

T 190 ELEKTROS INŽINERIJA

Sinusinės trifazės apvijos sudarymo tyrimas

J. Bukšnaitis

Agroenergetikos katedra, Lietuvos žemės ūkio universitetas
Akademija 53361, Kauno raj., tel. +370 7 397529; el. paštas buksnaitis@tech.lzuu.lt

Įvadas

Dėl kintamosios srovės elektros mašinų statoriaus ir rotoriaus magnetolaidžių dantytumo, apvijų diskretinio išdėstymo ir kitų priežasčių atsiranda sąlygos susikurti periodiniams nesinusiniams magnetiniams laukams. Toks iškraipytas magnetinis laukas elektros mašinos oro tarpe gali būti išskleidžiamas erdvinėmis harmonikomis [1], [2], [3]. Dažniausiai pirmoji (pagrindinė) magnetinio lauko erdvinė harmonika kintamosios srovės elektromechaniniame keitiklyje atlieka naudingas jai skirtas funkcijas. Aukštesnės eilės magnetinio lauko harmonikų įtaka šių elektros mašinų darbui daugiausia yra neigiama: jos didina elektros mašinų galios nuostolius, mažina pagrindinės harmonikos kuriamą sukimo momentą, iškraipo apvijose indukuotas elektrovaras, sukelia papildomus triukšmus, rezonancinius 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, imamas tam tikrų priemonių: trumpinamas apvijos žingsnis ($y < \tau$), apviją paskirstoma $q > 1$ 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 sukuria pakopų formos ir ji yra artimesnė sinusinei nei sutelktosios apvijos stačiakampės formos magnetovara.

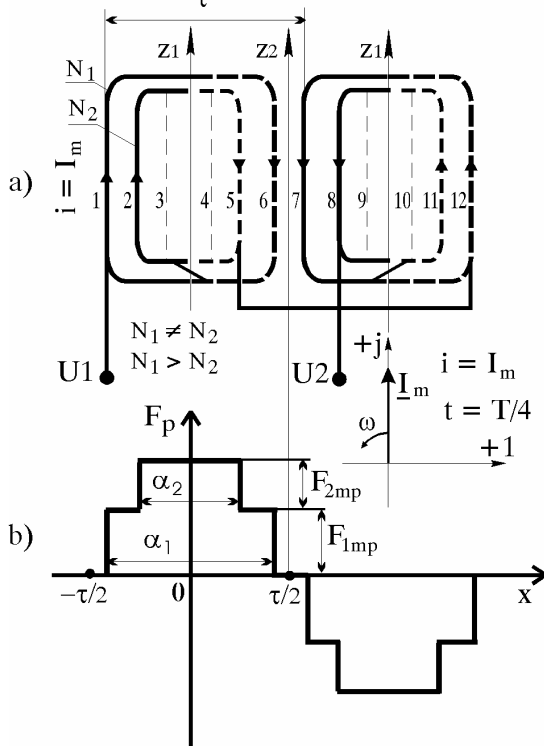
Kartais paskirstytųjų koncentrinųjų vienfazinių apvijų ričių grupių, turinčių po $q/2$ ričių ir atitinkančių vieną apvijos polių, ričių vijų skaičiai, kurie nustatomi pagal tam tikrą dėsnį, yra skirtingi, t.y. $N_1 \neq N_2 \neq \dots \neq N_i \neq \dots \neq N_{q/2}$, kur N_i - i -osios ritės vijų skaičius [4]. Tokios apvijos sukurta pulsuojamosios magnetovaros kreivė optimaliai priartinama prie sinusinio pasiskirstymo. Todėl ši apviją vadinama sinusine vienfazė apviją. Vienfaziai asinchroniniai varikliai su šio tipo apvijomis turi labai gerus energinius rodiklius, taip pat kitų teigiamų savybių [1], [4]. Tačiau apie sinusines trifazes apviją nebuvo rašyta techninėje literatūroje, nenaudojamos jos ir praktikoje. Todėl šiame darbe aptarsime galimybę sudaryti sinusinę trifazę apviją, kuri padėtų patobulinti kintamosios srovės elektros mašinas.

Sinusinės trifazės apvijos struktūrinis sudarymas

Iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad pagaminti ir praktikoje naudoti sinusines trifazes apviją neturėtų būti labai sunku, kadangi visų tipų trifazės apvijos su vienodu vijų skaičiumi ritėse yra sudarytos iš vienfazinių apvijų, perstumtų erdvėje $2\pi/3$ elektrinių laipsnių. Kaip minėta, sinusinių vienfazinių apvijų teorija yra pagrįsta, atlikti jų skaičiavimai, jos senokai naudojamos vienfaziuose asinchroniniuose varikliuose [4]. Atrodytų, apie šias apviją sukauptą informaciją beliktų pritaikyti paskirstytosioms trifazėms apvijoms ir gauti sinusinę trifazę apviją. Tačiau dėl daugelio priežasčių to padaryti neįmanoma. Visų pirma nė vienos iš dažniausiai praktikoje naudojamų viensluoksnių ir dvisluoksnių forminių trifazių apvijų negalima pritaikyti sinusinei trifazėi apvijai sudaryti, kadangi jos netenkina sinusinės apvijos elektrinės schemos pagrindinių struktūrinių reikalavimų. Pavyzdžiui, norint gauti bet kuriuo laiko momentu artimą sinusiniam su skirtingo aukščio pakopomis pulsuojamosios arba sukiosios magnetovaros pasiskirstymą, simetrišką koordinačių ašių atžvilgiu, reikia, kad šį pasiskirstymą sąlygojanti pagrindinė ričių grupė, sudaryta iš dviejų mažųjų ričių grupių, kurių ritės turės skirtingus vijų skaičius, visais aspektais taip pat būtų simetriška nagrinėjamų ričių grupių ašių z_1 ir z_2 atžvilgiu (1 pav.). Antra vertus, pagrindinės ričių grupės, atitinkančios vieną polių porą, bendras žingsnis turi būti lygus $(2\tau - 1)$. Plačiausiai naudojamos trifazės apvijos netenkina visų anksčiau paminėtų sinusinių apvijų elektrinėms schemoms keliamų struktūrinių reikalavimų. Pati artimiausia sinusinei trifazėi apvijai sudaryti būtų rečiau naudojama dvisluoksni koncentrinė trifazė apviją, kuri netenkina tik vieno reikalavimo, nes šios apvijos pagrindinės ričių grupės žingsnis lygus 2τ , o ne $(2\tau - 1)$ [5].

Remiantis sinusinių vienfazinių apvijų sukurta teorija [4], galima teigti, kad sinusinė trifazė apviją gali būti sudaryta paskirstytoms ritinėms įterptinėms trifazėms apvijoms, suvyniotoms iš lanksčių sekcijų. Kad nepažeistume trifazių apvijų simetriškumo sąlygų, visos nagrinėjamos apvijos fazių ričių grupės turi būti vienodos tiek erdviu ričių išdėstymu, tiek giminiškų ričių matmenimis ir vijų skaičiumi jose. Pagrindinių ir mažųjų ričių grupių simetriškumui jų ašių atžvilgiu išlaikyti, taip pat kad mažųjų ričių grupių žingsnį gautume lygų $(\tau - 1)$,

siūloma panaudoti vienintelį galimą variantą, t.y. sumažinto žingsnio $(2\tau - 1)$ pagrindinę ričių grupę, sudarytą iš dviejų simetriškų mažųjų ričių grupių, kuriose ritės bus išdėstomos koncentriškai (1 pav.). Tai būtų dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos su vienodu vijų skaičiumi ritėse atmaina – dvisluoksnė koncentrinė trifazė sumažinto žingsnio apvija [5]. Kitaip tariant, siūlomos sinusinės trifazės apvijos elektrinės schemos struktūroje ričių grupės pagal sudarymo pobūdį iš esmės nedaug skirtingi nuo sinusinių vienfazinių apvijų ričių grupių.



1 pav. Sinusinės trifazės apvijos vienos fazės elektrinė schema (a)

ir jos laiko momentu $t = T / 4$ sukurtos pulsuojamosios magnetovaros erdvinis skirstinys (b)

Sinusinė trifazė apvija su numatytais ričių grupėmis būtina turi būti daroma dvisluoksnė. Kiekvienos fazės ritės bus klojamos visais atvejais į du trečdalius skirtingų magnetolaidžio griovelių. Kadangi ši apvija turi būti dvisluoksnė, tai vienos fazės ritės iš tikrųjų visiškai užpildys tik trečdalį šių griovelių skaičiaus, ir tai tenkina vieną iš pagrindinių trifazėms apvijoms keliamų reikalavimų. Kad šią apviją visais atžvilgiais gautume simetrišką, pusė kiekvienai fazei priklausančių ričių aktyviųjų šonų turi būti klojama į apatinį griovelių sluoksnį, kita pusė – į viršutinį [5].

Sinusinių trifazių apvijų pagrindinių parametru 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 – fazių skaičius; q – ričių (griovelių) skaičius, tenkantis poliui ir fazei.

Reikia pažymėti, kad sinusinės trifazės apvijos negalėsime sudaryti su bet koku ričių skaičiumi q . Ričių skaičius q , tenkantis poliui ir fazei, šioje apvijoje turės būti sveikasis skaičius. Tuomet dvi mažosios ričių grupės, sudarančios pagrindinę ričių grupę, kurs skirtingo poliškumo simetriškus, artimus sinusiniams pulsuojamuosius magnetinius laukus (1 pav.). Savaime suprantama, kuo ričių skaičius q mažojoje ričių grupėje bus didesnis, tuo labiau magnetovaros kreivę bus galima priartinti prie sinusinio pasiskirstymo. Taigi ričių skaičius q , sudarantis mažąją 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 būtų lygus

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

čia y_i – dvisluoksnės koncentrinės apvijos mažosios ričių grupės i -osios ritės žingsnis; $\tau = Z / (2p)$ – polių žingsnis.

Iš (2) formulės matome, kad vidutinis šios apvijos žingsnis yra sutrumpinamas vienu trečdaliu polių žingsnio τ . Tai reiškia, kad aukštesniosios erdvinės harmonikos trijų kartotinės kiekvienos apvijos fazės kuriuose pulsuojamuosiuose magnetiniuose laukuose bus lygios nuliui. Kaip žinome, šios harmonikos nesinusinėse trifazėse apvijose tampa lygios nuliui tik sukiojuosiuose magnetiniuose laukuose, o pulsuojamuosiuose jos dažniausiai išlieka. Kitos magnetinių laukų aukštesniosios nelyginės erdvinės harmonikos ($\nu = 5; 7; 11; \dots$) sinusinėse trifazėse apvijose gerokai sumažės tinkamai paskirsčius šias apvijas ($q \geq 2$), taip pat suvyniojant rites mažosiose ričių grupėse su skirtingu vijų skaičiumi 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 apvijos pradžia bus išvesta iš n -ojo statoriaus griovelio. Tada V fazės apvijos pradžia turi išeiti iš $(Z/(3p) + n)$ -ojo, o W fazės apvijos pradžia – iš $(2Z/(3p) + n)$ -ojo statoriaus griovelių.

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	+	+	+	+	-	+

Iš anksčiau pateiktų samprotavimų išeina, kad teikiamos sinusinės trifazės apvijos nebus galima pagaminti esant bet kokiems 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 parodyta, kokiam galimam statoriaus griovelių skaičiui esant galima (+) arba negalima (-) sudaryti sinusinę trifazę apviją su atitinkamu polių porų skaičiumi, kuris tenkintų sąlygą $q \geq 2$.

Iš 1 lentelės matyti, kad sudarant sinusines trifazes apvijias magnetolaidžio griovelių ir polių porų skaičius išsidėsto pagal tam tikrą dėsninę. Sinusinę trifazę apviją su viena polių pora galima sudaryti kiekvienam 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.

Sinusinės trifazės apvijos ričių vijų skaičiaus nustatymas optimizuojant pulsuojamųjų magnetovarų erdvinį pasiskirstymą

Panagrinėsime dvi skirtingų parametrų sinusines ir trifazes apvijias. Pagrindiniai ir kiti apskaičiuoti nagrinėjamųjų apvijų parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų parametrai

Apvijų parametrai	Apvijų variantai	
	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°

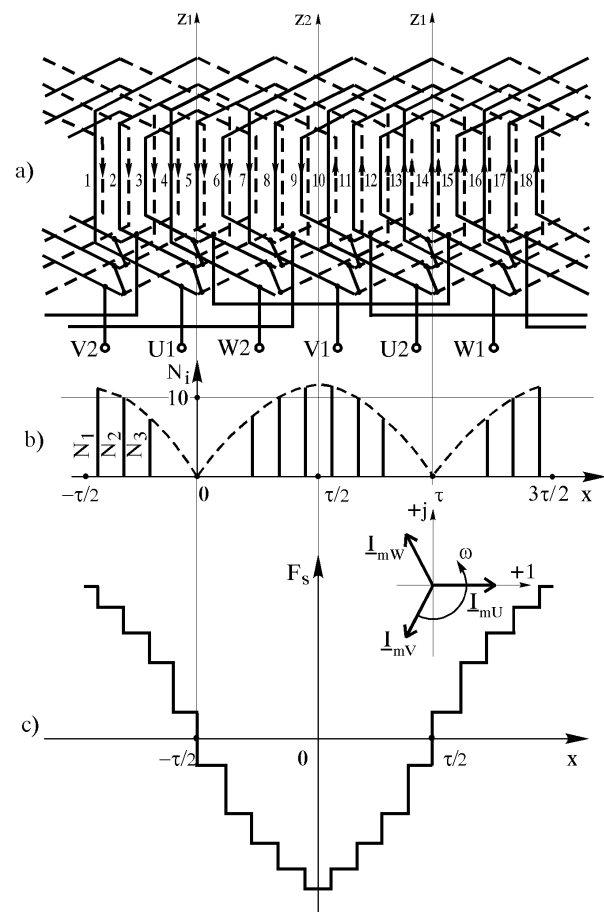
Iš 2 lentelės matome, kad pirmosios apvijos kiekviena fazė bus sudaryta iš vienos pagrindinės ričių grupės, susidedančios iš šešių ričių, o antrosios apvijos – iš dviejų pagrindinių ričių grupių, turinčių po keturias rites. Abiejose apvijose pagrindinės ričių grupės, kuriančios vienos polių poros pulsuojamuosius magnetinius laukus, sudaromos iš dviejų mažųjų absoliučiai simetriškų ričių grupių, kurių kiekviena atitinka po vieną polių. Tuomet pirmosios apvijos mažoji ričių grupė turės tris rites ($q=3$), o antrosios apvijos – dvi rites ($q=2$). Remdamiesi 1 pav. ir 2 lentelės parametrais, sudarome nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų elementų išdėstymo 3 lentelę ir elektrines schemas (2 pav., a; 3 pav., a).

Kadangi sinusinėse trifazėse apvijose vieno poliaus pulsuojamosios magnetovaros pasiskirstymą erdvėje formuoja mažoji ričių grupė, tai ji ir bus pagrindinis šių apvijų elementas. Vadinasi, bet kuri nagrinėjamoji apviją sudaroma iš $2pm$ vienodų mažųjų ričių grupių, atitinkamai išdėliotų erdvėje, ir kiekviena iš jų turės po q ričių su nevienodu vijų skaičiumi. Ritės mažosiose ričių grupėse

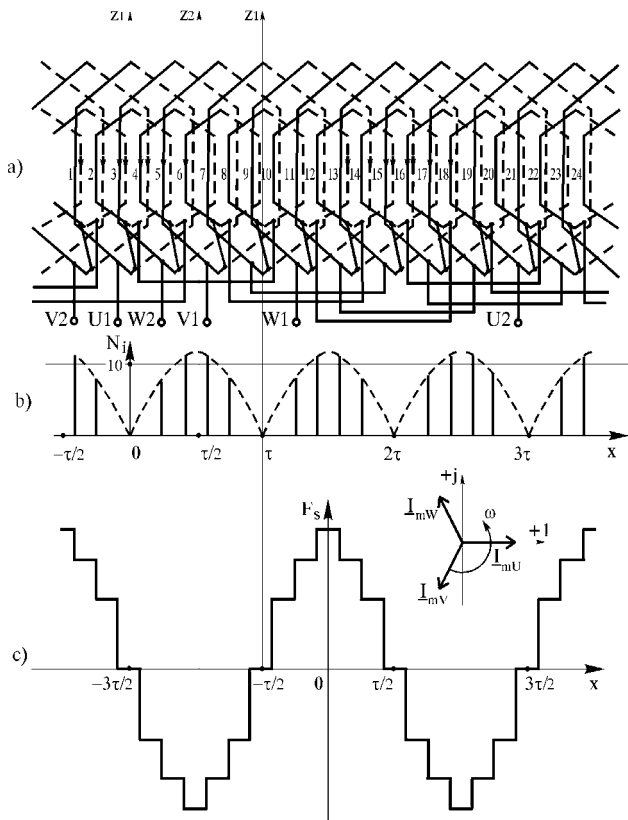
jungiamos nuosekliai, todėl jomis teka ta pati sinusinė srovė. Tuomet, kad kuriama kiekvienos mažosios ričių grupės pulsuojamosios magnetovaros pusperiodis būtų kuo artimesnis sinusoidai, šios mažosios grupės ričių vijų skaičiaus erdvinis pasiskirstymas taip pat turi kisti pagal sinuso dėsnį.

3 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų elementų išdėstymo lentelė

Fazių kaita	Ričių skaičius mažojoje grupėje		Griovelių numeriai			
			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 optimalaus vijų skaičiaus išdėstymas ritėse (b) ir jos laiko momentu $t=0$ sukurtos sukiosios magnetovaros, optimizavus pulsuojamąsias magnetovaras, erdvinis skirstinys (c)



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

2 pav., b, ir 3 pav., b, pateikta vienos apvijos fazės (U) erdvinis vijų skaičiaus N_i pasiskirstymas. Šis pasiskirstymas yra erdvinės koordinatės sinuso funkcija. Šios koordinatės pradžia parinkta mažosios ričių grupės simetrijos ašis z_1 . Tuomet i -osios ritės vijų skaičius surandamas iš šios išraiškos:

$$N_i(x) \cong k \cdot N \cdot \sin \left[\left(\frac{\pi - \beta}{2} \right) - (i-1) \cdot \beta \right] = \text{artimiausias sveikasis skaičius}; \quad (3)$$

čia $\beta = 2\pi \cdot p / Z$ – griovelių žingsnis elektriniais laipsniais; N – maksimalus statoriaus griovelyje telpančių efektyvių laidininkų skaičius; $k < 1$ – koeficientas; $i = 1 \div q$ – ritės numeris mažojoje ričių grupėje.

Pirmąjį numerį mažojoje 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, o q -oji mažiausio žingsnio ritė – mažiausią vijų skaičių.

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 iš 2 pav., a, ir 3 pav., a, nagrinėjamosiose sinusinėse trifazėse apvijose visus statorių griovelius užima skirtingų fazių aktyvieji ričių šonai, todėl grioveliuose vijų sumos $(N_1 + N_q; N_2 + N_{q-1}; \dots)$ bus

lygios arba artimos maksimaliam statoriaus griovelyje telpančių efektyvių laidininkų skaičiui. Vadinasi, šių griovelių užpilda bus beveik vienoda. Abu šiuos nagrinėjamųjų 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 – nelyginis skaičius,

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

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

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

Tardami, kad $N = 20$, ir, remdamiesi nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų 2 lentelėje pateiktais parametrais bei (3), (4), (5) išraiškoms, apskaičiuojame sąlyginius vijų skaičius mažųjų grupių ritėse. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų sąlyginis vijų skaičius mažųjų grupių ritėse optimizuojant pulsuojamųjų magnetovarų erdvinį pasiskirstymą

Ritės numeris i	Sąlyginiai vijų skaičiai N_i ritėse	
	I variantui	II variantui
1	11	12
2	10	8
3	7	-

Apskaičiuoti sąlyginiai vijų skaičiai U fazės apvijose ritėse grafiškai pateikti 2 pav., b, ir 3 pav., b. Dvypolės teikiamos apvijos 1, 3, 4, 6, 7, ... griovelių užpilda yra 10 % mažesnė už leistiną, o 2, 5, 8, ... – lygi leistinajai. Keturpolės teikiamos apvijos visų griovelių užpilda lygi leistinajai.

Jeigu nagrinėjamos trifazės apvijos būtų gaminamos nesinusinės, visos ritės abiejuose variantuose turėtų po 10 sąlyginių vijų.

Sinusinės trifazės apvijos ričių vijų skaičiaus nustatymas optimizuojant sukijų magnetovarų erdvinį pasiskirstymą

2 pav., c, ir 3 pav., c, pateikti sukijų magnetovarų erdviniai pasiskirstymai laiko momentu $t = 0$, gauti susumavus nagrinėjamųjų apvijų fazių sukurtas optimizuotas pulsuojamąsias magnetovaras. Tačiau šiuose paveiksluose gauti sukijų magnetovarų erdviniai pasiskirstymai nėra optimalūs. Norint dar labiau priartinti

sukiją magnetovarą prie sinusinio pasiskirstymo, reikia pagal kitas sudarytas išraiškas apskaičiuoti sinusinės trifazės apvijų ričių vijų skaičių. Tada gautume iš tikrųjų pagerintą sinusinę trifazę apviją.

Pateiktuose 2 ir 3 pav. matome, kad sukijų magnetovarų, gautų laiko momentu $t = 0$, pusperiodžių ašys sutampa su pagrindinių ričių grupių simetrijos ašimis z_2 . Ši ašis ir būtų pradinio atskaitymo ašis (koordinatinių pradžia). Būtina atkreipti dėmesį dar į vieną faktą, kad į dešinę ir į kairę pusę nuo z_2 ašies q grioveliuose laiko momentu $t = 0$ srovė teka tik vienuose apvijų sluoksniuose, priklausančiuose V ir W fazėms, o kituose tų pačių griovelių sluoksniuose, priklausančiuose U fazei, ji lygi nuliui. Vadinasi, sukiosios magnetovaros bangos viršūnę per $2q$ griovelių formuoja V ir W apvijų fazių mažosios ričių grupės (į vieną pusę nuo z_2 ašies – vienos fazės, į kitą pusę – kitos fazės). V ir W apvijų fazių ritės mažosiose ričių grupėse atžvilgiu z_2 ašies yra išsidėsčiusios simetriškai. Tuomet, norint gauti sukiją magnetovarą, laiko momentu $t = 0$ labiausiai priartėjusią prie sinusinio pasiskirstymo, reikia ričių vijų skaičių mažosiose ričių grupėse nustatyti pagal erdvinės koordinatės (nuo z_2 ašies) sinuso funkciją. Remiantis anksčiau pateiktais samprotavimais, i -osios ritės vijų skaičius, optimizuojant sukijų magnetovarų pasiskirstymą, bus surandamas iš šios išraiškos:

$$N_i(x) \cong k \cdot N \cdot \sin \left[\frac{\beta}{2} + (q-i)\beta \right] = \text{artimiausias sveikasis skaičius}; \quad (6)$$

čia N – maksimalus statoriaus griovelyje telpančių efektyvių laidininkų skaičius; $k \geq 1$ – koeficientas; $\beta = 2\pi \cdot p / Z$ – griovelių žingsnis elektriniais laipsniais; q – griovelių (ričių) skaičius, tenkantis poliui ir fazei (ričių skaičius mažojoje ričių grupėje); $i = 1 \div q$ – ritės numeris mažojoje ričių grupėje.

Pirmąjį numerį mažojoje ričių grupėje turi ritė su didžiausiu žingsniu $y_1 = \tau - 1$, antrąjį – ritė, kurios žingsnis $y_2 = \tau - 3$, ir t.t. Remdamiesi (6) išraiška, gauname, kad pirmoji ritė turės didžiausią, o q -oji – mažiausią vijų skaičių.

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

$$N'_i(x) = N \cdot \sin \left[\frac{\beta}{2} + (q-i)\beta \right]. \quad (7)$$

Toliau surandamos pagal (7) formulę apskaičiuotų laidininkų atitinkamuose grioveliuose preliminarūs skaičių sumos:

kai q yra lyginis skaičius,

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

o kai q – nelyginis skaičius,

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

Iš gautų sumų paimama maksimali $(N'_i + N'_{(q-(i-1))})_{\max}$ ir pagal (5) išraišką apskaičiuojamas koeficientas k .

Tardami, kad $N = 20$, ir remdamiesi nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų 2 lentelėje pateiktais parametrais bei (5), (6) ir (7) išraiškomis, apskaičiuojame sąlyginius vijų skaičius mažųjų grupių ritėse. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Nagrinėjamųjų sinusinių trifazių apvijų sąlyginis vijų skaičius mažųjų grupių ritėse optimizuojant sukijų magnetovarų erdvinį pasiskirstymą

Ritės numeris i	Sąlyginis vijų skaičius N_i ritėje	
	I variantui	II variantui
1	15	15
2	10	5
3	4	-

Dvipolės teikiamos apvijos 1, 3, 4, 6, 7, ... griovelių užpilda yra 5 % mažesnė už leistinąją, o 2, 5, 8, ... – lygi leistinajai. Keturpolės teikiamos apvijos visų griovelių užpilda lygi leistinajai.

Palyginus 4 ir 5 lentelių skaičiavimo rezultatus matyti, kad jie labai skiriasi.

Išvados

1. Iš visų trifazių apvijų tik dvisluoksnė koncentrinė trifazė sumažinto žingsnio apviją tenkina sinusinės trifazės apvijos elektrinei schemai keliamus struktūrinius reikalavimus, t.y. pulsuojamosios magnetovaros periodo pasiskirstymą sąlygojanti pagrindinė ričių grupė, sudaryta iš dviejų mažųjų ričių grupių, yra visiškai simetriška nagrinėjamosios ričių grupės ašių atžvilgiu ir šios pagrindinės ričių grupės bendras žingsnis yra vienu griovelių žingsniu mažesnis už dvigubą polių žingsnį.

2. Teikiamą sinusinę trifazę apviją galima gauti dvisluoksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos pagrindu, paliekant tą pačią jos struktūrą ir nustatant mažųjų ričių grupių ritėse naujus nevienodus vijų skaičius.

3. Tiek dvisluoksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos (nesinusinės apvijos), tiek sinusinės trifazės apvijos vidutinis žingsnis visais atvejais yra lygus dviem trečiosioms polių žingsnio, vadinasi, abiejų apvijų šis žingsnis sutrumpinamas vienu trečdaliu polių žingsnio, todėl šių apvijų pulsuojamųjų magnetovarų harmoniniame spektre trijų kartotinių harmonikų nėra.

4. Tiek dvisluoksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos (nesinusinės apvijos), tiek sinusinės trifazės apvijos kiekvienos fazės aktyvieji ričių šonai visais atvejais klojami skirtinguose (nepasikartojančiuose) magnetolaidžių grioveliuose (viršutiniuose ir apatiniuose jų sluoksniuose), todėl vienos apvijos fazės šie ričių šonai užima du trečdalius griovelių, bet kadangi abi nagrinėjamosios apvijos yra dvisluoksnės, tai kiekvienai apvijos fazei tenka vienas trečdalis visiškai užimtų griovelių, vadinasi, abiejų apvijų paskirstymas yra

vienodas ir geresnis nei kitų tipų trifazių nesinusinių apvijų.

5. Trifazės sinusinės apvijos mažųjų ričių grupių nevienodą vijų skaičių ritėse galima nustatyti optimizuojant pulsuojamosios magnetovaros erdvinį pasiskirstymą arba sukiosios magnetovaros erdvinį pasiskirstymą. Abiem atvejais gaunami skirtingi rezultatai.

6. Teikiamos sinusinės trifazės apvijos mažųjų ričių grupių ritės turi nevienodus vijų skaičius, todėl jų pulsuojamosios ir sukiosios magnetovaros kreivės, turinčios kiekviename poliuje pasikartojančias skirtingo aukščio pakopas, labiausiai priartėja prie sinusinio pasiskirstymo, palyginti su nesinusinių trifazių apvijų magnetovaromis, dėl to nagrinėjamoji apvija yra daug kuo pranašesnė už bet kurią nesinusinę trifazę apviją.

7. Sinusinės trifazės apvijos mažųjų ričių grupių didžiausio žingsnio ritės visuomet turi daugiausia vijų ir, einant šių grupių simetrijos ašių link, ričių vijų skaičius mažėja. Kadangi bet kuriuo atveju sinusinėje trifazėje apvijoje vienų apvijos fazių ritės, turinčios daugiau vijų, klojamos į atitinkamus magnetolaidžių griovelius su kitų apvijos fazių ritėmis, turinčiomis mažiau vijų, todėl

teikiamos apvijos atskirų griovelių užpilda dažniausiai yra nevienoda (lygi leistinajai arba mažesnė), tačiau visada ji gaunama labai artima leistinajai.

Literatūra

1. **Marazas S.** Elektros mašinos. – V.: Mokslas, 1989. – 303 p.
2. **Bukšnaitis J.** Trifazių žadinimo apvijų kuriamų magnetinių laukų analizė // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.1 (43). – P.43-46.
3. **Bukšnaitis J.** Trifazės trupmeninės apvijos elektromagnetinis įvertinimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 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. **Bukšnaitis J.** Mechanizuotai kloti pritaikytų dvisluksnių trifazių apvijų tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.6 (48). – P.42-45.

Pateikta spaudai 2003 09 12

J. Bukšnaitis. Sinusinės trifazės apvijos sudarymo tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 1(50). – P.46-51.

Išnagrinėtos trifazės įterptinės apvijos, kurių elektrinių schemų pagrindu būtų galima sudaryti sinusinę trifazę apviją. Nustatyta, kad tokią apviją galima sudaryti tik iš dvisluksnės koncentrinės trifazės sumažinto žingsnio apvijos, kuri visiškai tenkina sinusinės trifazės apvijos elektrinei schemai keliamus struktūrinius reikalavimus, t.y. šios apvijos kiekvienos fazės pulsuojamųjų magnetovarų periodų pasiskirstymus sąlygojančios pagrindinės ričių grupės, sudarytos iš dviejų vienu mažųjų ričių grupių, yra simetriškos jų ašių atžvilgiu ir šių ričių grupių žingsniai vienu griovelių žingsniu mažesni už dvigubą polių žingsnį. Pateikta autoriaus sudaryta metodika sinusinės trifazės apvijos ričių vijų skaičiui nustatyti optimizuojant jos ne tik pulsuojamąsias, bet ir sukiašias magnetovaras. Sudarytos dvipolė ir keturpolė sinusinės trifazės apvijos pateikiant jų ričių sąlyginius vijų skaičius, optimizavus pulsuojamąsias ir sukiašias magnetovaras. Il. 3, bibl. 5 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

J. Bukšnaitis. Research of Formation Sinusoidal Three- phase Winding // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 1(50). – P.46-51.

Three-phases fed-in windings were explored in this article. The sinusoidal three-phases winding can be made on the background of them. It is estimated that such a winding can be made of two layers concentric three-phases reduced step winding. It satisfies structural requirements for sinusoidal three-phase winding of the electrical diagram. For each phase of this group of the pulsating periods of magnetomotive force conditioned by the main group of the coils, in respect to the axes formed by two the same groups, are whole symmetrical in respect to the axes of the considered groups. The steps of these main coils groups by one step of the slots are less than the double step of the poles. It is given by the author methods of measuring the number of turns of coils of sinusoidal three-phases winding and optimizing pulsating and rotating magnetomotive forces. It was explored two-poles and four-poles sinusoidal windings. They were compared according appropriate rates. Ill. 3, bibl. 5 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

Ю. Букшнайтис. Исследование образования синусоидальной трехфазной обмотки // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 1(50). – С.46-51.

Рассмотрены трёхфазные укладываемые в ползакрытые пазы обмотки, на основе электрических схем которых можно было бы создать синусоидальную трёхфазную обмотку. Определено, что такую обмотку можно создать только из двухслойной концентрической трёхфазной сниженного шага обмотки, которая полностью соответствует структурным требованиям предъявленным к электрической схеме синусоидальной трёхфазной обмотки. Представлены созданные автором методики определения количества витков катушек синусоидальной трёхфазной обмотки, оптимизируя её не только пульсирующую, но и вращающую магнитодвижущую силу. Рассмотрены двухполюсная и четырёхполюсная синусоидальные трёхфазные обмотки, определены условные количества витков катушек этих обмоток, оптимизируя пульсирующие и вращающие магнитодвижущие силы. Ил. 3, библи. 5 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).