

Maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinė trifazė apvija

J. Bukšnaitis

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

Įvadas

Viensluoksnės trifazės apvijos dėl tam tikrų trūkumų tinka tik labai siauram (iki 15 kW) asinchroninių variklių galios diapazonui. Esant didesnėms galioms, paprastai naudojamos dvisluoksnės apvijos. Šios trifazės apvijos, kaip ir viensluoksnės, skirstomos į formines ir koncentrinės. Dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos gali būti paprastosios ir sinusinės. Kaip žinoma, vienintelės dvisluoksnės forminės apvijos gali turėti sveiką arba trupmeninį griovelių skaičių q , tenkantį poliui ir fazei. Šių apvijų žingsnį y galima sutrumpinti kiek reikia, todėl prislopinamos arba visiškai panaikinamos tam tikros aukštesniosios magnetinio lauko erdvinės harmonikos ir pastebimai pagerinamos variklių charakteristikos. Tačiau šiuo metu labiausiai paplitusios dvisluoksnės forminės apvijos, palyginti su dvisluoksnėmis koncentrinėmis apvijomis, turi keletą trūkumų: a) šių apvijų negalima sudaryti kaip sinusinių; b) šios apvijos netenkina pagrindinio mechanizuoto apvijų klojimo į statoriaus griovelius reikalavimo, t. y. apvijų klojimo metu reikia pakelti sekcijų aktyviuosius šonus. Dvisluoksnų koncentrinų apvijų trūkumai, palyginti su forminėmis, yra šie: a) šias apvijas galima sudaryti tik su sveikuoju griovelių skaičiumi q , tenkančiu poliui ir fazei; b) ribotos galimybės sutrumpinti šių apvijų vidutinį žingsnį; c) nevienodi šių apvijų sekcijų matmenys.

Dvisluoksnės forminės trifazės apvijos labai išsamiai išnagrinėtos [1-4], paprastosios dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos nagrinėjamos [5;6], sinusinių dvisluoksnų koncentrinų trifazių apvijų tyrimas, esant sumažintam vidutiniam apvijos žingsniui, pateiktas [7;8]. Šiame darbe nagrinėjama maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinė trifazė apvija.

Maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinės trifazės apvijos sudarymas

Sumažinto vidutinio žingsnio $y_{vid} = 2\tau/3 = 2q$ sinusinė trifazė apvija buvo sudaryta iš dvisluoksnės koncentrinės trifazės to paties vidutinio žingsnio apvijos [7;8]. Iš pradžių buvo manyta, kad dėl kai kurių magnetolaidžio griovelių užpildo tariamo didelio sumažėjimo sinusinė trifazė maksimalaus vidutinio žingsnio $y_{vid} = 2\tau/3 + 1 = 2q + 1$ apviją iš analogiškos paprastosios koncentrinės apvijos

nėra tikslo sudaryti [6]. Išsamiau panagrinėjus sinusinės apvijos sudarymą iš dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos, nustatyta, kad buvo apsirakta.

Nagrinėjamos sinusinės dvisluoksnės trifazės apvijos elektrinės schemos struktūra visiškai atitinka paprastosios dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos, esant maksimaliam vidutiniam jos žingsniui, elektrinės schemos struktūrai (1 pav., a). Ši sinusinė dvisluoksnė apvija taip pat sudaroma iš sekcijų grupių, kurių koncentrinės sekcijos yra nevienodo žingsnio. Didžiųjų sekcijų žingsnis y_1 , esant maksimaliam vidutiniam apvijos žingsniui, lygus polių žingsniui τ ($y_1 = \tau$) (1 pav., a). Šiuo atveju tai pačiai fazei priklausančių gretimų grupių didžiųjų sekcijų aktyvieji šonai klojami dviem sluoksniais į tuos pačius griovelius. Sekcijų grupėse vidinių sekcijų žingsniai, kaip ir visų tipų koncentrinų apvijų, šių grupių centrinių ašių kryptimi sutrumpėja dviem griovelių žingsniais. Nagrinėjamoje trifazėje apvijoje taip pat išlieka tos pačios fazių pradžių ir pabaigų išvadų vietos, tie patys sekcijų ir sekcijų grupių sujungimai, kaip ir paprastojoje dvisluoksnėje koncentrinėje trifazėje apvijoje. Sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos vidutinis žingsnis, kai $y_1 = \tau$, išreiškiamas taip [6]:

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

čia y_i – sekcijų grupės i -osios koncentrinės sekcijos žingsnis.

Nagrinėjama apvija, kaip ir visos kitos dvisluoksnės apvijos, yra sudaryta iš šešių polių porų skaičiaus grupių. Gretimų sekcijų grupių pradžios viena nuo kitos yra nutolusios per q griovelių žingsnių arba išsidėsčiusios kas 60° elektrinių laipsnių. Šioje apvijoje $6p$ magnetolaidžio griovelių užima tos pačios fazės sekcijų aktyvieji šonai (visos apvijos sekcijos, kurių žingsnis lygus polių žingsniui), o į likusius griovelius $Z - 6p$, kur Z – magnetolaidžio griovelių skaičius, p – polių porų skaičius, klojami skirtingų fazių sekcijų aktyvieji šonai.

Šios sinusinės apvijos bet kurios fazės sekcijų grupėje, sudarytoje iš q skirtingų žingsnių sekcijų, kiekviena sekcija turi skirtingą vijų skaičių, tačiau sekcijos skirtingose sekcijų grupėse, turinčios tą patį žingsnį, turės vienodą vijų skaičių.

Nagrinėjami apvijų sekcijų aktyviųjų šonų, esančių apatiniuose ir viršutiniuose griovelių sluoksniuose, skaičius kiekvienai fazei yra vienodas, todėl šios apvijos yra simetriškos.

Sinusinės trifazės apvijos sekcijų vijų skaičiaus nustatymas optimizuojant pulsuojamosios magnetovaros erdvinį skirstinį

Sinusinės trifazės apvijos, turinčios maksimalų vidutinį žingsnį, bet kuri fazė, prijungta prie kintamosios srovės maitinimo šaltinio, turi kurti pulsuojamąjį magnetinį lauką, kurio erdvinis skirstinys bus labiau priartėjęs prie sinusoidės, nei paprastosios dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos pulsuojamosios magnetovaros erdvinis skirstinys. Šiuo atveju nagrinėjant pakanka 1 pav., a, pasirinkti bet kurios fazės bet kurią vieną sekcijų grupę, sąlygojančią pulsuojamosios magnetovaros erdvinio skirstinio formą. Šios magnetovaros momentinių verčių erdvinė padėtis laikui bėgant nekis ir ji bus po grioveliais, kuriuose bus sukloti tu pačių fazių sekcijų aktyvieji šonai. Vadinasi, pulsuojamosios magnetovaros simetrijos ašis bet kuriuo atveju ir bet kuriuo laiko momentu sutaps su bet kurios sekcijų grupės simetrijos ašimi. Ši ašis toliau nagrinėjant laikoma atskaitymo ašimi. Į kairę arba į dešinę pusę nuo atskaitymo ašies sekcijų grupės žingsnis atitinka 90° elektrinių laipsnių arba $Z/4p$ griovelių žingsnių.

Norint gauti pulsuojamosios magnetovaros skirstinio formą, labiau priartėjusią prie sinusoidės, sekcijų grupėse sekcijų vijų skaičius nuo pasirinktos atskaitymo ašies turi būti paskirstomas pagal sinuso dėsnį, nes bet kurios sekcijų grupės sekcijomis teka to paties dydžio ir tos pačios fazės srovė, todėl pulsuojamosios magnetovaros skirstinio formai turi įtakos pačių sekcijų jų grupėje skaičius ir jose esančių vijų skaičius.

Atsižvelgiant į anksčiau išdėstytus samprotavimus, surandamos atitinkamų kampų sinuso funkcijų vertės, kurios bus lygios atitinkamų sekcijų vijų skaičiaus santykiniais dydžiams:

$$\begin{cases} \varphi_{p1} = \sin(\pi/2) = 1; \\ \varphi_{pi} = \sin[\pi/2 - \beta \cdot (i-1)]; \\ \varphi_{pq} = \sin[\pi/2 - \beta \cdot (q-1)]; \end{cases} \quad (2)$$

čia $\beta = 2\pi \cdot p / Z = \pi / \tau$ – griovelių žingsnis elektriniais laipsniais; $i = 1 \div q$ – sekcijos numeris sekcijų grupėje.

Pirmąjį numerį sekcijų grupėje turi sekcija, kurios žingsnis $y_1 = \tau$, antrąjį – sekcija, kurios žingsnis $y_2 = (\tau - 2)$, ir t. t. Tuomet, remiantis (2) išraiška, gaunama, kad pirmoji didžiausio žingsnio sekcija turės ir didžiausią vijų skaičių, q -oji mažiausio žingsnio sekcija – mažiausią vijų skaičių.

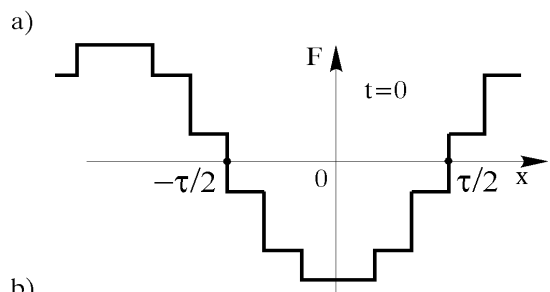
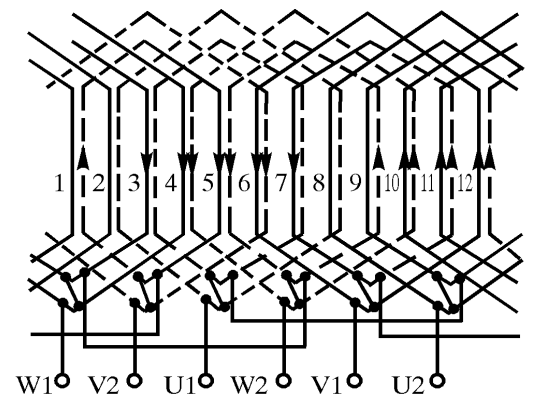
Tolesniam teoriniam nagrinėjimui sinusinė trifazė maksimalaus vidutinio žingsnio apvija susiejama su sutelktąja trifazė apvija, patikslinus gautus (2) išraiškoje sekcijų vijų skaičiaus santykinius dydžius:

$$\begin{cases} N_{p1}^* = \varphi_{p1} / C_p = 1 / C_p; \\ N_{pi}^* = \varphi_{pi} / C_p; \\ N_{pq}^* = \varphi_{pq} / C_p; \end{cases} \quad (3)$$

čia $C_p = \sum_{i=1}^q \varphi_{pi}$ – sekcijų vijų skaičiaus santykinis dydžių, gautų iš (2) išraiškos, suma.

(3) išraiškos visų narių suma turi atitikti tokią lygybę:

$$\sum_{i=1}^q N_{pi}^* = 1. \quad (4)$$



1 pav. Maksimalaus vidutinio žingsnio paprastosios bei sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijų elektrinė schema (a) ir jų sukiosios magnetovaros laiko momentu $t=0$ erdvinis skirstinys (b)

1 pav., a, pateikta maksimalaus vidutinio žingsnio paprastosios ir sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijų, kurių $2p = 2$, $q = 2$, $Z = 12$, $\tau = 6$, $y_{vid} = 5$, $\beta = 30^\circ$, elektrinė schema. Pasinaudojus (2), (3) išraiškomis, optimizuojant pulsuojamosios magnetovaros erdvinį skirstinį, apskaičiuojami nagrinėjamos sinusinės apvijos sekcijų vijų skaičiaus santykiniai dydžiai (1 lentelė).

1 lentelė. Paprastosios ir sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijų sekcijų vijų skaičiaus santykiniai dydžiai

Sektijos numeris	Apvijos tipas	
	Paprastoji	Sinusinė
1	0,5	0,536
2	0,5	0,464

1 pav., a, pateiktos paprastosios dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos magnetolaidžio grioveliai

užpildomi visiškai, o nagrinėjamos sinusinės trifazės apvijos taip užpildomas tik kas antras griovelis. Kiti magnetolaidžio grioveliai užpildomi 86,6 %. Pateiktos sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos vidutinis griovelių užpildymas sieks 93,3 %.

Pasinaudojus literatūra [9], sudaroma sinusinės dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos, gautos optimizavus jos pulsuojamąją magnetovarą, koeficiento pirmajai harmonikai išraiška:

$$k_{w1} = \sum_{i=1}^q N_{pi}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot y_i}{2\tau}\right) = \sum_{i=1}^q N_{pi}^* \sin(y_i \beta / 2). \quad (5)$$

Apvijos koeficiento ν -ajai harmonikai išraiška bus tokia:

$$k_{w\nu} = \sum_{i=1}^q N_{pi}^* \sin\left(\nu \frac{\pi \cdot y_i}{2\tau}\right) = \sum_{i=1}^q N_{pi}^* \sin(\nu \cdot y_i \beta / 2). \quad (6)$$

Pasinaudojus (5), (6) išraiškoms, apskaičiuojami 1 pav., a, pateiktų trifazių apvijų apvijos koeficientai kelioms harmonikoms (2 lentelė).

2 lentelė. Paprastosios ir sinusinės, gautos optimizavus pulsuojamąją magnetovarą, dvisluoksnų koncentrinų trifazių apvijų apvijos koeficientai

Harmonikos eilės numeris	Apvijos tipas	
	Paprastoji	Sinusinė
1	0,933	0,938
5	0,0670	0,1342
7	-0,0670	-0,1342
11	-0,933	-0,938
13	0,933	0,938

Palyginus paprastąją ir sinusinę, gautą optimizavus pulsuojamosios magnetovaros erdvinį skirstinį, dvisluoksnės koncentrinės trifazės apviją, matyti, kad jų apvijos koeficientai gaunami labai artimi, tačiau ši sinusinė apvija yra pranašesnė už paprastąją tuo, kad ją klojant sutaupoma apie 6,7 % vario nesumažinant, o netgi padidinant magnetovaros pirmosios harmonikos amplitudinę vertę 0,5 %.

Sinusinės trifazės apvijos sekcijų vijų skaičiaus nustatymas optimizuojant sukiosios magnetovaros erdvinį skirstinį

Sumuojant fiksuotais laiko momentais visų trijų fazių optimizuotus pulsuojamųjų magnetovarų erdvinis skirstinys, kurių ašys erdvėje yra perstumtos kas 120° elektrinių laipsnių, gaunami tais pačiais laiko momentais sukijų magnetovarų erdviniai skirstiniai. Tačiau taip gaunami šie skirstiniai nėra labiausiai priartėję prie sinusinio pasiskirstymo. Pulsuojamosios magnetovaros erdvinį skirstinį formuoja sekcijų grupė, sudaryta iš q sekcijų. Kadangi tiek paprastosios, tiek sinusinės dvisluoksnų koncentrinų trifazių apvijų pulsuojamosios bei sukiosios magnetovarų erdviniai skirstiniai yra simetriški koordinatinių ašių atžvilgiu, tai magnetovaras nagrinėti užtenka paimti šių skirstinių ketvirtadalį periodo T . Taigi pulsuojamosios magnetovaros $\tau/2$ pločio erdvinį skirstinį formuoja q sekcijų aktyvieji šonai. Sukiosios

magnetovaros šį skirstinį nagrinėjamos apvijose formuoja $Z/2p$ sekcijų aktyvieji šonai. Kadangi dydis $Z/2p$ trifazėse apvijose 3 kartus yra didesnis už q , todėl optimizuojant sukiosios magnetovaros erdvinį skirstinį, galima jį labiau priartinti prie sinusoidės.

Naudojantis 1 pav., nustatomos atskaitymo ašys. Jos sutampa su sukiosios magnetovaros pusperiodžių (1 pav., b) simetrijos ašimis, t. y. eina per antrojo arba aštuntojo magnetolaidžio griovelių (1 pav., a) simetrijos ašis. Šiuose grioveliuose esti tos pačios fazės (U) didžiausio žingsnio y_1 sekcijų aktyvieji šonai ir šiose sekcijose laiko momentu $t = 0$ neteka srovė. Taip pat šiuo laiko momentu srovė neteka ir kitose U fazės sekcijose, esančiose magnetolaidžio grioveliuose į dešinę ir į kairę pusę nuo pasirinktų atskaitymo ašių. Šiuose grioveliuose srovės teka fiksuotu laiko momentu tik kitų fazių (V ir W) sekcijų aktyviuosiuose sluoksniuose. Tai labai palengvina spęsti optimalios sukiosios magnetovaros sukūrimo uždavinį.

Norint gauti sukiosios magnetovaros skirstinį laiko momentu $t = 0$ labiausiai priartėjusį prie sinusinio pasiskirstymo, sekcijų vijų skaičių sekcijų grupėse reikia nustatyti pagal erdvinės koordinatės, kurios pradžia gali būti bet kuri pasirinkta atskaitymo ašis, sinuso funkciją. Atsižvelgiant į anksčiau išdėstytus samprotavimus, surandamos atitinkamų kampų sinuso funkcijų vertės, kurios bus lygios sekcijų vijų skaičiaus santykiniams dydžiams:

$$\begin{cases} \varphi_{s1} = \sin(\beta \cdot q); \\ \varphi_{si} = \sin[\beta(q + 1 - i)]; \\ \varphi_{sq} = \sin \beta; \end{cases} \quad (7)$$

čia $\beta = 2\pi \cdot p / Z = \pi / \tau$ – griovelių žingsnis elektriniams laipsniais; $i = 1 \div q$ – sekcijos numeris sekcijų grupėje.

Pirmąjį numerį sekcijų grupėje turi sekcija, kurios žingsnis $y_1 = \tau$, antrąjį – sekcija, kurios žingsnis $y_2 = (\tau - 2)$, ir t. t.

Tolesniam teoriniam nagrinėjimui sinusinė dvisluoksnė koncentrinė trifazė maksimalaus vidutinio žingsnio apvija susiejama su sutelktąja trifaze apvija, perskaičius (7) išraiškos gautų sekcijų vijų skaičiaus santykinis dydžius:

$$\begin{cases} N_{s1}^* = \varphi_{s1} / 2 \cdot C_s; \\ N_{s2}^* = \varphi_{s2} / C_s; \\ N_{si} = \varphi_{si} / C_s; \\ N_{sq} = \varphi_{sq} / C_s; \end{cases} \quad (8)$$

čia $C_s = \sum_{i=1}^q \varphi_{si}$ – sekcijų vijų skaičiaus santykinis dydžius, gautų iš (7) išraiškos, suma.

Todėl (8) išraiškos narių suma atitinka tokią lygybę:

$$\sum_{i=1}^q N_{si}^* = 1. \quad (9)$$

Pasinaudojus (7), (8) išraiškėmis, optimizuojant sukiosios magnetovaros skirstinį, apskaičiuojami nagrinėjamos sinusinės apvijos (1 pav., a) sekcijų vijų skaičiaus santykiniai dydžiai (3 lentelė).

3 lentelė. Paprastosios ir sinusinės dvisluoksnių koncentrinė trifazių apvijų sekcijų vijų skaičiaus santykiniai dydžiai

Seksijos numeris	Apvijos tipas	
	Paprastoji	Sinusinė
1	0,5	0,464
2	0,5	0,536

Pateiktos sinusinės dvisluoksnių koncentrinės trifazės apvijos vidutinis griovelių užpildymas išlieka toks pat, kaip ir optimizuojant pulsuojamąsias magnetovaras (lygus 93,3 %). Manoma, kad magnetolaidžio griovelių užpildymas pirmuoju ir antruoju atvejais, didėjant griovelių skaičiui q ($q > 2$), tenkančiam poliui ir fazei, neišliks toks pat.

Pasinaudojus literatūra [9], sudaroma sinusinės dvisluoksnių koncentrinės trifazės apvijos, gautos optimizavus jos sukiją magnetovara, koeficiento pirmajai harmonikai išraiška:

$$k_{w1} = \sum_{i=1}^q N_{si}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot y_i}{2\tau}\right) = \sum_{i=1}^q N_{si}^* \sin(y_i \beta / 2). \quad (10)$$

Apvijos koeficiento išraiška ν -ajai harmonikai bus tokia:

$$k_{w\nu} = \sum_{i=1}^q N_{si}^* \sin\left(\nu \frac{\pi \cdot y_i}{2\tau}\right) = \sum_{i=1}^q N_{si}^* \sin(\nu \cdot y_i \beta / 2). \quad (11)$$

Pasinaudojus (10) ir (11) išraiškėmis, kelioms harmonikoms apskaičiuojami 1 pav., a, pateiktų trifazių apvijų apvijos koeficientai (4 lentelė).

4 lentelė. Paprastosios ir sinusinės, gautos optimizavus sukiją magnetovara, dvisluoksnių koncentrinė trifazių apvijų apvijos koeficientai

Harmonikos eilės numeris	Apvijos tipas	
	Paprastoji	Sinusinė
1	0,933	0,928
5	0,0670	0
7	-0,0670	0
11	-0,933	-0,928
13	0,933	0,928

Palyginus paprastąją dvisluoksnių koncentrinę trifazę apviją ir sinusinę su optimizuotu sukiosios magnetovaros erdvinio skirstiniu, matyti, kad jų dantų harmonikų ($\nu = 11; 13$) apvijos koeficientai gaunami labai artimi. Tačiau sinusinės apvijos kitų aukštesniųjų harmonikų šie koeficientai tampa lygūs nuliui. Sinusinė apvija, optimizuojant sukiosios magnetovaros skirstinį, už paprastąją pranašesnė dar ir tuo, kad ją naudojant sutaupoma apie 6,7 % vario, sumažinus magnetovaros pirmosios harmonikos amplitudinę vertę tik 0,5 %.

Išvados

1. Paprastąsias ir sinusines maksimalaus vidutinio žingsnio dvisluoksnių koncentrinės trifazės apvijas ir magnetolaidžių griovelius galima sukloti mechanizuotai, nepakeliant ričių aktyviųjų šonų.

2. Iš visų trifazių apvijų ne tik sumažinto vidutinio žingsnio, bet ir paprastoji dvisluoksnių koncentrinė trifazė apvija tenkina sinusinės trifazės apvijos elektrinei schemai keliamus struktūrinius reikalavimus, t. y. pulsuojamosios magnetovaros periodo pasiskirstymą sąlygojančios dvi gretimos sekcijų grupės yra visiškai simetriškos savo ašiu48 atžvilgiu ir šių grupių bendras žingsnis lygus dvigubam polių žingsniui.

3. Teikiamą maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinę trifazę apviją galima gauti iš paprastosios dvisluoksnių koncentrinės trifazės apvijos, paliekant tą pačią jos struktūrą ir nustatant sekcijų grupių sekcijose naujus nevienodus vijų skaičius.

4. Teikiamos sinusinės trifazės apvijos maksimalus vidutinis žingsnis visuomet gaunamas mažesnis už polių žingsnį dydžiu, gautu iš poliui ir fazei tenkančio griovelių skaičiaus atėmus vieneta ($\tau - y_{vid} = q - 1$).

5. Maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinės trifazės apvijos nevienodus vijų skaičius sekcijose galima nustatyti optimizuojant pulsuojamosios arba sukiosios magnetovaros erdvinio skirstinius tam tikru laiko momentu.

6. Sinusinėje trifazėje apvijoje optimizavus sukiosios magnetovaros erdvinį skirstinį, aukštesniųjų magnetovaros harmonikų amplitudinės vertės labiau sumažinamos, nei optimizavus pulsuojamosios magnetovaros erdvinį skirstinį.

7. Sinusinėje trifazėje apvijoje sekcijų vijų skaičiaus nustatymo abiem atvejais vidutinis griovelių užpildymas, palyginti su paprastosios dvisluoksnių koncentrinės trifazės apvijos griovelių užpildymu, sumažėja, tačiau pagrindinės magnetovaros harmonikos amplitudinė vertė išlieka beveik nepakitusi.

8. Maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinė trifazė apvija, ir ypač gautoji optimizavus sukiosios magnetovaros erdvinį skirstinį, yra pranašesnė už paprastąją dvisluoksnių koncentrinę apviją.

Literatūra

1. **Marazas S.** Elektros mašinos. – V.: Mokslas, 1989. – 303 p.
2. **Kostrauskas P.** Asinchroninės elektros mašinos. – Kaunas: Technologija, 1995. – 116 p.
3. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Ленинград: Энергия, 1978. – 832 с.
4. **Жерве Г.К.** Обмотки электрических машин. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. – 399 с.
5. **Клюков Б.К.** Обмотчик электрических машин. – Москва: Высшая школа, 1982. – 279 с.
6. **Букšnaitis J.** Mechanizuotai kloti pritaikytų dvisluoksnių trifazių apvijų tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.6(48). – P.52–56.
7. **Букšnaitis J.** Sinusinės trifazės apvijos sudarymo tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr.1(50). – P.46–51.
8. **Букšnaitis J.** Sinusinės trifazės apvijos pagrindimas ir tyrimas // Energetika. – Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla, 2004. – Nr.2. – P.20–27.
9. **Smilgevičius A.** Vienfazės apvijos paskirstymas ir magnetovaros harmoninė sudėtis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2001. – Nr.4(33). – P.29–31.

J. Bukšnaitis. Maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinė trifazė apvija //Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 4(60). – P.45–49.

Išnagrinėtos dvisluoksnės trifazės apvijos, kurių elektrinių schemų pagrindu būtų galima sudaryti maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinę trifazę apvija. Nustatyta, kad tokią apvija galima sudaryti iš paprastosios dvisluoksnės koncentrinės trifazės apvijos, kuri visiškai atitinka sinusinės trifazės apvijos elektrinei schemai keliamas struktūrines sąlygas, kadangi šios apvijos kiekvienos fazės pulsuojamųjų magnetovarų pasiskirstymus sąlygojančios sekcijų grupės yra simetriškos jų ašių atžvilgiu ir šių grupių žingsniai lygūs polių žingsniui. Gautas analizinės išraiškos šios sinusinės trifazės apvijos sekcijų santykiniam vijų skaičiui nustatyti optimizuojant jos pulsuojamosios arba sukiosios magnetovaros erdvinius skirstinius. Taip pat gautos analizinės išraiškos nagrinėjamos apvijos pagrindinės ir aukštesniųjų harmonikų apvijos koeficientams apskaičiuoti. Taikant pateiktą maksimalaus vidutinio žingsnio sinusinės trifazės apvijos sudarymo metodą nebūtina iš anksto gauti jos magnetovaros erdvinio skirstinio. Sudaryta dvipolė sinusinė trifazė apvija, kai jos griovelių skaičius, tenkantis poliui ir fazei, lygus dviem, pateikiant šios apvijos sekcijų santykinius vijų skaičius, gautus optimizavus pulsuojamosios ir sukiosios magnetovaros erdvinius skirstinius, ir apvijos koeficientus. Išnagrinėtais dviem atvejais gauti skirtingi rezultatai. Il. 1, bibl. 9 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

J. Bukšnaitis. Sinusoidal Three-phase Winding with Maximal Average Span // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 4(60). – P. 45–49.

Three-phases two-layer windings were explored in this article. The sinusoidal three-phase winding with maximal average span can be made on the background of them. It was established that such winding can be made from simple two-layers concentric three-phase 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, with respect to the axes formed by the two same groups, are whole symmetrical with respect to the axes of the considered groups. The steps of these main coils groups are equal to the poles step. There was presented analytical expressions of measurement of the number of coils turns of sinusoidal three-phase winding by optimizing pulsating and rotating magnetomotive forces. Also there was presented analytical expressions of calculated windings factor. It was shown that winding factor of sinusoidal three-phase winding can be calculated for separate section adding all winding factors. It was explored two-poles sinusoidal winding. They were compared according to appropriate rates. Ill. 1, bibl. 9 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

Ю. Букшнайтис. Синусная трехфазная обмотка с максимальным средним шагом // Электроника и электротехника. - Каунас: Технологія, 2005. - № 4(60). – С. 45–49.

Рассмотрены двухслойные трёхфазные обмотки, на основе электрических схем, которых можно было бы создать синусную трёхфазную обмотку с максимальным средним шагом. Определено, что такую обмотку можно создать из простой двухслойной концентрической трёхфазной обмотки, которая полностью соответствует структурным условиям, предъявленным к электрической схеме синусной трёхфазной обмотки. Приводятся аналитические выражения для расчета относительных чисел витков секции этой синусной трёхфазной обмотки, оптимизируя пульсирующую или вращающую магнитодвижущую силу. Также приводятся аналитические выражения для определения обмоточных коэффициентов основной и высших гармоник рассматриваемой синусной трехфазной обмотки. Обмоточный коэффициент соответственной гармоники рассчитываются как сумма коэффициентов всех секций, входящих с различными шагами и числами витков в их группу. Рассмотрена двухполюсная синусная трёхфазная обмотка с двумя пазами на полюс и фазу, определены относительные числа витков секции этой обмотки, оптимизируя пульсирующую и вращающую магнитодвижущую силу, и рассчитаны обмоточные коэффициенты. Ил. 1, bibl. 9 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).