

Sinusinės trifazės apvijos pagrindimas ir tyrimas

Jonas Bukšnaitis

*Lietuvos žemės ūkio universitetas,
Žemės ūkio inžinerijos fakultetas,
Agroenergetikos katedra,
Studentų g. 11, Akademija,
LT-53361 Kauno r.*

Išnagrinėtos trifazės apvijos, kurių pagrindu būtų galima sudaryti sinusinę trifazę apviją. Nustatyta, kad tokią apviją galima sudaryti tik iš dvisluoksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos, kuri visiškai atitinka sinusinės trifazės apvijos elektrinei schemai keliamas struktūrinės sąlygas. Pateikta autoriaus sudaryta sinusinės trifazės apvijos ričių vijų skaičiaus nustatymo, optimizuojant jos pulsuojamąsias magnetovaras, metodika. Išnagrinėtos dvipolė ir keturpolė sinusinės bei tuos pačius pagrindinius parametrus turinčios nesinusinės trifazės apvijos, pateiktas jų pagal atitinkamus rodiklius palyginimas.

Raktažodžiai: viensluoksnė (dvisluoksnė) koncentrinė trifazė apviją, sinusinė trifazė apviją, ričių grupė, ritės vijų skaičius, pulsuojamosios magnetovaros optimizavimas, erdvinė (santykinė) harmonika, apvijos efektyvumo koeficientas

1. ĮVADAS

Dėl kintamosios srovės elektros mašinų statoriaus ir rotorius magnetolaidžių dantytumo, apvijų diskretinio išdėstymo ir kitų priežasčių susidaro sąlygos susikurti periodiniams nesinusiniams magnetiniams laukams. Toks iškraipytas magnetinis laukas elektros mašinos oro tarpe gali būti išskleidžiamas erdvinėmis harmonikomis [1–3]. Dažniausiai pirmoji (pagrindinė) magnetinio lauko erdvinė harmonika kintamosios srovės elektromechaniniame keitiklyje atlieka naudingas jai skirtas funkcijas. Aukštesnės eilės magnetinio lauko erdvinė harmonikų įtaka šių elektros mašinų darbui yra iš esmės neigiama: jos didina elektros mašinų galios nuostolius, blogina asinchroninių variklių mechanines charakteristikas, iškraipo apvijose indukuotas elektrovaras, sukelia papildomus triukšmus, rezonansinius reiškinius ir kt.

Kai kurioms aukštesniosioms oro tarpo magnetinio lauko erdvinėms harmonikoms sumažinti arba visiškai panaikinti, t. y. magnetovaros kreivės formai priartinti prie sinusinio pasiskirstymo, imamasi tam tikrų priemonių: trumpinamas apvijos žingsnis, apviją paskirstoma ir kt. Sutrumpinus apvijos žingsnį y pagrindinės harmonikos polių žingsnio τ atžvilgiu, sumažinamos arba panaikinamos tik kai kurios aukštesniosios magnetovaros harmonikos. Paskirstytosios apvijos magnetovara oro tarpe yra pakopų formos ir artimesnė sinusinei nei sutelktosios apvijos stačiakampės formos magnetovara.

Kartais paskirstytųjų koncentrinė vienfazė apvijų ričių grupių, turinčių po $q/2$ ričių ir atitinkančių vienam apvijos poliui, ričių vijų skaičiai, kurie nu-

statomi pagal tam tikrą dėsnį, yra skirtingi, t. y. $N_1 \neq N_2 \neq \dots \neq N_i \neq \dots \neq N_{q/2}$; čia N_i – i -osios ritės vijų skaičius [4, 5]. Tokios apvijos sukurta pulsuojamosios magnetovaros kreivė optimaliai priartinama prie sinusinio pasiskirstymo. Todėl ši apviją vadinama sinusine vienfaze apviją. Sinusinė apviją – tai tokia kintamosios srovės koncentrinė apviją, sudaryta iš vienodų ričių grupių, kurių skaičius fazėje atitinka šios apvijos polių skaičių, o grupes sudarančių ričių vijų skaičiai, kurie nuo šių grupių simetrijos ašių yra pasiskirstę pagal sinuso dėsnį, skirtingi. Vienfaziai asinchroniniai varikliai su šio tipo apvijomis turi labai gerus energinius ir ekonominius rodiklius, taip pat kitų teigiamų savybių [1]. Tačiau apie sinusines trifazes apviją nebuvo rašyta techninėje literatūroje, nenaudojamos jos ir praktikoje. Galima manyti, kad tokių trifazių apvijų panaudojimas, pavyzdžiui, asinchroniniuose varikliuose, iki minimumo sumažintų aukštesniąsias magnetovaros harmonikas, todėl pagerėtų jų energiniai rodikliai. Šiame darbe aptarsime galimybę pagrįsti ir sukurti sinusinę trifazę apviją, kuri padėtų patobulinti trifazes elektros mašinas.

2. SINUSINĖS TRIFAZĖS APVIJOS PAGRINDIMAS

Atrodo, kad pagaminti ir praktikoje naudoti sinusines trifazes apviją neturėtų kilti jokių problemų, nes visų tipų trifazės apviją su vienodu vijų skaičiumi ritėse yra sudarytos iš vienfazė apvijų, kurių pradžios erdvėje skiriasi 120 elektrinių laipsnių. Kaip minėta, vienfazė sinusinių apvijų teorija yra pagrįs-

ta [4, 5], atlikti jų skaičiavimai, jos senokai naudojamos vienfaziuose asinchroniniuose varikliuose. Atrodytų, apie šias apvijas sukauptą informaciją beliktų pritaikyti paskirstytosioms trifazėms apvijoms ir gauti sinusinę trifazę apviją. Tačiau dėl daugelio priežasčių to padaryti neįmanoma. Pirmiausia nė vienos iš dažniausiai praktikoje naudojamų viensluoksnių ir dvisluoksnių forminių trifazių apvijų negalima pritaikyti sinusinei trifazei apvijai sudaryti, kadangi jos neatitinka sinusinių apvijų elektrinių schemų pagrindinių struktūrinių sąlygų:

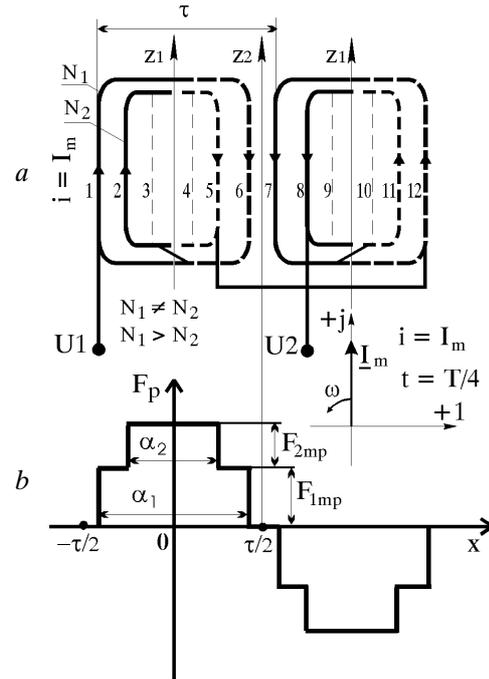
1) teigiamus ir neigiamus kiekvienos fazės pulsuojamųjų magnetovarų bangų pusperiodžius su skirtingo aukščio pakopomis sinusinėse trifazėse apvijose gali kurti tik atskiros atitinkamai tarpusavyje elektromagnetiškai sujungtos ričių grupės, t. y. ši apvija turi būti sudaryta iš $6p$ vienodų ričių grupių; čia p – apvijos polių porų skaičius;

2) norint gauti bet kuriuo laiko momentu artimą sinusiniam su skirtingo aukščio pakopomis pulsuojamąją magnetovaros skirstinį, simetrišką koordinatinių ašių atžvilgiu, reikia, kad ši skirstinį sąlygojančios ričių grupės, kurias sudarančios ritės turės skirtingą skaičių vijų, visais aspektais taip pat būtų simetriškos nagrinėjamų ričių grupių ašių atžvilgiu;

3) visų ričių grupių žingsniai sinusinėse trifazėse apvijose turi būti vienodi ir lygūs $(\tau - 1)$; čia τ – polių žingsnis, išreikštas griovelių skaičiumi.

Visi naudojami įterptinių trifazių apvijų tipai netenkina visų arba dviejų anksčiau minėtų sinusinių apvijų elektrinių schemų struktūrinių sąlygų. Artimiausia sinusinei trifazei apvijai būtų dvisluoksni koncentrinė trifazė apvija su vienodu skaičiumi vijų ritėse, kuri netenkina tik trečiosios sąlygos, kadangi jos $y_1 = \tau$; čia y_1 – pirmosios ritės arba šios apvijos ričių grupės žingsnis [6].

Remiantis sinusinių vienfazinių apvijų sukurta teorija [4, 5], galima teigti, kad sinusinė trifazė apvija gali būti sudaryta paskirstytoms ritinėms įterptinėms trifazėms apvijoms, suvyniotoms iš lanksčių sekcijų. Kad nepažeistume trifazių apvijų simetriškumo sąlygų, visos nagrinėjamos apvijos fazinių ričių grupės turi būti vienodos tiek erdvinio ričių išdėstymu, tiek giminiškų ričių matmenimis ir vijų skaičiumi jose. Kiekvienos fazės ričių grupių simetriškumui jų ašių atžvilgiu išlaikyti ir kad šių ričių grupių žingsnis būtų lygus $(\tau - 1)$, siūloma panaudoti vienintelį galimą variantą, t. y. ritės kiekvienoje ričių grupėje išdėstyti koncentriškai, o tai pačiai fazei priklausančias ričių grupes kloti nutolusias viena nuo kitos žingsniu, lygiu τ (1 pav.). Tai būtų dvisluoksni koncentrinė trifazė apvija su vienodu vijų skaičiumi ritėse atmaina – dvisluoksni koncentrinė trifazė sumažinto žingsnio apvija [7]. Kitaip tariant, siūlomos sinusinės trifazės apvijos elektrinės schemos struktūroje



1 pav. Sinusinės trifazės apvijos vienos fazės elektrinės schemos struktūra (a) ir jos laiko momentu $t = T/4$ sukurtos pulsuojamosios magnetovaros erdvinis skirstinys (b)

ričių grupės pagal sudarymo pobūdį mažai skirtingai nuo sinusinių vienfazinių apvijų ričių grupių.

Sinusinė trifazė apvija su koncentrinėmis ričių grupėmis būtinai turi būti gaminama dvisluoksni, nes tik dvisluoksni trifazėse apvijose viena ričių grupė atitinka vieną polių (viensluoksni trifazėse apvijose viena ričių grupė atitinka vieną polių porą). Remiantis numatyta sinusinių trifazių apvijų elektrinių schemų struktūra, kiekvienos fazės ritės visais atvejais bus suklotos į du trečdalius skirtingų magnetolaidžio griovelių. Kadangi ši apvija yra dvisluoksni, tai vienos fazės ritėms iš tikrųjų teks trečdalis magnetolaidžio griovelių Z . Tai atitinka vieną pagrindinių trifazėms apvijoms keliamų reikalavimų. Kad šią apviją visais aspektais gautume simetrišką, pusė kiekvienai fazei priklausančių ričių aktyviųjų šonų turės būti klojama į apatinius griovelių sluoksnius, kita pusė – į viršutinius.

Sinusinių trifazių apvijų pagrindinių parametrų ryšys būtų nusakomas ta pačia lygtimi kaip ir nesinusinių trifazių apvijų:

$$Z = 2p \cdot m \cdot q; \quad (1)$$

čia Z – statoriaus magnetolaidžio griovelių skaičius; $2p$ – sinusinės trifazės apvijos polių skaičius; m – fazinių skaičius; q – ričių (griovelių) skaičius, tenkantis poliui ir fazei.

Pažymėtina, kad sinusinės trifazės apvijos negalėsime sudaryti su bet kuriuo ričių skaičiumi q . Ri-

čių skaičius q , tenkantis poliui ir fazei, šioje apvijoje galės būti tik sveikasis skaičius. Tuomet bet kurios dvi ričių grupės, esančios viena šalia kitos, kurs skirtingo poliškumo simetriškus, artimus sinusiniams pulsuojamuosius magnetinius laukus (1 pav.). Savaiame suprantama, kuo ričių skaičius q ričių grupėje bus didesnis, tuo magnetovaros skirstinys bus artimesnis sinuso dėsniai. Taigi ričių skaičius q , sudarantis ričių grupę, turėtų būti ne mažesnis kaip du ($q = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$). Esant $q = 1$, gautume sutelktąją, o ne sinusinę trifazę apviją.

Sinusinės trifazės apvijos vidutinis žingsnis bus lygus

$$y_{vid} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_q}{q} = \frac{[(\tau - 1) + (\tau - 3) + \dots + (\tau - 2q + 1)]}{q} = \frac{2}{3} \tau = 2q; \quad (2)$$

čia $\tau = Z / (2p)$ – polių žingsnis.

Iš (2) formulės matyti, kad vidutinis šios apvijos žingsnis gaunamas sutrumpintas vienu trečdaliu polių žingsnio τ . Tai reiškia, kad aukštesniosios erdvinės harmonikos trijų kartotinės kiekvienos apvijos fazės kuriamuose pulsuojamuosiuose magnetiniuose laukuose bus lygios nuliui. Kaip žinoma, šios harmonikos nesusinūsėse trifazėse apvijose tampa lygios nuliui tik sukiuosiuose magnetiniuose laukuose, o pulsuojamuosiuose jos dažniausiai išlieka. Kitos magnetinių laukų aukštesniosios nelyginės erdvinės harmonikos ($v = 5, 7, 11, \dots$) sinusinės trifazėse apvijose gerokai sumažės paskirsčius šias apvijas ($q \geq 2$), taip pat suvyniojant rites ričių grupėse su skirtingu vijų skaičiumi, kuris nustatomas pagal tam tikrą dėsnį.

Sinusinėse trifazėse apvijose fazių pradžios, kaip ir įprastinėse trifazėse apvijose, viena kitos atžvilgiu bus perstumtos $2\pi/3$ elektriniais kampais, t. y. per $Z/(3p)$ statoriaus griovelių. Tarkim, kad U fazės pradžia bus išvesta iš n -ojo statoriaus griovelio. Tada V fazės pradžia turi išeiti iš $(Z/(3p) + n)$ -ojo, o W fazės pradžia – iš $(2Z/(3p) + n)$ -ojo statoriaus griovelio.

Iš anksčiau pateiktų samprotavimų gaunama, kad teikiamos sinusinės trifazės apvijos nebus galima pagaminti esant bet kuriems statoriaus magnetolaidžio griovelių Z ir polių porų p skaičiams. Norint gauti griovelių arba ričių skaičių, tenkantį poliui ir fazei, $q \geq 2$, statoriaus magnetolaidžio griovelių skaičius turi būti lyginis ir dalus iš šešių. 1 lentelėje pateikta, kuriam galimam statoriaus griovelių skaičiui esant galima (+) arba negalima (–) sudaryti sinusinę trifazę apviją su atitinkamu polių porų skaičiumi, kuris atitiktų sąlygą $q \geq 2$.

1 lentelėje matyti, kad, sudarant sinusines trifazes apviją, magnetolaidžio griovelių ir polių porų

skaičius išsidėsto pagal tam tikrą dėsnį. Sinusinę trifazę apviją su viena polių pora galima sudaryti kiekvienam 1 lentelėje pateiktam statoriaus griovelių skaičiui, su dviem – kas antram, su trimis – kas trečiam ir t. t. Suprantama, kad 1 lentelę, didinant galimus statoriaus griovelių skaičius, galima kiek norima išplėsti.

1 lentelė. Galimi magnetolaidžio griovelių ir atitinkamai polių porų skaičiai sinusinei trifazei apvijai sudaryti

Griovelių skaičius Z	Polių porų skaičius p					
	1	2	3	4	5	6
12	+	–	–	–	–	–
18	+	–	–	–	–	–
24	+	+	–	–	–	–
30	+	–	–	–	–	–
36	+	+	+	–	–	–
42	+	–	–	–	–	–
48	+	+	–	+	–	–
54	+	–	+	–	–	–
60	+	+	–	–	+	–
66	+	–	–	–	–	–
72	+	+	+	+	–	+

3. SINUSINĖS TRIFAZĖS APVIJOS RIČIŲ VIJŲ SKAIČIAUS NUSTATYMAS OPTIMIZUOJANT PULSUOJAMĄSIAUS MAGNETOVARAS

Panagrinėsime dviejų skirtingų parametrų sinusinių trifazių apvijų sudarymą. Pagrindiniai ir kiti apskaičiuoti teikiamų apvijų parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelėje matyti, kad pirmosios apvijos kiekviena fazė bus sudaryta iš dviejų ričių grupių, turinčių po tris rites, o antrosios apvijos – iš keturių ričių grupių, turinčių po dvi rites. Abiejose apvijose ričių

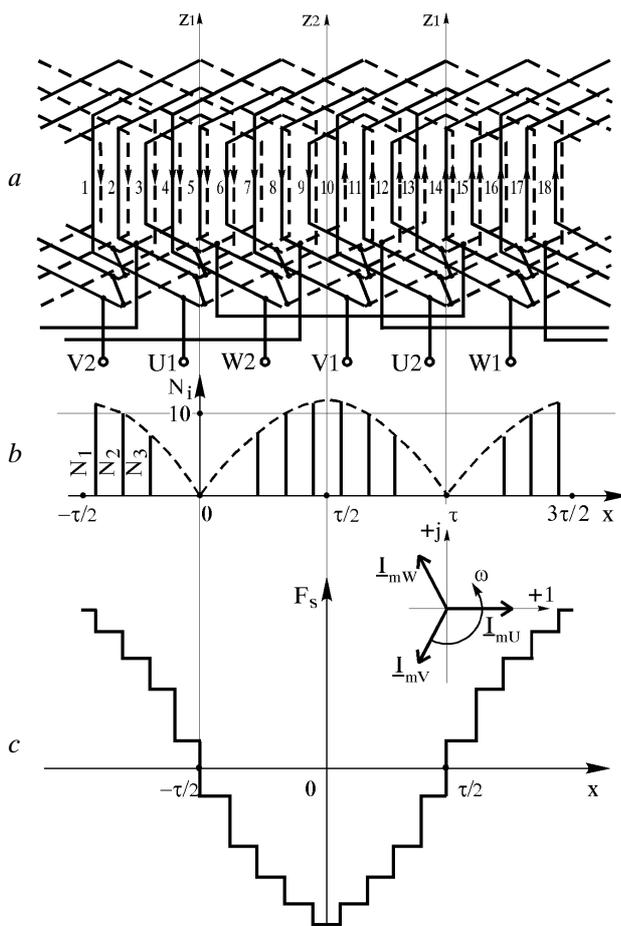
2 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių ir nesusinusių trifazių apvijų parametrai

Apvijų parametras	Apvijų variantas	
	I	II
Fazių skaičius (m)	3	3
Griovelių skaičius (Z)	18	24
Polių skaičius ($2p$)	2	4
Ričių (griovelių) skaičius, tenkantis fazei ir poliui (q)	3	2
Polių žingsnis (τ)	9	6
Vidutinis apvijos žingsnis (y_{vid})	6	4
Kampas tarp gretimų magnetolaidžio griovelių (β)	20°	30°

grupės atitinka po vieną polių. Remdamiesi 1 pav. ir 2 lentelės parametrais, sudarome nagrinėjamų sinusinių ir nesinusinių trifazių apvijų elementų išdės-

3 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių ir nesinusinių trifazių apvijų elementų išdėstymo lentelė

Fazių kaita	Ričių skaičius grupėje		Griovelio numeris			
			I variantui		II variantui	
	I	II	Z	Z'	Z	Z'
U1	3	2	1; 2; 3	7; 8; 9	1; 2	5; 6
W2	3	2	4; 5; 6	10; 11; 12	3; 4	7; 8
V1	3	2	7; 8; 9	13; 14; 15	5; 6	9; 10
U2	3	2	10; 11; 12	16; 17; 18	7; 8	11; 12
W1	3	2	13; 14; 15	1; 2; 3	9; 10	13; 14
V2	3	2	16; 17; 18	4; 5; 6	11; 12	15; 16
U1		2			13; 14	17; 18
W2		2			15; 16	19; 20
V1		2			17; 18	21; 22
U2		2			19; 20	23; 24
W1		2			21; 22	1; 2
V2		2			23; 24	3; 4



2 pav. Dvipolės sinusinės trifazės apvijos elektrinė schema (a), šios apvijos U fazės vijų skaičiaus išdėstymas ritėse (b) ir jos sukurtos laiko momentu $t = 0$ sukiosios magnetovaros erdvinis skirstinys (c)

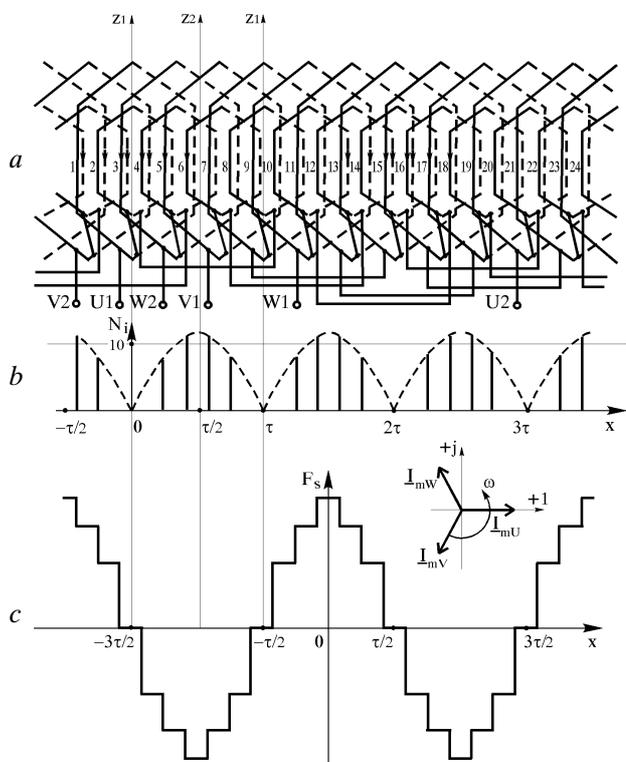
tymą (3 lentelė) ir elektrines schemas (2 pav., a; 3 pav., a).

Kadangi sinusinėse trifazėse apvijose vieno poliaus pulsuojamojo magnetinio lauko skirstinį erdvėje formuoja ričių grupė, tai ji ir bus pagrindinis šių apvijų elementas. Vadinasi, bet kuri nagrinėjamoji apvija sudaroma iš $2pm$ vienodų ričių grupių, atitinkamai išdėliotų erdvėje, ir kiekviena iš jų turi po q ričių su nevienodu skaičiumi vijų. Ritės ričių grupėse jungiamos nuosekliai, todėl jomis teka ta pati sinusinė srovė. Tuomet, kad kuriamas kiekvienos ričių grupės pulsuojamosios magnetovaros pusperiodis būtų kuo artimesnis sinusoidai, šių grupių ričių vijų skaičiaus išdėstymai ritėse taip pat turi kisti pagal sinuso dėsnį. 2 pav., b ir 3 pav., b pateikti vienos fazės (U) erdviniai vijų skaičiaus N_i išdėstymai ritėse. Šie išdėstymai yra erdvinės koordinatės sinuso funkcija. Šios koordinatės pradžia yra ričių grupių simetrijos ašys z_1 (2 pav. ir 3 pav., a). Tuomet i -osios ritės vijų skaičius surandamas iš šios išraiškos:

$$N_i(x) \cong k \cdot N \cdot \sin \left[\left(\frac{\pi - \beta}{2} \right) - (i - 1) \cdot \beta \right] =$$

= artimiausias sveikasis skaičius; (3)

čia $\beta = 2\pi \cdot p/Z$ – griovelių žingsnis elektriniais laipsniais; N – maksimalus statoriaus griovelyje efek-



3 pav. Keturpolės sinusinės trifazės apvijos elektrinė schema (a), šios apvijos U fazės vijų skaičiaus išdėstymas ritėse (b) ir jos sukurtos laiko momentu $t = 0$ sukiosios magnetovaros erdvinis skirstinys (c)

tyvių laidininkų skaičius; $k < 1$ – koeficientas, įvertinantis apvijų dvisluoksniškumą; i – ritės numeris ričių grupėje.

Pirmąjį numerį ričių grupėje turės ritė, kurios žingsnis lygus $(\tau - 1)$, antrąjį – ritė, kurios žingsnis $(\tau - 3)$, ir t. t. Tuomet remiantis (3) išraiška gaunama, kad pirmoji didžiausio žingsnio ritė turės ir didžiausią vijų skaičių N_1 , o q -oji mažiausio žingsnio ritė – mažiausią vijų skaičių N_q .

Koeficientui k nustatyti pirmiausia apskaičiuojami proporcingai padidinti vijų skaičiai $N'_i(x)$ ritėse:

$$N'_i(x) = N \cdot \sin \left[\left(\frac{\pi - \beta}{2} \right) - (i - 1) \cdot \beta \right]. \quad (4)$$

Kaip matyti 2 pav., a ir 3 pav., a, nagrinėjamosiose sinusinėse trifazėse apvijose visus magnetolaidžių griovelius užima (po du) skirtingų fazių aktyvieji ričių šonai, kurių vijų suma gaunama lygi arba artima maksimaliam statoriaus griovelyje efektyvių laidininkų skaičiui ($N_1 + N_q$; $N_2 + N_{q-1}$; ...), todėl galima manyti, kad šių griovelių užpilda skirsis nedaug (visi magnetolaidžio grioveliai bus panaudojami efektyviai). Abu šiuos teikiamų sinusinių trifazių apvijų bruožus galima traktuoti tik teigiamai. Remiantis pateiktais duomenimis, surandamos proporcingai padidintos pagal (4) formulę apskaičiuotų laidininkų atitinkamuose grioveliuose skaičių sumos:

kai q yra lyginis skaičius –

$$N'_1 + N'_q; N'_2 + N'_{(q-1)}; \dots; N'_{q/2} + N'_{[(q/2)+1]}$$

ir kai q yra nelyginis skaičius –

$$N'_1 + N'_q; N'_2 + N'_{(q-1)}; \dots; 2 \cdot N'_{(q+1)/2}.$$

Iš gautų sumų išrenkama didžiausia ($N'_i + N'_{(q-i)}$)_{max} ir apskaičiuojamas koeficientas k :

$$k = N / (N'_i + N'_{(q-i)})_{\max}. \quad (5)$$

Tardami, kad $N = 20$, ir remdamiesi nagrinėjamų sinusinių trifazių apvijų 2 lentelėje pateiktais parametrais bei (3–5) išraiškoms, apskaičiuojame ričių grupėje sąlyginius ričių vijų skaičius. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

Remiantis 4 lentelės rezultatais nustatoma, kad pirmame apvijų variante 2, 5, 8 ir t. t. magnetolaidžio griovelių užpilda gaunama leistina maksimali,

Ritės numeris i ričių grupėje	Sąlyginis vijų skaičius N_i ritėse	
	I variantui	II variantui
1	11	12
2	10	8
3	7	–

o 1, 3, 4, 6, 7 ir t. t. griovelių ji sumažėja 10%. Antrajame apvijų variante visų magnetolaidžio griovelių užpilda gaunama leistina maksimali.

Apskaičiuoti sąlyginiai vijų skaičiai U fazės apvijų ritėse taip pat grafiškai pateikti 2 pav., b ir 3 pav., b.

Jeigu nagrinėjamos trifazės apvijų būtų gaminamos nesusinusinės, visoms ritėms abiejuose variantuose tektų po 10 sąlyginių vijų.

4. SINUSINIŲ TRIFAZIŲ APVIJŲ MAGNETOVARŲ TYRIMAS

Teorinis tyrimas atliekamas naudojant nagrinėjamų apvijų magnetovaros bangų, kintančių laikui bėgant ir erdvėje, grafinius vaizdus (2 pav., c; 3 pav., c), gautus remiantis 2 pav., a ir 3 pav., a elektrinėmis schemomis bei fazių srovių laiko momentu $t = 0$ sustabdyta vektorių diagrama. Pagal šią diagramą nagrinėjamų apvijų fazėse nustatomi sąlyginiai srovių dydžiai ir jų tekėjimo kryptys. Sinusinių trifazių apvijų sąlyginiai nevienodi ričių vijų skaičiai N_i pateikti 4 lentelėje. Tariama, kad šiomis apvijomis tekančių fazinių srovių maksimalios vertės I_m yra lygios vienetai (sąlyginės vienietinės srovės). Nagrinėjant šias apvijų, tariama, kad magnetolaidžių plieno magnetinė skvarba $\mu = \infty$. Remdamiesi anksčiau pasirinktais sąlyginiais N_i ir I_m dydžiais ir žinodami, kad magnetovara $F = i \cdot N$, sudarome 5 lentelę.

Kadangi teikiama sinusinė trifazė apvija yra simetriška, tai per visą oro tarpo perimetrą magnetovaros pokyčiai grioveliuose pasikartos periodiškai. Remiantis 5 lentelės duomenimis, gauti nagrinėjamų sinusinių trifazių apvijų sukiosios magnetovaros laiko momentu $t = 0$ grafiniai vaizdai (2 pav., c; 3 pav., c).

Griovelio numeris	Magnetovaros sąlyginis pokytis grioveliuose			
	I variantui		II variantui	
	$N_1 \neq N_2 \neq N_3$	$N_1 = N_2 = N_3$	$N_1 \neq N_2$	$N_1 = N_2$
5	-17,32	-17,32	–	–
6	-16,28	-17,32	–	–
7	-9,86	-8,66	–	–
8	-8,66	-8,66	–	–
9	-6,43	-8,66	–	–
10	6,43	8,66	17,32	17,32
11	8,66	8,66	9,99	8,66
12	9,86	8,66	7,33	8,66
13	16,28	17,32	-7,33	-8,66
14	17,32	17,32	-9,99	-8,66
15	–	–	-17,32	-17,32

Nagrinėjimų trifazių apvijų sukamųjų apskritimi- nių magnetinių laukų v -ųjų harmonikų amplitudėms analiziškai apskaičiuoti panaudojama [2] gauta iš- raiška:

$$F_{mv} = \frac{4}{\pi \cdot v} \sum_{i=1}^k F_i \sin v \frac{\alpha_i}{2}; \quad (6)$$

čia k – pakopų formos magnetovaros pusperiodžius sudarančių stačiakampių skaičius; F_i – pakopų for- mos magnetovaros pusperiodžio i -ojo stačiakampio sąlyginis aukštis; α_i – pakopų formos magnetovaros kreivės i -ojo stačiakampio plotis, išreikštas puspe- riodžio elektriniais laipsniais.

Sukiosios magnetovaros erdvinių funkcijų harmo- ninei analizei atlikti panaudojamas 2 pav., c tarp erdvinių taškų $-\tau/2$ ir $\tau/2$ esantis neigiamas puspe- riodis bei 3 pav., c tarp tų pačių erdvinių taškų esantis teigiamas pusperiodis. Realius ir sąlyginius nagrinėjimų magnetovaros pusperiodžių parametrus surašome į 6 lentelę.

Apskaičiuoti erdvinių harmonikų sąlyginiai am- plitudiniai dydžiai pateikti 7 lentelėje.

Iš 7 lentelėje pateiktų harmoninės analizės re- zultatų matyti, kad pirmojo varianto sinusinės tri- fazės apvijų sąlyginė pirmoji magnetovaros harmo- nika truputį sumažėjo (–1,05%), o antrojo vari- anto – šiek tiek padidėjo (2,19%), palyginti su atitinkamų nesinusinių trifazių apvijų pirmosiomis sąlyginėmis magnetovaros harmonikomis. Pirmojo varianto sinusinės trifazės apvijų penktoji ir sep- tintoji magnetovaros harmonikos sumažėjo atitin- kamai 31,5 ir 45,2%, o antrojo varianto tos pa- čios harmonikos tų pačių nesinusinių trifazių apvi- jų harmonikų atžvilgiu taip pat sumažėjo atitinka- mai 32,7 ir 32,8%.

6 lentelė. Realūs ir sąlyginiai nagrinėjimų magne- tovaros pusperiodžių parametrai

Magne- tovaros pus- periodžio parametras	Sinusinių ir nesinusinių trifazių apvijų variantas			
	I		II	
	$N_1 \neq N_2 \neq N_3$	$N_1 = N_2 = N_3$	$N_1 \neq N_2$	$N_1 = N_2$
k	5	5	3	3
F_1	–8,66	–8,66	17,32	17,32
F_2	–16,28	–17,32	9,99	8,66
F_3	–9,86	–8,66	7,33	8,66
F_4	–8,66	–8,66	–	–
F_5	–6,43	–8,66	–	–
α_1	180°	180°	150°	150°
α_2	140°	140°	90°	90°
α_3	100°	100°	30°	30°
α_4	60°	60°	–	–
α_5	20°	20°	–	–

7 lentelė. Nagrinėjimų sinusinių ir nesinusinių tri- fazių apvijų magnetovaros harmoninės analizės rezultatai

F_{msv}	Sinusinių ir nesinusinių trifazių apvijų variantas			
	I		II	
	$N_1 \neq N_2 \neq N_3$	$N_1 = N_2 = N_3$	$N_1 \neq N_2$	$N_1 = N_2$
F_{ms1}	–47,1	–47,6	32,7	32,0
F_{ms5}	–1,48	–2,16	1,15	1,71
F_{ms7}	–0,69	–1,26	0,82	1,22
F_{ms11}	–0,44	–0,80	2,97	2,91
F_{ms13}	–0,57	–0,83	–2,52	–2,46
F_{ms17}	–2,77	–2,80	–0,34	–0,50
F_{ms19}	2,48	2,51	–0,30	–0,45
F_{ms23}	0,32	0,47	–1,42	–1,39
F_{ms25}	0,19	0,35	1,31	1,28
F_{ms29}	0,17	0,30	0,20	0,30

8 lentelė. Nagrinėjimų sinusinių ir nesinusinių tri- fazių apvijų magnetovaros harmonikų absoliutiniai santy- kiniai dydžiai pagrindinės harmonikos atžvilgiu

$\frac{F_{msv}}{F_{ms1}}$	Sinusinių ir nesinusinių trifazių apvijų variantas			
	I		II	
	$N_1 \neq N_2 \neq N_3$	$N_1 = N_2 = N_3$	$N_1 \neq N_2$	$N_1 = N_2$
f_1	1	1	1	1
f_3	0,032	0,045	0,035	0,054
f_7	0,015	0,026	0,025	0,038
f_{11}	0,009	0,017	0,091	0,091
f_{13}	0,012	0,017	0,077	0,077
f_{17}	0,059	0,059	0,010	0,016
f_{19}	0,053	0,053	0,009	0,014
f_{23}	0,007	0,010	0,043	0,043
f_{25}	0,004	0,007	0,040	0,040
f_{29}	0,04	0,006	0,006	0,009

Remiantis 7 lentelės duomenimis, 8 lentelėje pa- teikiami magnetovaros erdvinių harmonikų absoliu- tiniai santykiniai dydžiai pagrindinės harmonikos at- žvilgiu.

Pasinaudoję nagrinėjimų sinusinių ir nesinusi- nių trifazių apvijų magnetovaros harmonikų absoliu- tiniais santykiniais dydžiais (8 lentelė), pagal (7) iš- raišką [3] apskaičiuojame šių apvijų efektyvumo ko- eficientus:

$$k_{ef} = 1 - \sqrt{\sum_{v=5}^{\infty} f_v^2}; \quad (7)$$

čia f_v – v -osios magnetovaros harmonikos santykinis dydis.

Gauname, kad pirmojo varianto sinusinės tri- fazės apvijų $k_{ef} = 0,912$, to paties varianto nesinusi- nės apvijų $k_{ef} = 0,901$. Antrojo varianto sinusinės

trifazės apvijos $k_{ef} = 0,859$ ir šio varianto nesinusinės apvijos $k_{ef} = 0,850$. Pirmojo varianto sinusinės trifazės apvijos efektyvumo koeficientas padidėjo 1,22%, o antrojo – 1,06%.

5. IŠVADOS

1. Iš visų nesinusinių trifazių apvijų tik dvisluoksnė koncentrinė trifazė sumažinto žingsnio apvija atitinka sinusinių trifazių apvijų elektrinėms schemoms keliamas struktūrinės sąlygas, nes šioje apvijoje teigiamus ir neigiamus kiekvienos fazės pulsuojamųjų magnetovarų bangų pusperiodžius kuria atskiros ričių grupės, kurios visais aspektais yra simetriškos šių grupių ašių atžvilgiu ir jų žingsnis yra vienu grioveliu mažesnis už polių žingsnį.

2. Teikiama sinusinė trifazė apvija sudaroma iš dvisluoksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos, paliekant tą pačią jos elektrinės schemos struktūrą, bet pakeičiant ričių grupių ritėse vijų skaičius taip, kad jų erdvinis išdėstymas nuo šių grupių simetrijos ašių kistų pagal sinuso dėsnį.

3. Sinusinės trifazės apvijos vidutinis žingsnis lygus dviems trečiosioms polių žingsnio, vadinasi, jos žingsnis vienu trečdaliu trumpesnis už polių žingsnį, todėl šios apvijos pulsuojamųjų magnetovarų harmoniniame spektre trijų kartotinių harmonikų nėra.

4. Kadangi sinusinėje trifazėje apvijoje kiekvienos fazės ričių aktyvieji šonai užima dalinai du trečdalius magnetolaidžio griovelių skaičiaus, tai bet kuriai fazei su viršutiniais ir apatiniais ričių sluoksniais grioveliuose tenka po vieną trečdalį griovelių, todėl gaunamas optimalus šios apvijos paskirstymas tenkinant pagrindinę trifazių apvijų sąlygą.

5. Teikiamos sinusinės trifazės apvijos ričių grupėse ritės suvyniotos su skirtingu skaičiumi vijų, todėl jų pulsuojamųjų magnetovarų kreivės, turinčios kiekviename poliuje pasikartojančias skirtingo aukščio pakopas, labiausiai priartėja, palyginti su kitų nesinusinių trifazių apvijų magnetovaromis, prie sinusinio skirstinio, dėl to ši apvija pranašesnė už bet kurią nesinusinę trifazę apviją.

6. Kadangi sinusinės trifazės apvijos ričių grupėse didesnio žingsnio ritės visuomet turi daugiau vijų ir bet kuriuo atveju šioje apvijoje vienu fazių ritės, turinčios daugiau vijų, klojamos į atitinkamus magnetolaidžių griovelius su kitų fazių ritėmis, turinčiomis mažiau vijų, todėl teikiamos apvijos atskirų griovelių užpildos dažniausiai yra nevienodos, tačiau jos yra artimos leistinajai didžiausiai užpildai.

7. Sinusinių trifazių apvijų sukamųjų magnetovarų pagrindinės harmonikos vienais atvejais gaunamos truputį mažesnės, kitais – truputį didesnės nei atitinkamų nesinusinių trifazių apvijų tos pačios magnetovaros harmonikos, tačiau sinusinių apvijų aukš-

tesniosios magnetovaros harmonikos (5, 7, 11, ...) dažniausiai gaunamos pastebimai mažesnės nei atitinkamų dvisluoksnų koncentrinų sumažinto žingsnio trifazių apvijų tos pačios harmonikos.

Gauta
2003 06 26

Literatūra

1. Marazas S. Elektros mašinos. Vilnius: Mokslas, 1989. 303 p.
2. Bukšnaitis J. Trifazių žadinimo apvijų kuriamų magnetinių laukų analizė // Elektronika ir elektrotechnika. 2003. Nr. 1(43). P. 43–46.
3. Bukšnaitis J. Trifazės trupmeninės apvijos elektromagnetinis įvertinimas // Elektronika ir elektrotechnika. 2001. Nr. 1(30). P. 61–66.
4. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1961. 245 с.
5. Мушкетов Н. А. Обмотки однофазных асинхронных электродвигателей // Электродвигатели малой мощности. Ленинград: Наука, 1971. С. 23–39.
6. Клоков Б. К. Обмотчик электрических машин. Москва: Высшая школа, 1982. 280 с.
7. Bukšnaitis J. Mechanizuotai kloti pritaikytų dvisluoksnų trifazių apvijų tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. 2003. Nr. 6(48). P. 42–45.

Jonas Bukšnaitis

SUBSTANTIATION AND RESEARCH OF SINUSOIDAL THREE-PHASE WINDING

S u m m a r y

Three-phase windings were explored in this work. The sinusoidal three-phase winding can be made on their background. Such winding can be made of two-layer concentric three-phase reduced step winding. It satisfies the structural requirements of sinusoidal three-phase winding. Methods of measuring the number of turns of coils of sinusoidal three-phases winding and optimizing the pulsating magnetomotive forces are proposed. Two- and four-pole sinusoidal windings and windings that have the same parameters but are not sinusoidal are discussed. They were compared according to appropriate indices.

Key words: one-layer (two-layer) concentric three-phase winding, sinusoidal three-phase winding, group of coils, number of turns of coils, optimization of pulsating magnetomotive forces, spatial (relation) harmonic, effectiveness rate of a winding

Йонас Букшнайтис

ОБОСНОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ОБМОТКИ

Р е з ю м е

Рассмотрены трёхфазные обмотки, на основе которых можно было бы создать синусоидальную трёх-

фазную обмотку. Определено, что такую обмотку можно создать только из двухслойной концентрической трёхфазной обмотки сниженного шага, которая полностью соответствует структурным условиям, предъявленным к электрическим схемам синусоидальных трёхфазных обмоток. Представлена созданная автором методика определения количества витков катушки синусоидальной трёхфазной обмотки, оптимизируя её пульсирующую магнитодвижущую силу. Рассмотрены двух- и четырёхполюсная

синусоидальные и те же главные параметры, имеющие несинусоидальные трёхфазные обмотки, их сравнения представлены по соответствующим указателям.

Ключевые слова: однослойная (двухслойная) концентрическая трёхфазная обмотка, синусоидальная трёхфазная обмотка, группа катушек, количество витков катушки, оптимизация пульсирующей магнитодвижущей силы, пространственная (относительная) гармоника, коэффициент эффективности обмотки