

Invenția se referă la domeniul electroenergeticii, inclusiv la echipamentele de reglare rapidă a decalajului de fază a tensiunilor de ieșire în sistemele trifazate în coraport cu tensiunile de intrare ale echipamentului de reglare a decalajului de fază. Aceste echipamente se referă la sistemele flexibile în rețelele de transport (SFRT) cunoscute sub denumirea FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) și sunt destinate pentru dirijarea în dinamică cu fluxurile de putere în rețele electrice.

Cele mai apropiate soluții tehnice din domeniul abordat sunt prezentate în [1-3].

Echipamentul descris în [1] este realizat după schema regulatorului de fază cu un singur transformator (single core phase-shifting transformer). Neajunsul acestei soluții constă în necesitatea amplasării a cheilor electronice de putere pe o platformă specială izolată. Totodată montarea cheilor electronice de putere consecutiv cu linia electrică conduce la dificultăți de ordin tehnologic privind dirijarea lor (Commutation Problems Associated with Make-Before-Break Firing), iar ridicat de schimbare a unghiului fazei reglare conduce la diminuarea indicilor de calitate a tensiunii de ieșire. Din aceste considerente este necesar de a instala echipament suplimentar de filtrare a armonicilor superioare ceea ce conduce la creșterea masei și costului regulatorului de fază cu un singur transformator.

Este cunoscut echipamentul realizat constructiv din două transformatoare utilizat pentru reglarea decalajului de fază a tensiunilor în liniile electrice trifazate [2].

Neajunsul acestui echipament, care include două transformatoare, îl constituie majorarea aproape de două ori a puterii instalate a transformatoarelor. Reglarea fazei se face în mod discret și numărul de paliere a valorii reglate în intervalul de reglare este determinat de numărul de transformatoare conectate în serie cu linia electrică de transport (mai departe transformator în serie). Reglarea lentă a unghiului decalajului de fază prin modularea lățimii impulsurilor în circuitul de tensiune înaltă al transformatorului în serie este însoțită de distorsiunea semnificativă a tensiunii de ieșire.

Este cunoscut transformatorul cu decalajul unghiului de fază dirijat cu chei a electronicii de putere care include transformatorul de excitate al cărui circuit de tensiune înaltă include două înfășurări una dintre care are conexiunea în triunghi, iar a două înfășurare este confecționată cu punct neutru conectat galvanic la vârfurile triunghi, triunghiului format de prima înfășurare, transformatorul în serie format din șapte module unitare, cheii a electronicii de putere pentru asigurarea conexiunilor programate dintre înfășurările secundare de tensiune joasă a acestor transformatoare și dirijare cu funcționarea acestor module după algoritme (legi) bine determinate (prototip) [3].

Neajunsul acestui echipament constă în necesitatea unui număr ridicat de module unitare ale transformatorului în serie pentru a asigura o reglare lentă a unghiului decalajului de fază și îndeplinirea cerințelor către indicii de calitate a tensiunii de ieșire, cum este de exemplu coeficientului de distorsiune a tensiunii în limitele admisibile pentru liniile electrice (sub 2%). Această condiție se îndeplinește, dacă la reglarea lentă a decalajului prin modularea lățimii impulsurilor de tensiune în primul transformatoarelor în serie, pasul de variație a unghiului fazei nu depășește  $3,5^\circ$  [3] și ca urmare este necesar de majorat nu numai numărul de module unitare a transformatoarelor în serie, dar și a numărului de chei electronice necesare pentru a îndeplini conexiunile conform algoritmului de dirijare. Puterile necesare a transformatorului de excitate și a transformatorului în serie se calculează din relațiile:

$$S'_{ET} = 2S_r \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}; \quad (1)$$

$$S'_{BT} = 2S_r \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}, \quad (2)$$

unde  $S'_{ET}$  – puterea aparentă necesară a transformatorului de excitate;

$S'_{BT}$  – puterea aparentă necesară a transformatorului serie care asigură reglarea decalajului de fază dintre tensiuni;

$S_r$  – puterea aparentă la bornele de ieșire a echipamentului (sarcina);

$\psi_{\max}$  – valoarea maximă prescrisă a decalajului de fază dintre tensiunile de ieșire și intrare pentru regulatorul dat.

Puterile ambelor transformatoare sunt egale  $S'_{ET} = S'_{BT}$  și valoarea maximală a puterii aparente a acestor transformatoare se determină din expresia (1) și (2).

Prototipul poate asigura reglarea unghiului  $\psi_{\max} = 24,5^\circ$ , la valoarea coeficientului de distorsiune a tensiunii sub 2% în caz dată transformatorul în serie include un subsansamblu din 7 module unitare.

Puterea cheilor electronicii de putere corespunde sarcinii maxime și puterea echivalentă instalată a cheilor electronicii de putere (comutatorului electronic) se determină pentru prototip din relația:

$$S'_{PE} = 4S_r \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}, \quad (3)$$

unde  $S'_{PE}$  – puterea echivalentă instalată a tuturor cheilor electronicii de putere.

Cu majorarea valorii reglate crește complexitatea constructivă de realizare, masa, gabaritul, pierderile de energie proprii și costul echipamentului utilizat pentru reglarea unghiului decalajului de fază.

Problema pe care o rezolvă prezenta inovație constă în diminuarea masei și a gabaritului transformatorului în serie, inclusiv și a numărului de module unitare necesare pentru a acoperi diapazonul de reglare a unghiului decalajului de fază și a limita valoarea coeficientului de distorsiune a tensiunii de ieșire la nivelul pe care îl asigură prototipul.

Esența soluției tehnice propuse constă în micșorarea până la două module realizarea constructivă a transformatorului în serie și modificarea circuitelor de conexiune a înfășurărilor de tensiune joasă, care se comutează de cheile electronicii de putere ale înfășurărilor de tensiune joasă a transformatorului de excitație.

Scopul invenției se atinge prin modificarea circuitelor de conexiune ale transformatorului de excitație și ale transformatorului în serie. Aceasta conduce la divizarea fluxului de putere în elementele instalației. Fluxul de putere parțial trece direct în sarcină numai prin transformatorul de excitație și ca urmare se diminuează sarcina transformatorului în serie. Această redistribuire a fluxului de putere și micșorarea numărului de module unitare ale transformatorului în serie are ca rezultat majorarea indicilor tehnico-economici ai instalației care constau în micșorarea masei, gabaritelor și costului ei.

Instalația transformator cu decalajul unghiului de fază dirijat cu chei electronice de putere conține trei subsambluri constructive: transformatorul de excitație, transformatorul în serie și șase chei a electronicii de putere. Transformatorul de excitație este un transformator cu trei faze cu miezul fierului din trei coloane și are cinci înfășurări cu trei faze. Două înfășurări formează circuitul de tensiune înaltă una din care este conectată în triunghi, iar cealaltă înfășurare este confecționată cu punct neutru conectat la vârfurile triunghiului primei înfășurări cu o deplasare a conexiunii la faza amplasată pe coloană vecină a fierului transformatorului. Trei înfășurări aparțin circuitului de tensiune joasă și au fazele amplasate pe aceleași coloane ale fierului transformatorului de excitație. Înfășurările circuitului de joasă tensiune au un număr egal de spire și două din ele sunt fabricate din conductoare cu aceeași secțiune transversală, precum una din aceste înfășurări este realizată pentru fiecare fază cu punct neutru, care împarte înfășurarea în două părți cu număr egal de spire. O altă înfășurare a circuitului de tensiune joasă este confecționată din conductor cu secțiunea mai mică ca secțiunea conductoarelor celorlalte două înfășurări din conductor a cărui secțiune depășește de două ori secțiunea celorlalte două înfășurări a transformatorului de excitație, care aparțin de asemenea circuitului de tensiune joasă a instalației.

Transformatorul în serie este format din două transformatoare trifazate numite module unitare cu câte patru înfășurări. Două înfășurări ale modulelor se conectează în serie racordat, aparțin circuitului de tensiune înaltă și începuturile înfășurării primului modul unitar sunt conectate cu sfârșitul înfășurării circuitului de tensiune înaltă cu punct neutru a transformatorului de excitație, iar sfârșiturile altei înfășurări a circuitului de tensiune înaltă a primului modul unitar este conectat la capetele de început ale înfășurării circuitului de tensiune înaltă cu punct neutru a transformatorului de excitație. Sfârșitul înfășurării a două de tensiune înaltă a modului al doilea a transformatorului în serie prezintă intrarea, iar începuturile primei înfășurării de tensiune înaltă a acestui modul unitar sunt conectate la capetele de început ale înfășurării de tensiune joasă a modulelor unitare au câte o conexiune comună a începuturilor fazelor, precum aceste noduri comune a fiecărei grupe se conectează la câte unul din capetele de ieșire a înfășurării cu secțiunea mai mare din circuitul de tensiune joasă a transformatorului de excitație, iar ieșirile ultimilor înfășurări au conexiune cu câte o cheie a electronicii de putere cu cea mai mare valoare a puterii instalate. Sfârșitul unei înfășurări a circuitului de tensiune joasă a primului modul unitar are conexiune cu începuturile primei înfășurări din circuitul de tensiune joasă a transformatorului de excitație și cu o cheie a electronicii de putere cu valoare intermediară a puterii instalate, iar sfârșitul înfășurării a doua a circuitului de tensiune joasă a primului modul unitar este conectată la sfârșitul a aceeași înfășurări a circuitului de tensiune joasă a transformatorului de excitație și la o cheie a electronicii de putere cu valoare intermediară a puterii instalate.

Sfârșitul primei înfășurări a circuitului de tensiune joasă a modului unitar doi are conexiune comună cu începutul fazelor înfășurării de tensiune joasă a transformatorului de excitație cu punct neutru și cu puntea de diodi a unei chei electronicii de putere cu valoarea puterii instalate mică, iar sfârșitul fazelor înfășurării de tensiune joasă cu punct neutru a transformatorului de excitație au conexiune comună cu sfârșiturile înfășurării a doua de tensiune joasă a modului unitar doi. Punctele de neutru ale fazelor înfășurării de tensiune joasă sunt conectate la o altă cheie a electronicii de putere cu valoarea puterii instalate mică.

Înfășurările modulelor unitare ale transformatorului în serie sunt confecționate din conductoare cu aceeași valoare a secțiunii transversale.

Cheile electronicii de putere conțin o punte trifazată din șase ieșiri careia este unită cu un comutator dirijat, de exemplu un tiristor. După valoarea puterii instalate aceste chei se divizează în trei grupări: cu valoare mare, intermediară și mică a puterii instalate.

Invenția se explică prin desenele din fig. 1-9, care prezintă:

– fig. 1 prezentată schema electrică echivalentă a instalației. Instalația include circuitul trifazat de intrare 1 de tensiune, circuitul de ieșire de tensiune înaltă 2, transformatorul de excitație 3, transformatorul în serie 4 și blocul de chei a electronicii de putere 5. Transformatorul de excitație 3 include înfășurările trifazate 6, 7, 8, 9 și 10. Transformatorul în serie 4 este format din două module unitare 11 și 12, care au câte patru înfășurări. Primul modul unitar 11 include două înfășurări de tensiune joasă 15 și 16. Modulul al doilea unitar 12 are de asemenea două înfășurări de tensiune înaltă 17, 18 și două înfășurări de tensiune joasă 19 și 20. Bornele ieșirilor trifazate 21, 22, 23, 24, 25 și 26 a circuitelor de tensiune joasă formate de înfășurările 8, 9, 10 a transformatorului de excitație și de înfășurările 15, 16, 19 și 20 a transformatorului în serie sunt conectate cu intrările cheilor electronicii de putere 27, 28, 29, 30, 31 și 32 a blocului 5. Înfășurările 6 și 7 a transformatorului de excitație se conectează la circuitul de tensiune înaltă, iar înfășurările 8, 9 și 10 în circuitul de tensiune joasă. Înfășurarea 6 este conectată în triunghi. Înfășurarea 7 este realizată cu punct neutru și ieșirea acestui punct se conectează la vârfurile triunghiului înfășurării 6 astfel ca bobina înfășurării 7 amplasată pe prima coloană a fierului transformatorului de excitație este conectată cu începutul bobinei înfășurării 6 amplasată pe coloana a doua, neutrul bobinei amplasate pe coloana a doua a înfășurării 7 este conectată cu începutul bobinei

înfășurării 6 amplasate pe coloana a treia și neutrul bobinei înfășurării 7 amplasat pe coloana a treia este conectat cu începutul bobinei înfășurării 6 amplasate pe prima coloană a fierului transformatorului 3. Înfășurările 8 și 10 sunt confecționate din conductoare cu secțiunea transversală egală. Secțiunea conductorului înfășurării 9 are o valoare ridicată în comparație cu secțiunea conductoarelor bobinelor 8 și 10. O soluție optimală se obține, dacă secțiunea conductorului înfășurării 9 este de două ori mai mare în comparație cu valoarea secțiunii conductorului înfășurărilor 8 și 10. Înfășurarea 10 este confecționată cu punct neutru al bobinelor fazelor. Punctele neutru al înfășurărilor 7 și 10 divizează bobinelor fazelor acestor înfășurări în părți egale cu numărul de spire respectiv  $W_7/2$  și  $W_{10}/2$ , unde  $W_7$  și  $W_{10}$  – numărul de spire al bobinei fazei înfășurării respective 7 și 10. Transformatorul în serie 4 este format din două module unitare 11 și 12 cu parametri identici. Înfășurările 8, 10, 15, 16, 19 și 20 sunt îndeplinite din conductoare cu secțiunea transversală egală. Cheile electronicii de putere 27, 28, 29, 30, 31 și 32 conține o punte de redresare trifazată formală din șase diodi de putere VD1-VD6 și un tiristor T. Tiristoarele cheilor electronicii de putere au funcția de comutatoare cu ajutorul cărora se fac modificări în schema de structură a instalației, în circuitele de tensiune joasă. Bornele trifazate 21, 22, 23, 24, 25, 26 asigură conectarea cheilor electronicii de putere a blocului 5 la circuitele înfășurărilor de tensiune joasă a transformatorului de excitare 3 și a transformatorului în serie 4. Cheile electronicii de putere pot include trei diodi și trei tiristori în punte sau pot fi confecționate din alte elemente moderne a electronicii de putere.

Fazele înfășurărilor 7, 13, 17 se conectează în serie racordat, astfel că începutul înfășurării 7 este conectat cu sfârșitul fazelor înfășurării 13 și începutul fazelor înfășurării 13 cu sfârșitul fazelor înfășurării 17, iar începutul fazelor înfășurării 17 se conectează la bornele ieșire 2 ale instalației.

Sfârșitul înfășurării 7 se conectează cu începutul fazelor înfășurării 14, sfârșiturile cărora au conexiune galvanică cu începuturile fazelor înfășurării 18 a modulului unitar 12. Sfârșiturile fazelor înfășurării 18 sunt conectate la bornele intrare 1 ale instalației.

Începuturile fazelor înfășurării 8 au conexiune cu sfârșiturile fazelor respective ale înfășurării 15 a modulului unitar 11 și prin borna 21 cu puntea de diodi a cheii electronicii de putere 27, iar sfârșiturile fazelor înfășurării 8 sunt conectate cu sfârșitul fazelor înfășurării 16 a modulului unitar 11 și prin borna 25 cu puntea de diodi a cheii electronice de putere 31. Începutul fazelor înfășurării 9 au o conexiune comună cu începutul fazelor respective ale înfășurării 15 modulului unitar 11, cu începutul fazelor înfășurării 19 ale modulului unitar 12 și prin borna 22 cu puntea de diodi a cheii electronicii de putere 28m, iar sfârșitul fazelor înfășurării 9 au conexiune comună cu începutul înfășurărilor 16 a modulului unitar 1 și cu începutul fazelor înfășurării 20 a modulului unitar 12, iar prin borna 23 cu puntea cu sfârșitul e diodi a cheii electronicii de putere 29. Începutul fazelor înfășurării 10 este conectată cu sfârșitul fazelor înfășurării 19 a modulului unitar 12 a transformatorului în serie, prin intermediul bornei 24 cu puntea de diodi a cheii electronicii de putere 30, pe când sfârșitul fazelor înfășurării 10 galvanic sunt legate cu sfârșitul fazelor înfășurării 20 a modulului unitar. Punctele de neutru a bobinelor fazelor înfășurării 10 prin borna 26 sunt conectate cu puntea de diodi a cheii electronicii de putere 32.

- fig. 2, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 0^\circ$ ;
- fig. 3, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 3,48^\circ$ ;
- fig. 4, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 6,95^\circ$ ;
- fig. 5, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 10,42^\circ$ ;
- fig. 6, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 13,86^\circ$ ;
- fig. 7, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 17,28^\circ$ ;
- fig. 8, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 20,67^\circ$ ;
- fig. 9, diagrama fazică convențională și starea cheilor electronice la formarea unghiului decalajului de fază  $\psi = 24,02^\circ$ .

Instalația funcționează în modul următor.

Funcționarea normală a instalației transformator cu decalajul unghiului de fază dirijat cu chei electronice de putere necesită îndeplinirea următoarelor condiții:

$$\frac{W_7}{W_6} = \frac{2\sqrt{3}}{7} \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}$$

$$W_8 = W_9 = W_{10}$$

$$W_{13} = W_{14} = W_{17} = W_{18}$$

$$W_{15} = W_{16} = W_{19} = W_{20}$$

(4)

$$\frac{W_{13}}{W_{15}} = \frac{W_{14}}{W_{16}} = \frac{W_{17}}{W_{19}} = \frac{W_{10}}{W_{20}} = \frac{1}{3} \frac{W_7}{W_9}$$

unde  $W_6$ ,  $W_8$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 6 și 7 de tensiune înaltă a transformatorului de excitare;

$W_8, W_9, W_{10}$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 8, 9 și 10 a circuitului de tensiune joasă a transformatorului de excitare;

$W_{13}, W_{14}$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 13 și 14 de tensiune înaltă a primului modul unitar al transformatorului în serie;

$W_{17}, W_{18}$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 17 și 18 de tensiune înaltă a modulului al doilea unitar al transformatorului în serie;

$W_{15}, W_{16}$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 15 și 14 de tensiune joasă a primului modul unitar al transformatorului în serie;

$W_{19}, W_{20}$  – numărul de spire în bobinele fazelor înfășurărilor 19 și 20 de tensiune joasă a modulului al doilea unitar al transformatorului în serie.

Tensiunea decalajului de fază se determină din relația:

$$U_{sr} = U_r - U_s = U_7 \pm [U_{13} + U_{17} + U_{14} + U_{18}], \quad (5)$$

unde:  $U_{sr}$  – vectorul tensiunii decalajului de fază;

$U_r$  – vectorul tensiunii de ieșire a instalației;

$U_s$  – vectorul tensiunii de intrare a instalației;

$U_7$  – vectorul tensiunii înfășurării 7 a transformatorului de excitare;

$U_{13}$  – vectorul tensiunii înfășurării 13 a circuitului de tensiune înaltă al primului modul unitar al transformatorului în serie;

$U_{17}$  – vectorul tensiunii înfășurării 17 a circuitului de tensiune înaltă al modulului al doilea unitar al transformatorului în serie;

$U_{14}$  – vectorul tensiunii înfășurării 14 a circuitului de tensiune înaltă al primului modul unitar al transformatorului în serie;

$U_{18}$  – vectorul tensiunii înfășurării 18 a circuitului de tensiune înaltă al modulului al doilea unitar al transformatorului în serie.

Valoarea tensiunii decalajului de fază  $\psi$  dintre tensiunea ieșire și tensiunea intrare a instalației este determinată de combinația de lucru a cheilor electronicii de putere. Înfășurarea 7 a transformatorului de excitare formează un vector a tensiunii cu valoarea constantă, iar modulele 11 și 12 ale transformatorului în serie 4 formează un ansamblu de tensiuni cu valori diferite în funcție de starea cheilor electronicii de putere 27, 28, 29, 30, 31, 32. Cheia electronicii de putere 28 în regim de lucru asigură regimul de scădere din vectorul tensiunii înfășurării 7 a transformatorului de excitare 3 a vectorilor tensiunilor formați de înfășurările 13, 17, 14, 18 a transformatorului în serie 4, iar la activarea cheii electronicii de putere 29 obținem regimul de sumare a tensiunilor, și ca urmare reglăm valoarea unghiului decalajului de fază de la zero până la circa 24°. Valoarea tensiunii în înfășurările 17 și 18 a modulului unitar este determinată de înfășurarea transformatorului de excitare 8 sau 10 care se conectează în circuit de către cheile electronicii de putere. La conectarea bobinelor înfășurării 10 tensiunea în înfășurările 17 și 18 devine egală cu ½ din valoarea maximă posibilă și ceasta majorează numărul de paliere a valorii reglate a tensiunii decalajului de fază.

Reglarea tensiunii decalajului de fază includ două diapazone determinate de faptul, care din cheile 28 sau 29 este conectată.

Conectarea consecutivă a cheilor 27 și 31 conduce la schimbarea discretă și simultană a tensiunilor înfășurărilor de tensiune înaltă 13 și 14 a primului modul unitar 11, iar conexiunile efectuate consecutiv de cheile 27 și 32 asigură reglarea simultană și discretă a valorilor tensiunilor înfășurărilor 17 și 18 a modulului unitar 12. Conexiunea cheilor electronice (27):(32) după un algoritm prescris conduce la obținerea a opt valori discrete ale tensiunii și a unghiului decalajului de fază  $\psi$ .

Diagrama conexiunii racordate ale cheilor electronicii de putere (27):(32) este prezentată în tabel, iar în fig. 2-9 sunt prezentate diagramele fazice pentru toate combinațiile de conexiune ale cheilor electronice (27):(32) constituie pentru instalația care asigură reglarea discretă a unghiului decalajului de fază cu pasul  $\Delta\psi = 3,5^\circ$  în regimul de mers în gol și care se obțin prin șapte trepte de variație a acestei mărimi până la atingerea valorii maxime a mărimii reglate.

Diagrama stării de lucru a cheilor electronicii de putere

Valoarea unghiului decalajului de fază $\psi$ , grade electrice	Numărul cheii electronice și starea ei					
	28	31	32	30	27	29
0	1	1	1	0	0	0
3,48	1	1	0	1	0	0
6,96	1	0	1	0	1	0
10,42	1	0	0	1	1	0
13,86	0	1	1	0	0	1
17,28	0	1	0	1	0	1
20,67	0	0	1	0	1	1
24,02	0	0	0	1	1	1

În tabel este notat: 1 – starea activă (de lucru) a cheii, iar 0 – cheia este deconectată.

Varierea pasului de reglare a unghiului decalajului de fază  $\psi$  a instalației nu depășește  $\pm 1,5\%$ , și este condiționată de

micșorarea inducției în coloanele transformatoarelor proporțional evoluției valorii funcției  $\cos \frac{\psi}{2}$ . Deoarece pasul de variere discretă a unghiului decalajului de fază nu depășește valoare de  $3,5^\circ$  soluția tehnică propusă asigură și reglarea lentă a unghiului  $\psi$  prin modularea lățimii impulsurilor cu ajutorul cheilor electronicii de putere comandate după o lege determinată în regim închis-deschis, ceea ce ne asigură valoarea coeficientului de distorsiune a tensiunii de ieșire sub  $2\%$ , dar acest rezultat s-a obținut în baza utilizării numai a două module unitare în transformatorul serie în comparație cu cele 7 ale soluției tehnice realizate de prototip.

Puterea transformatorului în serie 4 format din modulele unitare 11 și 12 se determină din relația:

$$S_1 = \frac{2(\sin \frac{\psi_{\max}}{2} - \frac{3}{7} \sin \frac{\psi_{\max}}{2})}{\cos \frac{\psi_{\max}}{2}} S_r \approx 0,572 S'_{BT}, \quad (6)$$

iar puterea transformatorului de excitare:

$$S_3 = (2 \frac{3}{7} \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} + \frac{8}{7} \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}) S_r = S'_{ET}, \quad (7)$$

unde  $S_3$  – puterea aparentă a transformatorului de excitare în instalația propusă;

$S_1$  – puterea aparentă a transformatorului în serie în instalația propusă;

$S'_{ET}$  – puterea transformatorului de excitare a prototipului;

$S'_{BT}$  – puterea aparentă a transformatorului în serie a prototipului.

Puterea cheilor electronicii de putere în instalația propusă se determină din relațiile:

$$S_{28} = S_{29} = \frac{4}{7} \frac{S_q}{\cos \frac{\psi_{\max}}{2}}, \quad (8)$$

$$S_{21} = S_{31} = \frac{2}{7} \frac{S_q}{\cos \frac{\psi_{\max}}{2}}, \quad (9)$$

$$S_{30} = S_{32} = \frac{1}{7} \frac{S_q}{\cos \frac{\psi_{\max}}{2}}, \quad (10)$$

$$S_q = 2 S_r \sin \frac{\psi_{\max}}{2}, \quad (11)$$

$$S_{PE} = S_{27} + S_{28} + S_{29} + S_{30} + S_{31} + S_{32} = 4 \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} = S'_{PE}, \quad (12)$$

$$S_d = S_r - S_q - \Delta S, \quad (13)$$

unde:  $S_{21}$ ;  $S_{28}$ ;  $S_{29}$ ;  $S_{30}$ ;  $S_{31}$ ;  $S_{32}$  – puterea cheilor electronicii de putere (27)÷(32) în instalația propusă;

$S_q$  – partea de putere furnizată sarcinii, care trece prin transformatorul de excitare și prin transformatorul în serie;

$S_r$  – puterea aparentă totală a sarcinii;

$S_{PE}$  – puterea totală a cheilor electronicii de putere a instalației propuse;

$S'_{PE}$  – puterea totală a cheilor electronicii de putere a prototipului;

$S_d$  – cota puterii transmise în sarcină direct, prin ocolirea transformatorului de excitare și a transformatorului în serie;

$-\Delta S$  mărimea care include pierderile de energie în transformatoarele instalației propuse și puterea reactivă consumată de această instalație.

După puterea instalată cheile electronicii de putere se divizează în instalația propusă în trei grupări:  $S_{28}$ ;  $S_{29}$  – cu valoare mare a puterii instalate;  $S_{27}$ ;  $S_{31}$  – cu valoarea intermediară a puterii instalate și  $S_{30}$ ;  $S_{32}$  – cu valoarea mică a puterii instalate.

Rezultatul tehnic este o urmare a divizării fluxului de putere  $S_q$  care trece prin transformatorul complex cu decalajul unghiului de fază dirijat cu chei electronice de putere în două fluxuri:  $S_{q1}$  și  $S_{q2}$ . Un flux de putere  $S_{q1} = 0,428 S_q$  este supus numai la o singură transformare de către transformatorul de excitare, iar fluxul al doilea  $S_{q2} = 0,572 S_q$  este modificat de două ori, atât de transformatorul de excitare, cât și de transformatorul serie.

Puterea transformatorului de excitare a instalației propuse este egală cu puterea transformatorului de excitare a prototipului, iar puterea totală a transformatorului în serie se micșorează cu  $42,8\%$ , ceea ce îmbunătățește indicii tehnici și economici ai instalației propuse. Pentru regimul de funcționare la valoarea unghiului decalajului de fază  $\psi = \psi_{\max}$  pierderile de energie în instalația propusă se micșorează cu  $21,4\%$  în comparație cu prototipul.

Rezultatul tehnic constă în diminuarea masei, gabaritelor, costului total și a pierderilor de energie în transformatorul cu decalajul fazei dirijat cu chei electronice de putere și a lărgirii posibilităților de fabricare a echipamentului ca o unitate constructivă integră. Aceasta este o urmare a divizării fluxului de energie conversat de transformatorul cu decalajul fazei dirijat cu chei electronice de putere în două fluxuri, unul din care ocolește transformatorul în serie.

Veridicitatea soluției tehnice propuse și robustețea ei a fost verificată experimentală în Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei.