. Керуючим входом системи є компенсуюча напруга, що генерується інвертором напруги, в той час як входом збурення є струм електроприймача підземного рудника.

Складемо диференціальні рівняння, які описують поведінку ДВН. Використовуючи другий закон Кірхгофа:

$$\begin{cases} u_{iA} = u_{R\phi A} + u_{L\phi A} + u_{C\phi A}; \\ u_{iB} = u_{R\phi B} + u_{L\phi B} + u_{C\phi B}; \\ u_{iC} = u_{R\phi C} + u_{L\phi C} + u_{C\phi C}. \end{cases} \quad (1)$$

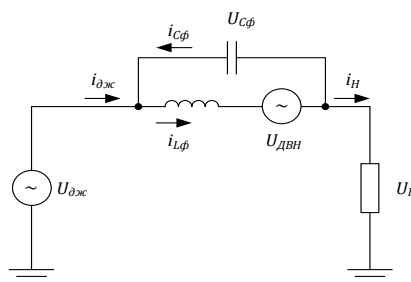


Рисунок 1 – Схема заміщення фази динамічного відновлювача напруги.

Звідки, враховуючи, що $u_{R\phi} = i_{L\phi} R_{\phi}$ і $u_{L\phi} = L_{\phi} di_{L\phi} / dt$ і перетворивши:

$$\begin{cases} \frac{di_{L\phi A}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi A} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi A} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iA}; \\ \frac{di_{L\phi B}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi B} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi B} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iB}; \\ \frac{di_{L\phi C}}{dt} = -\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} i_{L\phi C} - \frac{1}{L_{\phi}} u_{C\phi C} + \frac{1}{L_{\phi}} u_{iC}. \end{cases} \quad (2)$$

де L_{ϕ} – індуктивність LC-фільтра;

R_{ϕ} – паразитний опір котушки індуктивності LC-фільтра.

$u_{C\phi}$ – напруга на конденсаторі.

Використовуючи перший закон Кірхгофа вузла 2 на схемі рис. 1:

$$\begin{cases} i_{L\phi A} = i_{C\phi A} + i_{HA}; \\ i_{L\phi B} = i_{C\phi B} + i_{HB}; \\ i_{L\phi C} = i_{C\phi C} + i_{HC}. \end{cases} \quad (3)$$

Враховуючи, що $i_{C\phi} = C_{\phi} du_{C\phi} / dt$ і перетворивши :

$$\begin{cases} \frac{du_{C\phi A}}{dt} = \frac{1}{C_{\phi}} i_{L\phi A} - \frac{1}{C_{\phi}} i_{HA}; \\ \frac{du_{C\phi B}}{dt} = \frac{1}{C_{\phi}} i_{L\phi B} - \frac{1}{C_{\phi}} i_{HB}; \\ \frac{du_{C\phi C}}{dt} = \frac{1}{C_{\phi}} i_{L\phi C} - \frac{1}{C_{\phi}} i_{HC}. \end{cases} \quad (4)$$

де C_{ϕ} – ємність LC-фільтра.

Поеднавши системи рівнянь (2) і (4) отримуємо модель динамічного відновлювача напруги в системі ABC:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{L\phi A}}{dt} &= -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi A} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi A} + \frac{1}{L_\phi} u_{iA}; \quad \frac{di_{L\phi B}}{dt} = -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi B} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi B} + \frac{1}{L_\phi} u_{iB}; \\ \frac{di_{L\phi C}}{dt} &= -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi C} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi C} + \frac{1}{L_\phi} u_{iC}; \\ \frac{du_{C\phi A}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi A} - \frac{1}{C_\phi} i_{HA}; \quad \frac{du_{C\phi B}}{dt} = \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi B} - \frac{1}{C_\phi} i_{HB}; \\ \frac{du_{C\phi C}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi C} - \frac{1}{C_\phi} i_{HC}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Перетворивши (6) в систему dq0 і доповнивши її маємо:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{L\phi d}}{dt} &= -\frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi d} + \omega i_{L\phi q} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi d} + 0 \cdot u_{C\phi q} + \frac{1}{L_\phi} u_{id} + \\ &\quad + 0 \cdot u_{iq} + 0 \cdot i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{di_{L\phi q}}{dt} &= -\omega i_{L\phi d} - \frac{R_\phi}{L_\phi} i_{L\phi q} + 0 \cdot u_{C\phi d} - \frac{1}{L_\phi} u_{C\phi q} + 0 \cdot u_{Cq} + \\ &\quad + 0 \cdot u_{id} + \frac{1}{L_\phi} \cdot u_{iq} + 0 \cdot i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{du_{C\phi d}}{dt} &= \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi d} + 0 \cdot i_{L\phi q} + 0 \cdot u_{C\phi d} + \omega u_{C\phi q} - \frac{1}{C_\phi} i_{Ld} + 0 \cdot i_{Lq}; \\ \frac{du_{C\phi q}}{dt} &= 0 \cdot i_{L\phi d} + \frac{1}{C_\phi} i_{L\phi q} - \omega \cdot u_{C\phi d} + 0 \cdot u_{C\phi q} + 0 \cdot i_{Ld} - \frac{1}{C_\phi} i_{Lq}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Модель ДВН можна представити у просторі станів:

$$\begin{cases} x' = Ax + Bu + B_d d; \\ y = Cx + Du + D_d d, \end{cases} \quad (7)$$

де X – вектор стану (напруга на конденсаторі, струм котушки індуктивності);

u – керуючий вхід (напруга компенсації ДВН через інвертор напруги);

d – вхідне збурення (просідання/зростання напруги);

y – вихід (наприклад, напруга на навантаженні);

$A, B, B_d, C,$ – матриці входу, збурення і виходу – матриця стану;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_\phi}{L_\phi} & \omega & -\frac{1}{L_\phi} & 0 \\ -\omega & -\frac{R_\phi}{L_\phi} & 0 & -\frac{1}{L_\phi} \\ \frac{1}{C_\phi} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_\phi} & -\omega & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\phi} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\phi} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_\phi} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_\phi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Відзначаємо, що значення усіх змінних стану, вхідних та вихідних дій системи можуть бути зафіксовані вимірювальними пристроями.

Моделювання розімкненої системи динамічного відновлювача напруги.

Перевіряємо модель динамічного відновлювача напруги на керованість та спостережність [14, 15]. Обчислимо матрицю керованості та встановимо ранг:

$$K = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 & -4 \cdot 10^6 & 6,3 \cdot 10^5 \\ 0 & 2 \cdot 10^3 & 0 & 0 & -6,3 \cdot 10^5 & -4 \cdot 10^6 & \dots \\ 0 & 0 & -2,1 \cdot 10^4 & 0 & 4,3 \cdot 10^7 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -2,1 \cdot 10^4 & 0 & 4,3 \cdot 10^7 & \dots \\ 4,3 \cdot 10^7 & 0 & -7,7 \cdot 10^{10} & -2,5 \cdot 10^9 & -8,5 \cdot 10^{10} & \dots \\ 0 & 4,3 \cdot 10^7 & 2,5 \cdot 10^9 & -7,7 \cdot 10^{10} & -2,7 \cdot 10^{10} & \dots \\ \dots & 0 & -6,6 \cdot 10^7 & -8,5 \cdot 10^{10} & 2,7 \cdot 10^{10} & 9,1 \cdot 10^{11} & \dots \\ 6,6 \cdot 10^7 & 0 & -2,7 \cdot 10^{10} & -8,5 \cdot 10^{10} & 0 & \dots \\ 2,7 \cdot 10^{10} & 3,3 \cdot 10^{14} & -7,03 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} & -8 \cdot 10^{13} & \dots \\ -8,5 \cdot 10^{10} & 7,03 \cdot 10^{13} & 3,3 \cdot 10^{14} & 8 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} & \dots \\ \dots & 0 & -1,7 \cdot 10^{15} & -8 \cdot 10^{13} & -1,8 \cdot 10^{15} & 8,5 \cdot 10^{14} \\ 9,1 \cdot 10^{11} & 8 \cdot 10^{13} & -1,7 \cdot 10^{15} & -8,5 \cdot 10^{14} & -1,8 \cdot 10^{15} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\text{rang}(K) = 4.$$

Ранг матриці відповідає числу станів, тому модель повністю керована.

$$C = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \cdot 10^4 \\ 2,1 \cdot 10^8 & 0 & 0 & 3,1 \cdot 10^6 \\ 0 & 2,1 \cdot 10^8 & -3,1 \cdot 10^6 & 0 \\ -4,3 \cdot 10^{11} & 1,3 \cdot 10^{11} & -4,3 \cdot 10^{11} & 0 \\ -1,3 \cdot 10^{11} & -4,3 \cdot 10^{11} & 0 & -4,3 \cdot 10^{11} \\ -8,3 \cdot 10^{15} & -4 \cdot 10^{14} & 8,5 \cdot 10^{14} & 4 \cdot 10^{14} \\ 4 \cdot 10^{14} & -8,3 \cdot 10^{15} & 4 \cdot 10^{14} & 8,5 \cdot 10^{14} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$\text{rang}(C) = 4.$

Ранг матриці відповідає числу станів, тому модель і повністю спостерігаєма.

На рис. 2 і у табл. 1 приведені результати симуляції роботи просторово-станної моделі ДВН з такими параметрами: $C_\phi = 47 \text{ мкФ}$, $L_\phi = 0,5 \text{ мГн}$, $R_\phi = 1 \text{ Ом}$. Вони прийняті з розрахунку, що буде застосована індивідуальна стабілізація напруги для типового електроприймача підземного рудника – скреперної лебідки типу ЛС-30 (потужністю 30 кВт).

Таблиця 1 – Показники якості перехідних процесі в розімкненій системі динамічного відновлювача напруги

Вихід	u_{Cfd}		u_{Cfq}	
Вхід	Час перехідного процесу, сек	Пере-регулювання, %	Час перехідного процесу, сек	Пере-регулювання, %
u_{id}	0,003069	60,1409	0,005933	713,8296
u_{iq}	0,005933	713,8296	0,003069	60,1409
i_{Hd}	0,003319	247,741	0,005764	266,6595
i_{Hq}	0,005764	266,6595	0,003319	247,741

Одразу уточнимо, що канали, що зв'язують однакові вхідну і вихідну величину, по вісі d або вісі q мають ідентичні характеристики динаміки.

Модель розімкненої системи ДВН демонструє нерівномірний розподіл динамічних характеристик між каналами, що свідчить про їх різну реакцію на вхідні дії та збурення, котрі визначаються умовами роботи електромережі підземного рудника. Відсутність зворотного зв'язку означає відсутність можливості корекції, тому динаміка моделі (6) визначається лише внутрішніми

характеристиками об'єкта – першочергово параметрами LC-фільтра ДВН і зовнішніми діями. Така система має фіксовані часові параметри перехідних процесів (ПП), які залежать від фізичних властивостей елементів, що утворюють ДВН, зокрема, характеристик окремих компонентів, котрі задають співвідношення між імпедансами гілок схеми ДВН (рис. 1).

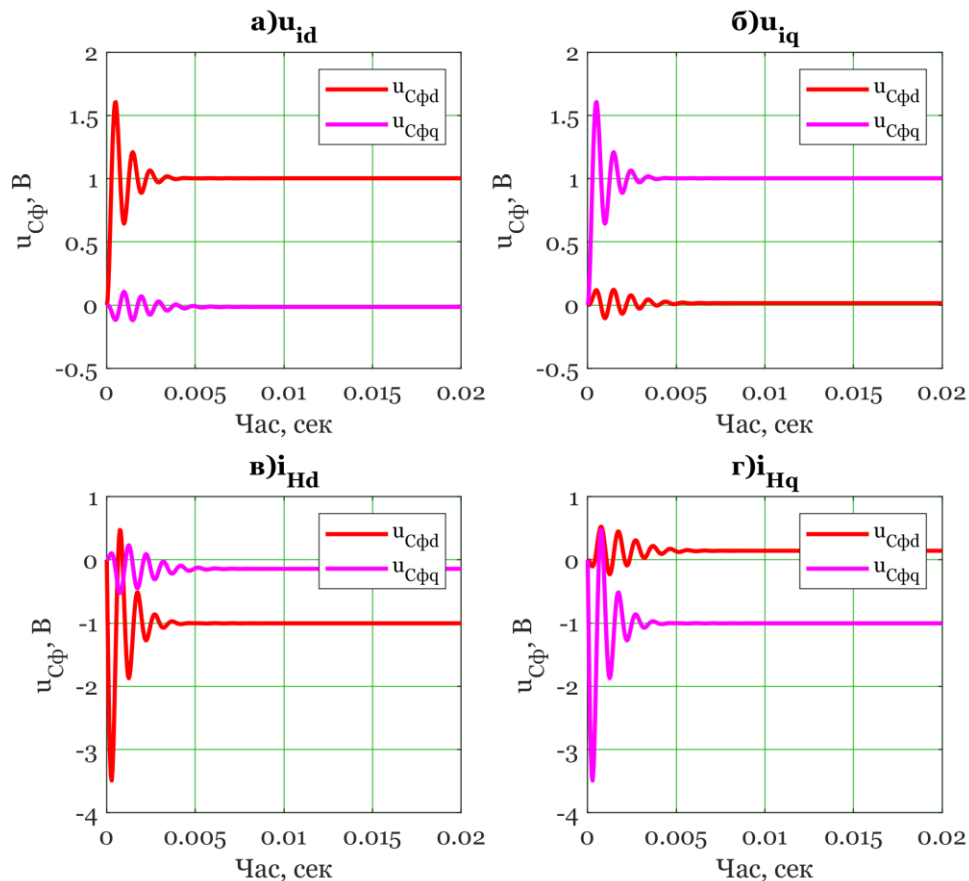


Рисунок 2 – Перехідний процес в розімкненій системі динамічного відновлювача напруги при одиничній східчастій функції

Різниця у часах ПП між каналами вказує на неоднорідність у динамічній поведінці системи, що, як говорилося, обумовлено відмінностями в співвідношеннях між електричними параметрами для кожного каналу. Канали $u_{id} - u_{c\phi d}$; $u_{iq} - u_{c\phi q}$ із найменшим часом ПП демонструють найшвидшу реакцію, що пов'язано з меншою інерційністю. Канали $u_{id} - u_{c\phi q}$; $u_{iq} - u_{c\phi d}$, у яких найбільший час ПП (на 93,32 % вищий ніж у $u_{id} - u_{c\phi d}$; $u_{iq} - u_{c\phi q}$, тобто практично у 2 рази), має сповільнену динаміку, що є результатом більшого опору,

підвищеної індуктивності або ємності. Канали $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}; i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ за швидкодією займають проміжне положення за часом реакції на збурення. При чому, час ПП каналів $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}$ нижчий за $i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ і є трохи більшим (усього на 8,41%) ніж у каналів $u_{id} - u_{c\Phi d}; u_{iq} - u_{c\Phi q}$. Час ПП каналів $i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ на 73,55% вищий на ніж у $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}$, але на 2,91 % менший ніж у $u_{id} - u_{c\Phi q}; u_{iq} - u_{c\Phi d}$.

Наявність помітного розриву в часі ПП між швидшими та повільнішими каналами вказує на потенційні проблеми із синхронізацією роботи каналів моделі ДВН. Це може негативно вплинути на ефективність роботи ДВН в цілому, якщо він використовується тоді, коли потрібна узгоджена реакція на зовнішні дії.

Відсутність САК у цій моделі означає, що така асиметрія в ПП залишається незмінною і може бути компенсована лише шляхом зміни конструкції системи, що дасть оптимізацію параметрів схеми заміщення ДВН.

Найменше перерегулювання спостерігається в каналах $u_{id} - u_{c\Phi d}$ і $u_{iq} - u_{c\Phi q}$, де його значення становить 60,14 %, що вказує на відносно добре згасаючий ПП із помірним рівнем коливань. Це результат більшого внутрішнього демпфування. Канали $u_{iq} - u_{c\Phi d}$ і $u_{id} - u_{c\Phi q}$ демонструють аномально високе перерегулювання 713,83 %, що на перший погляд може вказувати на сильну нестійкість у ПП, виражену у вигляді значних коливань, які можуть тривати довгий час перед досягненням встановленого значення. Проте дивлячись на графік $u_{c\Phi d}$ на рис. 2 а) і $u_{c\Phi q}$ на рис. 2 б) можна побачити, що таке число обумовлене тим, що усталене значення становить усього 0,0148 В, а сам ПП хоч і коливальний, але згасаючий за 0,005933 секунди.

Канали $i_{Hd} - u_{c\Phi d}; i_{Hq} - u_{c\Phi q}; i_{Hd} - u_{c\Phi q}; i_{Hq} - u_{c\Phi d}$ з перерегулюваннями 247,71 % і 266,66 % також демонструють значні коливання, хоч і не настільки критичні, як у вищеописаних. Такий рівень перевищення встановленого значення

може бути обумовлений близьким розташуванням полюсів передавальної функції до уявної осі в комплексній площині. Відсутність САК у даній моделі не дозволяє коригувати цей ефект, що призводить до тривалих коливань, що в реальних електромережах підземних рудників, де буде задіяний такий ДВН, може викликати небажані наслідки, зокрема перевантаження або нестабільну роботу обладнання.

Загальний характер динаміки такої системи вказує на те, що канали мають суттєво різні демпфуючі властивості, що знову ж таки, як вже зазначалося, обумовлено відмінностями в співвідношеннях між електричними параметрами для кожного каналу, що визначає різну інтенсивність ПП. Модель ДВН є розімкненою, тому її поведінка залишається незмінною, а отже, значні перевищення встановленого значення перерегулювання не можуть бути виключені.

Далі побудуємо логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики (рис. 3 і рис. 4). З них видно, що в цілому модель по більшості каналів керування є стійкою. Проте канали $u_{C\phi d} - i_{Hd}$, $u_{C\phi d} - i_{Hq}$ і $u_{C\phi q} - i_{Hq}$ є нестійкими, якщо до них не застосувати негативний зворотній зв'язок. Запас по амплітуді і по фазі для каналів $u_{C\phi d} - i_{Hd}$, $u_{C\phi q} - i_{Hq}$ становить $-0,04$ дБ і $-89,57$ град., для $u_{C\phi d} - i_{Hq}$ – $9,66$ дБ і $105,63$ град.

Амплітудо-частотні характеристики (рис. 4) містять резонансні частоти, що підтверджує коливання під час ПП. Для каналів $u_{C\phi d} - u_{iq}$, $u_{C\phi d} - i_{Hq}$, $u_{C\phi q} - u_{id}$, $u_{C\phi q} - u_{id}$ вона становить $6416,7$ рад/с, для $u_{C\phi d} - u_{id}$, $u_{C\phi q} - u_{iq}$ – $6360,4$ рад/с, для $u_{C\phi d} - i_{Hd}$, $u_{C\phi q} - i_{Hq}$ – 6686 рад/с. Тобто резонансна частота відрізняється не дуже значно.

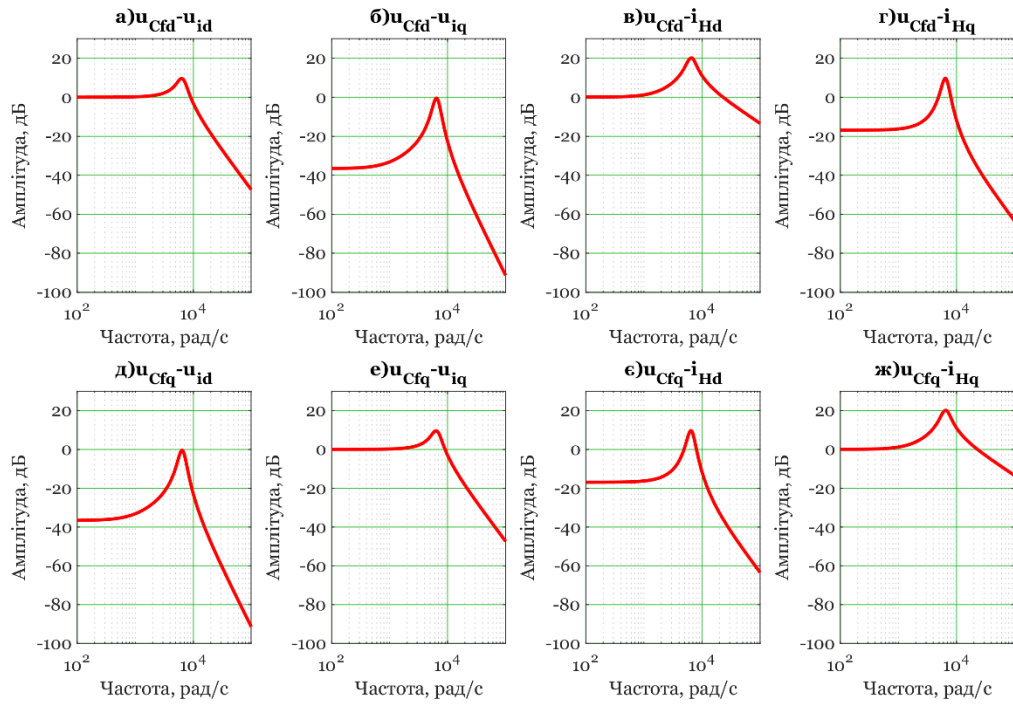


Рисунок 3 – Амплітудо-частотні характеристики моделі динамічного відновлювача напруги

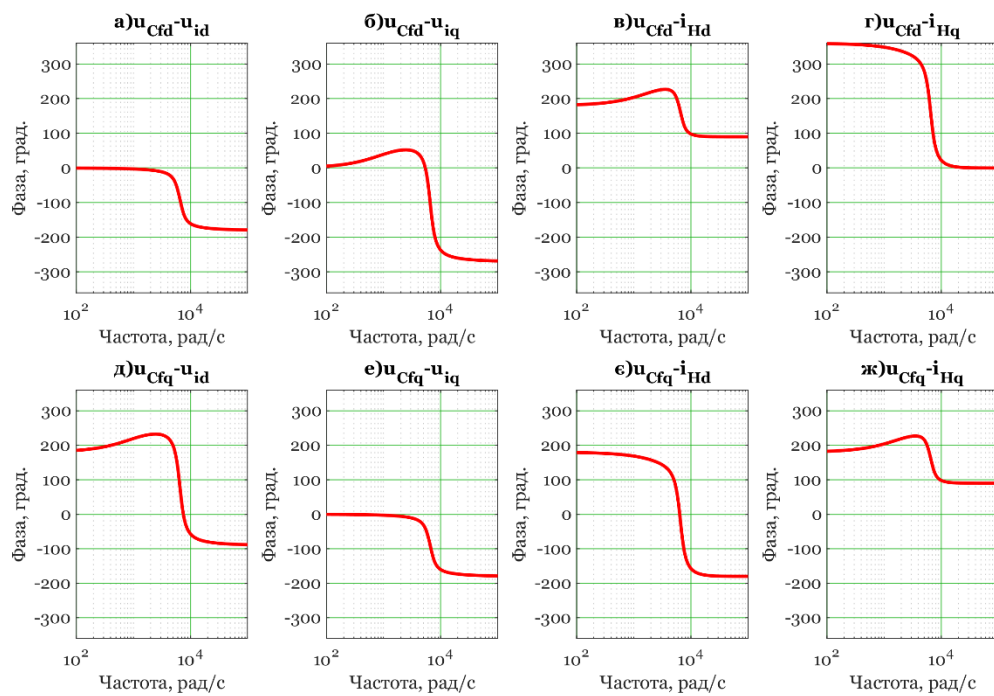


Рисунок 4 – Фазо-частотні характеристики моделі динамічного відновлювача напруги

Аналіз розробленої моделі динамічного відновлювача напруги в форматі розімкненої системи вказує на необхідність або суттєвої оптимізації внутрішніх параметрів, таких як опір, ємність, індуктивність в схемі заміщення ДВН, або ж

введення САК, яка могла б зменшити перерегулювання та забезпечити більш згладжену динаміку.

Висновки. У результаті виконання даного дослідження розроблено просторово-станну модель динамічного відновлювача напруги, яка використовує перетворення Парка-Горєва, для оперативної стабілізації напруги в електромережах підземних рудників при її відхиленні від стандартизованих значень. Змінними стану для моделі взято напругу на конденсаторі, яка додається до мережевої, та струм індуктивності LC-фільтру. Керуючим входом системи є компенсуюча напруга, що генерується інвертором напруги, в той час як входом збурення є струм електроприймача підземного рудника.

Проведене моделювання роботи динамічного відновлювача напруги у розімкненому контурі, дозволило оцінити власні характеристики системи. Аналіз часових та частотних характеристик системи визначив, що просторово-станна модель динамічного відновлювача напруги є динамічною системою другого порядку, тому має коливальний характер перехідних процесів з високим переруглюванням. Деякі канали, як-то «струм навантаження» – «напруга на конденсаторі LC-фільтру», показали, що без застосування зворотного зв'язку їх перехідні процеси будуть нестійкими. Запропонована модель дозволяє аналізувати перехідні процеси та в подальшому визначати оптимальні параметри системи автоматизованого керування для забезпечення ефективної роботи динамічного відновлювача напруги в електромережах підземних рудників.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Вілкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.О. Сучасний стан гірничо-видобувної промисловості України. *Гірничий вісник*, 2022. № 110. С. 3–9.
2. Ступнік М.І., Федько М.Б., Письмений С.В., Колосов В.О., Курносів С.А., Маланчук З.Р. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету*, 2018. № 47. С. 3–8. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8>
3. Сінчук І.О. Методологічні засади оцінювання електроефективності залізрудних підприємств: монографія. Кривий Ріг: ПП Щербатих, 2019. 284 с.
4. Жежеленко І.В., Папайка Ю.А., Луценко І.М., Лисенко О.Г. Оцінка стану якості напруги у промислових системах електропостачання. *Гірничі електромеханіка та автоматика*, 2020. № 103. С. 26–31.

5. Sinchuk I.O., Kotyakova M.G. Preface to the development of rapid response systems to deviations of electricity quality indicators from standard values in internal mine electric networks. Warsaw (Poland) : iScience, 2025. 85 p. ISBN 978-83-68188-18-9
6. Сінчук І.О., Котякова М.Г. Підхід до покращення якісних показників електроенергії залізрудних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*, 2023. № 57. С. 43–52.
7. Сінчук О.М., Сьомочкін А.Б., Барановська М.Л., Кобеляцький Д.В. До проблеми покращення якості електричної енергії у внутрішньо шахтних електричних мережах шляхом її переведення на підвищені рівні напруги. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства»* (Кривий Ріг, 24–26 травня 2023). С. 56.
8. Farhadi-Kangarlu M., Babaei E., Blaabjerg F. A comprehensive review of dynamic voltage restorers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017. Vol. 92. P. 136–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.04.013>
9. Moghassemi A., Padmanaban, S. Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. *Energies*, 2020. Vol. 13(16). Article 16. <https://doi.org/10.3390/en13164152>
10. Prasad D., Dhanamjayulu C. A Review of Control Techniques and Energy Storage for Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer in Grid-Integrated Renewable Sources. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. Vol. 2022(1). Article 6389132. <https://doi.org/10.1155/2022/6389132>
11. Remya V. K., Parthiban P., Ansal V., Babu B. C. Dynamic Voltage Restorer (DVR) – A Review. *Journal of Green Engineering*, 2018. Vol. 8(4). P. 519–572. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.844>
12. Беззуб М., Бялобржеський О., Тодоров О. Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного відновлювача напруги. *Електротехніка та електроенергетика*, 2023. № 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-2>
13. Ochoa-Giménez M., Roldán-Peréz J., García-Cerrada A., Zamora-Macho J.L. (2015). Efficient multiple-reference-frame controller for harmonic suppression in custom power devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015. Vol. 69. P. 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.01.013>
14. Сільвестров А. М., Островерхов М. Я., Шефер О. В., Ладік Н. А., Зіменков Д. К. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 386 с.
15. Новицький І. В., Ус С. А. Сучасна теорія керування. Дніпро : НГУ, 2017. 263 с.

REFERENCES:

1. Vilkul Yu.H., Azarian A.A., Kolosov V.O. Current state of the mining industry of Ukraine. *Mining Bulletin*, 2022. Vol. 110. P. 3–9.
2. Stupnik M.I., Fedko M.B., Pysmenyi S.V., Kolosov V.O., Kurnosov S.A., Malanchuk Z.R. Problems of opening and preparation of ore deposits in deep horizons of mines of Kryvbas. *Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 2018. Vol. 47. P. 3–8. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8>
3. Sinchuk I.O. Methodological principles of assessing the electrical efficiency of iron ore enterprises: monograph. Kryvyi Rih : Shcherbatykh, 2019. 284 p.
4. Zhezhelenko I.V., Papaika Yu.A., Lutsenko I.M., Lysenko O.H. Assessment of the state of voltage quality in industrial power supply systems. *Mining electromechanics and automation*, 2020. Vol. 103. P. 26–31.
5. Sinchuk I.O., Kotiakova M.H. Preface to the development of rapid response systems to deviations of electricity quality indicators from standard values in internal mine electrical networks. Warsaw (Poland) : iScience, 2025. 85 p. ISBN 978-83-68188-18-9.
6. Sinchuk I.O., Kotiakova M.H. Approach to improving the quality indicators of electricity of iron ore enterprises, *Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 2023. Vol. 57. P. 43–52.

7. Sinchuk O.M., Somochkin A.B., Baranovska M.L., Kobeliatskyi D.V. On the problem of improving the quality of electricity in intra-mine electrical networks by transferring it to higher voltage levels. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference 'Development of Industry and Society'* (Kryvyi Rih, 24-26 May 2023). P. 56.
8. Farhadi-Kangarlu M., Babaei E., Blaabjerg F. A comprehensive review of dynamic voltage restorers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017. Vol. 92. P. 136–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.04.013>
9. Moghassemi A., Padmanaban, S. Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. *Energies*, 2020. Vol. 13(16). Article 16. <https://doi.org/10.3390/en13164152>
10. Prasad D., Dhanamjayulu C. A Review of Control Techniques and Energy Storage for Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer in Grid-Integrated Renewable Sources. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. Vol. 2022(1). Article 6389132. <https://doi.org/10.1155/2022/6389132>
11. Remya V. K., Parthiban P., Ansal V., Babu B. C. Dynamic Voltage Restorer (DVR) - A Review. *Journal of Green Engineering*, 2018. Vol. 8(4). P. 519–572. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.844>
12. Bezzub M., Bialobrzheskyi O., Todorov O. Study of the distribution of harmonic power components in the power circuit of a dynamic voltage restorer. *Electrical engineering and electric power engineering*, 2023. Vol. 1. P. 19–29. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-27>
13. Ochoa-Giménez M., Roldán-Peréz J., García-Cerrada A., Zamora-Macho J.L. (2015). Efficient multiple-reference-frame controller for harmonic suppression in custom power devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015. Vol. 69. P. 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.01.013>
14. Silvestrov A. M., Ostroverkhov M. Ya., Shefer O. V., Ladik N. A., Zimenkov D. K. Automatic control systems of technological complexes. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. 386 p.
15. Novytskyi I. V., Us S. A. Modern control theory. Dnipro : NSU, 2017. 263 p.

Надійшла до редакції 19.03.2025р.