

Отже, запропонована методика, яка базується на методі Р.Поля, забезпечує достатню точність розрахунків і її можна використати для врахування двобічної зубчастості в явнополюсних електромеханічних перетворювачах з пасивними зубчастими роторами.

1. Вольдек А.И., Солдатенкова Н.Л. К расчету магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин с помощью метода гармонических проводимостей. Л., 1969. № 301. С.41–50. 2. Freeman E.M. The calculation of harmonics, due slotting in the flux-density waveform of a dynamoelectric machine. Proc. IEE, 1962. Vol.109. Part C., N016. 3. Зечихин Б.С. Магнитное поле в зазоре индукторной машины с пульсирующим потоком зубцов ротора. М., 1961. Вып.133. С.26–34. 4. Жуловян В.В., Комаров А.В., Майник И.Ф. К расчету магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней и двухсторонней зубчатости // Электричество. 1988. № 1. С.50–56. 5. Денисенко В. К расчету магнитной проводимости воздушного зазора при двухсторонней зубчатости бесщеточных совмещенных возбуждающих устройств // Электромеханика. Теория і практика: Пр. НТК, присвяченої 100-річчю від дня народження видатного українського вченого-електромеханіка Тихона Губенка. Львів, 1996. С.73–76. 6. Pohl R. Theory of pulsating field machines // IEE. 1946. № 3. Vol.93. 7. Ткачук В. Обчислення магнітної провідності повітряного зазору електромеханічного перетворювача з пасивним вторинним елементом // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 1995. № 288. С.125–130.

УДК 621.313.2.001.57

Чучман Ю.І.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

## ВПЛИВ ПОХИБОК ВИГОТОВЛЕННЯ ЩІТКОВО-КОЛЕКТОРНОГО ВУЗЛА НА ПУЛЬСАЦІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

© Чучман Ю.І., 2000

**Розглянутий вплив похибок виготовлення щітково-колекторного вузла на вихідні характеристики вимірювальних і виконавчих електричних машин постійного струму. Наведено результати досліджень впливу зсувів щіток з геометричної нейтралі, нерівномірностей розподілу колекторних пластин по обводу колектора та радіального биття поверхні колектора.**

Швидкодія та точність слідкуючих електроприводів значною мірою визначається якістю застосованих виконавчих і вимірювальних електричних машин (ВВЕМ). Одним з важливих показників якості ВВЕМ є рівень пульсацій моменту і частоти обертання роторів двигунів і пульсацій вихідної напруги тахогенераторів, виникнення яких зумовлене дискретністю структури ВВЕМ та похибками їх виготовлення.

Вплив першої групи зазначених вище чинників давно привернув увагу дослідників і відповідно відображений в літературі. Зокрема вплив дискретності і співвідношення розмірів контактуючих поверхонь ковзного контакту щітково-колекторного вузла (ЩКУ) машин постійного струму розглянуті в [1–3], а здійснені дослідження дозволили встановити оптимальну ширину щіток, при якій рівень пульсацій з частотою основної гармоніки кратної кількості колекторних пластин  $K$  (колекторні пульсації)  $f_k = Krf_0$  буде мінімальним [3] (тут  $p$  – кількість пар полюсів машини,  $f_0$  – частота обертання якоря). Проблеми та шляхи зменшення пульсацій ЕРС, зумовлених зубчастістю якоря знайшли своє відображення в [4–5] та інших наукових працях.

Велика кількість різновидів похибок виготовлення, які впливають на рівень пульсацій ЕРС, спричиняють надзвичайну складність розуміння впливів кожного з них зокрема, а також заважають пошукам методів зменшення рівня цього виду пульсацій. Відомі роботи присвячені дослідженню впливу одночасного зсуву усіх щіток з геометричної нейтралі [6], асиметрії магнітних систем [7, 8], магнітної анізотропії сталі [9] на пульсації ЕРС з частотами кратними частоті обертання і кількості пар полюсів.

У той же час, впливу похибок виготовлення елементів ЩКУ не приділено належної уваги.

Використання математичної моделі, описаної в [10], при введенні певних допущень дозволяють на етапі проектування ВВЕМ оцінити рівні пульсацій, що виникнуть внаслідок наявності різного роду похибок виготовлення ЩКУ.

Миттєве значення ЕРС кожної з паралельних гілок (ПГ) якірної обмотки  $e_n(\gamma)$  залежить від схеми з'єднання обмотки; кількості пар полюсів  $p$ ; кількості пластин колектора  $K$ ; кутів охоплення колектора щіткою  $\beta_i$ , значення яких залежить від швидкості обертання якоря, коефіцієнта тертя ковзного контакту, терміна обертання якоря в цьому напрямку, особливостей конструкції щіткового вузла та інших чинників, що впливають на роботу ковзного контакту; кутів, які займають міжламельні проміжки  $\Theta$ ; похибок встановлення щіток на геометричну нейтраль  $\epsilon_j$ ; кутового положення якоря  $\gamma_p$  відносно щіток та інших конструкційних параметрів та похибок виготовлення ЩКУ.

У загальному випадку при заданій стабільній швидкості обертання якоря машини

$$e_n(\gamma) = \sum_{s=1}^{S_n} e_{ns}(\gamma), \quad (1)$$

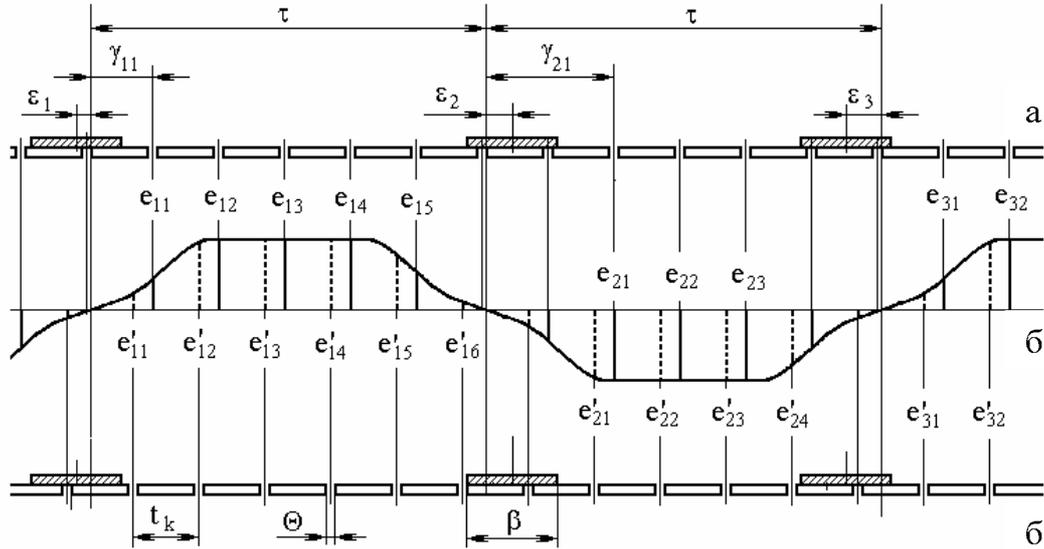
де  $n = 1, 2, \dots, 2a$  – номер ПГ;  $s = 1, 2, \dots, S_n$  – номер котушки якірної обмотки в  $n$ -й ПГ;  $S_n$  – кількість котушок в  $n$ -й ПГ при даному кутовому положенні якоря, рис.1;  $e_{ns}(\gamma)$  – миттєве значення ЕРС  $s$ -ї котушки  $n$ -ї ПГ

$$e_{ns}(\gamma) = \sum E_v \sin \left\{ v \left[ \gamma_{n1} + t_z \left( \text{Int} \left( 1 + \frac{s}{u_z} \right) - 1 \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$v = p, 3p, 5p, \dots$  – номер гармоніки ЕРС котушки;  $E_v$  – амплітуда  $v$ -ї гармоніки ЕРС;  $\gamma_{n1}$  – кутове положення першої котушки  $n$ -ї ПГ при вказаному кутовому положенні, зокрема, для простої петльової обмотки

$$\gamma_{n1} = \gamma_p + t_k \left[ 1 + \text{Int} \left( \frac{\pi(n-1) + p(\beta + \Theta - 2\gamma_p)}{2pt_k} \right) \right]; \quad (3)$$

$\gamma_p$  – розрахункове кутове положення якоря;  $t_z=2\pi/Z$  – зубцева поділка;  $Z$  – кількість зубців якоря;  $t_k=2\pi/K$  – колекторна поділка;  $u_z=S/Z$  – кількість котушок якоря в одному пазу;  $S=K$  – загальна кількість котушок в якірній обмотці;  $\text{Int}$  – оператор виділення цілої частини змішаного дробу.



**Рис.1.** Механізм впливу зсуву щіток з геометричної нейтралі та кутового положення якоря на миттєві значення ЕРС паралельних гілок обмотки:  
а – розташування колекторних пластин відносно щіток при  $\gamma_{p1}$ ; в – те саме, при  $\gamma_{p2}$ ;  
б – визначення миттєвих значень ЕРС котушок якірної обмотки.

Миттєве значення ЕРС якірної обмотки ВВЕМ

$$e_o(\gamma) = \frac{\sum_{n=1}^{2a} e_n(\gamma) g_n(\gamma)}{\sum_{n=1}^{2a} g_n(\gamma)} ; \quad (4)$$

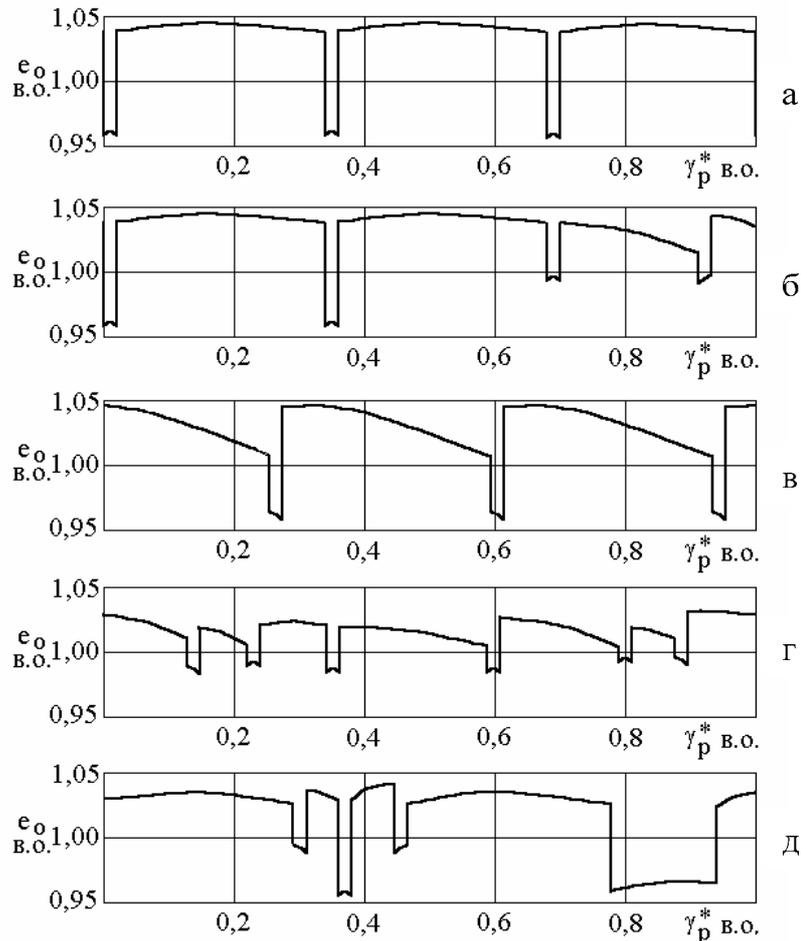
де  $g_n=1/S_n r_k$  – провідність  $n$ -ї ПГ при кутовому положенні якоря;  $r_k$  – опір котушки якоря.

З (1)–(4) зрозуміло, що миттєві значення  $e_o(\gamma)$  залежать від конкретних значень конструкційних параметрів ВВЕМ; форми ЕРС, яка індукується в котушці якоря, та виду і значень похибок виготовлення, тому вплив зазначених чинників на пульсації ЕРС машини будемо розглядати на прикладі конкретної ВВЕМ, яка характеризується такими показниками:  $K=S=104$ ,  $p=3$ ,  $\beta=2,1t_k$ ,  $\Theta=0,05t_k$ ,  $u_z=1$ .

На рис.2 зображені результати розрахунків  $e_o(\gamma)$  для машини з простою хвилевою обмоткою за таких умов: на рис.2,а – всі щітки точно виставлені на геометричній нейтралі, на рис.2,б – одна зі щіток зсунута з нейтралі на кут  $\varepsilon=0,1t_k$ , на рис.2,в – всі щітки зсунуті з нейтралі в одному напрямку на кут  $\varepsilon=0,1t_k$ , на рис.2,г,д – всі щітки зсунуті з нейтралі на кут

$$\varepsilon_q = \varepsilon_m \cos \frac{\pi m}{2p} (q-1), \quad (5)$$

де  $\varepsilon_m=0,1t_k$  – максимальне значення кутового зсуву щіток;  $m$  – порядок впорядкованого зсуву щіток (для рис.2,г –  $m=0,5$ , а для рис.2,д –  $m=1$ );  $q=1, 2, 3, \dots, 2p$  – номер щітки, в порядку їх розташування по обводу колектора.



**Рис.2.** Вплив розташування щіток на миттєві значення ЕРС якірної обмотки.

Зображені на рис.2 залежності свідчать, що вид зсуву суттєво впливає на значення пульсації та її гармонічний склад. Останнє підтверджується спектрограмами, показаними на рис.3. Порівняння спектрограм дозволяє дійти до висновку, що наявність похибок встановлення щіток на геометричну нейтраль зумовлює спотворення спектра гармонік, при цьому з'являються гармоніки пульсацій  $\nu_k$  з частотами, нижчими від  $f_k$ , амплітуди яких  $A_\nu$  співвимірні з основною гармонікою  $f_k=Kp n_o = 3Kn_o$ .

Дослідження впливу зсувів щіток з нейтралі на пульсації ЕРС якірної обмотки машини, яка розглядається в поданому вище прикладі, показали, що машини з хвилевими обмотками чутливіші до наявності цього виду похибок виготовлення ЩКУ. На значення пульсацій значно впливає і порядок впорядкованого зсуву щіток  $m$ , що ілюструється рис.4.

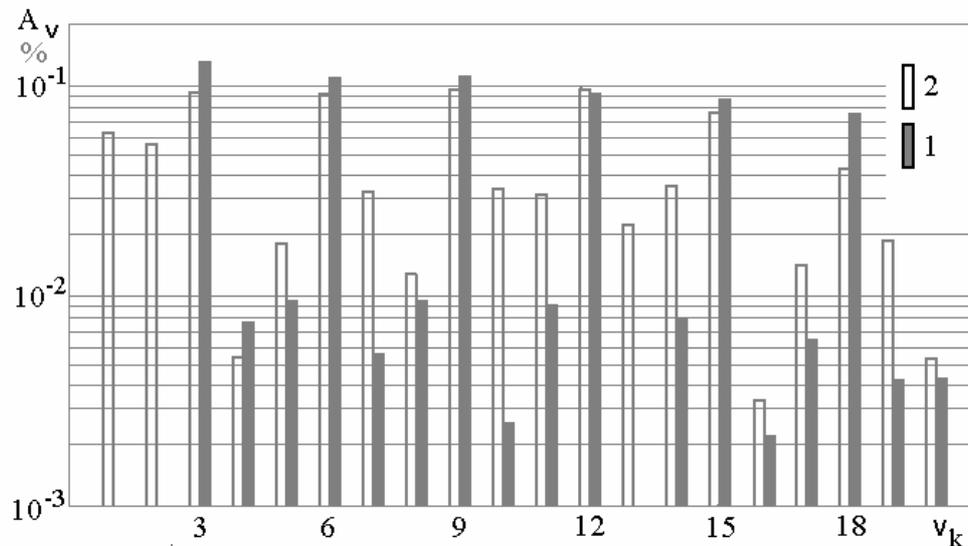


Рис.3. Порівняння спектрів гармонік пульсації ЕРС якорної обмотки.

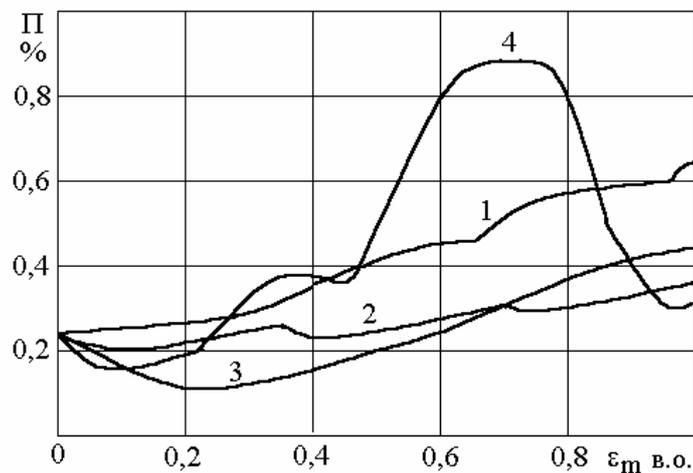


Рис.4. Залежність рівня пульсації хвильової якорної обмотки від  $\epsilon_m$  і типу зсуву щіток:  
 1 – зсув однієї щітки; 2 – рівномірний зсув усіх щіток;  
 3 – зсув щіток при  $m=0,5$ ; 4 – зсув щіток при  $m=1$

Незважаючи на наявність в технологічному процесі складання колекторів таких операцій, як калібрування колекторних пластин і міканітових прокладок, завжди виникає нерівномірність розподілу пластин по обводу колектора, зумовлена відмінністю їх товщин, яка має імовірнісний характер. Зазначене явище, як і зсув щіток з нейтралі, призводить до неідентичностей значень ЕРС ПГ, які залежать від кутового положення колектора відносно щіток.

Для виявлення закономірностей впливу нерівномірностей розподілу пластин по обводу колектора на пульсації ЕРС дослідження виконували на моделі з впорядкованими нерівномірностями розподілу пластин. При цьому, першим порядком нерівномірності ( $m=1$ ) вважається випадок, коли на колекторі є одне місце з більшою густиною пластин, ніж це повинно бути при рівномірному розподілі, а діаметрально до нього розташоване місце з меншою густиною. Прийнято, що зміна густини пластин по обводу колектора підпорядковується синусоїдальному закону.

Миттєві значення ЕРС ПГ для машини з простою петлевою обмоткою при визначенні рівня пульсацій, зумовлених цим впливаючим чинником, можна вважати такими:

$$e_n = \int_{a_n}^{b_n} \sum_{v=p}^{\infty} E_v \sin pv \left[ 1 + \Delta_m^* \sin m(\alpha + \gamma_p) \right] d\alpha, \quad (6)$$

а для машини з простою хвилевою обмоткою

$$e_1 = \sum_{n=1}^p e_{2n-1}; \quad e_2 = \sum_{n=1}^p e_{2n}, \quad (7)$$

де  $a_n = \frac{\pi}{p}(n-1) + \frac{\beta}{2}$ ;  $b_n = \frac{\pi}{p}n - \frac{\beta}{2}$ ;  $E_v$  – амплітуда  $v$ -ї гармоніки ЕРС котушки;  $\Delta_m^* = \frac{\Delta_m}{\tau}$  – відносне значення амплітуди  $\Delta_m$  нерівномірності розподілу пластин по обводу колектора  $m$ -го порядку, визначене в кутових одиницях.

Опір ПГ простої петлевої обмотки при проведенні аналізу можна вважати

$$R_n = \frac{A_n}{\frac{\pi}{p} - \beta} R_{\sigma}, \quad (8)$$

а для простої хвилевої обмотки

$$R_1 = \sum_{n=1}^p R_{2n-1}; \quad R_2 = \sum_{n=1}^p R_{2n}, \quad (9)$$

$$\text{де } A_n = \int_{a_n}^{b_n} \left[ 1 + \Delta_m^* \sin m(\alpha + \gamma_p) \right] d\alpha.$$

Дослідження показали, що впорядковані нерівномірності розподілу пластин колектора призводять до появи пульсацій ЕРС з частотою основної гармоніки

$$f_n = \frac{2pm}{c} f_o, \quad (10)$$

де  $c$  – спільний дільник чисел  $m$  і  $2p$ , якщо такий існує.

Амплітуда цієї пульсації залежить від співвідношення чисел  $m$  і  $2p$ , схеми з'єднання обмотки, амплітуди нерівномірності розподілу пластин колектора  $\Delta_m$  і ширини щіток. Під час досліджень встановлено, що існує залежність середнього рівня ЕРС  $E_c$  від досліджуваного чинника. В табл.1 наведено залежності рівня пульсацій ЕРС П, її частоти  $f_n$  і середнього рівня ЕРС  $E_c$  для машини з простою петлевою обмоткою,  $p=3$ ,  $\beta=0,1\tau$ ,  $\Delta_m=0,02\tau$ , а в табл.2 – те саме, для машини з простою хвилевою обмоткою.

Таблиця 1

**Залежність рівня пульсацій ЕРС якірної обмотки, її частоти і середнього значення від порядку нерівномірності розподілу пластин колектора машини з простою петлевою обмоткою**

| $m$          | 0   | 1      | 2      | 3      | 4      | 6   | 9           | 12  |
|--------------|-----|--------|--------|--------|--------|-----|-------------|-----|
| П, %         | 0   | 0      | 0,005  | 0,36   | 0,001  | 2,2 | $\approx 0$ | 0,4 |
| $f_n/f_o$    | 1   | 1      | 6      | 6      | 12     | 6   | 18          | 12  |
| $E_c$ , в.о. | 1,0 | 0,9975 | 0,9977 | 0,9985 | 0,9991 | 1,0 | 1,001       | 1,0 |

**Залежність рівня пульсацій ЕРС якірної обмотки, її частоти і середнього значення від порядку нерівномірності розподілу пластин колектора машини з простою хвильовою обмоткою**

| m            | 0   | 1   | 2   | 3     | 4   | 6   | 9   | 12  |
|--------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| П, %         | 0   | 0   | 0   | 0,25  | 0   | 3,3 | 0   | 0,7 |
| $f_n/f_0$    | 1   | 1   | 6   | 6     | 12  | 6   | 18  | 12  |
| $E_c$ , в.о. | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,997 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Амплітуда пульсацій зростає практично пропорційно збільшенню  $\Delta_m$  і  $\beta$ , а  $E_c$  зменшується при збільшенні  $\beta$ .

Радіальне биття колектора дає такі самі наслідки, як і нерівномірність розподілу пластин колектора першого порядку ( $m=1$ ), при цьому можна вважати, що  $\Delta_m$

$$\Delta_m = R_k (2\vartheta - \tau), \quad (11)$$

де  $R_k$  – радіус колектора;  $\vartheta = \arcsin \left[ \sin \frac{\pi}{2p} \left( 1 + \frac{\delta^*}{\cos \frac{\pi}{2p}} \right) \right]$ ;  $\delta^* = \delta / R_k$  – відносне значення раді-

ального биття колектора.

Використання викладених вище методів аналізу дає змогу зрозуміти впливи похибок виготовлення ЩКУ на пульсації ЕРС якірної обмотки ВВЕМ та оцінити їх на етапі проектування. Отже, з'являється можливість визначення допусків на обробку, складання та налагодження ЩКУ без дослідження експериментальних зразків машин, що значно прискорює їх розробку та зменшує вартість ДКР. Крім того, стає реальною коректна оцінка можливостей технологічного обладнання, яке планується використати для виготовлення такого виду ВВЕМ.

1. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. М., 1964. 2. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М., 1979. 3. Чучман Ю.И., Павлына В.Ф., Черепаняк М.В. Коллекторные пульсации ЕДС якорной обмотки машины постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 1992. № 3. С.27–32. 4. Волков В.С., Фролов С.И. Снижение пульсаций магнитного поля в воздушном зазоре моментного электродвигателя постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением // Сб. тр. Моск. энерг. ин-та. 1988. № 155. С.55–59. 5. Li Touzhu, Sleman Gordon Reduction of cjjggin torque in permanent magnet motor // IEEE Trans. Magn. 1988. 24. № 6. P.2901–2903. 6. Ваганов М.А. Положение щеток относительно геометрической нейтрали и коллекторные пульсации напряжения в ТГ постоянного тока // Электротехн. пром-сть. Сер. Электрические машины. 1977. № 8. С.18–20. 7. Осидач Ю.В., Попадин И.И., Есин А.А. Результаты экспериментального исследования влияния асимметрии магнитной системы на уровень пульсаций напряжения микромашин постоянного тока // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1980. № 140. С.71–73. 8. Wróbel Tadeusz. Przyczyny pulsacji napęcia malej częstotliwości w prądnicach tachometrycznych prądu stałego // Zesz. Nauk. PSI Elektr., 1982. № 82. S.21–36. 9. Панькин В.М. Учет анизотропии стали магнитопровода при проектировании и расчете электрических машин. Л., 1987. 27 с. Деп. в Информэлектро 27.04.87, № 765-эт87. 10. Чучман Ю.И. Многоцелевая математическая модель электрической машины // Электротехника. 1990. № 9. С.26–29.