

Міжнародний науково-технічний журнал



# СВІТЛОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

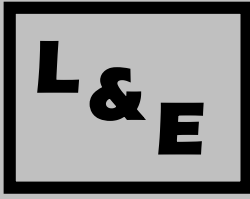
Lighting engineering and power engineering

ISSN 2079-424X

№3 (53)

2018  
Харків





# СВІЛОТЕХНІКА ТА

№3'2018

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Міжнародний науково-технічний журнал

*Lighting Engineering and Power Engineering*

### ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

**В. С. Плюгін**

д-р техн. наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

### ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

**М. К. Сухонос**

д-р техн. наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

### ТЕХНІЧНИЙ РЕДАКТОР

**В.О. Грініна**

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

**Г.О. Петченко**

д-р фіз.-мат. наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Halonen Liisa**

Ph.D Professor, Aalto University (Finland)

**Ihhami Colak**

Ph.D, Professor, Istanbul Gelisim University (Turkey)

**Jan Bauer**

Ph.D, Professor, Czech Technical University in Prague (Czech Republic)

**І.О. Шведчикова**

д-р техн. наук, професор Київського національного університету технологій та дизайну

**Д. М. Калюжний**

канд. техн. наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**В. І. Карась**

д-р фіз.-мат. наук, професор ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"

**М.М. Заблудський**

д-р техн. наук, професор Національного університету біоресурсів і природокористування України

**А.Г. Сосков**

д-р техн. наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**В.Ф.Болюх**

д-р техн. наук, професор Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту»

**П. І. Неєжмаков**

д-р техн. наук, генеральний директор ННЦ „Інститут метрології”

**Sowa Pawel**

Ph.D, DSc, Professor, Silesian University of Technology (Poland)

**Topalis Frangiskos V.** Ph.D, Professor, National Technical University of Athens (Greece)

**Sagiroglu Seref**

Ph.D, Professor, Gazi University (Turkey)

**Bulbul Halil Ibrahim**

Ph.D, Professor, Gazi University (Turkey)

**Yochanan Shachmurove**

Ph.D, Professor, Colin Powell School for Civic and Global Leadership (USA)

**Zissis Georges**

Ph.D, Professor, Université Paul Sabatier, Toulouse (France)

**Bizjak Grega**

Ph.D., Professor, University of Ljubljana (Slovenia)

**В. Г. Ягуп**

д-р техн. наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

### Атестація

УДК 621.314(628.971)

*Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Наказ Міністерства освіти і науки України від 10.05.2017р. № 693).*

### Рекомендовано

вченою радою Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, протокол № 5 від 28.11.2017р.

Підписано до друку: 08.12.2017 р.

### Свідоцтво про державну реєстрацію журналу

Серія КВ №22332-12232 ПР від 04.10.2016 р.

### Індексація журналу



### Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002

Тел.: (057) 707-31-17

Факс: (0572) 706-15-54

Електронна адреса: lepe@kname.edu.ua

### Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014 р.

## ЗМІСТ

<b>1. В.М. Охріменко, М.В. Збітнєва, В.О. Перепечений</b> ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ЧОТИРИПРОВІДНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ .....76
<b>2. П.П. Рожков, С.Е. Рожкова</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА .....82
<b>3. В.Ф. Рой, В.О. Грініна</b> СТАБІЛІЗОВАНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ .....87
<b>4. А.С. Сисоєв</b> ПРОХОДЖЕННЯ ГАУССОВОГО ПУЧКА КРИЗЬ КВАДРАТИЧНО-НЕОДНОРІДНУ ПРИЗМУ .....91
<b>5. Н.П. Лукашова, Т.П. Павленко, Б.Г. Любарський</b> ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ В ХОДОВИХ ЧАСТИНАХ МЕТРОВАГОНІВ .....96
<b>6. В.О.Перепечений</b> АНАЛІЗ ЗМІНИ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З РІВНОМІРНО- РОЗПОДІЛЕНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ..... 105

## CONTENTS

<b>1. V. Okhrimenko, M. Zbitnieva, V. Perepecheny</b> STUDY OF NON-SYMMETRIC MODES OF FOUR-WIRE DISTRIBUTED NETWORKS .....76
<b>2. P. Rozhkov, S. Rozhkova</b> MATHEMATICAL DESIGN OF NONLINEAR ELECTRIC..... 82
<b>3. V. Roy, V. Grinina</b> STABLE POWER SUPPLY FOR ELECTRONIC CONTROL AND CONTROL SYSTEMS ..... 87
<b>4. A.S. Sysoiev</b> PASSING OF GAUSSIAN BUNCH THROUGH QUADRATICALLY- HETEROGENEOUS PRISM..... 91
<b>5. N. Lukashova, T. Pavlenko, B. Lubarski</b> EFFICIENCY OF USE OF ELECTROMECHANICAL SHOCK ABSORBER IN METRO TRAILERS. .... 96
<b>6. V. Perepechenyi</b> ANALYSIS OF THE CHANGE OF TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF ELECTRIC NETWORK EQUILIBRIUMLY DISTRIBUTED LOADING.....105

# Дослідження несиметричних режимів чотирипровідних розподільних мереж

В. М. Охріменко

Кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст

ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

м. Харків, Україна

monviktor@ukr.net

М. В. Збітнева

Харківська гуманітарно-педагогічна академія

м. Харків, Україна

В. О. Перепечений

Кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст

ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

м. Харків, Україна

**Анотація** - Запропоновано методику оцінки стану несиметрії чотирипровідної розподільної мережі для встановлення потреби у засобах симетрування на етапі проектних розрахунків систем електропостачання. Методика передбачає зведення схеми чотирипровідної розподільної мережі до розрахункової моделі у складі джерела живлення, лінії живлення і еквівалентних навантажень фаз електроспоживача. Режим мережі описано рівняннями методу симетричних складових і теорії комплексних чисел. Наведені математичні співвідношення дозволяють проводити розрахунки несиметричних режимів чотирипровідної розподільної мережі. Вихідними даними для розрахунку є комплексні напруги джерела живлення, комплексні опори ліній живлення та навантажень фаз електроспоживача.

Розроблена комп'ютерна програма «Несиметрія навантаження», що базується на технології Microsoft .NET і забезпечує виконання розрахунків щодо аналізу впливу зміни несиметрії фазних навантажень та оцінки припустимих значень опорів фазних навантажень. Програма написана мовою програмування C#. В інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі задаються дані моделі чотирипровідної розподільної мережі, шаг і діапазон зміни опору фазного навантаження.

Наведені результати дослідження впливу активного, індуктивного та ємнісного фазного навантаження на усталене відхилення фазних напруг, коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями. Показано, що в у випадку зміни фазного навантаження (активного чи реактивного) у межах нормально припустимого усталеного відхилення напруги ( $\pm 5\%$ ), коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю не виходить за межі гранично припустимих нормованих значень ( $\pm 4\%$ ), а коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю значно перевищує ці значення. Розподільна мережа у цьому випадку потребує встановлення пристроїв симетрування напруги з метою зменшення величини струмів нульової послідовності.

Методика оцінки впливу фазних навантажень на показники якості електричної енергії і комп'ютерна програма «Несиметрія навантаження» можуть використовуватись у процесі проведення проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж міст і промислових підприємств.

**Ключові слова** - чотирипровідна розподільна мережа, несиметричний режим, опір фазного навантаження, якість електричної енергії.

## I. ВСТУП

Чотирипровідні розподільні електричні мережі отримали широке розповсюдження в системах розподілу електричної енергії міст і промислових підприємств. Їхньою основною перевагою є можливість забезпечення електричною енергією як трифазних, так і однофазних споживачів. Система електропостачання забезпечує подачу споживачам напруги симетричної за фазами. Але електроспоживачі, в силу наявності значної кількості однофазного навантаження і його випадкового характеру, порушують симетрію трифазної системи, що призводить до додаткових втрат як в системі електропостачання, так і в системі електроспоживання [1, 2]. Одним з актуальних є завдання аналізу несиметричного режиму як на етапі проектування розподільних чотирипровідних мереж, так і при їхній експлуатації.

При виконанні проектних розрахунків однофазні електроприймачі рівномірно розподіляються між фазами чотирипровідної мережі з урахуванням статистичних даних про їхні режими роботи. У подальшому, під час експлуатації спроектованої мережі мають місце часті випадки, коли показники якості електричної енергії в окремих вузлах мережі виходять за межі припустимих значень. Така ситуація характерна для розподільних мереж промислових підприємств зі значною часткою однофазних навантажень [3]. Часті зміни графіків роботи електрообладнання, зміна складу електроприймачів та схем внутрішньоцехових розподільних мереж (виведення електрообладнання з експлуатації, введення в роботу нового і т. ін.) призводять до непередбачених порушень симетрії навантажень і, як наслідок, погіршення техніко-економічних показників як самих електроприймачів, так і чотирипровідних розподільних мереж.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вирішенню проблеми несиметрії напруг і струмів трифазних розподільних мереж приділяється постійна увага. Дослідження проводять в напрямках удосконалення математичного опису і моделювання несиметричних режимів [4–6], дослідження впливу несиметрії навантаження на втрати в мережі [1, 8, 9]. Значна увага приділяється вдосконаленню методів і засобів симетрування напруг і струмів трифазних мереж. Так у роботі [10] розглядається методика визначення оптимальної потужності і місця розташування симетруючих конденсаторів у радіальних розподільних мережах, у роботах [11, 12] аналізуються критерії та алгоритми керування компенсаційними симетрувальними пристроями.

Незважаючи на значну кількість публікацій щодо розроблення пристроїв симетрування напруг і методів визначення їхніх параметрів, недостатня увага приділяється уточненню методів, які дозволяють розраховувати ступінь впливу опорів фазних навантажень на режим мережі та показники якості електричної енергії на етапі проектування розподільної мережі. Оцінка можливих меж зміни фазних опорів на стадії проектування розподільної мережі дозволяє зменшити капітальні витрати на розроблення і встановлення пристроїв симетрування у процесі експлуатації розподільної мережі.

Таким чином, метою даної статті є дослідження впливу фазного навантаження на режим роботи і показники якості електричної енергії у чотирипровідній електричній мережі.

Для досягнення цієї мети необхідно провести аналіз методів математичного опису несиметричного режиму, розробити модель чотирипровідної електричної мережі і комп'ютерну програму, яка дозволяє розраховувати залежності показників якості від опорів навантаження фаз.

III. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Порядок дослідження впливу опору фазного навантаження на режим роботи і показники якості електричної енергії розглянемо на прикладі мережі, схема якої наведена на fig. 1. Тут показано фрагмент однолінійної схеми широко розповсюдженої, зокрема на промислових підприємствах, чотирипровідної розподільної мережі системи TN-C. Схема відтворює фрагмент чотирипровідної внутрішньоцехової розподільної мережі і містить джерело живлення (силовий знижувальний трансформатор Т), лінії живлення (позначені індексами Л1 і Л2), розподільні пристрої РП-1 і РП-2, навантаження (позначені індексами Н1, Н2 тощо). Від шин 0,4 кВ цехової ТП отримують живлення: безпосередньо група електроприймачів (на fig. 1 навантаження Н1, Н2, НN з провідностями  $Y_{H1}$ ,  $Y_{H2}$ ,  $Y_{HN}$ ); по лініях з провідностями  $Y_{L1}$  та  $Y_{L2}$  – електроспоживачі (на fig. 1 розподільні пристрої РП-1 і РП-2). Електроспоживачі утворені групами електроприймачів, які отримують живлення від одного джерела: навантаження  $Y_{H1-1}$ ,  $Y_{H1-2}$ ,  $Y_{H1-N}$  – від шин РП-1; навантаження  $Y_{H2-1}$ ,  $Y_{H2-2}$ ,  $Y_{H2-N}$  – від шин РП-2.

Зазначимо, що електроприймач ми розглядаємо у загальноприйнятому розумінні як пристрій, у якому відбувається перетворення електричної енергії в інший вид енергії, а електроспоживач – як групу електроприймачів, що отримують живлення від спільного джерела електричної енергії.

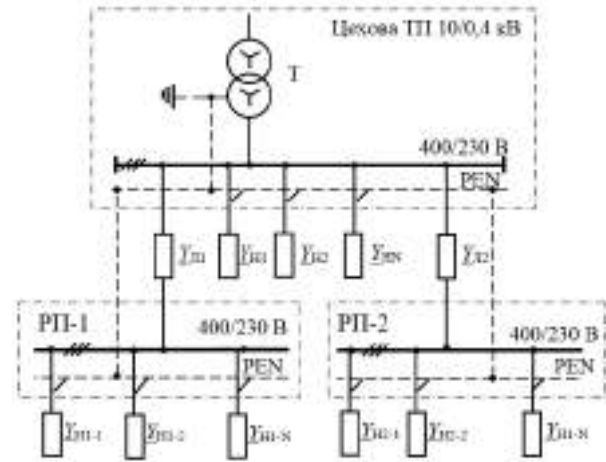


Fig. 1. Однолінійна схема чотирипровідної розподільної мережі

Наведена на fig.1 схема дає змогу провести дослідження впливу опорів фазних навантажень на показники якості електричної енергії розподільної мережі. Дослідження проводимо для випадку лінійних параметрів схеми.

Розгляд схеми (fig. 1) показує, що зазвичай електроприймачі утворюють паралельне підключення до джерела живлення, в якості якого виступають шини ТП 10/0,4 кВ або шини РП 0,4 кВ. Несиметричне навантаження створюється підключенням однофазних електроприймачів на фазу або лінійну напругу трифазної розподільної мережі.

Для проведення дослідження вихідну схему зводимо до розрахункової схеми (fig. 2) шляхом розрахунку еквівалентних провідностей фазних навантажень джерела живлення за відомими співвідношеннями. Наприклад, еквівалентна провідність навантаження фази А розраховується як алгебраїчна сума провідностей електроприймачів цієї фази:

$$Y_a = \sum_{i=1}^n Y_{ai} \tag{1}$$

де n – кількість електроприймачів фази А;  
 $Y_{ai}$  – комплексна провідність i-го електроприймача.

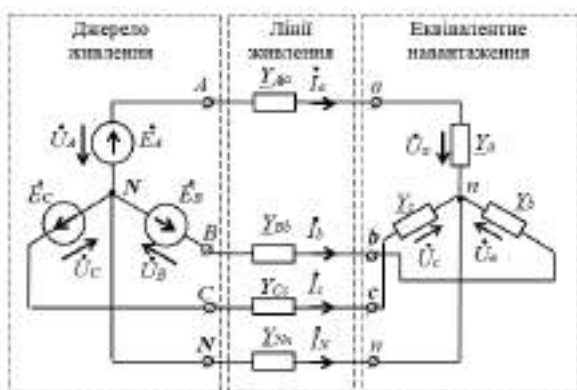


Fig. 2. Розрахункова схема моделі розподільної мережі

У випадку послідовного з'єднання електроспоживачів варто скористатися аналогічною формулою для послідовного з'єднання опорів з подальшим розрахунком еквівалентної провідності.

Залежно від конфігурації схеми досліджуваної розподільної мережі, у якості джерела живлення можна розглядати шини 400 В РП (розрахунок для локальної ділянки мережі), або шини 400 В ТП 10/0,4 кВ (розрахунок для мережі в цілому).

З урахуванням прийнятого припущення про лінійний характер параметрів електричного кола скористаємося методом симетричних складових [2, 13, 14], який дозволяє для нашої розрахункової схеми (fig. 2) отримати співвідношення для дослідження впливу фазних навантажень на показники якості електричної енергії.

#### IV. ПОРЯДОК РОЗРАХУНКУ

Вихідними даними для розрахунку є: електрорушійні сили фаз джерела живлення  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ ; провідності фаз та нейтралі лінії живлення  $\underline{Y}_{Aa}, \underline{Y}_{Bb}, \underline{Y}_{Cc}, \underline{Y}_{Nn}$ ; еквівалентні провідності фаз електроспоживача  $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ . Режим схеми розраховуємо за відомими співвідношеннями [13, 14] у такій послідовності.

Напруга зміщення нейтралі:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_{a\Sigma} + \dot{E}_B \underline{Y}_{b\Sigma} + \dot{E}_C \underline{Y}_{c\Sigma}}{\underline{Y}_{a\Sigma} + \underline{Y}_{b\Sigma} + \underline{Y}_{c\Sigma} + \underline{Y}_{Nn}} \quad (2)$$

Струм у фазі  $a$  електроспоживача:

$$\dot{I}_a = (\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}) (\underline{Y}_{Aa} + \underline{Y}_a) \quad (3)$$

Струми у фазах  $b$  і  $c$  розраховуються за аналогічними формулами. Напруги на фазах споживача  $\dot{U}_a, \dot{U}_b$  і  $\dot{U}_c$  розраховуємо із співвідношень закону Ома.

Далі розраховуються симетричні складові [5, 13, 14] напруги:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a \dot{U}_b + a^2 \dot{U}_c), \quad (4)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a^2 \dot{U}_b + a \dot{U}_c), \quad (5)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c), \quad (6)$$

де  $a = e^{j120^\circ}$  – оператор повороту.

З урахуванням припущення про лінійність параметрів системи можна вважати, що  $U_{1(1)} = U_1$ ,  $U_{2(1)} = U_2$ ,  $U_{0(1)} = U_0$ . Тоді коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною  $K_{2U}$  і за нульовою  $K_{0U}$  послідовностями можемо розрахувати за формулами:

$$K_{2U} = U_2/U_1; \quad (7)$$

$$K_{0U} = \sqrt{3}U_0/U_1. \quad (8)$$

Усталене відхилення напруги на фазі електроприймача  $\delta U_\phi$  розраховуємо за відомим співвідношенням як різницю між діючим значенням напруги на фазі електроприймача  $U_\phi$  і номінальним значенням напруги  $U_n$ :

$$\delta U_\phi = \frac{U_\phi - U_n}{U_n} 100\% \quad (9)$$

Наведені співвідношення дозволяють дослідити залежності показників якості електричної енергії (усталеного відхилення напруги, коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями) від фазних опорів електроприймачів.

#### V. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Розрахунки досліджуваних залежностей виконані з використанням розробленої комп'ютерної програми «Несиметрія навантаження». Програма написана мовою програмування C# з використанням технології Microsoft .NET. Розрахунок виконується для моделі (fig. 2) за наведеними вище співвідношеннями з урахуванням загальновідомих співвідношень щодо математичних операцій з комплексними числами.

У програмі як вхідні дані для розрахунку задаються активні і реактивні складові електрорушійних сил фаз джерела живлення, активні і реактивні складові опорів фаз і нейтралі лінії живлення, активні і реактивні складові фаз навантаження. Окремо задається шаг зміни опору (активного чи реактивного) фази навантаження. У програмі прийнято 10 шагів зміни опору фази навантаження.

Правильність розрахунків перевірена покроковим тестуванням у ручному режимі.

На fig. 3 – fig. 5 наведено графіки розрахункових залежностей показників якості електричної енергії від зміни опору навантаження фази А (активного, індуктивного, ємнісного) для наступних вихідних даних: номінальна потужність трансформатора  $S_{н.тр} = 630$  кВА; довжина кабелю лінії живлення – 100 м; переріз кабелю

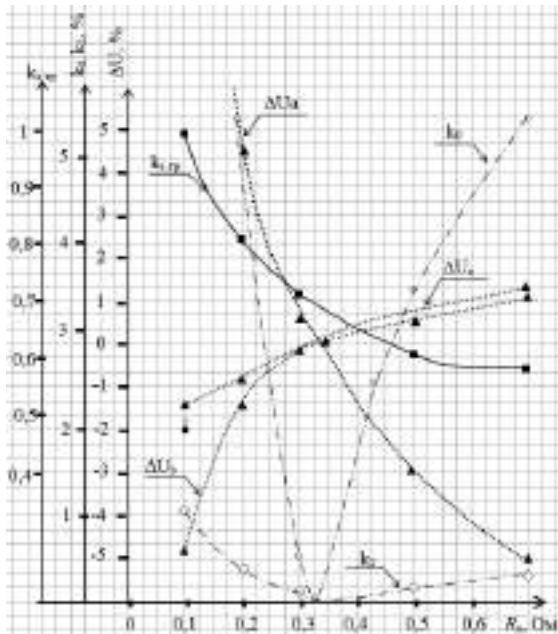


Fig. 3. Залежність показників якості від  $R_a$   
 $k_{3,тр}$  – коефіцієнт навантаження трансформатора;  
 $k_0, k_2$  – коефіцієнти несиметрії за нульовою і зворотною послідовностями відповідно;  $\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c$  – падіння напруги на фазах  $a, b, c$  електроприймача відповідно

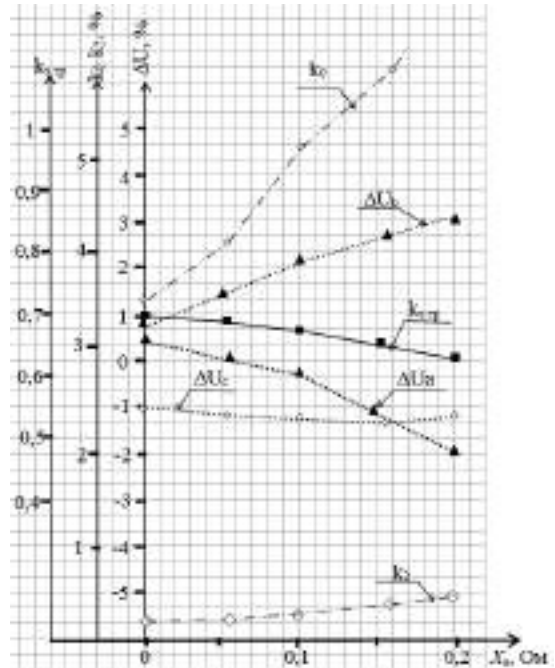


Fig. 5. Залежність показників якості від ємнісного  $X_c$

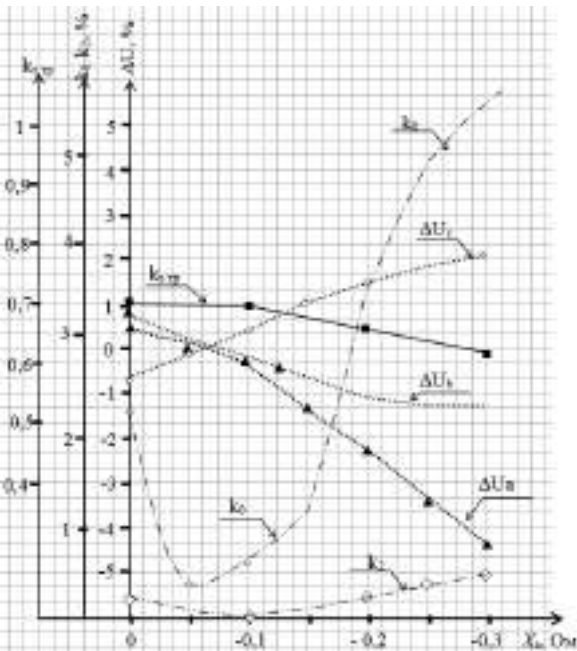


Fig. 4. Залежність показників якості від індуктивного  $X_l$

Аналіз отриманих залежностей показує, що зміна фазного навантаження (активного чи реактивного), у межах нормально припустимого усталеного відхилення напруги ( $\pm 5\%$ ), призводить до виходу коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю за межі гранично припустимих нормованих значень ( $\pm 4\%$ ), а коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю не перевищує гранично припустимі нормовані значення.

Таким чином, під час виконання проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж доцільно виконати оцінку меж можливих змін опорів фазних навантажень з подальшим розрахунком очікуваних значень коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю. І, у випадку виходу його значень за нормативно припустимі, передбачати застосування пристроїв симетрування напруги з метою зменшення втрат від струмів нульової послідовності.

## VI. ВИСНОВКИ

На підставі аналізу існуючих методів розрахунку несиметричних режимів трифазних розподільних мереж складено розрахункову модель і математичні співвідношення, які описують залежності параметрів якості електричної енергії (усталеного відхилення напруги, коефіцієнтів несиметрії за зворотною і нульовою послідовностями) від опору фазного навантаження (активної і реактивної складових).

Розроблено комп'ютерну програму «Несиметрія навантаження», яка дозволяє дослідити залежність показників якості від значень опорів фазного навантаження.

Проведено дослідження впливу опору фазного навантаження на показники якості електричної енергії, встановлені межі зміни значень опору, за якими показники якості електричної енергії перевершують величини нормативних припустимих значень.

Наведена методика і програма «Несиметрія навантаження» можуть використовуватись на етапі проведення проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж міст і промислових підприємств.

- [1] Сариев Б. И. Влияние несимметрии напряжения на потери электроэнергии в системах электроснабжения [Текст] / Б. И. Сариев, З. Э. Абдиева, Р. Б. Куржумбаева, Х. Т. Касмамбетов // Автоматика и программная инженерия. – 2017, № 2(20). – С. 46–51.
- [2] Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] / B. de Metz-Noblat // Cahier Technique Schneider Electric n° 18. – Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/CT018/> (date of the application: 10.04.2018). – Header from the screen.
- [3] Попов А. Н. Повышение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий за счет уменьшения несимметрии фазных напряжений [Электронный ресурс] / А. Н. Попов // Электронный физико-технический журнал. – 2011, Т. 6. – С. 26–36. – Режим доступа: <https://eftj.secna.ru/vol6/110603.pdf> (дата обращения: 10.04.2018). – Название с экрана.
- [4] Ягуп К. В. Моделювання несиметричної системи електропостачання із використанням оптимізації для визначення параметрів симетруючого пристрою [Текст] / К. В. Ягуп // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2016. – Вип. 161. – С. 130–138.
- [5] Сиротин Ю. А. Ортогональные составляющие трехфазного тока при асимметричной активно-реактивной нагрузке в четырехпроводной сети [Текст] / Ю. А. Сиротин // Электротехника і електромеханіка. – 2016, № 3. – С. 62–66.
- [6] Дед А. В. Математическое моделирование расчета потерь мощности в трехфазной сети при несимметрии нагрузки [Текст] / А. В. Дед // Омский научный вестник. – 2016, № 5(149). – С. 98–101.
- [7] Sunderland K. A correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks [Текст] / K. Sunderland, M. Coppo, M. Conlon, R. Turri // Electric Power Systems Research, 132. – 2017. – P. 30–38.
- [8] Bahrevar P. Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network [Текст] / P. Bahrevar, M. Esmaili // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9(S1). – P. 1–7.
- [9] Panich S. Impact of plug-in electric vehicles on voltage unbalance in distribution systems [Текст] / S. Panich, J. G. Singh // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2015. – Vol. 7, No. 3. – P. 76–93.
- [10] Murty V. V. S. N. Capacitor Allocation in Unbalanced Distribution System under Unbalances and Loading Conditions [Текст] / V. V. S. N. Murty, A. Kumar // 4th International Conference on Advances in Energy Research. – 2013. – P. 47–74.
- [11] Бурбело М. Й. Керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень у розподільній електричній мережі [Текст] / М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Наукові праці ВНТУ. – 2012, № 2. – С. 1–5.
- [12] Janyavula, D. Unbalanced Variable Nonlinear Load Compensation Using Multiple Shunt Active Filters [Текст] / D. Janyavula, S. N. Saxena // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 5, No. 5. – P. 896–904.
- [13] Основы теории цепей: учебник для вузов [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд. – Москва, «Энергия», 1989. – 528 с.
- [14] Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії : підручник [Текст] / В. М. Охріменко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.
- [1] Sariev B. I., Abdiyeva Z. E., Kurgumbaeva R. B., Kosmambetov H. T. (2017). Influence of voltage unbalance on electric power losses in power supply systems // Automation and software engineering, № 2(20), 46–51.
- [2] Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] // Cahier Technique Schneider Electric n° 18. – Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/CT018/> (date of the application: 10.04.2018). – Header from the screen.
- [3] Popov A. N. (2011). Improvement of quality of electricity in industrial networks by reducing asymmetry of phase voltages [Electronic resource] // Electronic journal of physics and technology, Vol. 6, 26–36. – Access mode: <https://eftj.secna.ru/vol6/110603.pdf> (Date of address 10.04.2018). – Title from screen.
- [4] Yagup K. V. (2016). Modeling of unbalanced power system with optimization to determine parameters of symmetric devices // Collection of scientific works of Ukrainian state University of railway transport, Vol. 161, 130–138.
- [5] Sirotni Yu. A. (2016). Orthogonal components of three-phase current at asymmetric actively-reactive load in four-wire network // Electrical engineering and electromechanics, № 3, 62–66.
- [6] Ded A.V. (2016). Mathematical modeling of power loss calculation in three-phase network under load asymmetry // Omsk scientific bulletin, № 5(149), 98–101.
- [7] Sunderland, K., Coppo, M., Conlon, M., Turri, R. (2017). A correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks. Electric Power Systems Research, 132, 30–38.
- [8] Bahrevar, P., Esmaili, M. (2016). Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network. Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(S1), 1–7.
- [9] Panich, S., Singh, J. G. (2015). Impact of plug-in electric vehicles on voltage unbalance in distribution systems. International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 7, No. 3, 76–93.
- [10] Murty, V.V.S.N., Kumar, A. (2013). Capacitor Allocation in Unbalanced Distribution System under Unbalances and Loading Conditions. 4th International Conference on Advances in Energy Research, 47–74.
- [11] Burbelo M. Y., Devyatko M. V., Voytyuk Yu. P. (2012). Management of symmetric device in case of multiple asymmetry of loads in distributed electric networks // Scientific works of VNTU, № 2, 1–5.
- [13] Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. (1989). Fundamentals of circuit theory: textbook for universities /– 5th ed., revised. – Moscow, "Energy", – 528 p.
- [14] Okhrimenko V. M. (2019). Consumers of electric energy : tutorial. – Kharkiv : O. M. Beketov NUUE, – 286 p.



# Study of non-symmetric modes of four-wire distributed networks

V. Okhrimenko

Department of power supply and city electricity consumption

O. M. Beketov NUUE

Kharkiv, Ukraine

monviktor@ukr.net

M. Zbitnieva

Kharkiv Humanitarian Pedagogical Academy

Kharkiv, Ukraine

V. Perepecheny

Department of power supply and city electricity consumption

O. M. Beketov NUUE

Kharkiv, Ukraine

jahoma@i.ua

*Abstract. It is proposed method of assessment of state of asymmetry of four-wire distributed network to establish need for means of symmetry at the stage of design calculations of power supply systems. Method provides for transformation of four-wire distributed network circuit to calculated model as part of power source, power line and equivalent loads of phase of electric consumer. Mode of network is described by equations of method of symmetric components and theory of complex numbers. Given mathematical relations allow to carry out calculations of asymmetric modes of four-wire distributed network. Initial data for calculation are complex voltages of power source, complex supports of power lines and loads of phases of consumer of electric energy.*

*It is developed computer program "Load asymmetry", which is based on Microsoft .NET technology, and ensures accomplishment for analysis of influence of changes in asymmetry of phase loads and estimation of admissible values of phase load resistances. Program is written in C# programming language. It is specified data of four-wire distributed network model, step and range of phase load resistance change.*

*Results of study of influence of active, inductive and capacitive phase load on steady-state phase voltage deviation, voltage asymmetry coefficients for inverse and zero sequences are presented. It is shown that in case of change in phase load (active or reactive) within normally permissible steady-state voltage deviation ( $\pm 5\%$ ), coefficient of asymmetry in reverse sequence does not exceed limits of maximum permissible normalized values ( $\pm 4\%$ ), and coefficient of asymmetry in zero sequence significantly exceeds these values. Distributed network requires installation of voltage symmetry devices in order to reduce values of zero sequence currents in this case in this case.*

*Method of estimation of range of changes in values of phase loads that do not lead to output of electrical energy quality indicators for normalized values, and computer program "Load asymmetry" can be used in process of realization of designed calculations of four-wire distribution networks of cities and industrial enterprises.*

**Keywords:** *four-wire distributed network, asymmetric mode, phase load resistance, quality of electrical energy.*

# Математичне моделювання нелінійного електричного кола

*Рожков Петро Павлович*

*Факультет електропостачання і освітлення міст  
ХНУМГ імені О.М. Бекетова  
Харків, Україна  
e-mail [rozhkov-pp@ukr.net](mailto:rozhkov-pp@ukr.net)*

*Рожкова Світлана Едуардівна*

*Автомобільний факультет  
ХНАДУ  
Харків, Україна  
e-mail [rozhkova.se@gmail.com](mailto:rozhkova.se@gmail.com)*

**Анотація** Запропоновано використовувати метод припасовування для розрахунку струму в послідовному нелінійному електричному колі змінного струму. На першому етапі знаходиться аналітичне розв'язання неоднорідного лінійного диференційного рівняння другого порядку з урахуванням початкових умов для послідовного електричного кола, яке складається з активного опору, індуктивності та ємності. Права частина рівняння представлена гармонійною функцією електрорушійної сили з початковим фазним зсувом. В результаті розв'язання диференційного рівняння за допомогою перетворення Лапласа отримані аналітичні функції залежності заряду, струму та другої похідної заряду від часу для дійсних, кратних та комплексних коренів характеристичного рівняння. Використання методу припасовування дозволяє проводити математичне моделювання процесів в електричному колі з нелінійною характеристикою будь-якого його елемента. На другому етапі розглянуто випадок, коли у якості нелінійного елемента електричного кола використовується котушка з феромагнітним осердям, а активний опір та ємність є лінійними елементами. Феромагнітне осердя суттєво впливає на індуктивність кола і робить його залежним від струму, що тече в колі. Вихідні дані для кривої намагнічування, що характеризує залежність магнітних властивостей матеріалу осердя від струму, представлені як сукупність експериментальних точок. Для отримання аналітичної залежності проведена кубічна сплайн-інтерполяція експериментальних даних. Для аналізу залежності форми та величини струму від виду феромагнетика в якості осердя розглянуті сталь 3411 та сталь 1512. Для аналізу впливу активного опору на форму та величину струму в колі розрахунки проводилися для двох значень активного опору, які розрізняються у десять разів. Отримані графіки залежності струмів від часу для різних феромагнетиків осердя та однакових значень активного опору мають подібну форму, але величини струмів після закінчення перехідного процесу відрізняються іноді в два рази. Найбільший вплив на форму та величину струму справляє величина опору. Форма струму зі збільшенням опору починає наближатися до гармонійної. Це відбувається в наслідок зменшення струму і зменшення варіації індуктивності кола.

**Ключові слова** нелінійне електричне коло, диференційне рівняння, початкові умови, метод припасовування, феромагнітне осердя

## I. ВСТУП

Теорія лінійних електричних кіл досягла великих успіхів у вирішенні практичних задач сучасної електроенергетики. Фактично всі математичні моделі

процесів та об'єктів, що вона пропонує, знайшли свої використання у генерації, передачі та розподіленні електричної енергії. Але існує значна частина електричних процесів та об'єктів, що описуються нелінійними співвідношеннями. До таких об'єктів належать електричні кола, що мають у своєму складі котушки з феромагнітним осердям. Ферорезонансні режими, що виникають в електричних мережах високої напруги в результаті несприятливого поєднання схеми з'єднань та відповідних енергетичних процесів, заслуговують на особливу увагу, оскільки починаються неочікувано, розвиваються стрімко та супроводжуються перенапругами та надструмами. Виникає нагальна проблема у побудові математичної моделі нелінійного електричного кола, яка дозволяє отримати характеристики процесу в аналітичному вигляді [1].

## II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розвиток теорії і створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах – це досить актуальний науковий напрям, що активно розвивається в Україні [2].

Дослідження нелінійних RLC-кіл за допомогою аналітичних методів мають певні особливості [3]. Наприклад, вибір математичного методу для аналізу процесів у колі залежить від вигляду залежності нелінійного елемента. Застосування в рівнянні апроксимаційної залежності нелінійної характеристики елемента RLC-кола у вигляді дрібно-раціональних, логарифмічних, гіперболічних та інших складних функцій вимагають особливого підбору математичного методу для практичного використання. Значною мірою вибір математичного методу обумовлюється виглядом наближеного розв'язку, який є відображенням фізичних властивостей досліджуваної системи.

До того ж, оскільки використання аналітичних методів для аналізу процесів у нелінійних електричних колах пов'язане з великою трудомісткістю, громіздкістю обчислень та складністю розв'язання нелінійних диференційних рівнянь, при ускладненні нелінійних кіл виникає необхідність використання нових математичних методів, можливих для практичного застосування.

Наприклад, у роботі [2] були запропоновані нові аналітичні підходи до аналізу нелінійних електричних кіл, а саме: було запропоновано новий оригінальний метод розрахунку процесів у слабо нелінійних коливальних колах з втратами, що ґрунтується на

розкладанні розв'язків слабо нелінійної системи по розв'язках незбуреної (породжуючої) системи, за допомогою якого було проведено розрахунки кіл з різними нелінійними елементами.

Було проаналізовано коло розряду конденсатора на лінійний опір та індуктивність з феромагнітним осердям. З урахуванням нелінійності потокозчеплення таке коло описується рівнянням

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L_0} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{L_0 C} = \varepsilon \frac{3}{L_0} \left( \frac{dq}{dt} \right)^2 \frac{d^2 q}{dt^2},$$

де  $q$  – величина заряду на конденсаторі;  $R$  – опір навантаження;  $C$  – ємність конденсатора;  $L_0$  – індуктивність, що відповідає лінійному випадку;  $\varepsilon$  – малий параметр.

Розв'язання цього рівняння шукають у класі експоненціальних та тригонометричних функцій.

У роботі [14] розглядалася ділянка електричної мережі, що представлена на fig. 1. Для наведеної схеми рівняння балансу напруги має вигляд

$$u_k + u_c = u.$$

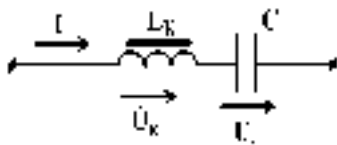


Fig. 1. Послідовне включення реактивних елементів у випадку поздовжньої ємнісної компенсації

Оскільки  $u_k = \frac{d\psi}{dt}$ ;  $u_c = \frac{q}{C}$ , а миттєві значення прикладеної напруги гармонійне, то рівняння буде мати вигляд

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{q}{C} = U_{max} \sin \omega t.$$

Розв'язання цього рівняння шукають у класі тригонометричних функцій. З приведених прикладів видно, що розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь шукають для окремих випадків, загального рішення не існує.

Виходом з цієї ситуації вважається чисельне розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь електричного кола, але в цьому разі ми не отримуємо аналітичної функції, а отримуємо сукупність дискретних значень.

Виходячи з цього, пропонується використовувати для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь метод припасовування, який дозволяє, на відміну від чисельних методів, отримати аналітичне рішення для будь-якого виду нелінійності елементів електричного кола.

### III. РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО РІВНЯННЯ ЗАМКНЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Розглянемо послідовне замкнуте електричне коло, наведене на fig. 2.

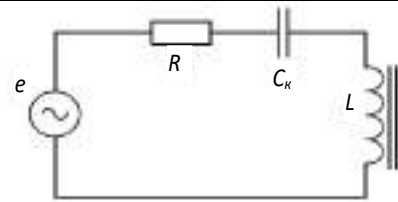


Fig. 2. Послідовне замкнуте електричне коло

Напишемо диференційне рівняння для контуру зображеного на fig. 2

$$L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C_k} = e(t), \quad (1.1)$$

де  $q(t)$  – заряд.

У якості моделі ЕРС прийемо формулу

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) = E_m (\cos \varphi \cdot \sin \omega t + \sin \varphi \cdot \cos \omega t).$$

Введемо позначення:

$$\alpha = E_m \cdot \cos \varphi;$$

$$\beta = E_m \cdot \sin \varphi.$$

Після підстановки отримаємо наступне рівняння

$$L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C_k} = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t. \quad (1.2)$$

Будемо вважати, що початкові умови не дорівнюють 0.

$$q(0) = q_0;$$

$$q'(0) = q'_0.$$

Для розв'язання рівняння (1.2) будемо використовувати операторний метод [5].

Отримаємо рішення диференційного рівняння (1.2) для дійсних різних коренів  $r_1, r_2$  характеристичного рівняння

$$q(t) = (Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} + C \cos \omega t + \frac{D}{\omega} \sin \omega t) / L$$

для комплексних коренів:

$$q(t) = \frac{A}{L} e^{-b_1 t} \cos a_1 t - \frac{Ab_1}{La_1} e^{-b_1 t} \sin a_1 t + \frac{B}{La_1} e^{-b_1 t} \sin a_1 t + C \cos \omega t + \frac{D}{\omega} \sin \omega t;$$

дійсних кратних коренів:

$$q(t) = \frac{A}{L} e^{r_1 t} + \frac{B}{L} e^{r_1 t} + \frac{C}{L} \cos \omega t + \frac{D}{\omega L} \sin \omega t.$$

Значення величин  $A, B, C, D, r_1, r_2, a_1, b_1$  залежать від параметрів електричного кола та початкових умов.

З отриманих рішень визначимо першу  $q'(t)$  та другу  $q''(t)$  похідні.

#### IV. РОЗРАХУНОК СТРУМУ У НЕЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ

Застосуємо метод припасовування. Будемо вважати, що на початку процесу початкові умови дорівнюють нулю та впродовж деякого дуже малого часу  $\Delta t$  параметри диференційного рівняння залишаються постійними. В результаті за отриманими формулами можна визначити  $q(\Delta t)$  та її похідні. Ці значення будемо вважати початковими умовами для наступного шагу. Параметри диференційного рівняння змінимо відповідно до вольт-амперної або вебер-амперної характеристики. Після цього проведемо розрахунки нового значення  $q(\Delta t)$  і так далі. Треба вважати на те, що час дії збурюючого впливу поступово збільшується з дискретністю  $\Delta t$ . Точність методу визначається величиною  $\Delta t$ . Таким чином, в результаті отримуємо не тільки сукупність чисел – значень функції  $q(t)$ , але і аналітичну залежність з відповідними параметрами.

Для ілюстрації пропонуваного методу розрахунку замкнутого нелінійного електричного кола визначимо струм, що тече в ньому.

Проведемо кубічну сплайн-інтерполяцію кривої намагнічування для сталі 3411 (Э310). Експериментальні точки наведені в табл. 1.

TABLE I. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТОЧКИ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ ДЛЯ СТАЛІ 3411 (Э310)

№	1	2	3	4	5
H, А/м	170	220	280	370	500
B, Тл	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
№	6	7	8	9	10
H, А/м	700	1000	2000	4000	9200
B, Тл	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9

Крива намагнічування, що побудована за результатами кубічної сплайн-інтерполяції, представлена на fig. 3.

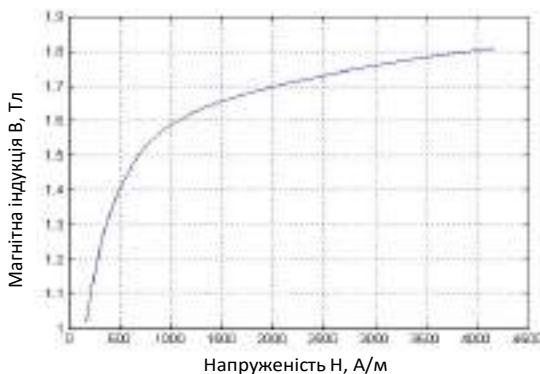


Fig. 3. Крива намагнічування сталі 3411(Э310)

Будемо розглядати випадки, коли активний опір складає  $R = 16$  Ом та  $R = 160$  Ом, а ємність дорівнює  $C = 12.67 \cdot 10^{-6}$  Ф.

За результатами розрахунків на fig. 4 представлена крива струму для випадку, коли  $R = 16$  Ом, а на fig. 5  $R = 160$  Ом.

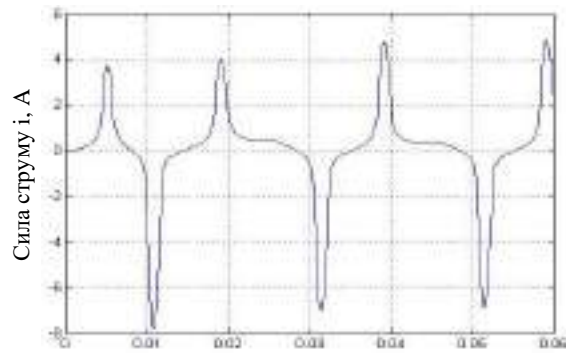


Fig. 4. Струм у колі з активним опором  $R = 16$  Ом.

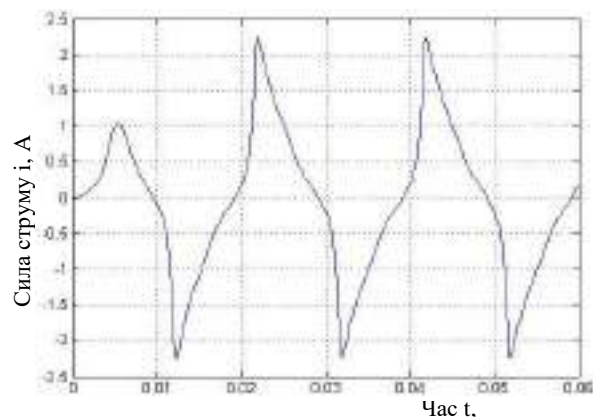


Fig. 5. Струм у колі з активним опором  $R = 160$  Ом.

Аналіз отриманих графіків показує, що форма струму, а отже і спектральний склад, суттєво залежить від величини струму. Вплив перехідного процесу, що відповідає включенню, закінчується приблизно через два періоди, для схеми з більшим активним опором це відбувається швидше.

З метою дослідження впливу феромагнетика на величину та форму струму проведемо такі ж розрахунки для сталі 1512(Э42). Експериментальні точки наведені в табл. 2. Будемо розглядати випадки, коли активний опір складає  $R = 16$  Ом та  $R = 160$  Ом, а ємність  $C = 12.67 \cdot 10^{-6}$  Ф.

TABLE II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТОЧКИ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ ДЛЯ СТАЛІ 1512(Э42)

№	1	2	3	4
H, А/м	96	114	148	192
B, Тл	0,4	0,5	0,6	0,7
№	5	6	7	8
H, А/м	254	325	414	538
B, Тл	0,8	0,9	1,0	1,1
№	9	10	11	12
H, А/м	730	1080	1940	3850
B, Тл	1,2	1,3	1,4	1,5

За результатами розрахунків на fig. 6 представлена крива струму для випадку, коли  $R = 16$  Ом, а на fig. 7  $R = 160$  Ом.

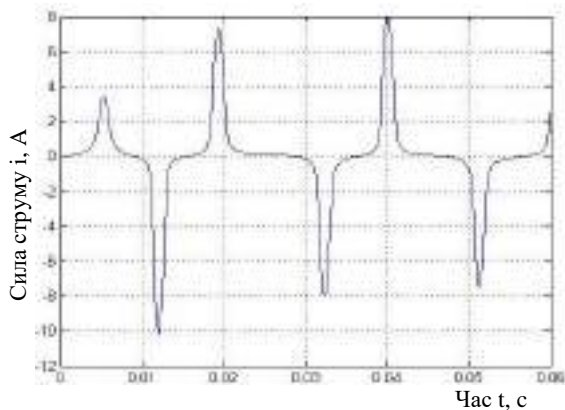


Fig. 6. Струм у колі з активним опором  $R = 16$  Ом.

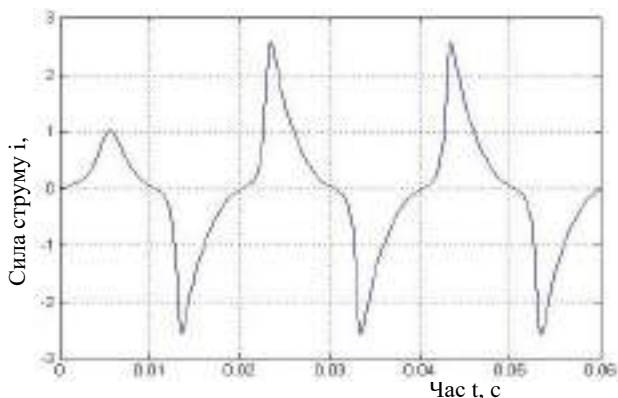


Fig. 7. Струм у колі з активним опором  $R = 160$  Ом

Аналіз отриманих графіків показує, що як і в попередніх графіках, форма струму суттєво залежить від його величини. Вплив перехідного процесу, що відповідає включенню, більш затягнутий для схеми з меншим активним опором.

#### V. ВИСНОВКИ

Проведені дослідження довели ефективність використання методу припасовування для

## Mathematical design of nonlinear electric

P. Rozhkov

O.M. Beketov National University of Urban Economy  
in Kharkiv, Ukraine

S. Rozhkova

Kharkiv National Automobile and Highway University

розрахунку нелінійних кіл. Отримані аналітичні залежності дозволяють проводити розрахунки для усіх видів нелінійних елементів електричних мереж. Розглянуті приклади доводять ефективність використання запропонованого методу для аналізу процесу виникнення ферорезонансу в послідовних електричних колах.

#### VI. ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Ганус А.И. Экспериментальное определение границ областей возможных затухающего и незатухающего феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения // Світлотехніка та електроенергетика. – 2006. - № 7-8. с. 77-85.
- [2] Шидловська Н.А., Васецкий Ю.М., Мислович М.В., Хімюк І.В. Сучасні інформаційні технології у вирішенні задач електротехніки та підвищення надійності електротехнічного обладнання // Технічна електродинаміка. -2011. - №6, - С. 55 - 70.
- [3] Шидловська Н.А., Самойленко В.Г. Про деякі задачі нелінійної електротехніки і математичні методи їх дослідження // Технічна електродинаміка. - 2008. - №5, - С. 3 - 11.
- [4] Б.Т. Кононов, Е.А. Кононова, А.А. Мушаров Феррорезонанс в электрических сетях с поперечной и продольной компенсацией потерь напряжения Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2012, випуск 1(30) - С.144 - 146.
- [5] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1986. – 544с.

Keywords a nonlinear electric circle, differential equation, initial conditions, the method of fitting, ferromagnetic core.

Abstract: It is proposed to use the method of attachment for the calculation of current in a sequential nonlinear electric circuit of an alternating current. At the first stage, the analytical solution of the second-order non-uniform linear differential equation is considered, taking into account the initial conditions for a sequential electric circuit, which consists of active resistance, inductance and capacitance. The right-hand side of the equation is represented by the harmonic function of the electromotive force with initial phase shift. As a result of the solution of the differential equation by means of the Laplace transform, was obtained analytic functions of the charge, current, and second derivative charge on time for real, multiple and complex roots of the characteristic equation. The use of the method of attachment allows us to conduct mathematical modeling of processes in an electric circuit with a nonlinear characteristic of any of its elements. In the second stage, the

case of using a reel with ferromagnetic core as a nonlinear element of the electric circuit is considered, and the active resistance and capacitance are linear elements. The ferromagnetic core significantly influences the inductance of the circle and makes it dependent on the current flowing in the circle. Output data for the magnetization curve characterizing the dependence of the magnetic properties of the core material on the current are presented as a set of experimental points. To obtain an analytic dependence, a cubic spline-interpolation of experimental data was performed. For the analysis of the dependence of the shape and value of the current on the type of ferromagnet as a core, steel 3411 and steel 1512 are considered. For the analysis of the influence of the active resistance on the form and the value of the current in the circle, calculations were made for two values of the active resistance, which differ tenfold. The obtained graphs of time-dependent currents for different core ferromagnets and the same values of active resistance have the same form, but the magnitudes of currents after the end of the transition process differ sometimes in two times. The greatest influence on the shape and magnitude of the current is the value of the resistance. The shape of the current with increasing resistance begins to approach harmonious. This is due to a decrease in the current and a decrease in the variation of the inductance of the circle.



# Стабілізоване джерело живлення для електронних систем контролю та управління

В.Ф. Рой

Факультет електропостачання і освітлення міст  
ХНУМГ імені О.М. Бекетова  
Харків, Україна

В. Грініна

Факультет електропостачання і освітлення міст  
ХНУМГ імені О.М. Бекетова  
Харків, Україна  
[viktoriagrini@gmail.com](mailto:viktoriagrini@gmail.com)

*Анотація* – На сьогоднішній день в електроенергетиці України існують і експлуатуються декілька сотень районів електричних мереж, що використовують і обслуговують розподільні мережі напругою 0,38÷110 кВ. З метою підвищення надійності та ефективності їх роботи, економічності та якості електропостачання споживачів, в останні роки час відбувається інтенсивне впровадження систем телемеханіки та обчислювальної техніки з метою створення інтегрованих автоматизованих систем контролю та управління на всіх ієрархічних рівнях побудови цих систем. Основною метою телемеханізації електричних комплексів є забезпечення можливості дистанційного вимірювання робочих параметрів електрообладнання та дистанційного управління режимами їх роботи. Данні про режими роботи обладнання повинні передаватися на диспетчерський пункт за допомогою дискретних телесигналів або аналогових сигналів, які відображають значення напруги, струмів та потужності на шинах підстанцій. Прилади збору та передачі сигналів на диспетчерський пункт а також передачі команд управління режимами роботи обладнання повинні відповідати високим вимогам надійності, безвідмовності, строку експлуатації, кібербезпеки та електромагнітної сумісності. Важливим напрямком розвитку автоматизованих систем є інтеграція автоматизованого контролю та управління окремими структурними підрозділами районних електричних мереж в єдину інтегровану систему. Ця проблема може бути успішно вирішена лише шляхом використання стандартизованих рішень з інформаційного, технічного та програмного забезпечення автоматизованої системи диспетчерського управління підприємств електричних мереж. Основними напрямками реалізації цих завдань є побудова та раціональне використання ієрархічної системи моделей планування, ремонту та експлуатації електричних мереж та оперативне управління їх режимами, підвищення ефективності оперативно-диспетчерського управління розподільними електричними мережами, автоматизації збору, обробки та чіткого відображення отриманої інформації щодо режимів роботи обладнання. Ці науково-технічні вимоги, що стосуються проблем створення багаторівневих сучасних автоматизованих систем управління підприємствами електроенергетики ґрунтуються на основі галузевих методик та матеріалів, державних стандартів, враховуючі сучасні досягнення вітчизняної та зарубіжної науки і техніки в галузі електроенергетики. Реалізація цього напрямку дасть змогу забезпечити розвиток і впровадження нової техніки, оптимізації технологічних процесів і режимів роботи електроенергетичного обладнання і електричних

мереж, раціонального використання матеріалів і підвищення ефективності виробничо-господарської діяльності. Важливим фактором щодо забезпечення вищезазначених вимог надійності, безвідмовності та електромагнітної сумісності усіх автоматизованих систем контролю та управління, безумовної сумісності їх з живильною мережею, є використання високоякісних ефективних джерел живлення численних електронних приладів автоматизованої системи.

Запропоновано універсальне джерело живлення з корекцією коефіцієнта потужності, яке придатне в якості ефективного вторинного джерела живлення електронних систем різноманітного призначення стабілізованою напругою різної величини і знаку, що забезпечує високу надійність та якість їх роботи, а також електромагнітну сумісність з живильною мережею. Це досягається застосуванням в схемі джерела живлення активного коректора коефіцієнта потужності, який, на відміну від «пасивних» коректорів, що масово використовуються в недорогих джерелах живлення електронної апаратури і засновані на компенсації зсуву фаз між струмом і напругою живлячої мережі ємнісними і індуктивними елементами, - є набагато ефективнішими і забезпечує високе – до 0,98 значення коефіцієнта потужності а також високу якість та ефективне використання електричної енергії. Стабілізація вихідних напруг джерела живлення здійснюється за рахунок порівняння сигналу з датчика вихідної напруги із сигналом датчика опорної напруги і, після підсилювача сигналу розбалансу, регулює момент ввімкнення або вимкнення електронних ключів мостової схеми інвертора до моменту досягнення напругою навантаження номінальної величини.

За рахунок застосування в схемі джерела мостової інвертора і вихідного трансформатора досягається збільшення ефективної потужності джерела живлення майже удвічі порівняно з аналогами а також можливість отримати вихідні напруги різної величини і знаку. В приладі відсутній гальванічний зв'язок вихідних робочих напруг з мережею живлення гарантує повну безпеку персоналу при експлуатації даного пристрою а також забезпечує електромагнітну сумісність з живильною мережею.

*Ключові слова* - стабілізоване джерело, коректор коефіцієнта потужності, мостова схема інвертора, датчик вихідної напруги, гальванічний зв'язок, електромагнітна сумісність, мікропроцесорні системи контролю та управління, енергоекономічність.

## I. ВСТУП

Сучасні електроенергетичні комплекси містять велику кількість різноманітних електронних систем керування технологічними процесами, контролю режимів роботи та захисту від впливу зовнішніх негативних факторів. Безперерйну та якісну роботу таких систем повинні забезпечувати високоякісні енергоекономічні системи живлення та їх електромагнітна сумісність з енергетичним обладнанням. Ефективним засобом підвищення якості електроенергії споживаною різноманітною електронною апаратурою, що використовується в системах енергозабезпечення, є використання стабілізованих джерел живлення з використанням коректорів коефіцієнта потужності. Широкого застосування набули відносно недорогі джерела живлення з так званими «пасивними» коректорами коефіцієнта потужності електричної енергії [1,2,3] які засновані на компенсації зсуву фаз між струмом та напругою живлячої мережі шляхом ввімкненням спеціальних емнісних та індуктивних елементів. Це дозволяє покращити ефективність використання електричної енергії електричними апаратами за рахунок деякого збільшення коефіцієнта потужності. Але в цілому, такі джерела з пасивними коректорами коефіцієнта потужності мають невелику ефективність, тому їх застосовують лише в пристроях з переважно індуктивною складовою навантаження: електричних машинах, індуктивних баластах розрядних лампах освітлювальних установок та ін., оскільки їх ефективність при інших типах навантаження досить мала.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В останній час набувають широкого застосування пристрої живлення з електронними коректорами коефіцієнту потужності електричної енергії [4,5,6]. Такі пристрої зазвичай містять діодний міст, до якого приєднані датчик вихідної напруги моста напруга з якого подається до входу підсилювача сигналу розбалансу. Схема містить також датчик струму приєднаний до іншого входу діодного мосту через електронний ключ. До другого входу підсилювача сигналу розбалансу приєднаний датчик опорної напруги, один з входів якого приєднаний до датчика вихідної напруги мосту. Як свідчить досвід експлуатації такої схеми приладу з коректором коефіцієнта потужності електричної енергії в системах живлення електронної апаратури, суттєвим недоліком такого пристрою є недостатня вихідна потужність, висока одно полярна вихідна напруга та наявність безпосереднього гальванічного зв'язку вихідної стабілізованої напруги з мережею живлення, що є вкрай небезпечним для користувачів.

## III. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Задачею даної розробки було удосконалення схеми стабілізованого джерела живлення з електронним коректором коефіцієнта потужності електричної енергії з метою покращення його енергоекономічних показників, збільшення вихідної потужності та позбавлення гальванічного зв'язку з мережею живлення. Це було досягнуто за рахунок введення в

існуючу схему декілька функціональних елементів: мостового інвертора, вихідного трансформатора та стартового генератора і двох схем спів падіння. І це дало змогу майже удвічі підвищити ефективну потужності джерела порівняно з базовими зразками. Крім того додатково стало можливим отримати одночасно декілька стабілізованих напруг різної величини і полярності, а також повністю виключити гальванічний зв'язок вихідної робочої напруги з напругою мережі живлення.

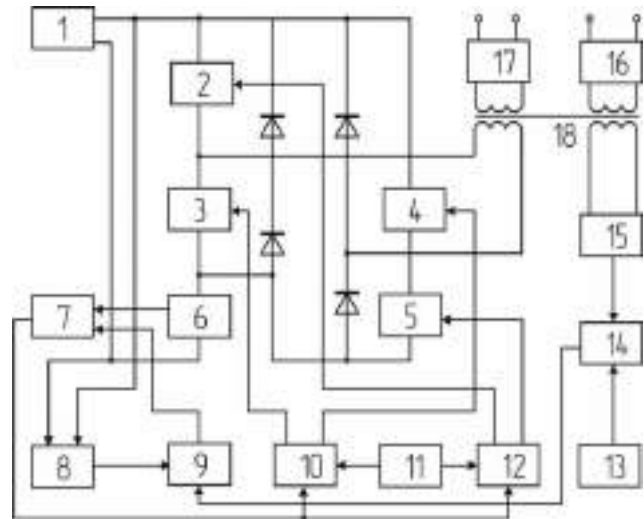


Fig. 1. Блок-схема стабілізованого джерела живлення.

Схема запропонованого пристрою з електронним коректором коефіцієнта потужності (рис. 1) додатково містить діодний міст 1, до якого приєднані датчик вихідної напруги моста та мостовий інвертор, що складається з чотирьох електронних ключів 2,3,4,5 з захисними діодами. До виходу інвертора приєднано датчик струму 6, з'єднаний з входом схеми порівняння по струму 7, з виходів якої сигнал подається на дві схеми співпадіння 10 і 12. Датчик вихідної напруги джерела живлення 15 приєднаний до входу підсилювача сигналу розбалансу 14, до другого входу якого приєднаний датчик опорної напруги 13. Вихід підсилювача сигналу розбалансу 14 з'єднано з множителем напруги 9, вихід якого з'єднано з схемою порівняння по струму 7. Первинна обмотка вихідного трансформатора 18 підключена до діагоналей мостового інвертора. З виходів кіп-реле 11 сигнал подається до входів двох схем співпадіння 10 та 12. Виходи схем співпадіння приєднані до входів електронних ключів мостового інвертора 2,3,4,5. Двополярні випрямлячі схеми 16...17, приєднані до вторинних обмоток трансформатора 1 8, до виходів яких приєднуються навантаження.

За рахунок застосування мостової схеми інвертора, вихідного трансформатора, кіп-реле та двох схем порівняння досягається збільшення ефективної потужності джерела живлення майже у двічі, причому в схемі відсутній гальванічний зв'язок вихідних напруг з живлячою мережею. Пристрій дозволяє отримувати декілька стабілізованих вихідних напруг різної величини і полярності та забезпечувати електромагнітну сумісність з живлячою мережею.



На рисунку наведена принципова функціональна запропонованого пристрою. Робота пристрою відбувається наступним чином. При ввімкненні напруги мережі випрямлена напруга з виходу діодного моста 1 подається на діагональ мостової схеми інвертора і при одночасній подачі керуючих сигналів до входу електронних ключів 2-5 або 3-4 (по черзі) на датчику струму 6 з'являється сигнал, пропорційний  $U(t) \cdot e^{-\frac{t}{Rt}}$ , де  $U(t)$  - вихідна напруга діодного мосту,  $L$  - індуктивність первинної обмотки вихідного трансформатора,  $R$  — еквівалентний опір навантаження.

Після досягнення амплітудою сигналу з датчика струму 6 рівня, що задається датчиком вихідної напруги 15 (з корекцією її блоком множника напруги 9 та підсилювача сигналів розбалансу 14) вимикається електронний ключ 5 і одночасно на виході інвертора з'являється сигнал запуску електронного ключа 6. Але запуск цього ключа відтермінується на деякий час  $\Delta t$  за рахунок роботи кіп-реле 11 та схеми співпадіння 12. Аналогічно після досягнення амплітудою сигналу з датчика струму 6 нового рівня вихідної напруги з блоку 15 з'являється сигнал запуску на схемі порівняння по струму 7, але запуск електронного ключа 5 також відбувається з запізненням на деякий час  $\Delta t$  за рахунок кіп-реле 11 та схеми співпадіння 10.

Після досягнення амплітудою сигналу з датчика струму 6 рівня, який виробляється в блоку порівняння по струму 7, який пропорційний  $U(t)$ , відбувається відключення одної пари електронних ключів мостового інвертора до моменту включення іншої пари електронних ключів.

При цьому напруга на первинній обмотці трансформатора являє собою прямокутні імпульси із сквапністю, яка залежить від фази мережевої напруги напругою  $2U(t)$ , або «0», в залежності від того, ввімкнені або вимкнені електронні ключі інвертора. В моменти відключення електронних ключів 2÷5 або 3÷4 надлишок електричної енергії повертається до живильної мережі через зворотні діоди. Кожна пара електронних ключів 2÷5 перемикається з періодом  $T$ , що значно менше за період мережевої напруги. При цьому періодом  $\Gamma$ , що значно менше за період мережевої напруги. При цьому середня складова живильного струму близька по формі до мережевої напруги (синусоїди), чим забезпечується високе значення коефіцієнта потужності.

Стабілізація вихідної напруги коректора коефіцієнта потужності здійснюється за рахунок порівняння сигналу з датчика вихідної напруги

джерела 15 із сигналом датчика опорної напруги 13, різниця яких з виходу підсилювача сигналу розбалансу 14 через множник напруги 9 регулює момент ввімкнення та вимкнення електронних ключів 2÷5 мостової схеми інвертора до досягнення напругою навантаження номінальної величини. Потрібний рівень фільтрації вихідних напруг на виході двохполярних випрямлячів вихідної напруги 16÷17 забезпечується відповідною величиною ємностей фільтра.

#### IV. ВИСНОВКИ

Таким чином розроблений пристрій може використовуватись в якості ефективного вторинного джерела живлення електронної апаратури різноманітного призначення стабілізованою напругою різної величини і полярності, що забезпечує високе (до 0,98) значення коефіцієнта потужності а також високу якість та ефективність використання електричної енергії, електромагнітну сумісність споживачів з живлячою мережею, підвищення удвічі, потужності даного пристрою в порівнянні з існуючими зразками, а також повну відсутність гальванічного зв'язку вихідних робочих напруг з мережею живлення, що гарантує безпеку споживачів при експлуатації пристрою. Технічним результатом є підвищення коефіцієнту потужності джерела, можливість отримання декількох стабілізованих напруг різної величин і полярності та електромагнітна сумісність з мережею живлення.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. с. СССР №1721753. H02M 3/335. Бюл. №11. 1992 г.
- [2] Коректор коефіцієнта потужності. Патент України № 98721 від 12.05.2015. Бюл. №9.
- [3] Стабілізоване джерело напруги. Патент України № 98834 від 12.05.2015 Бюл. №9.
- [4] Семенов Б.Ю. Силовая электроника. - \1: Энергия. 2002.- 210 с.
- [5] Борисов В.П. и др. Стабилизатор напряжения с переключающими регулируемым элементами /В.И.Борисов. Б.Н.Иванчук И.И.Колосков. - М.- Энергоатомиздат.-1986.- 81 с.
- [6] Здорок Д.Г. Выпрямительные устройства стабилизированного напряжения. М.- Энергоатомиздат.- 1988.-142 с.
- [7] Маловзоров В.П. и др. /Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения /В.П.Маловзоров. А.К.Мусомиц. - М - Энергоатомиздат.- 1996.- 246 с.
- [8] Поскребка А.А. Бесконтактные коммутационные и регулирующие полупроводниковые устройства.//VI.— Энергия,-1989.- 362 с.

## Stable power supply for electronic control and control systems

V. Roy

Faculty of power supply and lighting of cities,  
O.M. Beketov National University of Urban  
Economy in Kharkiv

V. Grinina

Faculty of power supply and lighting of cities  
O.M. Beketov National University of Urban  
Economy in Kharkiv  
viktoriagrinnina@gmail.com

To date, several hundred districts of electric grids exist in Ukraine and operate and use 0.38 ÷ 110 kV distribution networks. In order to increase the reliability and efficiency of their operation, economy and quality of power supply to consumers, in recent years intensive introduction of telemechanics and computer systems has been underway to create integrated automated control and control systems at all hierarchical levels of construction of these systems. The main purpose of telemechanization of electrical complexes is to provide the possibility of remote measurement of operating parameters of electrical equipment and remote control of the modes of their operation. Equipment operating data shall be transmitted to the control station by means of discrete television signals or analog signals indicating the values of voltage, current and power at the substation buses. Devices for collecting and transmitting signals to the control station, as well as transmitting commands for operating modes of equipment, must meet the high requirements of reliability, reliability, service life, cybersecurity and electromagnetic compatibility. An important area of development of automated systems is the integration of automated control and management of individual structural units of district electrical networks into a single integrated system. This problem can be successfully solved only through the use of standardized solutions for the information, technical and software automated control system of the enterprises of the electrical networks. The main directions of realization of these tasks are construction and rational use of the hierarchical system of models of planning, repair and operation of electric networks and operations - out-of-control of their modes, increase of efficiency of operative-dispatching control of distribution electric networks, automation of collecting, processing and clear display of the received information. re-modes of equipment operation. These scientific and technical requirements concerning the problems of creation of multilevel modern automated control systems of the enterprises of the electric power industry are based on the branch-methods and materials, the state standards, taking into account the modern achievements of the national and foreign science and technology in the field of the power industry. Realization of this direction will allow to provide development and introduction of new equipment, optimization of technological processes and modes of operation of electric power equipment and electric networks, rational use of materials and increase of efficiency of production and economic activity. An important factor in ensuring the above requirements of reliability, reliability and electromagnetic compatibility of all automated control and control systems, unconditional compatibility with the supply network, is the use of high-quality efficient power sources for numerous electronic devices of the automated system.

A universal power supply with power factor correction is proposed, which is suitable as an effective secondary power source for electronic systems of various purposes with stabilized voltage of different magnitude and sign, which provides high reliability and quality of their work, as well as electromagnetic compatibility with the power network. This is achieved by the application of the power factor corrector in the power source circuit, which, unlike the "passive" correctors, is widely used in low-cost power sources of electronic equipment and is based on phase offset compensation between current and voltage of the capacitive and inductive network. The elements are much more efficient and provide high power factor values of up to 0.98, as well as high quality and efficient use of electricity. Output voltage stabilization of the power source is made by comparing the signal from the output-to-elastic sensor with the signal of the reference voltage sensor and, after amplifying the unbalance signal, regulates the moment of switching on or off the electronic keys of the inverter bridge circuit until the voltage is reached. the value of nominal value.

Due to the use in the circuit of the bridge inverter and output transformer, the increase of the effective power of the power supply is almost doubled in comparison with analogues, as well as the possibility to obtain output voltages of different magnitude and sign. There is no galvanic connection of the output operating voltages to the power supply, which guarantees complete safety of personnel while operating this unit and also provides electromagnetic compatibility with the power supply network.

**Keywords** - stabilized source, power factor corrector, inverter bridge circuit, output voltage sensor, galvanic coupling, electromagnetic compatibility, microprocessor control and control systems, energy efficiency.

# Проходження гауссового пучка крізь квадратично-неоднорідну призму

А.С.Сисоєв

факультет «Електропостачання і освітлення міст»

ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

Харків, Україна

61002, Україна, Харків, вул. Маршала Бажанова, 17

**Анотація** – Показано, що при нахиленому падінні гауссового пучка на квадратичне середовище з довільно орієнтованою віссю неоднорідності енергія пучка переноситься вздовж осі неоднорідності, а фаза – вздовж напрямку, який складає деякий кут з віссю неоднорідності. Найбільш суттєвим параметром задачі є відношення радіуса падаючого пучка у горловині і радіуса власної моди квадратичного середовища. Аналіз поля пучка проведено як функція цього параметру. Показано, що радіус пучка у квадратичному середовищі при нахиленому падінні пучка на межу розподілу змінюється з періодом таким же, як і у випадку нормального падіння, нормального падіння осі неоднорідності і розташування горловини пучка на межі розподілу. Доведено, що при осевому падінні на межу розподілу (падаючий пучок поширюється вздовж осі неоднорідності) параметри хвильового пучка у квадратичному середовищі не залежать від кута падіння. Квадратичне середовище каналізує падаючий хвильовий пучок, заставляючи його поширюватися вздовж осі неоднорідності. При цьому параметри пучка періодично змінюються.

Радіус хвильового пучка коливається між двома екстремальними значеннями, які залежать від положення горловини, кута падіння та орієнтації осі неоднорідності. Радіус кривини хвильової поверхні в перерізах з екстремальними радіусами пучка обертається у нескінченність ( хвильові поверхні пласкі ). При певних умовах за квадратичним шаром утворюється горловина, подібно тому, як це буває при проходженні пучка крізь збиральну лінзу з великою оптичною силою. Введено параметр, який описує вплив неоднорідності середовища на зміну розбіжності пучка. Показано, що розбіжність пучка у квадратичному середовищі періодично змінюється.

У заключенні відзначимо, що знаючи параметри хвильового пучка, який пройшов квадратичний шар, можливо розрахувати параметри відкритого сферичного резонатора, який містить шар квадратичного діелектрика.

**Ключові слова** - пучок, квадратичне середовище, радіус пучка, осциляції.

## I. ВСТУП

Практично часто середовище буває неоднорідним. Одним з зручних методів розв'язання задач поширення хвиль в неоднорідних середовищах є метод апроксимації функції діелектричної проникності поліномом. Обмежуючись поліномом другого порядку,

приходимо до так званих квадратичних середовищ, які широко використовуються для теоретичного моделювання реальних неоднорідних середовищ. В розглянуто осеве поширення гауссових хвильових пучків у квадратично неоднорідних середовищах з заданим розподілом у де-якій площині, у - поза осеве поширення пучків, яке базується на розкладанні первісного розподілу по модам квадратичного середовища.

У даній роботі розглядається проходження хвильового пучка межі розділу однорідного діелектрика з квадратично-неоднорідним діелектриком при довільному куті падіння пучка і довільній орієнтації осі неоднорідності.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Неоднорідність діелектричної проникності у області 2 ( квадратично-неоднорідний діелектрик ) задаємо у вигляді

$$\varepsilon_2(x_2) = \varepsilon_2 - \varepsilon_x \cdot x_2^2, \quad (1)$$

де вісь неоднорідності складає кут  $\varphi_1'$  з нормаллю до 1-ої границі розділу. Вісь неоднорідності і вісь падаючого пучка  $Z_1$  перетинаються у одній точці 1-ої границі розділу ( рис.1). Цей випадок падіння пучка на квадратично-неоднорідне середовище будьмо називати нахиленим падінням без зміщення.

У квадратичному середовищі зміна варіансу пучка описується формулою (1)

$$V_2(z_2) = \frac{V_2(0)\cos(z_2/V_c) + iV_c \sin(z_2/V_c)}{V_c \cos(z_2/V_c) + iV_2(0)\sin(z_2/V_c)}, \quad (2)$$

де

$$V_c = n_2 / \varepsilon_x^{1/2} \quad (3)$$

$$n_2 = [\varepsilon_2 - \varepsilon_x^{1/2} (2p + 1)k_0] \quad (4)$$

Показник заломлення (4) є ефективним показником заломлення квадратично- неоднорідного середовища і саме його потрібно підставляти в формули для визначення параметрів гауссового пучка у квадратичному середовищі.

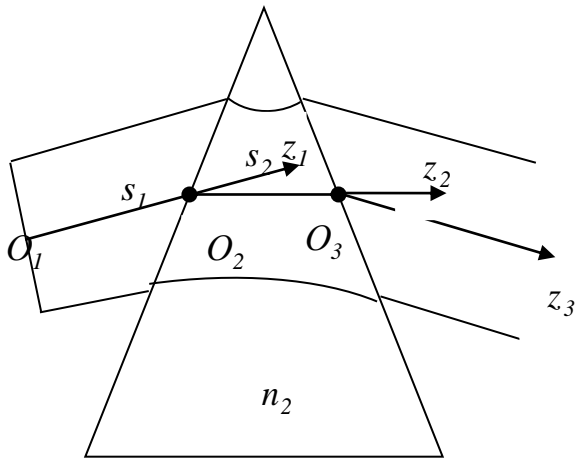


Fig. 1. Геометрія задачі.

Значення варіанса на межі  $V_2(0)$  визначається із формули

$$V_2(0) = \frac{n_2}{n_1} V_1(s_1) t_1^2, \quad (5)$$

де

$$t_1 = \cos \varphi_1' / \cos \varphi_1,$$

$\varphi_1$  - кут падіння в області 1,  $\varphi_1'$  - кут заломлення,

$S_1$  - геометричний шлях пучка у 1-му середовищі.

Величина  $t_1$  описує зміну напрямку поширення пучка на 1-й межі розподілу. Межі розподілу між двома областями надається індекс середовища з меншим порядковим номером. Формулу (5) можливо розглядати, як правило перетворення для варіансу гауссового пучка на плоскій межі розділу двох однорідних середовищ.

Поле гауссового хвильового пучка у будь-якій з областей ( $j = 1, 2, 3$ ) можливо записати у вигляді

$$u^{(j)} = A_j \Psi_p(x_j, z_j) \exp(i\Phi_j(z_j)) \quad (6)$$

де  $A_j$  - амплітуда, що визначає енергію, яка переноситься пучком,  $(x_j, z_j)$  - променеві системи координат, центр координат  $O_1$  знаходиться у горловині падаючого пучка,  $O_2$  і  $O_3$  - на границях області 2. Функція  $\Phi_j(z_j)$  визначає частину фази пучка, яка співпадає з фазою плоскої хвилі

$$\Phi_j(z_j) = \sum_{m=1}^{j-1} k_m s_m + k_j z_j, \quad (7)$$

де  $k_j = n_j k_0$ ,  $k_0 = \omega/c$ . Функція  $\Psi_p(x_j, z_j)$  описує відмінність поля пучка від поля плоскої хвилі і має вигляд

$$\Psi_p(x_j, z_j) = \sigma_j(z_j) H_p \left( \sqrt{\frac{k_j}{w_j}} x_j \right) \times \quad (8)$$

$$\exp(-k_j x_j^2 / 2V_j + i\varphi_j(z_j))$$

де  $H_p(x)$  - поліном Ерміта  $p$ -го порядку.

Поле (6) у області 2 задовольняє умові безперервності функцій  $\Psi_p(x_j, z_j)$  на межі розділу.

Крім того для задовільнення граничних умовам постійні поширення вздовж межі розділу у двох сусідніх областях повинні бути рівними. Коли область 2 однорідна, це виконується автоматично, т. я. кути  $\varphi_1$  і  $\varphi_1'$  пов'язані законом заломлення. Для квадратично неоднорідного середовища кут  $\varphi_1'$  визначає напрям осі неоднорідності і тому записані у вигляді (6) поля не задовольняють умові рівності сталих поширення вздовж 1-ї границі розділу. Для того, щоб ця рівність виконувалася потрібно поле у квадратичному середовищі, що визначається формулою (6), помножити, як це впливає з [3] на  $\exp(ik_2 \delta x_2)$ , де

$$\delta = \frac{n_1 \sin \varphi_1 - n_2 \sin \varphi_1'}{n_2 \cos \varphi_1'}, \quad (9)$$

Тобто поле у квадратичному середовищі має вигляд

$$u^{(2)} = A_2 \Psi_p(x_2, z_2) \times \quad (10)$$

$$\exp i[k_1 s_1 + k_2 (z_2 + \delta x_2)]$$

Таким чином, як це звичайно і буває у анізотропних середовищах, напрямки хвильової і променевої нормалей гауссового пучка при його нахиленому падінні не співпадають. Променева нормаль, вздовж якої переноситься енергія, співпадає з віссю неоднорідності, а хвильова нормаль, вздовж якої поширюється фаза пучка, складає з віссю неоднорідності кут  $\alpha = \text{tg } \delta$ . При  $\varepsilon_x = 0$  область 2 однорідна,  $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ , кут  $\varphi_1'$  стає кутом заломлення хвильового пучка, а параметр  $\delta = 0$ .

Амплітуда відбитого і заломленого хвильових пучків визначається формулами для коефіцієнтів Френеля з  $n_2$  за формулою (4).

Для прозорих квадратичних середовищ  $V_c$  дійсна величина і представляючи її у вигляді

$$V_c = k_2 \rho_c^2 / 2, \quad (11)$$

де  $\rho_c$  - радіус пучка власної моди квадратичної системи, для параметрів хвильового пучка в області 2 отримаємо

$$a_2 = (n_2 / n_1) a_1 D(z_2) t_1^2, \quad (12)$$

$$b_2(z_2) = a_2(z_2) \beta_2(z_2), \quad (13)$$

$$\beta_2(z_2) = \frac{1}{2} \mu^2 \mu_- \sin(2z_2 / V_c) + \beta_1(s_1) \cos(2z_2 / V_c) \quad (14)$$

$$D(z_2) = [1 + \beta_1^2(s_1)] \times \left\{ \begin{array}{l} \cos^2(z_2 / V_c) + \\ + \mu^2 \sin^2(z_2 / V_c) - \\ - \beta_1(s_1) \cos(z_2 / V_c) \end{array} \right\}^{-1} \quad (15)$$

$$\mu = \xi [1 + \beta_1^2(s_1)]^{1/2} t_1, \quad (16)$$

$$\mu_{\pm} = \mu^{-4} [1 + \beta_1^2(s_1)] \pm 1$$

Найбільш суттєвим параметром в формулах (12) - (16) є

$$\xi = \rho_o / \rho_c, \quad (17)$$

який визначає співвідношення між радіусом  $\rho_o$  падаючого пучка в горловині і радіусом  $\rho_c$  власної моди квадратичного середовища.

Параметр

$$\mu = \rho_2(0) / \rho_c, \quad (18)$$

де

$$\rho_2(0) = \rho_o [1 + \beta_1^2(s_1)]^{1/2} t_1 \quad (19)$$

визначає співвідношення між радіусом пучка  $\rho_2(0)$  на вході в квадратичне середовище і радіусом  $\rho_c$  власної її моди. Формула (14) визначає хвильовий параметр пучка у квадратичному середовищі. При  $\rho_c \rightarrow \infty$  формула (14) переходить у формулу для однорідного середовища, а  $D(z_2) = 1$ .

Для зручності аналізу є доречним величини  $V_c$  і  $n_2$  виразити через

$$V_c = n_2 a_o / \xi^2 \quad (20)$$

$$n_2 = \left[ \varepsilon_2 - \frac{2\rho + 1}{k_o a_o} \xi^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

де  $a_o = k_o \rho_o^2 / 2$ . Тоді можливо провести аналіз поля пучка як функції параметра  $\xi$ .

Радіус пучка у квадратичному середовищі визначається формулою

$$\rho_2^2(z_2) = \rho_2^2(0) D(z_2), \quad (22)$$

а для радіуса кривини хвильової поверхні пучка отримуємо

$$R_2(z_2) = \frac{k_2 \rho_2^2(z_2)}{2\beta_2(z_2)} = \frac{W_2(z_2)}{\beta_2(z_2)} \quad (23)$$

Підстановка (14), (15) в (22) і наступні перетворення призводять до кінцевої формули для радіуса пучка у квадратичному середовищі

$$\rho_2^2(z_2) = \rho_2^2(0) \left[ \begin{array}{l} 1 + \mu_- \sin^2(z_2 / V_c) + \\ + \mu^{-2} \beta_1(s_1) \sin(2z_2 / V_c) \end{array} \right] \quad (24)$$

Як видно з (24) радіус пучка у квадратичному середовищі при нахиленому падінні пучка на границю розділу змінюється з періодом

$$L = \frac{1}{2} \pi k_o n_2 \rho_c^2 \quad (25)$$

таким ж, як і у випадку нормального падіння пучка, нормального напрямку осі неоднорідності і розташуванні горловини на границі розділу. Таким чином, період зміни радіуса пучка у квадратичному середовищі визначається тільки радіусом  $\rho_c$  власної моди квадратичного діелектрика, ефективним показником заломлення  $n_2$  квадратичного середовища, частотою  $K_o$  і не залежить від положення горловини падаючого пучка, кута падіння і орієнтації осі неоднорідності.

При співвісному падінні пучка на межу розділу (падаючий пучок поширюється вздовж осі неоднорідності)  $\varphi_1 = \varphi'_1$ ,  $t_1 = 1$  і параметри хвильового пучка у квадратичному середовищі не залежать від кута падіння. Від кута падіння при цьому залежать тільки коефіцієнти відбиття і проходження.

Осциляції радіуса пучка у квадратичному середовищі носять складний характер і суттєво залежать від розташування горловини падаючого пучка. Якщо горловина лежить на межі розділу ( $\beta_1 = 0$ ) осциляції радіуса пучка носять квадратично синусоїдальний характер ( $\sim \sin^2(z_2 / V_c)$ ). При  $\mu_- = 0$  ( тобто  $\mu^4 = 1 + \beta_1^2(s_1)$  ) осциляції пучка носять чисто синусоїдальний характер (  $\sim$

$\sin(2z_2/V_c)$ ). В загальному випадку осциляції радіуса пучка уявляють собою накладання цих двох видів осциляцій. Таким чином, квадратичне середовище каналізує падаючий пучок, заставляючи його поширюватися вздовж осі неоднорідності, при цьому параметри пучка періодично змінюються.

Радіус пучка  $\rho_2$  з періодом  $L$  коливається між двома екстремальними значеннями

$$\rho_{2\pm}^2 = \frac{1}{2} \rho_2^2(0) \left[ \mu_{\pm} \pm \sqrt{\mu_{\pm}^2 + 4\mu^{-4} \beta_1^2(s_1)} \right], \quad (26)$$

які залежать від розташування горловини, кута падіння і орієнтації осі неоднорідності. Радіус кривини хвильової поверхні в перерізах з екстремальними радіусами пучка обертається у нескінченність (хвильові поверхні плоскі).

В області 3 (за квадратичним шаром) параметри  $a_3$  і  $b_3$  приймають значення

$$a_3 = \frac{n_3}{n_2} a_2 (s_2) t_2^2, \\ b_3(z_3) = a_3 \beta_2(s_2) + z_3, \quad (27)$$

де  $S_2$  - довжина шляху пучка у квадратичному середовищі, яку виміряно вздовж осі неоднорідності,  $t_2 = \cos \varphi_2' / \cos \varphi_2$ ,  $\varphi_2$  - кут, який складає вісь неоднорідності з нормаллю до 2-ої межі розділу,  $\varphi_2'$  - кут заломлення на 2-ій межі розділу. Кут заломлення  $\varphi_2'$  для пучка, який пройшов квадратичний шар, визначається з рівності сталих поширення вздовж 2-ої межі розділу

$$n_3 \sin \varphi_2' = n_2 (\sin \varphi_2 + \delta \cos \varphi_2) \quad (28)$$

Для плоско паралельного квадратичного шару  $\varphi_1' = \varphi_2$  і з (28)  $n_3 \sin \varphi_2' = n_1 \sin \varphi_1$ , тобто кут заломлення  $\varphi_2'$  після квадратичного шару такий же, як і для однорідного плоско паралельного шару і якщо  $n_3 = n_1$ , то  $\varphi_2' = \varphi_1$ , тобто хвильовий пучок, що пройшов плоско паралельний квадратичний шар, поширюється паралельно падаючому.

## Passing of gaussian bunch through quadratically-heterogeneous prism

A.S. Sysoiev

Faculty of Electricity and Lighting of cities  
O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,  
17, Marshal Bazhanov Street,  
Kharkiv, 61002, Ukraine.

Якщо  $b_3(0) \neq 0$ , то за квадратичним шаром утворюється горловина в перерізі з координатою

$$z_3 = -a_3 \beta_2(s_2) \quad (29)$$

При цьому фокусуюча дія квадратичного шару така велика, що призводить до утворення горловини за шаром, аналогічно як це буває при проходженні пучка крізь збиральну лінзу з великою оптичною силою.

Розбіжність  $\Theta$  пучка у кожній з областей ( $j = 1, 2, 3$ ) визначається формулою

$$\Theta_j = (2/k_j a_j)^{1/2} \quad (30)$$

Зміна розбіжності пучка, який пройшов квадратичний шар, дорівнює

$$\Theta_3 / \Theta_1 = (n_1 / n_2 t_2 t_1) (D(s_2))^{-1/2} \quad (31)$$

Для однорідного шару  $D(s_2) = 1$ . Отже фізичний сенс параметра  $D(s_2)$  полягає в тому, що він описує вплив неоднорідності середовища на зміну розбіжності пучка. Внаслідок того, що  $D(s_2)$  періодична функція товщини  $S_2$  квадратичного шару, то і розбіжність пучка, що пройшов призму, періодично змінюється з збільшенням товщини  $S_2$ .

### III. ВИСНОВКИ

У заключенні відзначимо, що знаючи параметри хвильового пучка, який пройшов квадратичний шар, можливо розрахувати параметри відкритого сферичного резонатора, який містить шар квадратичного діелектрика.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Fedorov F.I / F.I Fedorov, V.V Filippov // Reflection and refraction of light transparent crystals. - Minsk; Science and Technology, 1976.
- [2] Goncharenko AM / A.M. Goncharenko // Gaussian beams of light. - Minsk; Science and Technology 1977.
- [3] Deschamps J. / J. Deschamps, P. Mast // Coll. "Quasioptics". - Moscow. World, 1966 - p. 198-209.

Passing of wave bunch is in-process examined through the border of division of homogeneous dielectric with quadratically heterogeneous at arbitrary coal of falling of bunch and arbitrary orientation of axis of heterogeneity.

The parameters of wave bunch are certain in a quadratically-heterogeneous environment. The most substantial parameter of task is a relation of radius of falling bunch in a mouth and radius of own fashion of quadratic environment.

It is shown that the radius of bunch in a quadratic environment at the sloping falling on the border of division changes with a period, the same as well as in case of the normal falling, normal direction of axis of heterogeneity and location of mouth of bunch on the border of division.

At the axial falling on the border of division (a falling bunch spreads along the axis of heterogeneity ) the parameters of wave bunch in a quadratic environment do not depend on the angle of incidence. From the angle of incidence here the coefficients of reflections and refractions depend only.

Thus, a quadratic environment ducts a falling wave bunch, compelling him to spread along the axis of heterogeneity and here the parameters of bunch change periodically.

The radius of wave bunch hesitates between two extreme values that depend on position of mouth, angle of incidence of bunch and orientation of axis of heterogeneity.

At certain terms a mouth appears after a quadratic layer, like that as it is at passing of bunch through a collecting lens with large optical force. A parameter that describes influence of heterogeneity of environment on the change of the divergence of bunch is entered. It is shown that divergence of bunch in a quadratically heterogeneous environment changes periodically.

The radius of wave bunch hesitates between two extreme values, that depend on position of mouth, angle of incidence and orientation of axis of heterogeneity. At certain terms a mouth appears after a quadratic layer, like that, as it is at passing of bunch through a collective lens with large optical force. A parameter that describes influence of heterogeneity of environment on the change of divergence of bunch is entered. It is shown that divergence of bunch in a quadratic environment changes periodically.

## Прохождение гауссового пучка через квадратично-неоднородную призму

А. С. Сысоев

факультет «Электроснабжения и освещения городов»

ХНУГХ им. А.Н. Бекетова

Харков, Украина

61002, Украина, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17

Рассмотрено прохождение волнового пучка через границу раздела однородного диэлектрика с квадратично-неоднородным при произвольном угле падения пучка и произвольной ориентации оси неоднородности. Показано, что направления волновой и лучевой нормалей пучка в квадратично-неоднородной среде при его наклонном падении на границу не совпадают. Лучевая нормаль, вдоль которой переносится энергия, совпадает с осью неоднородности, волновая нормаль, вдоль которой распространяется фаза пучка, составляет некоторый угол с осью неоднородности. Определены параметры волнового пучка в квадратично-неоднородной среде. Наиболее существенным параметром задачи есть соотношение между радиусом падающего пучка в горловине и радиусом собственной моды квадратичной среды. Анализ поля пучка проведен как функция этого параметра.

# Ефективність використання електромеханічного амортизатору в ходових частинах метровагонів

Лукашова Н. П.

Асистент кафедри «Електричний транспорт»  
ХНУМГ ім. О.М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків,  
Україна, 61002  
E-mail: lukaschova.natalya@gmail.com  
Контактний тел.: (097) 255 73 80

Павленко Т. П.

Доктор технічних наук, професор кафедри  
«Електричний транспорт»  
ХНУМГ ім. О.М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків,  
Україна, 61002  
E-mail: tpavlenkoskp@gmail.com  
Контактний тел.: 097-573 44 25

Любарський Б. Г.

Доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002  
E-mail: lboris1911@ukr.net  
Контактний тел.: 067-993-75-69

*Анотація: В роботі проведено аналіз технічних рішень та розглянуто особливості роботи амортизаторів ресорного підвішування візків ходової частини вагонів метро. Обґрунтовано вибір конструкції електромеханічного амортизатору в залежності від принципу дії та геометричного співвідношення параметрів. З використанням задач оптимізації та встановлених обмежень знайдені способи і методи рішення, що сприяють визначенню оптимальних електромеханічних параметрів електромеханічного амортизатору. Задачі оптимізації, що розглядаються, є багатокритеріальними. У якості їх рішення обрано два рівнозначних за перевагою критерію: приведений об'єм матеріалів, та ККД електромеханічного амортизатору. Для задач такого типу проведено об'єднання параметрів і встановлено загальний критерій. При визначенні методів оптимізації параметрів використовувалися генетичні алгоритми за рахунок яких визначалися оператори оптимізаційної процедури, що містять як детерміновані так і стохастичні компоненти. Це сприяє підвищенню пошукового процесу при завмиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції.*

*Визначення ефективності роботи електромеханічного амортизатора залежить від показників динамічних якостей для вагонів метрополітену: плавності руху, максимального прискорення, коефіцієнтів динаміки підвішування. Для визначення таких параметрів використовуються методи моделювання ресорного підвішування з урахуванням випадкової нерівності рейок. Параметри розглядалися при стаціонарному, центрованому, випадковому процесах розподілу Гауса. При цьому однією з основних характеристик є спектральна щільність, яка отримана при обробці результатів динамічних випробувань вагону метрополітену моделі 81.717. З використанням процесів моделювання*

*отримані результати режимів роботи електромеханічного амортизатору та визначено вплив коливань під*

*час його експлуатації. Порівняльно з конструкцією гідравлічного амортизатору амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від 13 до 85% за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору.*

*В результаті рішення задач оптимізації отримані оптимальні параметри електромеханічного амортизатору та визначена ефективність його роботи в системі ресорного підвішування за рахунок параметрів плавності ходу та динамічних процесів під час експлуатації вагону метро. процесів під час експлуатації транспортного засобу.*

*Ключові слова: ходова частина, електромеханічний амортизатор, рейковий транспорт, гасителі коливань, пневматичні ресори, ефективність роботи.*

## I. ВСТУП

Надійність роботи рейкового міського електротранспорту має велике значення для мегаполісів України. Тому головним завданням транспортного підприємства – є безперебійна експлуатація рухомого складу, яка забезпечується ефективним транспортним обслуговуванням міського населення. Основними критеріями надійності рухомого складу та транспортного підприємства є: максимальне зменшення витрат часу на переміщення і зниження транспортної втомлюваності; максимальний випуск рухомого складу на лінію; висока регулярність руху і транспортний комфорт пасажироперевезень. На забезпечення високих якісних показників міських перевезень прямо або опосередковано працюють всі структурні одиниці багатогалузевого транспортного господарства.

Аналіз технічних рішень. На території багатонаселених міст України широко використовується рейко-



вий міський електричний транспорт до якого відносяться вагони метро. Одним з основних елементів такого транспорту є ходова частина візків вагонів, яка має ресорне підвішування (Fig. 1).

Особливість роботи ресорного підвішування полягає у передачі тягового зусилля від візка до кузова вагону. Завдяки використанню ресорних пристроїв зменшуються коливання вагону, пом'якшуються при цьому поштовхи і удари, що виникають від нерівностей колії і при вписуванні коліс в криві ділянки під час руху транспортного засобу.



Fig. 1. Ходова частина візків вагону метрополітена

До основних елементів ресорного підвішування відноситься гаситель коливань (демпфер), який призначений для створення зусиль, що забезпечують усунення або зменшення амплітуди коливань вагонів і його частин.

В Україні найбільш широкого поширення набули гідравлічні й фрикційні гасителі коливань [1]. Проаналізуємо особливості їх роботи.

Принцип дії гідравлічних гасителів полягає у послідовному переміщенні в'язкої рідини з однієї порожнини циліндра в іншу поршневої системи під дією розтягуючих або стискаючих зусиль.

У фрикційних гасителях коливань сили тертя виникають при вертикальному і горизонтальному переміщеннях клинів гасителя, що контактують з фрикційними планками, які укріплені на колонках боковин візків.

Істотним недоліком фрикційних гасителів з поступальним рухом частин є нерівномірний знос їх частин в процесі експлуатації, внаслідок чого змінюється характеристика гасителя.

Цих недоліків не має дисковий фрикційний гаситель коливань. Такий гаситель має сталевий диск, з'єднаний з повідцем, який за допомогою пружини, болтів, повідків і гумових прокладок затиснутий між двома фрикційними прокладками з азбестової маси. Повідками гаситель кріпиться до ресорного підвішування вагону. При відносному переміщенні повідків, і відповідно диска та прокладок виникають сили тертя постійної величини. Сили тертя регулюється стисненням пружин.

У буксових підвішування візків типів КВ3-5, КВ3-ЦНИИ, ТВ3-ЦНДІ-М пасажирських вагонів встановлені фрикційні гасителі, які розміщені всередині зовнішніх пружин буксового ресорного підвішування. Пружинні елементи підвішування спільно з гасителями коливань амортизують поштовхи, зменшують динамічні сили і підвищують плавність ходу.

Одним з основних недоліків всіх фрикційних гасителів коливань є те, що вони мають великі сили тертя, які перешкоджають прогину ресорного підвішування, коли величина вимушених коливань менше сили тертя самого гасителя.

Для істотного підвищення швидкостей руху поїздів необхідно поліпшити їх динамічні характеристики по впливу на рейковий шлях і на пасажирів. У розвинених країнах Європи і Азії це зазвичай досягається шляхом застосування систем ресорного підвішування на основі пневматичних ресор [2]. Цей напрям також отримав широке поширення, на автомобільному транспорті. У роботах [2-6] приведені основні етапи впровадження пневматичного ресорного підвішування на рухомому складі розвинених країн.

Система пневматичного ресорного підвішування дозволяє реалізувати крім відомих, такі функції: нахил кузова вагона при русі по кривим та зчитування характеристик і діагностику пневмопідвіски.

Аналіз конструкцій основних типів гасителів коливань показав, що фрикційні та гідравлічні демпфери дають можливість гасити коливання, які створюються при русі транспортного засобу. Однак регулювання їх параметрів при різній загрузці вагонів неможлива. Застосування пневматичних ресор дає можливість регулювання параметрів демпфування, в залежності від загрузки вагону та величини зовнішніх впливів, але в цілому пневматичне підвішування потребує додаткових втрат енергії та потужностей пневматичної системи рухомого складу.

Спираючись на досвід створення сучасних демпферів, в роботі розглядаються питання використання електромеханічного амортизатору в якості демпфера, який сприятиме регулювати силу демпфування в залежності від режимів руху транспортного засобу. Це дає можливість не тільки утилізувати енергію коливань рухомого складу, а і повернути її до електричного кола транспортного засобу з можливістю повторного використання.

Мета роботи – визначення ефективності роботи електромеханічного амортизатору системи ресорного підвішування за рахунок параметрів плавності ходу та динамічних процесів під час експлуатації вагону метро.

Відповідно мети роботи виконувались наступні завдання:

- провести аналіз технічних рішень та особливості роботи амортизаторів ресорного підвішування візків ходової частини вагонів метро;
- обґрунтувати вибір електромеханічного амортизатору і визначити задачі оптимізації параметрів і способи їх рішення;
- визначити ефективність роботи електромеханічного амортизатору з урахуванням параметрів плавності ходу та впливу динамічних процесів під час експлуатації транспортного засобу.

Обґрунтування вибору електромеханічного амортизатору і постановка задач оптимізації. Вибір електромеханічного амортизатору заснований на типі, конструкції і тягової (механічної) характеристики лінійного електромеханічного перетворювача. Обираючи тип і

конструкції такого перетворювача для електромеханічного амортизатору відзначимо, що він не підпадає ні під один з видів існуючої їх класифікації: силовий, енергетичний і потужний [7-9].

Для визначення параметрів і характеристик електромеханічного амортизатору розглянемо його особливості конструкції та принцип дії (Fig. 2).

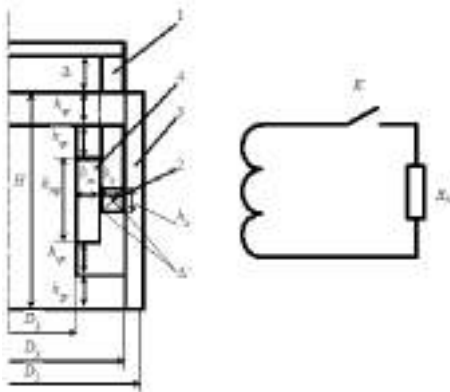


Fig. 2. Електромеханічний амортизатор постійного струму: 1 – якор; 2 – обмотка якорю; 3 – станина; 4 – постійний магніт

Принцип дії амортизатора заснований на електромагнітних явищах. Постійний магніт 4 (див. Fig. 3) має радіальне намагнічення. Силові магнітні лінії потоку збудження замикаються по колу: повітряний зазор з якорем 1 та обмоткою якорю 2, спинка станини та станина 3, постійний магніт 4. Потік збудження зчіплюється з обмоткою якоря і під дією зовнішніх динамічних сил, які виникають під час коливання кузова та візка, якорі рухається (до низу або до верху) У обмотці якоря виникає ЕРС. При навантаженні на обмотку якоря виникає струм якоря. У провідниках обмотки якоря зі струмом виникає сила, яка направлена супротив динамічної сили, що призводить до демпфування коливань кузова. На потік збудження впливає потік реакції якоря, що розмагнічує одну з половин магнітного кола станини (верхню або нижню) в залежності від напрямлення руху якоря (донизу або до верху), а іншу (проти-лежну) намагнічує, що може призвести до насичення магнітного кола та зменшення електромагнітної сили.

Як видно з принципу дії електромагнітна сила залежить, в першу чергу, від струму у обмотці якоря. На силу, практично, не впливає положення якоря відносно станини, що забезпечує стабільність сил демпфування при зазорах між кузовом та візком. Цей вплив найбільше проявляється при крайніх положеннях якорю та великих значеннях струму його обмотки коли різко збільшується потік розсіювання. Для стабілізації параметрів можливо застосування регулювання опору кола якоря і, відповідно, електромеханічної сили.

Геометричні співвідношення параметрів амортизатора визначаються рішенням задачі оптимізації, що зумовлена обраною конструкцією (див. Fig.3).

Перетин зовнішньої спинки статору:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) \quad (1)$$

TABLE I. – Основні характеристики електромеханічного дослідного амортизатору

Параметр	Величина	Примітки
$F_{dem}$	2000 Н	Номінальна електромагнітна сила на якорі амортизатора
$V_{dem}$	0,08 м/с	Номінальна швидкість якоря амортизатора
$\Delta$	0,08 м	Максимальний хід амортизатора
$H_c$	$9,5 \cdot 10^5$ А/м	Коерцитивна сила постійного магніту
$B_{ost}$	1,05 Тл	Остаточна індукція постійного магніту
$I_W$	5120 А	МРС обмотки якоря у номінальному режимі
$H$	0,293 м	Висота ярма амортизатора
$D_1$	0,360 м	Зовнішній діаметр амортизатора
$D_2$	0,312 м	Згідно рисунку 2
$D_3$	0,18 м	Діаметр внутрішнього осердя
$h_m$	0,114 м	Висота постійного магніту
$b_m$	0,032 м	Товщина постійного магніту
$h_k$	0,034 м	Висота обмотки якоря
$b_k$	0,0325 м	Товщина обмотки якоря,
$h_{sp}$	0,045 м	Товщина спинки якоря,
$\Delta'$	0,001 м	Технологічні повітряні зазори

Перетин внутрішньої спинки статору:

$$S_4 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \quad (2)$$

Перетин постійного магніту:

$$S_m = \pi D_3 h_m \quad (3)$$

Перетин верхньої та нижньої спинки статору у найбільш напруженому місці – при з'єднанні з внутрішньою спинкою:

$$S_3 = \pi D_3 h_{sp} \quad (4)$$

Площа перетину міді обмотки з урахуванням коефіцієнту заповнення  $k_z$

$$S_w = k_z b_k h_k \quad (5)$$

Магнітні потоки у елементах магнітопроводу:

– зовнішньої спинки статору:

$$\Phi_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) B_1 \quad (6)$$

де  $B_1$  – індукція у сталевих елементах магнітопроводу у номінальному режимі.

– внутрішньої спинки статору:

$$\Phi_4 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} B_1 \quad (7)$$

– верхньої та нижньої спинки статору:

$$\Phi_3 = \pi D_3 h_{sp} B_1 \quad (8)$$

– постійного магніту:

$$\Phi_m = \pi D_3 h B_\delta, \quad (9)$$

Зважаючи на те, що магнітний потік у спинках стартору однаковий та дорівнює половині потоку постійного магніту. Тому при розрахунках розмірів осердь справедливо рівняння:

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4 = \frac{1}{2} \Phi_m. \quad (10)$$

$$D_2 = D_3 + 2(b_m + b_k + 2\Delta')$$

$$D_1 = \sqrt{D_3^2 + D_2^2},$$

$$h_m = \frac{D_3 B_1}{2 B_\delta} \quad (11)$$

$$h_{sp} = \frac{D_3}{4}$$

$$h_k = h_m - 2\Delta$$

$$H = h_m - 4h_{sp}$$

Таким чином, наведено геометричні параметри амортизатору обраної конструкції, та здобуто їх оптимальне співвідношення.

Постановка задач оптимізації полягає у визначенні геометричних параметрів та їх залежності.

В якості параметрів для вирішення задачі оптимізації обрані геометричні параметри, що наведені на рисунку 2 та таблиці 1, тобто  $H, D_1, D_2, D_3, h_m, b_m,$

$h_k, b_k, h_{sp}$  Остаточню, параметрами задачі обрано товщину постійного магніту та обмотки, діаметр внутрішнього осердя і число витків обмотки якоря:  $D_3, b_m, b_m, w.$

Для рішення задачі визначені обмеження, які поділені на категорії:

- обмеження за розмагніченням постійного магніту. Режими роботи постійного магніту обмежені мінімальною індукцією лінійної частини кривої розмагнічення. Для сплаву NdFeB індукція розмагнічування становить 0,1 Тл, тому індукція повітряного зазору  $B_\delta > 0,1$  Тл.

- обмеження за щільністю струму, який є важливим параметром, що впливає на роботу амортизатору:

$$J_w = \frac{I}{S_w} = \frac{F_{dem} \left( \frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m} \right)}{\pi W k_z b_k h_k (D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)} \quad (12)$$

- компоновочні обмеження. Наведені обмеження зумовлені необхідністю розміщення амортизатора у монтажному об'ємі ходової частини, а також конструкцією самого амортизатора [10], тому:

$$D_1 < 0,5 \text{ м}, H < 0,3 \text{ м}, \quad (13)$$

Обмеження, які накладаються на параметри задачі оптимізації, з урахуванням геометричних розмірів елементів конструкції (13) та кількістю витків, яка повинна бути цілою виліченою. Максимальна кількість витків обирається з урахування конструктивних обмежень та не може перевищувати 10000, а мінімальна не може бути менша за 1:

$$0,01 \text{ м} < D_3 < 0,5 \text{ м}; 0,01 \text{ м} < b_m < 0,5 \text{ м};$$

$$0,01 \text{ м} < b_m < 0,5 \text{ м}; I < W < 10000 \quad (14)$$

В якості цільових функцій для рішення задачі можливо обрати:

– затрати на створення амортизатору;

– енергію, що може рекуперувати амортизатор за час своєї роботи.

При цьому перший критерій необхідно мінімізувати, а другий максимізувати. Розглянемо обидві цільові функції.

Цільова функція затрат складається з затрат на створення конструкції амортизатору які пропорційні затратам на матеріали.

Затрати на матеріали складаються з:

$$C = C_{st} + C_c + C_{pm}, \quad (15)$$

де,  $C_{st}, C_c, C_{pm}$  – затрати на матеріали зі сталі, матеріали мідної обмотки, та постійного магніту, відповідно.

Приведений об'єм матеріалів:

$$V = \frac{C}{Z_{st}} = \frac{C_{st}}{Z_{st}} + \frac{C_c}{Z_{st}} + \frac{C_{pm}}{Z_{st}} = V_{st} + V_c k_c + V_{pm} k_{pm} \quad (16)$$

де  $Z_{st}$  – вартість 1м<sup>3</sup> сталі, що застосована у конструкції амортизатору,

$V_{st}, V_c, V_{pm}$  – об'єми сталей, обмоткової міді та постійного магніту амортизатора відповідно,

$k_c, k_{pm}$ , – коефіцієнти міді та постійного магніту, що розраховуються співвідношеннями:

$$k_c = \frac{\rho_c Z_{c1}}{\rho_{st} Z_{st1}}, k_{pm} = \frac{\rho_{pm} Z_{pm1}}{\rho_{st} Z_{st1}} \quad (17)$$

де  $\rho_c, \rho_{st}, \rho_{pm}$  – щільність міді, сталі та постійного магніту,

$Z_{c1}, Z_{st1}, Z_{pm1}$  – вартість 1кг міді, сталі та постійного магніту.

Для сучасного стану економіки вони становлять  $k_c = 5,64, k_{pm} = 47$  в.о.

Приведений об'єм матеріалів має невелике коливання відносно курсу валют, що вказує на універсальність розробленого підходу.

Об'єм сталі амортизатору:

$$V_{st} = \frac{\pi}{4} H (D_3^2 + D_1^2 - D_2^2) + \frac{\pi}{2} h_{sp} (D_2^2 - D_3^2) \quad (18)$$

Об'єм міді амортизатору:

$$V_c = \pi (D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k) b_k h_k \quad (19)$$

Об'єм постійного магніту амортизатору:

$$V_{pm} = \pi (D_3 + b_m) b_m h_m \quad (20)$$

Таким чином вираз (16) з урахуванням виразів (17-20) є першим критерієм, який обрано для вирішення задачі визначення оптимальних параметрів електромеханічного амортизатору.

Критерій, що визначає енергію, яку рекуперує амортизатор, за час роботи:

$$f = -\frac{dW_m}{dx} \quad (21)$$

де  $P_{msr}$  – середня потужність механічних коливань кувала,

$T_\Sigma$  – строк служби амортизатора,

$\eta$  – ККД амортизатору.

Перші дві складові  $P_{msr}$ ,  $T_\Sigma$  визначаються зовнішніми факторами та залежать від конструкції ходової частини ЕРС. В свою чергу ККД амортизатору визначається втратами у його конструкції та залежить від неї. Тому ККД амортизатора визначає енергію, що може рекуперувати пристрій, та може бути обрано у якості другого критерію.

Втрати у амортизаторі складаються з втрат в міді обмотки, сталі магнітопроводу та механічних втрат. Визначення двох останніх складових втрат на попередньому етапі розрахунків дуже складна задача. До того ж значення втрат у сталі є незначними тому, що змінний магнітний потік проходить лише у верхньої та нижньої спинки статора, а частота його складає 0,5–10 Гц. Це значно нижче за показників поширених електричних машин. Тому втрати у амортизаторі приблизно дорівнюють електричним втратам у обмотці

$$P_\Sigma = R_{ya} I^2 \quad (22)$$

де  $R_{ya}$  – опір обмотки амортизатора.

Потужність навантаження згідно рисунку 2 складає:

$$P_2 = R_n I^2 \quad (23)$$

де  $R_n$  – опір навантаження амортизатора.

Потужність, що перетворює амортизатор складає:

$$P_1 = P_2 + P_\Sigma \quad (24)$$

ККД амортизатора дорівнює:

$$\eta = 1 - \frac{P_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{R_{ya}}{R_{ya} + R_n} = 1 - \frac{R_{ya}}{R_\Sigma} \quad (25)$$

де  $R_\Sigma$  – загальний опір кола обмотки якоря, що можливо визначити виразом:

$$R_\Sigma = \frac{E_{dem}}{I} \quad (26)$$

Для визначення  $E_{dem}$  та  $I$  можливо застосувати спрощену математичну модель [11] перетворив її до виду:

$$E_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} V_{dem}, \quad (27)$$

$$I = \frac{F_{dem} \left( \frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m} \right)}{\pi W (D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)}.$$

Опір навантаження амортизатора визначається з урахуванням середньої довжини вітка, його площини та питомого опору міді:

$$R_{ya} = 1,72 \cdot 10^{-8} \pi \frac{(D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)}{b_k h_k k_z} W^2 \quad (28)$$

Таким чином, вираз (25) з урахуванням виразів (26-28) є другим критерієм, який обрано для вирішення задачі визначення оптимальних параметрів електромеханічного амортизатору.

Задача оптимізації, що розглядається, належить до групи багатокритеріальних задач оптимізації. У якості рішення обрано два рівнозначних за перевагою критерію: приведений об'ємів матеріалів ( $V$ ), та ККД амортизатору ( $\eta$ ). Для задач такого типу згідно з [8, 12] необхідно об'єднати параметри і встановити загальний критерій:

$$f = -\frac{dW_m}{dx} \quad (29)$$

де  $k_1$ ,  $k_2$  – вагові коефіцієнти згортки параметрів.

Знак «-» у виразі вказує на врахування того факту, що другий фактор потребує максимізації.

Фізично вагові коефіцієнти повинні перевести приведений об'єм матеріалів та ККД до значень фінансових затрат. Так для сучасних цін на електротехнічну сталь та вартість електроенергії та 10 річного строку використання амортизатору вагові коефіцієнти дорівнюють:

$$k_1 = 7,87 \cdot 10^3 \text{ грн} / \text{м}^3, \quad k_2 = 1820 \text{ грн}.$$

Для рішення задачі оптимізації широко використовуються відомі методи, наприклад як метод багатогранника що деформується [8, 9, 13, 14], де результат

рішення суттєво залежить від стартової точки. Тому оператори оптимізаційної процедури містять як детерміновані так і стохастичні компоненти, що здатні оживити пошуковий процес при завмиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції. Одним з таких методів оптимізації є метод, що використовує генетичні алгоритми [16-21].

Особливістю методу є те, що він обробляє не один параметр, а цілий набір параметрів, який структурований певним чином у вигляді ланцюжка кінцевої довжини, що по аналогії з процесами біології, називається хромосомою. Такий метод працює не з одним рішенням, а з популяцією можливих рішень, за допомогою генетичних операторів. [15]

## II. РЕЗУЛЬТАТИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ

Визначення ефективності роботи електромеханічного амортизатора залежить від показників динамічних якостей для вагонів метрополітену: плавності руху, максимального прискорення, коефіцієнтів динаміки підвищення.

Визначення показників динамічної якості проводиться за виразами.

Коефіцієнт плавності руху  $C$  по реалізаціям випадкового процесу прискорень кузова тривалістю  $t_p$  [22]:

$$C = \alpha \cdot 6,67 \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{t_j}{t} \left( 2 \int_{f_n}^{f_b} q_n^2(f) G_{z_{kj}}(f) df \right)} \quad (30)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності,  $\alpha = 4,346$ ;

$$t_j - \text{тривалість } j\text{-ї реалізації, } t_p = \sum_{j=1}^n t_j ;$$

$f_n, f_b$  – відповідно нижня і верхня межі частотного діапазону вимірюваних прискорень;

$G_{z_{kj}}(f)$  – спектральна щільність  $j$ -ї реалізації процесу прискорень кузова;

$q_n(f)$  – нормована амплітудно-частотна характеристика фільтру, що коригує (апроксимація фізіологічного коефіцієнта):

$$q_n(f) = 1,15 \sqrt{\frac{1 + 0,1f^2}{(1 + 4,04f^2)((1 - 0,0364f^2) + 0,045f^2)}}$$

Коефіцієнт вертикальної динаміки кузова вагона визначається [23]:

$$k_{\delta\sigma} = \frac{P_{\delta\sigma} - P_{cm}}{P_{cm}}, \quad (31)$$

де  $P_{\delta\sigma}$  – динамічна вертикальна сила, що передаються від кузова на ходові частини у центральному або буксовому підвищення,

$P_{cm}$  – статичне навантаження, що передається від кузова до ходових частин.

Для визначення коефіцієнту плавності руху використовуються методи моделювання ресорного підвищення при випадковій нерівності рейок.

Параметри розглядалися при стаціонарному, центрованому, випадковому процесах розподілу Гауса. При цьому однією з основних характеристик є спектральна щільність  $G_\eta(\omega)$ , яка отримана при обробці результатів динамічних випробувань вагону метрополітену моделі 81.717

Для використання в розрахунках ця спектральна щільність апроксимована аналітичним виразом, який відповідає випадковому процесу, що диференціюється:

$$G_\eta(\omega, v) = \frac{S_\eta^2}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{a_j \cdot v} \left\{ \exp \left[ -\frac{(\omega + \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] \right\}$$

де  $S_\eta^2$  – дисперсія еквівалентної геометричної нерівності (за результатами випробувань було отримано  $S_\eta^2 = 13,01 \text{ мм}^2$ );

$\omega$  – поточне значення частоти, рад/с;

$\omega_j$  – частота  $j$ -го максимуму спектральної щільності;

$a_j$  – доля дисперсії, що доводиться на  $j$ -й максимум спектральної щільності;

$\alpha_j$  – половина ширини  $j$ -го максимуму спектральної щільності на половині його висоти.

При апроксимації отримані параметри для швидкості руху  $v = 1 \text{ м/с}$  аналітичного виразу  $G_\eta(\omega)$ . Синтез нерівності виконано наближеним методом ковзаючого підсумовування [24]. Де зазначено, що генерування з використанням випадкового стаціонарного процесу еквівалентної геометричної нерівності  $\eta(t)$  припускає використання датчиків псевдовипадкових чисел, що відповідає суті реалізації випадкових процесів.

В якості початкових даних для моделювання  $\eta(t)$  набувають середнього значення  $\bar{\eta}$  і її спектральної щільності  $G_\eta(\omega)$ . Дискретні значення  $\eta_i = \eta(t_i)$  моделюваного процесу  $\eta(t)$  ( $t_i = i \Delta t, i=0, 1, \dots$ ) формуються у вигляді ковзаючої суми:

$$\eta_i = \bar{\eta} + \sum_{j=-M}^M c_j \cdot \varepsilon_{i-j} \quad (32)$$

де  $c_j$  – вагові коефіцієнти;

$\varepsilon_j$  – незалежні випадкові величини, розподілені за законом Гауса [25-27];

$M$  – кількість вагових коефіцієнтів ( $2M=9600$ ).

Значення вагових коефіцієнтів  $c_j$

$$c_j = \frac{1}{\omega_c} \int_0^{\omega_c} [\omega_c G_\eta(\omega)]^{0,5} \cdot \cos \frac{j\pi\omega}{\omega_c} d\omega \quad (33)$$

де  $\omega_c$  – частота дискретизації випадкового процесу  $\eta(t)$ ;

$\Delta t$  – крок дискретизації ( $\Delta t = 0,001 \text{ с}$ ).

В результаті змодельовані реалізації нерівностей  $\eta_{пр}$  і  $\eta_{л}$  для швидкостей руху  $v = 40, 50, 60, 70, 80, 90$  і  $100$  км/год, які перекривають значення передбачуваної конструкційної швидкості  $v_k = 90$  км/год.

При цьому параметри  $\alpha_j$  і  $\beta_j$  (табл. II) перераховувалися з  $v = 1$  м/с на необхідну швидкість руху.

TABLE II. ПАРАМЕТРИ АНАЛІТИЧНОГО ВИРАЗУ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ

Номер складової спектру	$\alpha_j$ , рад/с:м/с	$\omega_j$ , рад/с:м/с	$a_j$
1	1,0	0	0,697
2	0,0018	0,20096	0,12
3	0,002	0,25749	0,109
4	0,01	0,314	0,074

Показниками динамічних якостей досліджуваної моделі вагону метрополітену в роботі були прийняті:

1. Коефіцієнти плавності ходу  $C_1$  і  $C_2$  над першою і другою по ходу руху шворневими точками на підлозі кузова.

2. Максимальні значення прискорень кузова  $\ddot{z}_{к1}$  і  $\ddot{z}_{к2}$  відповідно в тих же точках, що і коефіцієнти плавності ходу.

3. Коефіцієнти динаміки у зв'язках кузова і рами візка, а також рами візка і колісних пар:  $K_{дц1}, K_{дц2}, K_{дц3}$  та  $K_{дц}$  – коефіцієнти динаміки в елементах центрального ступеня ресорного підвішування першого ( $K_{дц1}, K_{дц2}$ ) і другого ( $K_{дц3}, K_{дц4}$ ) за ходом руху візків;  $K_{дб1}, K_{дб2}, K_{дб3}, K_{дб4}, K_{дб5}, K_{дб6}, K_{дб7}$  і  $K_{дб8}$  – коефіцієнти динаміки в буксовому ступені ресорного підвішування першої ( $K_{дб1}, K_{дб2}, K_{дб3}$  і  $K_{дб4}$ ) і другої ( $K_{дб5}, K_{дб6}, K_{дб7}$  і  $K_{дб8}$ ) по ходу руху візків, відповідно для лівого і правого коліс однієї колісної пари.

Коефіцієнти динаміки в цій роботі визначалися як відношення максимального динамічного зусилля  $F_{дин}^{max}$  у вказаних вище елементах ресорного підвішування до його статичного значення  $F_{стат}$ .

$$K_d = \frac{F_{дин}^{max}}{F_{стат}} \quad (34)$$

Для порівняння результатів досліджень у роботі були визначені власні частоти коливань вагонів метрополітену з пружинним ресорним підвішуванням і електромеханічним амортизатором.

Для аналізу коливань прийняті початкові умови

Порівняльний аналіз результатів роботи проводився між базовою конструкцією (гідравлічний амортизатор) і моделювання режимів роботи електромеханічного амортизатора. Результати моделювання наведено на Fig. 3.

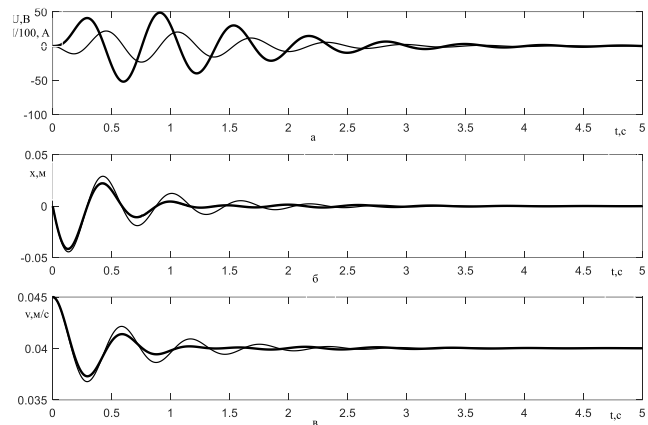


Fig. 3. Результати моделювання режимів роботи амортизатору. 1- напруга та струм амортизатора (тонка та жирна лінія відповідно), 2- переміщення якоря амортизатора базової та розробленої конструкції (тонка та жирна лінія відповідно), 3- швидкість якоря амортизатора базової та розробленої конструкції (тонка та жирна лінія відповідно).

За результатами моделювання встановлено, що максимальне по модулю значення струму складає  $0,234$  А, а напруги –  $52,9$  В. Близько  $3$  с проходить процес повного погашення коливань за  $4$  періоди.

Порівняльно з базовою конструкцією амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від  $13$  до  $85\%$  за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору в порівнянні з гідравлічним. Енергія, що рекуперовано, склала  $3,3$  Дж, а, що розсіяно –  $11,5$  Дж.

### III. ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технічних рішень та розглянути особливості роботи амортизаторів ресорного підвішування візків ходової частини вагонів метро, які показали переваги та недоліки існуючих конструкції гідравлічних та фрикційних гасителів коливань.

2. Обґрунтовано вибір конструкції електромеханічного амортизатору в залежності від принципу дії та геометричного співвідношення параметрів. З використанням задач оптимізації та встановлених обмежень і критеріїв знайдені способи і методи рішення, що сприяють визначенню оптимальних електромеханічних параметрів електромеханічного амортизатору.

3. Визначена ефективність роботи електромеханічного амортизатору з урахуванням параметрів плавності ходу та впливу динамічних процесів під час експлуатації транспортного засобу. Завдяки процесів моделювання отримані результати режимів роботи електромеханічного амортизатору та визначено вплив коливань під час його роботи. Порівняльно з конструкцією гідравлічного амортизатору амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від  $13$  до  $85\%$  за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору. При цьому енергія, що рекуперовано, склала  $3,3$  Дж, а, що розсіяно –  $11,5$  Дж.

### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДжЕРЕЛ

- [1] Гасителі коливань і амортизатори ударів рейкових екіпажів (математичні моделі) / Л.А. Манашкін, С. В. Мямлін, В. І. Приходько. – Д.: 2007. – 196 с.

- [2] Галиев И.И. Методы расчета, натурная реализация и прогнозирование виброзащитных свойств пневматического подвешивания локомотивов: Дис. на соиск. учен. степ. д.т.н./ Омск, 1985.
- [3] <http://www.ed4moo54.narod.ru/620m.htm>
- [4] Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов / Куценко С.М., Елбаев Э.П., Кирпичников В.Г., Маслиев В.Г., Рубан А.Н. / Под ред. С.М. Куценко. – Харьков: Вища школа, 1978. – 97 с.
- [5] Динамика вагонов электропоездов ЭР22 и ЭР200 на тележках с пневматическим подвешиванием/ А.А. Львов, Ю.С. Ромен, А.В. Кузнецов и др. – М.: Транспорт, 1970, 184 с.
- [6] Кузнецов А.В. Вагонные тележки с пневматическим подвешиванием. М., ЦИНТИАМ, 1963.
- [7] P. P. Silvester, Finite elements for electrical engineers, Cambridge University Press, 1990.
- [8] Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- [9] Штойер Р. Многокритериальная оптимизация / Р. Штойер. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
- [10] ЙЕ ВИН ХАН ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОРЕССОРЫ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ДЛЯ ВАГОНА МЕТРОПОЛИТЕНА ГОРОДА ЯНГОН РЕСПУБЛИКИ МЬАНМА 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Москва – 2014
- [11] Павленко Т.П. Математична модель розрахунку параметрів електромеханічного амортизатора ходової частини трамваю // Н.П. Лукашова, Т.П. Павленко, Транспортні системи та технології // Зб. наук. праць. Вип. 32-33. - К.: ДУИТ, 2018. - С.76-86
- [12] Рябов Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // Электротехніка і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.
- [13] Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 1: Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдел. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
- [14] Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 2: Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдел. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
- [15] Лукашова Н.П. Оптимізаційне рішення гасіння коливаль у ходових частинах візків міського електричного транспорту (ПЕРВАЯ СТАТЬЯ...ОДНООСІБНА)
- [16] Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко / [Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 88 с.
- [17] Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
- [18] Weise T. Global optimization algorithms theory and application / T. Weise. – E-Book. – 2008. – 820 p.
- [19] Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice / T. Back. – New York: Oxford University Press, 1996. – 328 p.
- [20] M.Balaji, V.Kamaraj. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm // European Journal of Scientific Research, Vol.47 No.2 (2010), pp.187-196.
- [21] Satit Owatthaiphong, Nisai H. Fuengwarodsakul. Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms // PEDS, 2009, pp. 1530–1533.
- [22] Кондрашов В. М. Единые принципы исследования динамики железнодорожных экипажей в теории и эксперименте: Дис... доктора техн. наук – М., 2001. 274с.
- [23] Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)// М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
- [24] Савоськин А. Н. О выборе аналитического выражения для функции спектральной плотности случайных колебательных процессов // Тр. МИИТ. –1971. вып.373. с.78–85
- [25] Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений М.: Стройиздат, 1982. 350с.
- [26] Добрынин С. А., Фельдман М. С. Определение экспресс-оценок амплитуд случайных колебаний // Исследование динамических систем на ЭВМ.- М.: Наука, 1982. с.26–35.
- [27] Долгачев Н. И. Прогнозирование динамических качеств и оптимизация параметров рессорного подвешивания электропоездов при их вертикальных колебаниях: Автореф. дис...канд. техн. наук. М., 1987. 24с.

## Efficiency of use of electromechanical shock absorber in metro trailers

Lukashova N.

Assistant of the Department of Electric Transport  
KhNUMG them. O.H.M. Becketova  
st. Marshala Bazhanova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Email: lukashova.natalya@gmail.com  
Contact tel.: (097) 255 73 80

Pavlenko T.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electric Transport  
KhNUMG them. O.H.M. Becketova  
st. Marshala Bazhanova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Email: tpavlenkoskp@gmail.com  
Contact tel.: 097-573 44 25

Lubarski B.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Transport and Heat Engineering  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
st. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002  
Email: lboris1911@ukr.net  
Contact tel.: 067-993-75-69

Abstract: The analysis of technical solutions is carried out in the work and the features of the work of shock absorbers of the suspension suspension of carts of the undercarriage of subway cars are considered. The choice of design of electromechanical shock absorber based on the principle of action and geometric ratio of parameters is substantiated. Using optimization problems and set constraints, we have found ways and methods of solution that help to determine the optimal electromechanical parameters of the

---

electromechanical shock absorber. The optimization tasks under consideration are multi-criteria. Two equivalent criteria were chosen as their solution: the given volume of materials, and the efficiency of the electromechanical shock absorber. For tasks of this type, the parameters were combined and a common criterion was set. In determining the methods of parameter optimization, genetic algorithms were used to determine the operators of the optimization procedure containing both deterministic and stochastic components. This enhances the search process when it fades into the local minima of the target function relief.

Determination of the efficiency of the electromechanical shock absorber depends on the indicators of dynamic qualities for subway cars: smooth traffic, maximum acceleration, suspension coefficients. To determine such parameters, we use methods of modeling the suspension suspension, taking into account the random inequality of the rails. The parameters were considered in the Gaussian stationary, centered, random distribution processes. One of the main characteristics is the spectral density, which is obtained when processing the results of dynamic tests of the subway car model 81.717. Using simulation processes

the results of the modes of operation of the electromechanical shock absorber are obtained and the influence of vibrations during its operation is determined. Compared to the design of the hydraulic shock absorber, the oscillation amplitude of the armature stroke and its velocity decreased from 13 to 85% in the first three periods, which indicates a greater efficiency of the electromechanical shock absorber.

As a result of solving optimization problems, the optimal parameters of the electromechanical shock absorber were obtained and the efficiency of its operation in the suspension system was determined due to the parameters of smooth running and dynamic processes during the operation of the subway car.

*Keywords: chassis, electromechanical shock absorber, rail transport, oscillation dampers, pneumatic springs, efficiency.*



# Аналіз зміни техніко-економічних показників електричної мережі з рівномірно-розподіленим навантаженням

В.О.Перепечений

кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
Харків, Україна

**Анотація** – В статті проаналізовані зміни техніко-економічних показників мережі з рівномірно-розподіленим уздовж ліній навантаженням. Це обумовлено тим, що при спорудженні або реконструкції електричних мереж середньої й низької напруги, необхідно враховувати ріст навантажень у перспективі, а також пристосувати вже існуючі мережі до зрослих рівнів електроспоживання. Основні проблеми проектування пов'язані із труднощами планування розвитку мереж при зростанні навантаження. При оптимізації параметрів електричних мереж в основному вирішують завдання вибору параметрів схем електропостачання при заданих статичних рівнях навантаження.

Розглянуто методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. Проведення цих досліджень було здійснено на підставі розгляду двох можливих шляхів підвищення пропускної здатності мережі: періодичним нарощуванням пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичним збільшенням числа трансформаторних підстанцій. Критерієм при порівнянні варіантів з різним початковим розміщенням трансформаторних підстанцій стали сумарні наведені до початкового моменту витрати за розрахунковий період, тобто за такий період, при збільшенні якого не одержуємо зміни результату. Розглянуто, як змінюються відносні річні витрати з ростом навантаження при різних варіантах вибору початкового радіусу дії мережі. Визначено радіус дії мережі з рівномірно розподіленим по довжині навантаженням. Розглянуто методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. Проведення цих досліджень було здійснено на підставі розгляду двох можливих шляхів підвищення пропускної здатності мережі: періодичним нарощуванням пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичним збільшенням числа трансформаторних підстанцій.

**Ключові слова:** трансформаторна підстанція, електричні мережі, щільність навантаження, щорічні розрахункові витрати, розміщення трансформаторних підстанцій, підвищення пропускної здатності мережі.

## I. ВСТУП

При проектуванні електричних мереж першочерговим завданням проектувальника є вибір розміщення трансформаторних підстанцій [1]. Початкове розміщення трансформаторних підстанцій визначає схему мережі й подальший її розвиток при збільшенні навантаження.

У літературі [2-4] питання про початкове розміщення трансформаторних підстанцій при зміні навантажень у часі освітлено мало, а на практиці вирішується на основі

емпіричних рекомендацій без достатнього аналізу техніко-економічних показників.

Завданням дослідження є аналіз зміни техніко-економічних показників мережі з рівномірно-розподіленим навантаженням шляхом визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками.

Мета – оптимізація електричної мережі шляхом визначення радіусу дії з урахуванням змін навантаження у часі.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розглянемо методику визначення початкового розміщення трансформаторних підстанцій за економічними показниками. При цьому припустимо, що з ростом навантажень пропускна здатність мережі збільшується тільки шляхом збільшення числа трансформаторних підстанцій, переріз же проводів ліній і їхнє число приймається постійними. Таким чином, розглядаються незалежно два можливих шляхи підвищення пропускної здатності: періодичне нарощування пропускної здатності ліній заміною перерізів або додаванням нових ланцюгів і періодичне збільшення числа трансформаторних підстанцій. Методичні результати, проведеного аналізу крім того, що вони можуть бути застосовані при проектуванні мереж для деяких окремих випадків, де розглянемо більш окремий випадок розвитку мережі, коли її пропускна здатність збільшується шляхом комбінування зміни перерізів проводів зі збільшенням числа трансформаторних підстанцій.

Критерієм при порівнянні варіантів з різним початковим розміщенням трансформаторних підстанцій є сумарні наведені до початкового моменту витрати за розрахунковий період, тобто за такий період, при збільшенні якого не одержуємо зміни результату.

Виконання методичних і принципових питань розглянемо для теоретичних випадків. Розглядається нескінченно довгу лінію, що має рівномірно-розподілене навантаження (fig. 1). Щільність навантаження, розподіленої уздовж лінії, міняється в часі:

$$\sigma_t = \sigma_0 k_t, \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – початкова щільність навантаження;

$\sigma_t$  – щільність навантаження в t-му році;

$k_t$  – кратність приросту навантажень за  $t$  років.

$$a_{\text{П}} = (p_{\text{ам}} + p_{\text{н}})K_{\text{П}} \quad (3)$$

Лінія має незмінний за довжиню  $l$  у часі переріз  $F$ . Для виводу деяких залежностей розглянемо коли переріз є економічним у будь-який момент часу, а також для будь-якої ділянки лінії.

Випадок з постійним перерізом проводів лінії й змінним в часі числом трансформаторних підстанцій і випадок з економічним в будь-який момент часу перерізом проводів при одночасній зміні числа трансформаторних підстанцій є крайніми, між якими перебувають практично оптимальний варіант, коли мережа працює з постійним перерізом тільки протягом деяких відрізків часу й розвиток мережі з ростом навантажень відбувається шляхом спільного збільшення числа трансформаторних підстанцій і періодичних замін перерізів проводів.

У цьому випадку шуканим параметром мережі  $X$  є радіус дії  $R$ , тобто половина відстані між трансформаторними підстанціями (fig. 1).

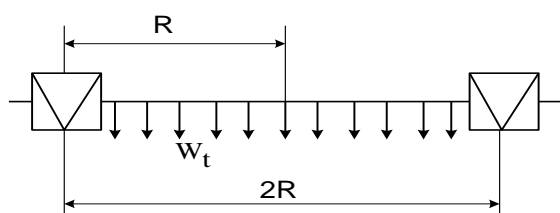


Fig. 1. Розрахункова схема для визначення оптимального радіусу дії розподільної мережі

У відомому діапазоні потужностей однотипних трансформаторних підстанцій ми можемо визначити витрати на підстанції з деяким наближенням у вигляді виразу:

$$Z_{\text{П}} = a_{\text{П}} + b_{\text{П}}W_{\text{П}}, \quad (2)$$

де  $a_{\text{П}}$  – незалежна від потужності підстанції частина витрат;

$b_{\text{П}}$  – залежні від потужності витрати в підстанцію на 1 кВА її потужності.

При допущенні лінійної залежності витрат у підстанції від потужності приходимо до висновку, що змінні витрати на трансформацію не залежать від кількості підстанцій, у той час як постійна складова витрат залежить від числа підстанцій. Тому при виборі радіусу дії нами враховується тільки постійна складова витрат у підстанції  $a_{\text{П}}$ , яка надалі приймається постійною.

Величина постійної  $a_{\text{П}}$  й змінної  $b_{\text{П}}$  частини витрат у підстанції може бути визначена графо-аналітично. Для цього необхідно побудувати сімейство залежностей річних витрат від завантаження трансформатора для діапазону шкали, що цікавить нас, номінальних потужностей трансформаторів і замінити огинаючу цього сімейства прямою лінією. Точка перетинання отриманої прямої з віссю ординат визначить величину незалежної від потужності частини витрат  $a_{\text{П}}$ .

У першому наближенні величина  $a_{\text{П}}$  може бути визначена також за виразом:

де  $K_{\text{П}}$  – вартість підстанції даного типу.

Уточнення величини витрат у підстанції мало впливає на результат. Приймається також, що довжина живильної мережі не змінюється зі збільшенням числа трансформаторних підстанцій, а установка додаткових трансформаторних підстанцій може бути здійснена в будь-якому місці лінії без додаткових витрат для лінії.

У нашому аналізі будемо розглядати величину щорічних розрахункових витрат на 1 км лінії:

$$Z = \frac{a_{\text{П}}}{2R} + Z_{\text{л}}, \quad (4)$$

де  $Z_{\text{л}}$  – частина витрат на 1 км лінії, рівна відповідно до виразу:

$$Z_{\text{л}} = a_{\text{л}} + b_{1\text{л}}F + \frac{b_{2\text{л}}W^2}{F}. \quad (5)$$

де  $W$  – середньоквадратичне навантаження лінії

$$W = \frac{R_w}{k_p}, \quad (6)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт розподілу навантажень уздовж лінії.

Для рівномірно-розподіленого навантаження  $k_p = \sqrt{3}$ .

Змінну частину щорічних витрат у мережу, обумовлену виразом (4), можна також представити у вигляді узагальненого виразу:

$$Z = A_x + B_x W^2 \quad \text{та} \quad Z = A_x x^\alpha + B_x x^{-\beta}$$

У цьому випадку коефіцієнти, що входять у ці узагальнені рівняння визначаються в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \frac{a_{\text{П}}}{2R}; & B_x &= \frac{b_{2\text{л}}}{F} \cdot \frac{R^2}{k_p^2}; \\ A_w &= \frac{w^2}{k_p^2} - \frac{b_{2\text{л}}}{F}; & B_x &= \frac{a_{\text{П}}}{2}; \\ \alpha &= 2; & \beta &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Розглядаючи вираз (4), бачимо, що він складається із двох частин – витрат у трансформаторні підстанції й витрат в електричні лінії. При скороченні радіусу дії знижуються витрати, пов'язані із втратами енергії в проводах ліній. Однак, при цьому зростає частина витрат, пов'язана із вкладеннями в трансформаторні підстанції. Очевидно, що при постійній щільності навантаження величина річних витрат, залежно від величини радіусу дії мережі, має оптимум. Величина радіусу дії, що відповідає оптимуму річних витрат, називається оптимальним радіусом дії  $R_{\text{опт}}$ .

Вважаючи, що оптимальне значення якого-небудь параметра мережі  $X_{\text{опт}}$  визначається в найбільш загальній формі за виразом:

$$X_{\text{опт}} = \left( \frac{B_w \beta}{A_w \alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha + \beta}} \quad (8)$$

З урахуванням залежності (7) величина оптимального радіусу дії може бути визначена за виразом:

$$R_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{ТП}}}{2b_{\text{л}}} \cdot \frac{k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}}{\sigma^2}} \quad (9)$$

де  $W_{(F) \text{опт}}$  – оптимальне навантаження, що відповідає перерізу проводів лінії F.

Якщо задано радіус дії R, подібним же чином може бути визначена щільність навантаження, при якій цей радіус дії буде оптимальним. Величину цієї щільності навантаження назвемо оптимальною щільністю:

$$\sigma_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{1}{R^3} \cdot \frac{a_{\text{ТП}}}{2b_{\text{л}}} \cdot k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}} \quad (10)$$

У такий спосіб також, як це мало місце для перерізу проводів F і відповідних навантажень  $W_{(F) \text{опт}}$ , величини  $R_{\text{опт}}$  і  $\sigma_{\text{опт}}$  і R є взаємопов'язані.

Радіус дії буде оптимальним тільки при одному значенні щільності навантаження. Витрати при цьому навантаженні досягають мінімального значення  $Z_{\text{мін}}$ .

Мінімальне значення витрат визначиться підстановкою величини  $R_{\text{опт}}$  у виразі (4):

$$Z_{\text{мін}} = \sqrt[3]{\frac{b_{\text{л}} \cdot a_{\text{ТП}}^2}{4 \cdot k_p^2 \cdot W_{(F) \text{опт}}} \cdot 1,5^3 \sigma^2} + a_{\text{л}} + 0,5 \cdot b_{\text{л}} \cdot W_{(F) \text{опт}} \quad (11)$$

Другий і третій член виразу (11) при заданому перерізі, не залежать ні від радіуса дії, ні від щільності навантаження. Зміна витрат у мережу при рості навантажень у часі й збереженні радіусу дії постійним, будемо характеризувати залежністю відносних річних витрат:

$$Z_* = \frac{3}{3_{\text{мін}}} \quad (12)$$

За базисну величину приймається значення мінімальних річних витрат для залежної від радіусу дії й навантаження частини витрат – перший член виразу (11), що відповідають оптимальному значенню радіусу дії мережі при кожному значенні навантаження.

З урахуванням виразу (7) може бути отримана наступна залежність відносних річних витрат від навантаження:

$$Z_* = \frac{3}{3_{\text{мін}}} = \frac{1}{3} \left[ 2 \left( \frac{\sigma_{\text{опт}}}{\sigma} \right)^{2/3} + \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\text{опт}}} \right)^{4/3} \right] \quad (13)$$

Для залежності відносних витрат у лінії, у нашому випадку ця залежність є універсальною й не залежить від варіюваних показників, закону росту навантажень і їх абсолютних величин, а залежить тільки від кратності щільності навантажень стосовно оптимальної щільності. Графічно ця залежність показана на fig. 2, крива 2.

Аналогічним шляхом можуть бути отримані залежності для річних витрат, оптимальних радіусів дії й оптимальних навантажень для інших теоретичних випадків, коли переріз проводів лінії в будь-який момент часу, а також для кожної ділянки лінії є економічним  $F = f(t, l)$ , і коли переріз проводів лінії в будь-який момент часу є економічним, але однаковим для всіх ділянок лінії  $F = f(t)$ .

Залежності відносних витрат від навантаження наведені на fig. 2.

Оптимальний радіус дії при сталості перерізу проводів лінії зворотно пропорційний величині  $\sqrt[3]{\sigma^2}$ , у той час як для випадків, коли переріз змінюється у часі й у кожний момент є економічним, оптимальний радіус дії зворотно пропорційний величині  $\sqrt{\sigma}$ .

Постійна частина мінімальних витрат для випадку  $F = \text{const}$  у порівнянні з випадками  $F = f(t)$  й  $F = f(t, l)$  збільшується на величину  $0,5 \cdot b_{\text{л}} \cdot W_{(F) \text{опт}}$ .

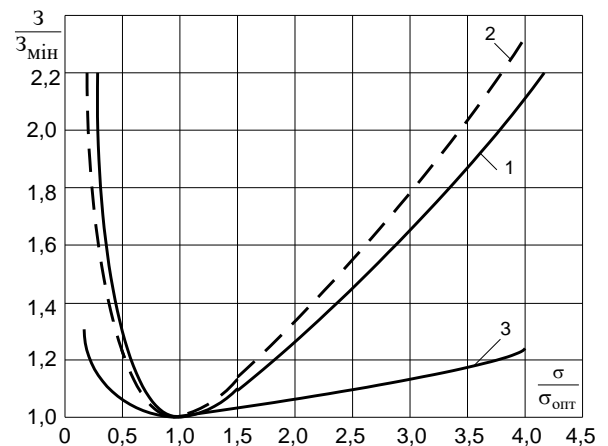


Fig. 2. Універсальні залежності відносних щорічних витрат від кратності навантаження:

1 – для лінії з постійним перерізом проводів; 2 – для мережі, зображеної на fig. 1, при постійному перерізі проводів; 3 – для тієї ж мережі, коли переріз проводів економічний при всіх навантаженнях

Величина  $W_{(F) \text{опт}}$  пропорційна перерізу при однаковому матеріалі проводів. У випадку  $F = \text{const}$  змінна складова питомих витрат зворотно пропорційна величині  $\sqrt[3]{W_{(F) \text{опт}}}$ . Сталість перерізу за довжиною приводить до необхідності враховувати розподіл навантажень по лінії за допомогою коефіцієнта  $k_p$ .

## III. ВИСНОВКИ

Практично, незважаючи на зміну навантажень у часі, необхідно протягом певного періоду мати постійне значення радіусу дії мережі. При цьому витрати при постійному перерізі проводів прямо пропорційні квадрату щільності навантаження, а при економічному значенні перерізу в кожний момент ці витрати прямо пропорційні щільності навантаження в першому ступені. Радіус дії є оптимальним тільки при одному значенні щільності навантаження, при інших же значеннях щільності навантаження за період маємо перевищення витрат над відповідними мінімальними значеннями. Залежність відносини змінної частини річних витрат до мінімальних витрат у всіх розглянутих випадках має універсальний характер і не залежить від вартісних показників.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. – Чернигов: ЧГТУ, 2005. – 341 с.341
- [2] Мисриханов М.Ш. О технико-экономическом сравнении вариантов электроустановок при проектировании / М.Ш. Мисриханов, К.В. Мозгалев, Б.Н. Неклепаев, А.В. Шунтов // Электрические станции.– 2004. – №2. – с.2-8.
- [3] Зорин В.В. Многоцелевая оптимизация динамики развития распределительных электрических сетей / В.В. Зорин, Л.Д. Третьякова, Х. Басам // Энергетика и электрификация. 1991. № 3. С. 5-10.
- [4] Методы расстановки питающих центров для электроснабжения осваиваемых территорий городов. Mori Sadao, Shibata Kunio // Denki qokkai zasshi = J.Inst.Elec.Eng.Jap. – 2002/ - 122 № 6. – С.567-570. – яп.
- [5] Козлов В.А. Электроснабжение городов 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 264 с.
- [6] Говоров Ф.П. Оптимизация схем и параметров распределительных электрических сетей / Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, В.А. Перепеченый // Збірник наукових праць Донецького технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". Випуск 50. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – 190 с.

## Analysis of the change of technological and economic indicators of electric network equilibriumly distributed loading

V. Perepechenyi

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
Kharkiv, Ukraine

The article analyzes the changes in the technical and economic indicators of the network with uniformly distributed along the load lines. This is due to the fact that when constructing or reconstructing medium and low voltage electrical networks, it is necessary to take into account the growth of loads in the future, as well as to adapt the existing networks to the increased levels of electricity consumption. The main design problems are related to the difficulty of planning the development of networks with increasing load. When optimizing the parameters of the power grids, the problem of choosing the parameters of the power supply circuits at the given static load levels is basically solved.

The method of determining the initial placement of transformer substations by economic indicators is considered. These studies were carried out on the basis of considering two possible ways to increase the capacity of the network: by periodically increasing the capacity of the lines by replacing the sections or adding new circuits and periodically increasing the number of transformer substations. The criterion for comparing variants with different initial placement of transformer substations is the cumulative reduced to the initial moment of the cost for the billing period, that is, for such a period, when we do not increase the result change. Consideration is given to how the relative annual costs with increasing load vary with different choices of the initial radius of the network. The radius of the network with uniformly distributed load length is determined. The method of determining the initial placement of transformer substations by economic indicators is considered. These studies were carried out on the basis of considering two possible ways to increase the capacity of the network: by periodically increasing the capacity of the lines by replacing the sections or adding new circuits and periodically increasing the number of transformer substations.

*Keywords: transformer substation, electrical networks, load density, annual estimated costs, placement of transformer substations, increase of network capacity.*



## **Шановні автори!**

Наукові публікації є невід'ємною складовою освітнього процесу вищої школи України. Якісні та актуальні наукові праці студентів та науковців - це обличчя наукової діяльності Університету. Від якості наукових публікацій Університету залежить його рейтинг, популярність серед абітурієнтів і студентів та значимість в системі освіти України та світу.

Саме тому Харківський національний університет міського господарства імені О.М.Бекетова прийняв участь у соціальному проєкті, що підтримує наукові видання, під керівництвом команди Unicheck. Таким чином, починаючи з 1 вересня 2017 року всі наукові праці, що подаються до друку у Міжнародному науково-технічному журналі "Світлотехніка та електроенергетика", перевіряються на ознаки плагіату за допомогою сервісу Unicheck.

Unicheck - це сервіс з перевірки робіт на ознаки плагіату, який вчасно надає підтримку своїм користувачам та може адаптувати систему відповідно до потреб навчальних закладів.

Створений українськими розробниками у 2014, він може використовуватись онлайн або інтегруватись з навчальними системами ВНЗ (так звані learning management systems). Серед них - Moodle, Canvas, Blackboard, Schoology, Google Classroom та інші. Наразі сервісом користуються більш ніж 50 українських університетів. Навчальні заклади США, Іспанії, Бельгії та інших країн світу також перевіряють роботи з Unicheck.

---

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Грініна В.О.	87
Збітнєва М.В.	76
Лукашова Н.П.	96
Любарський Б.Г.	96
Охріменко В.М.	76
Павленко Т.П.	96
Перепечений В.О.	76
Перепечений В.О.	105
Рожков П.П.	82
Рожкова С.Е.	82
Рой В.Ф.	87
Сисоєв А.С.	91

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

### ЖУРНАЛ «СВІЛОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА» № 3(53)

Технічний редактор В.О. Грініна

Дизайн обкладинки А.О. Богославець

ознайомитися на сайті Університету [www.kname.edu.ua](http://www.kname.edu.ua) в цифровому репозиторії:  
<http://eprints.kname.edu.ua> та на сайті журналу <http://lepe.kname.edu.ua/index.php/lepe/issue/archive>

---

Здано до склад 12.09.2019 р.

Формат 60×84/8

Наклад 150 прим.

Ціна договірною

Підписано до друку 08.09.2019р.

Папір офсетний

Зам. №

Гарнітура «Times New Roman»

Ум.-друк. арк. –

Обл.-вид. арк. –

---

Адреса редакції: 61002, Харків, вул. Маршала Бажанова, 17

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Віддруковано з готових оригіналів-макетів у друкарні ФОП «АЗАМАЄВ В.Р.»

Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 229278 від 25.11.1998 р.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції. Серія ХК № 135 від 23.02.2005  
м. Харків, вул. Познанська, 6, к.84, тел. 8 (057) 362-01-52