

## Three-Phase Phase-Shifting Transformer with Regulation in Neutral Point

Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I., Moraru L.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova  
Chisinau, Republic of Moldova

**Abstract.** The paper aimed to research mode characteristics of phase shift installation based on one three-phase transformer having three windings. Usually, such installations are two cores: exciting transformer and regulation transformer. In paper the installation functional scheme description, as well main relations which determine currents and voltages character in scheme elements during regulation process are given. It is shown, that installation is able to provide phase shift angle regulation up to  $\pm 120^\circ$ . The installation scheme is designed to place the control module in the neutral connection point of regulation windings. Such solution allowing essential reduction of installation rated capacity compare to traditional one and excluding necessity of special isolation of shell. Proposed solution ensure in such mode compact construction and commodity for transportation, mounting and service.

**Keywords:** phase-shifting transformer rated capacity, complex transformer factor, phase-shift angle.

### Transformator trifazat de reglare a decalajului de fază cu reglare în punctul neutru

Calinin L., Zaițev D., Tîrșu M., Golub I., Moraru L.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei  
Chisinau, Republica Moldova

**Rezumat.** Lucrarea dată a avut ca scop cercetarea caracteristicilor de regim ale instalației de reglare a decalajului de fază, realizate pe baza unui transformator trifazat cu trei înfășurări. De regulă, astfel de instalații sunt realizate pe două transformatoare: paralel (de magnetizare) și consecutiv (de reglare a decalajului de fază). În lucrare este prezentată descrierea schemei principale a instalației, sunt date relațiile de bază, care determină caracterul schimbării curenților și tensiunilor în elementele schemei la realizarea reglării. Este demonstrat, că instalația asigură reglarea unghiului decalajului de fază în diapazonul  $\pm 120^\circ$ . Schema instalației prevede amplasarea elementului de control în neutrul schemei de conexiune a înfășurărilor de reglare, ceea ce permite reducerea considerabilă a puterii instalate a acesteia comparativ cu construcția tradițională și conduce la excluderea necesității de izolare specială a carcasei, asigurând prin aceasta o construcție compactă, comodă pentru transportare, montare și deservire.

**Cuvinte-cheie:** transformator de reglare a decalajului de fază, unghiul decalajului de fază, coeficient de transformare, coeficient de transformare complex, puterea nominală a instalației.

### Трёхфазный фазорегулирующий трансформатор с регулированием в нейтрали

Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С., Голуб И.В., Морару Л.П.

Институт энергетики Академии наук Молдовы  
Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Цель работы состояла в исследовании режимных характеристик устройства для регулирования перетоков энергии в электрических сетях, выполненного на основе одного трехфазного трехобмоточного трансформатора. Традиционно, устройства подобного назначения изготавливают в виде агрегата, состоящего из двух трансформаторных элементов: параллельного (намагничивающего) и последовательного (фазорегулирующего). Приведено описание принципиальной схемы устройства, представлены основные соотношения, определяющие характер изменения токов и напряжений в элементах схемы при регулировании. Показано, что устройство обеспечивает регулирование угла фазового сдвига в диапазоне  $\pm 120^\circ$ . Схема устройства предполагает размещение управления в нейтрали схемы соединения регулировочных обмоток и позволяет существенно снизить его установленную мощность по сравнению с традиционной конструкцией. Такое техническое решение приводит к отсутствию необходимости в специальной изоляционной защите корпуса. При этом реализуется компактная, удобная для транспортировки, монтажа и обслуживания конструкция.

**Ключевые слова:** фазорегулирующий трансформатор, угол фазового сдвига, коэффициент трансформации, комплексный коэффициент преобразования, расчетная мощность устройства.

## Introducere

Dezvoltarea în continuare a ramurii energeticii presupune nu numai construirea de noi linii electrice, dar și gestionarea optimă cu fluxurile de energie în baza utilizării transformatoarelor cu reglarea a decalajului de fază [1-4]. Acest mod de reglare permite reducerea pierderilor de energie electrică până la un nivel tehnic argumentat, asigură fiabilitatea și eficiența funcționării rețelelor electrice [5-7].

Instalația elaborată se referă la domeniul electroenergeticii și poate fi utilizată la dirijarea cu fluxurile de putere activă în

ramurile de rețelelor de transport și distribuție a energiei electrice.

## Schema și descrierea transformatorului trifazat cu trei înfășurări

Instalația reprezintă un transformator trifazat cu trei înfășurări (Fig.1), care conține sisteme trifazate de înfășurări primare ( $W_1$ ) și secundare ( $W_2$ ), precum și sistemul trifazat cu înfășurări de reglare (dirijare) ( $W_3$ ) cu ramificații reglabile, care sunt comutate prin contacte cu legare la pământ (P) a mecanismului de comutare sub sarcină.

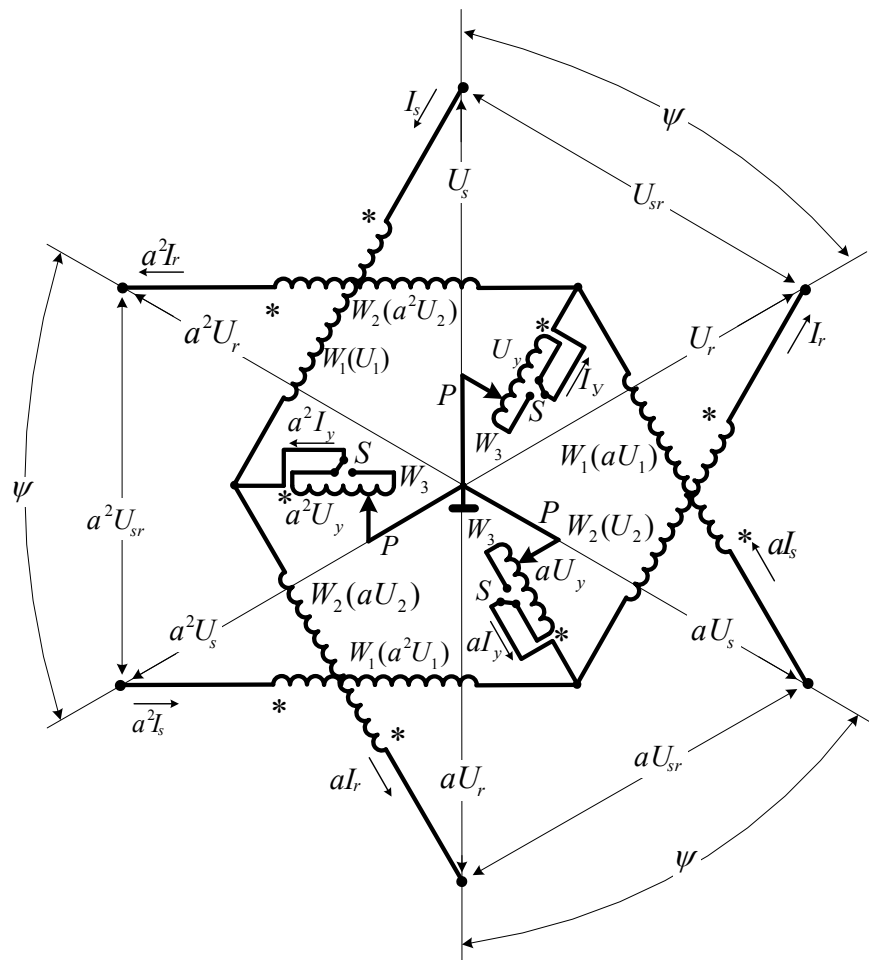


Fig. 1. Transformator trifazat cu trei înfășurări.

Numărul total de spire al bobinei de reglare  $W_3$  determină valoarea maximă a unghiului de defazare ( $\psi_{\max}$ ) și este stabilit în dependență de funcțiile exercitate de instalație în rețeaua electrică.

Comutatorul suplimentar S stabilește semnul de reglare al defazajului tensiunii de ieșire  $U_r$  a instalației în raport cu tensiunea de la intrare  $U_s$ . Defazajul se consideră pozitiv, dacă  $U_r$

depășește  $U_s$ . În caz contrar, semnul  $\psi$  se va considera negativ.

### Modelul matematic al instalației

Coefficientul complex de transformare ( $\dot{K}$ ) al transformatorului de reglare a defazajului caracterizează starea lui în orice poziție a contactelor mecanismului de comutare ( $P$ ) și determină definitiv situația corespunzătoare regimului electric.

În scopul corelării regimului la starea reală a instalației, introducem noțiunea coeficientului de reglare  $k_y$ , care poate fi exprimat prin raportul următor:

$$k_y = \frac{W_3}{W_1} = \frac{W_3}{W_2}. \quad (1)$$

Valoarea  $W_3$  reprezintă numărul spirelor active (prin care trece curentul) acestei înfășurări la oricare din poziții a mecanismului de comutare  $P$ . De asemenea de remarcat, că valoarea  $k_y$  poate fi examinată în calitate de coordonată de comandă independentă.

Coefficientul complex de transformare al tensiunii se determină, reieșind din diagrama vectorială a tensiunilor și este reprezentată în Fig.2.

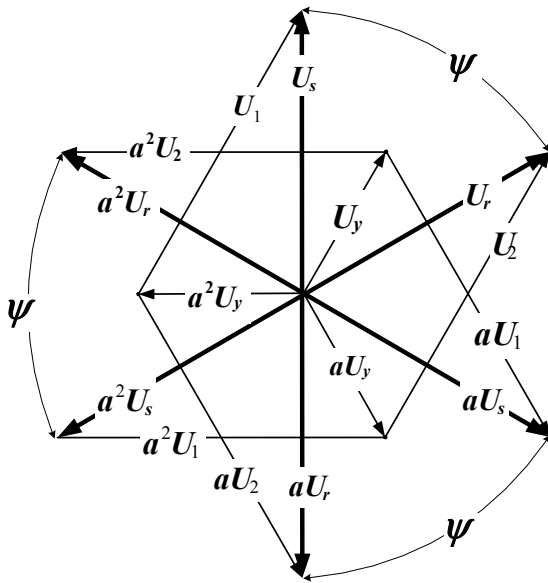


Fig.2. Diagrama vectorială a tensiunilor.

Ținând cont că  $W_1 = W_2$ , putem nota:

$$U_1 = U_2 = U. \quad (2)$$

Iar tensiunea  $U_y$  pe înfășurarea de reglare se va supune condiției:

$$U_y = k_y \cdot U. \quad (3)$$

Din diagrama vectorială Fig.2 reiese:

$$\begin{cases} U_s = U_1 + a^2 U_y = (1 + a^2 k_y) U \\ U_r = U_2 + a U_y = (1 + a k_y) U \end{cases}, \quad (4)$$

unde  $a$  - este operatorul complex al sistemului trifazat

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (5)$$

Atunci:

$$\frac{U_s}{1 + a^2 k_y} = \frac{U_r}{1 + a k_y}, \quad (6)$$

sau

$$U_r = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y} U_s. \quad (7)$$

Factorul din fața tensiunii  $U_s$  pentru această variantă a transformatorului cu reglare a decalajului de fază este coeficientul complex de transformare al tensiunii:

$$\dot{K} = \frac{1 + a k_y}{1 + a^2 k_y}. \quad (8)$$

Dacă  $k_y = 0$ , obținem  $\dot{K} = 1$ . Aceasta înseamnă că  $U_s = U_r$ , iar unghiul  $\psi = 0^\circ$ .

Dacă  $k_y = 1$ , obținem  $\dot{K} = \frac{1+a}{1+a^2} = a$ .

Aceasta înseamnă că  $U_s = a U_r$ , iar unghiul  $\psi = 120^\circ$ .

Mai departe, neglijând cu curentul de scurt circuit, determinăm coeficientul complex de transformare pentru curentul de sarcină.

Ecuția de echilibru electromagnetic (cu condiția că  $W_1 = W_2 = W$  și  $W_y = k_y W$ ) devine:

$$k_y W I_3 + W I_r = W I_s. \quad (9)$$

Din această ecuație poate fi exprimată valoarea  $I_y$ :

$$I_y = \frac{I_S - I_R}{k_y}. \quad (10)$$

Pentru nodul la care trece curentul  $I_y$ , se poate scrie:

$$I_y + aI_S = a^2I_R, \quad (11)$$

sau

$$I_y = a^2I_R - aI_S. \quad (12)$$

Cu aceste condiții obținem expresia

$$\frac{I_S - I_R}{k_y} = a^2I_R - aI_S. \quad (13)$$

De aici reiese

$$(1 + ak_y)I_S = (1 + a^2k_y)I_R. \quad (14)$$

În fine, ajungem la rezultatul

$$I_R = \frac{1 + ak_y}{1 + a^2k_y} I_S. \quad (15)$$

Astfel, coeficientul complex de transformare pentru curent corespunde pe deplin coeficientului complex de transformare pentru tensiune

$$\left. \begin{matrix} U_r \\ I_r \end{matrix} \right\} = \dot{K} \left\{ \begin{matrix} U_s \\ I_s \end{matrix} \right\}. \quad (16)$$

În cazul egalității modulelor tensiunii de intrare și tensiunii de ieșire, după cum și are loc în regim d scurt circuit, putem scrie:

$$\dot{K} = \frac{1 + ak_y}{1 + a^2k_y} = e^{j\psi} = \cos\psi + j \sin\psi.$$

Acest raport permite exprimarea dependenței coeficientului de reglare  $k_y$  cu funcțiile trigonometrice ce caracterizează unghiul reglabil  $\psi$ :

$$\begin{aligned} \frac{1 + ak_y}{1 + a^2k_y} &= \frac{(1 + ak_y)^2}{(1 + ak_y)(1 + a^2k_y)} = \\ &= \frac{(1 - k_y - \frac{k_y^2}{2}) + j\sqrt{3}(1 - \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Unde

$$\cos\psi = \frac{1 - k_y(1 + \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2}, \quad (18)$$

$$\sin\psi = \frac{\sqrt{3}(1 - \frac{k_y}{2})k_y}{1 - k_y + k_y^2}. \quad (19)$$

Raportul ce stabilește relația dintre  $\psi$  și  $k_y$  poate fi necesar la soluționarea problemelor de dirijare cu regimurile schimbului de energie între nodurile sistemului electric și se determină astfel:

$$\psi = 2 \arctg \frac{\sqrt{3}k_y}{2 - k_y}, \quad (20)$$

$$k_y = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}{\sqrt{3} + \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}. \quad (21)$$

Principalii indicatori pentru regimul normal de funcționare al instalației sunt curenții și tensiunile din elementele circuitului electric, care se modifică în procesul reglării unghiului  $\psi$ . Caracterul schimbării acestor variabile determină caracteristicile energetice și costul produsului la proiectarea instalației. Unul dintre acești indicatori este tensiunea  $U_{sr}$  dintre bornele de intrare și de ieșire ale instalației.

Din schema instalației reprezentate în Fig.1 reiese:

$$U_r = U_S + U_{sr}. \quad (22)$$

Atunci

$$\begin{aligned} U_{sr} = U_r - U_S &= \frac{1 + ak_y}{1 + a^2k_y} U_S - U_S = \frac{(a - a^2)k_y}{1 + a^2k_y} U_S = \\ &= \frac{(a - a^2)(1 + ak_y)k_y}{(1 + a^2k_y)(1 + ak_y)} U_S = -\frac{3}{2} k_y \frac{k_y - j\frac{2}{\sqrt{3}}(1 - \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2} U_S \end{aligned}$$

$$U_{sr} = U_r - U_s = \frac{1 + ak_y}{1 + a^2 k_y} U_s - U_s = \frac{(a - a^2)k_y}{1 + a^2 k_y} U_s =$$

$$= \frac{(a - a^2)(1 + ak_y)k_y}{(1 + a^2 k_y)(1 + ak_y)} U_s = -\frac{3}{2} k_y \frac{k_y - j \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - \frac{k_y}{2})}{1 - k_y + k_y^2} U_s$$

Revenind la modulul acestei valori complexe, se obține o expresie destul de simplă

$$|U_{sr}| = \frac{\sqrt{3}k_y}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} U_s \quad (23)$$

Ținând cont de corelația stabilită anterior dintre  $k_y$  și unghiul  $\psi$ , ajungem la rezultatul:

$$|U_{sr}| = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s \quad (24)$$

Tensiunile înfășurărilor  $W_1$  și  $W_2$  care se schimbă la reglarea unghiului  $\psi$  și sunt descrise în funcție de coeficientul de reglare  $k_y$ , se supun următoarei legi:

$$|U_1| = |U_2| = U = \frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}} \quad (25)$$

Aceleași tensiuni reprezentate prin funcții trigonometrice, sunt exprimate astfel:

$$|U_1| = |U_2| = U = (\cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2}) U_s \quad (26)$$

Prin urmare, tensiunea pe partea activă a înfășurării de reglare  $U_y$  este caracterizată prin relația:

$$|U_y| = \frac{k_y}{\sqrt{1 - k_y + k_y^2}} U_s \quad (27)$$

Referitor la curentul înfășurării de reglare  $I_y$ , caracterul dirijării sale se supune următoarelor legi:

- în funcție de  $k_y$

$$I_y = \frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}} \quad (28)$$

- în funcție de  $\psi$

$$I_y = (\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\psi}{2}) I_s \quad (29)$$

Parametrii și caracteristicile regimului normal de funcționare al transformatorului cu reglare al decalajului de fază prezentate în acest punct, în continuare vor fi supuse simulării cu aplicarea mijloace tehnice moderne.

Una dintre cele mai importante caracteristici ale produsului tehnic destinate transmiterii de energie electrică, este puterea nominală (tipică). Această caracteristică poate fi examinată ca un indicator care permite estimarea diferitor soluții de proiectare.

Conform definiției standard, puterea de proiectare (calculată) a instalației transformatoare este o jumătate din suma puterilor maxime a tuturor înfășurărilor lucrătoare. Pentru varianta constructivă a transformatorului de reglare a decalajului de fază examinat, acest fapt poate fi reprezentat ca:

$$S_{PST} = \frac{|U_{s \max}| |I_{s \max}| + |U_{y \max}| |I_{y \max}| + |U_{r \max}| |I_{r \max}|}{2}$$

Folosind relațiile obținute anterior, ajungem la rezultatul:

$$S_{PST} = \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2} k_y + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}}) (\frac{k_y}{2} + \sqrt{1 - k_y + \frac{k_y^2}{4}})}{1 - k_y + k_y^2} U_s I_s$$

sau

$$S_{PST} = (1 + \sin \frac{\psi}{2}) (\cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2}) U_s I_s \quad (30)$$

Valoarea  $U_s I_s$  caracterizează puterea de sarcină, la care trebuie să fie calculat transformatorul de reglare a decalajului de fază.

### Sistemul modificat de dirijare al instalației

În schema Fig.1 este prezentă cea mai simplă versiune a unui transformator de reglare a defazajului cu trei înfășurări și comutare în neutru. Particularitatea acestei scheme constă în faptul că la trecerea comutatorului  $S$  în poziția opusă, diapazonul de reglare al unghiului defazajului se reduce semnificativ, ceea ce poate fi examinat ca un dezavantaj al acestei soluții tehnice. Varianta circuitului ce oferă simetria reglării unghiului  $\psi$  în ambele domenii este

prezentată în Fig.3, iar diagrama vectorială în Fig.4.

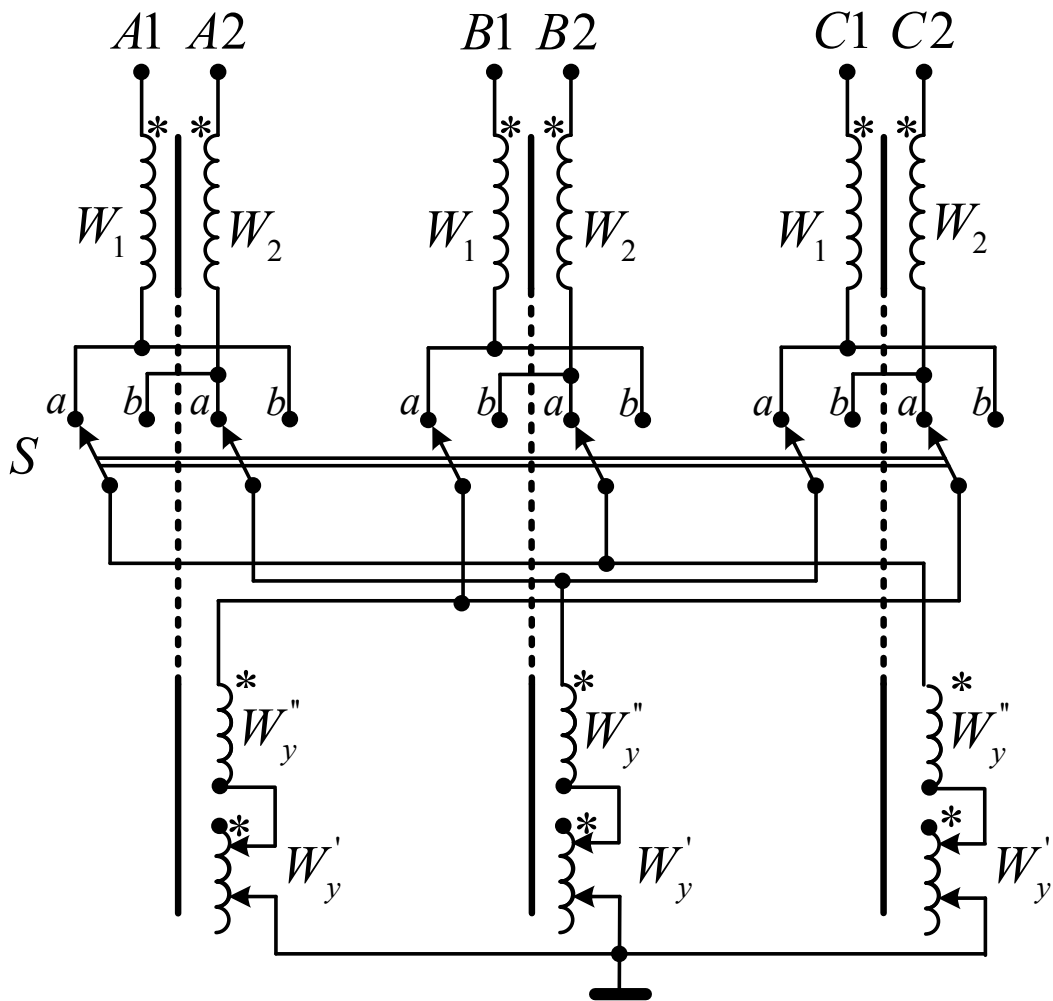


Fig.3. Schema de reglare a unghiului  $\psi$ .

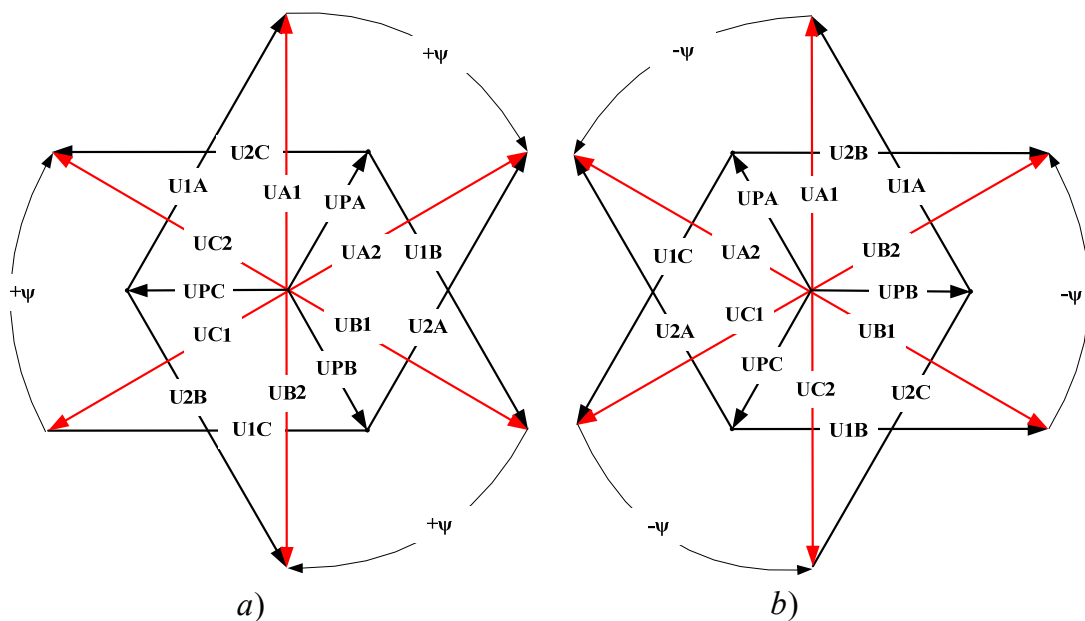


Fig.4. Diagrammele vectoriale ale tensiunilor la reglarea unghiului  $\psi$  în zona pozitivă – (a), (b) – în zona negativă.

O caracteristică suplimentară a variantei menționate este, că înfășurarea de reglare a transformatorului de reglare a defazajului este împărțită în secțiune reglabilă  $W'_y$  și  $W'_y$  neregabilă, iar mecanismul de comutare al ramificațiilor reglabile sub sarcină conține două contacte opuse de comutare. Aceasta contribuie

la o extindere semnificativă a limitelor de reglare a unghiului  $\psi$ .

În fig.5 sunt prezentate graficele modificării puterii nominale a transformatorului de reglare a decalajului de fază  $S_{PST}$  la schimbarea unghiului  $\psi$  în diapazon de  $\pm 120^\circ$ .

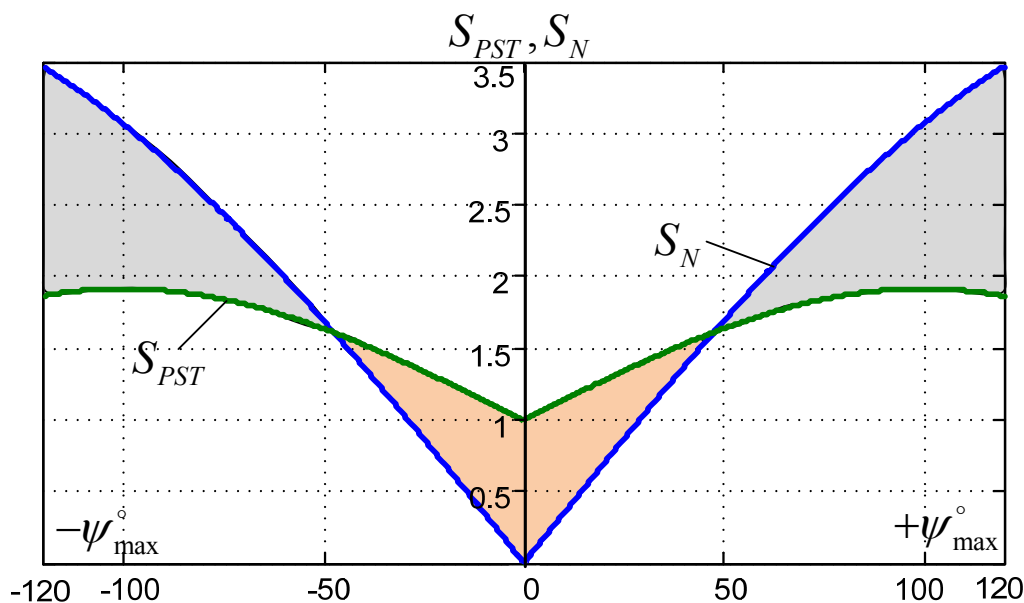


Fig.5. Graficele modificării puterii stabilite (calculate) a instalațiilor cu transformatoare de reglare a decalajului de fază.

Respectiv, sunt prezentate graficele modificării puterii proiectate  $S_N$  a variantei cunoscute a instalației de reglare a defazajului cu două transformatoare. Compararea graficelor  $S_{PST}(\psi)$  și  $S_N(\psi)$  permite selectarea unei sau altei soluții la examinarea problemelor tehnice specifice.

### Concluzii

Rezultatele lucrării efectuate sugerează următoarele concluzii:

1. Instalația propusă permite o utilizare a unei construcții compacte, comode la transportare, montare și întreținere a construcției.
2. Comutatorul ramificațiilor de reglare a instalației propuse este plasat în neutrul schemei de racordare a înfășurărilor de reglare, ceea ce conduce la căderea necesității unei protecții de izolare specială a carcasei.

3. Instalația asigură un diapazon larg de reglare a unghiului defazajului  $\psi = \pm 120^\circ$ .

4. Transformatorul de reglare a decalajului de fază poate reduce semnificativ puterea instalată în comparație cu transformatoarele tradiționale de rotație fazei într-un diapazon larg de reglare.

### Bibliografie (References)

- [1] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal FACTS-Devices and Applications Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control Power Systems 2012, pp 1-30
- [2] Helder Lopes Ferreira, Angelo L'Abbate, Gianluca Fulli, Ulf Häger Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) Devices Advanced Technologies for Future Transmission Grids Power Systems 2013, pp 119-156
- [3] A.Kramer, J.Ruff, Transformers for Angle Regulation Considering the Selection of On-Loas Tap-Changers, IEEE transactions on power delivery, Vol.13, No.2, April 1998, Page(s):518-525.

- [4] FACTS Overview, IEEE Power Engineering Society, Cigre International Conference On Large High Voltage Electric Systems, 95TP108.
- [5] Luiz A. C. Lopes, Geza Joos, Boon-Teck Ooi, "A High-Power PWM Quadrature Booster Phase Shifter Based on a Multimodul AC Controller", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No.2, March 1998
- [6] Stelimakov V., Zhmurov V., Tarasov A., Grinshteyn B., [Phase rotation device thyristor-controlled.]. Fazopovorotnye ustroystva s tiristornym upravleniem, Energetik 2010, №8, str.20-23.
- [7] Zhmurov V., Stelimakov V., Tarasov A., Grinshteyn B., [The use of phase rotation devices with thyristor controlled at high angles of adjustment of the phase shift]. Primenenie fazopovorotnikh ustroystv s tiristornym upravleniem pri bolshikh uglakh regulirovaniya fazovogo sdviga, Izvestia Akademii Nauk Energetika, 2010 №5, str.132-141.

#### Despre autori:



**Kalinin Lev,**

[kalinin\\_lev@ie.asm.md](mailto:kalinin_lev@ie.asm.md)

Institutul de Energetică al AȘM, doctor științe tehnice. Domeniul intereselor științifice este determinat de elaborarea și utilizarea controlerelor FACTS în sisteme energetice.



**Tîrșu Mihai,**

[tirsu.mihai@gmail.com](mailto:tirsu.mihai@gmail.com)

Institutul de Energetică al AȘM, doctor științe tehnice. Domeniul intereselor științifice este legat de diagnostica echipamentului tensiune înaltă și electronică de putere.



**Moraru Larisa,**

[larisa\\_moraru@ie.asm.md](mailto:larisa_moraru@ie.asm.md)

Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice este în domeniul cercetărilor și analizei problemelor generale în energetică, securitatea energetică.



**Zaițev Dmitrii,**

[zaiats@ie.asm.md](mailto:zaiats@ie.asm.md)

Institutul de Energetică al AȘM, doctor științe tehnice. Domeniul intereselor științifice este în domeniul cercetărilor regimurilor sistemelor energetice ce conțin interconexiuni flexibile.



**Golub Irina,**

[irina.golub@mail.ru](mailto:irina.golub@mail.ru)

Institutul de Energetică al AȘM. Domeniul intereselor științifice este determinat de cercetările regimurilor sistemelor energetice liniilor electric dirijate de curent alternativ cu capacitate sporită de trafic.