

МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ДВОПОЛЮСНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ МАШИН ІЗ ЗБІЛЬШЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ГІЛОК

Подана методика створення двополюсних обмоток асинхронних машин із збільшеною кількістю паралельних гілок у фазах в 1,5 і 2 рази порівняно з кількістю полюсів. Методика підтверджується результатами експериментальних досліджень.

Представлена методика создания двухполюсных обмоток асинхронных машин с большим количеством параллельных ветвей в фазах в 1,5 и 2 раза по сравнению с числом полюсов. Методика подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Актуальність проблеми. В обмотках трифазних двополюсних асинхронних двигунів середньої потужності при виготовленні котушок виникає необхідність у великій кількості елементарних (паралельних) провідників $n_{ел.}$ в цих котушках при максимально можливій кількості паралельних гілок $a=2p=2$.

Так, в двигунах серії А2 і АО2, які експлуатуються і періодично ремонтуються, в А2-82-2 $n_{ел.}=6$, в А2-91-2 $n_{ел.}=9$, А2-92-2 $n_{ел.}=11$. В двигунах з жорсткими котушками А102-2М, А103-2М, А112-2 – $n_{ел.}=4$.

В двигунах серії 4А – в 4А225М2 $n_{ел.}=6$ ($U_л=220/380$ В), в 4А250S2 $n_{ел.}=8$ при $U_л=380$ В і $n_{ел.}=6$ при $U_л=660$ В, в 4А250М2 відповідно $n_{ел.}=9$ і $n_{ел.}=6$. В двигунах з жорсткими котушками 4А280S2 і М2, 4А315S2 і М2, 4А355S2 – $n_{ел.}=4$, а в двигуні 4А355М2 $n_{ел.}=6$!

В той же час відомі рекомендації: "В сучасних машинах намагаються зменшити кількість елементарних провідників в одному ефективному до 5-6, а в обмотці, призначеній для механізованої укладки, до 2-3. В обмотках з жорсткими котушками $n_{ел.}$ зазвичай не більше двох. Виконання котушок із $n_{ел.}=4$ ускладнюється" [1].

Виникають проблеми і з одним елементарним провідником. В двигуні ВАО2-315L2, який серійно виготовляє Первомайський електромеханічний завод, площа поперечного перерізу елементарного прямокутного провідника $S=27,55$ мм², в двигуні ВАО2-280М2 – $S=24,66$ мм². Однак існує рекомендація: "Площа прямокутних провідників, із яких виготовляють жорсткі і напівжорсткі котушки, не повинна перевищувати 17-20 мм², оскільки при більших перерізах в провідниках обмотки значно збільшуються втрати від вихрових струмів" [2].

Якщо ж виконувати обмотки кількістю паралельних гілок у фазі в два рази більшим, ніж кількість полюсів, $a=4p=4$, то кількість елементарних провідників в котушках зменшується в два рази, площа перерізу елементарного прямокутного провідника при $n_{ел.}=1$ зменшується в два рази. Але такі обмотки не висвітлені в підручниках і посібниках з ремонту електричних машин, тому в більшості випадків виконання таких обмоток на ремонтних заводах призводить до появи значних зрівняльних струмів між паралельними гілками, що робить неможливою нормальну роботу машини.

Мета роботи – розробити методику створення трифазних двополюсних обмоток кількістю паралельних гілок у фазах більшим, ніж кількість полюсів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Відомі публікації по обмоткам із збільшеною кількістю паралельних гілок стосуються обмоток потужних турбогенераторів [3-5]. ЕРС в кожному провіднику обмотки якоря турбогенератора сягає багатьох сотень вольт, і при заданому значенні номінальної напруги неможливо виконати обмотку якоря при найбільш можливій кількості паралельних гілок, яке дорівнює кількості полюсів. Однак у відомих публікаціях приведені вже готові апробовані схеми, пояснення одержання обмоток із збільшеною кількістю паралельних гілок відсутні. Методика по конструюванню таких обмоток не була створена. Щоб пояснити причину, чому не з'явилась методика по створенню таких обмоток, приведено цитату із монографії Жерве Г.К. [5]: "З огляду на різноманітність розподілу котушок в котушкових групах різних паралельних гілок нема можливості дати загальні правила обчислювання обмоткових коефіцієнтів, які можна вирахувати тільки методом проєкцій векторів ЕРС окремих пазів на дві взаємно перпендикулярні вісі".

На теперішній час, коли розроблена і відома універсальна формула розрахунку обмоткових коефіцієнтів [6], таку методику є можливість створити.

Матеріал і результати досліджень. На заводі "Луганський енергозавод" була виготовлена двополюсна обмотка для двигуна 5АМН-315М2, який і спричинив дане дослідження. Потужність двигуна $P_2=250$ кВт, напруга $U_л=380/660$ В, струм $I=433/250$ А. Кількість пазів статора $z_л=48$, кількість пазів на полюс і фазу $q=8$, крок $y=1-16$. Кількість витків котушок $w_k=7$, провід $d_{зол.}=1,5$ мм із 9 елементарних (паралельних) провідників, кількість паралельних гілок $a=4$. Необхідність у збільшенні паралельних гілок виникла тому, що при двох паралельних гілках обмотку потрібно було б виконувати із 18 елементарних провідників. Таке виготовлення обмотки стає практично неможливим.

Обмотку виконали найбільш простим з точки зору технологічності способом: подвоєнням кількості паралельних гілок поділом існуючих паралельних гілок через одну котушку, одна фаза на одному полюсному поділі показана на рис. 1.

Обмоткові коефіцієнти можливо вирахувати по відомих формулам, якщо прийняти кут α не між двома поряд розміщеними пазами, а в 2 рази більшим:

$$\alpha = 2 \frac{360^\circ \cdot p}{z} = 2 \frac{360^\circ \cdot 1}{48} = 15^\circ, \quad (1)$$

а q – в два рази меншим:

$$q = \frac{z}{2 \cdot 2pm} = 4. \quad (2)$$

Тоді:

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 4 \cdot 7,5^\circ}{4 \cdot \sin 7,5^\circ} = 0,957662, \quad (3)$$

$$k_{ск.} = \sin \frac{15}{24} \cdot 90^\circ = 0,83147, \quad (4)$$

$$k_{об.} = k_p \cdot k_{ск.} = 0,79626.$$

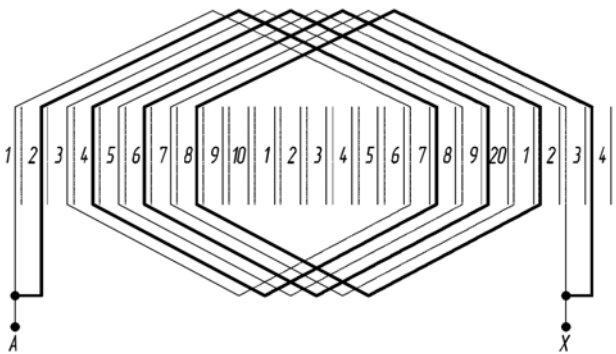


Рис. 1. Подвоєння кількості паралельних гілок

Обмоткові коефіцієнти для всіх паралельних гілок однакові, але ця однаковість оманлива. Умовою утворення паралельних гілок, які забезпечують відсутність зрівняльних струмів між паралельними гілками, є однакова кількість послідовно ввімкнених котушок в кожній гілці та однакове їх розміщення в магнітному полі. В даному випадку дві паралельні гілки, що знаходяться на одному полюсному поділі (рис. 1), зсунуті по фазі одна відносно іншої на кут $\alpha=7,5^\circ$, і геометрична різниця ЕРС двох паралельних гілок, що знаходяться на одному полюсному поділі:

$$\Delta E = 2 \cdot E_\phi \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} = 2 \cdot 380 \cdot \sin \frac{7,5^\circ}{2} = 49,7 \text{ В}. \quad (5)$$

Під дією цієї різницевої ЕРС в паралельних гілках обмотки виникає значний зрівняльний струм, який можна вирахувати за формулою:

$$I = \frac{\Delta E}{2\sqrt{R^2 + x^2}}, \quad (6)$$

де R і x – активний та індуктивний опір паралельної гілки.

В режимі холостого ходу при напрузі $U_n=380 \text{ В}$ і з'єднанні фаз трикутником були зроблені заміри струму і споживаної потужності: $I_0=120 \text{ А}$, $P_0=8,8 \text{ кВт}$. Нажаль, не був ввімкнений амперметр в одну із паралельних гілок, але судячи із швидкого нагрівання обмотки статора зрівняльний струм в паралельних гілках був не менший, ніж струм в номінальному режимі. Збільшення потужності P_0 більш як в 2 рази порівняно з обмоткою без зрівняльних струмів пояснюється виникненням гальмівного електромагнітного моменту, викликаного зрівняльними струмами.

Реальне уявлення про ЕРС паралельних гілок можливо отримати з допомогою універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів [6]. Геометричну суму ЕРС паралельної гілки на комплексній площині визначаємо так:

$$\dot{E} = \sum_{n=1,2,\dots,n} (\cos n\alpha + j \sin n\alpha) - \sum_{k=1+y,2+y,\dots,n+y} (\cos k\alpha + j \sin k\alpha), \quad (7)$$

де n – перші сторони котушок паралельної гілки, k – другі сторони котушок цієї ж гілки.

Для першої паралельної гілки (рис. 1) $n=1, 3, 5, 7$; $k=16, 18, 20, 22$.

Після розрахунків за формулою (7) одержуємо вектор ЕРС першої паралельної гілки:

$$\dot{E}_1 = 6,35644 - j0,416625, \quad (8)$$

а модуль цієї комплексної величини

$$E_1 = \sqrt{(6,35644^2 + 0,416625^2)} = 6,37,$$

є величина ЕРС у відносних одиницях першої паралельної гілки.

Обмотковий коефіцієнт одержимо, поділивши величину ЕРС на кількість активних сторін котушок:

$$k_{об.} = \frac{E_1}{N} = \frac{6,37}{8} = 0,79626.$$

Одержаний обмотковий коефіцієнт повністю збігається з одержаним раніше по відомій формулі (4).

Аналогічно одержуємо вектор ЕРС для другої паралельної гілки ($n=2, 4, 6, 8$; $k=17, 19, 21, 23$):

$$\dot{E}_1 = 6,3563844 + j0,416663, \quad (9)$$

модуль:

$$E_1 = \sqrt{(6,3563844^2 + 0,416663^2)} = 6,37.$$

Величини ЕРС повністю співпадають, а вектори ЕРС відрізняються (формули 8 і 9).

Порівняння паралельних гілок набагато спрощується, якщо розглядати ЕРС тільки перших сторін котушок, що входять в паралельну гілку, тобто користуватись першою частиною формули (7).

Для першої гілки ($n_1=1, 3, 5, 7$) отримуємо ЕРС перших сторін котушок:

$$\dot{E}_{1,1} = 3,316744 + j1,9153244.$$

Модуль цієї комплексної величини: $E_{1,1}=3,83065$, а обмотковий коефіцієнт одержимо, поділивши модуль на кількість сторін котушок:

$$k_p = \frac{E_{1,1}}{N_1} = \frac{3,83065}{4} = 0,957662,$$

який є коефіцієнтом розподілу паралельної гілки і повністю збігається з одержаним по формулі (3). Якщо розглядувані котушки мають однаковий крок, коефіцієнт розподілу обчислюється із врахуванням розміщення тільки перших сторін котушок, тобто використовується перша частина формули (7).

Для другої гілки ($n_2=2, 4, 6, 8$) отримуємо ЕРС:

$$\dot{E}_{2,1} = 3,3039 + j2,33195.$$

Модуль $E_{2,1}=3,83065$, коефіцієнт розподілу $k_p=0,957662$.

Отже, паралельні гілки потрібно одержувати із таких котушок, геометрична сума ЕРС яких була б однаковою.

З огляду на безкінечно велику кількість варіантів поєднання котушок в паралельні гілки, потрібно виявити явно неприйнятні варіанти, щоб їх не обраховувати. Зобразимо на рис. 2 в межах однієї фазної зони на одному секторі по радіусам 4 прийнятні варіанти поєднання котушок в паралельні гілки і виконаємо відповідний аналіз цих варіантів.

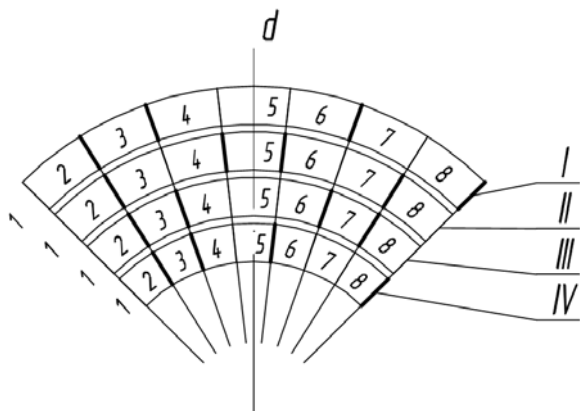


Рис. 2. Варіанти поєднання котушок в паралельні гілки для $q=8$

I варіант:

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 5, 7$:

$$\dot{E}_{1,1} = 3,2596 + j2,03264; E_{1,1}=3,8414.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 6, 8$:

$$\dot{E}_{1,2} = 3,0969 + j2,2146; E_{1,2}=3,8073.$$

II варіант:

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 3, 6, 8$:

$$\dot{E}_{2,1} = 3,12243 + j2,08634; E_{2,1}=3,7553.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 4, 5, 7$:

$$\dot{E}_{2,2} = 3,008705 + j2,25459; E_{2,2}=3,8227.$$

III варіант

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 5, 8$:

$$\dot{E}_{3,1} = 3,15 + j2,1050; E_{3,1}=3,78877.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 6, 7$:

$$\dot{E}_{3,2} = 3,20567 + j2,1542; E_{3,2}=3,86224.$$

IV варіант

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 6, 7$:

$$\dot{E}_{4,1} = 3,1733385 + j2,131; E_{4,1}=3,822455.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 5, 8$:

$$\dot{E}_{4,2} = 3,1831587 + j2,116289; E_{4,2}=3,82247.$$

Аналізуючи показані на рис. 2 варіанти, можна зробити такі висновки:

1. Котушки паралельних гілок повинні бути рівномірно розподілені в межах фазної зони.

2. ЕРС паралельних гілок повинні співпадати по фазі.

3. Суми проєкцій ЕРС сторін котушок кожної з паралельних гілок на вісь d (рис. 2) не повинні відрізнятися.

Найкраще цим вимогам задовольняє IV варіант, ЕРС паралельних гілок якого зсунуті по фазі на кут $\gamma=15'54''$, тобто практично співпадають, а максимальні значення ЕРС однакові.

В уже згадуваному двигуні 5АМН-315М2 котушки паралельних гілок згідно з рис. 1 були пе-

рез'єднані згідно IV варіанта (рис. 3). В режимі холостого ходу $I_0=78$ А, $P_0=4$ кВт. Струм зменшився в 1,5 рази, потужність холостого ходу – в 2,2 рази.

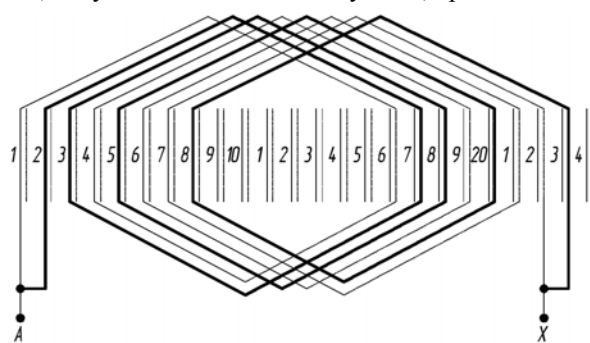


Рис. 3. Дві паралельні гілки з однаковими векторами ЕРС

На рис. 4, 5 показані найкращі варіанти для обмоток, що мають $q=6$ і $q=10$. Ці варіанти підтверджують зроблені висновки відносно способу об'єднання котушок в паралельні гілки.

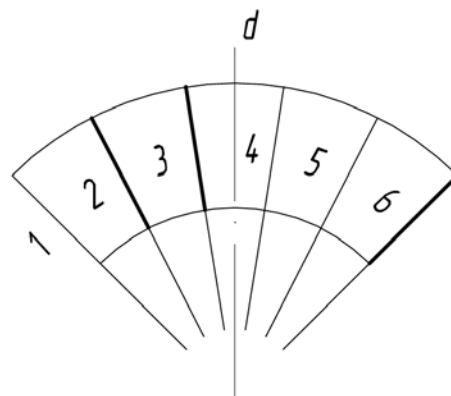


Рис. 4. Поєднання котушок в паралельні гілки для $q=6$

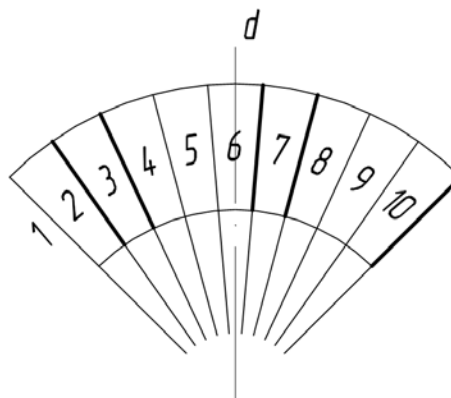


Рис. 5. Поєднання котушок в паралельні гілки для $q=10$

Для $q=6$

перша гілка $n_1=1, 4, 5$:

$$\dot{E}_1 = 2,39364 + j1,58248; E_1=2,86944;$$

друга гілка $n_2=2, 3, 6$:

$$\dot{E}_2 = 2,3057 + j1,708; E_1=2,86944.$$

Для $q=10$

перша гілка $n_1=1, 4, 5, 8, 9$:

$$\dot{E}_1 = 4,031 + j2,563427; E_1=4,777;$$

друга гілка $n_2=2, 3, 6, 7, 10$:

$$\dot{E}_2 = 3,981366 + j2,63987; E_1=4,777;$$

Використовуючи описаний спосіб об'єднання котушок в паралельні гілки, можливо створювати двополосні обмотки з кількістю паралельних гілок $a=3$. Збільшення кількості паралельних гілок в 1,5 рази можливе в обмотках, кількість пазів яких на полюс і фазу q кратне трьом, тобто в обмотках, що мають $q=6, 9, 12, 15$.

Так, наприклад, для $q=6$ дві паралельні гілки формуються з котушок, які розміщені на двох полюсних поділах. Для першої гілки – котушка 1, 3, 5 і котушка, розміщена в 23-му пазу. Оскільки вектор ЕРС 23-го паза направлений зустрічно, ЕРС 23-го паза потрібно вирахувати з від'ємним знаком. Аналогічно дії проводять з другою гілкою.

Для першої гілки $n_1=1, 3, 5, -23$:

$$\dot{E}_1 = 3,1364 + j2,2057; E_1=3,834.$$

Для другої гілки $n_2=2, 4, 6, -19$:

$$\dot{E}_2 = 3,19 + j2,02465; E_2=3,778.$$

Для третьої гілки $n_3=20, 21, 22, 24$:

$$\dot{E}_3 = 3,0718 + j2,351; E_3=3,868.$$

ВИСНОВКИ

Розроблена методика створення двополосних обмоток асинхронних машин із збільшеною кількістю паралельних гілок дозволяє пропорційно зменшувати кількість елементарних провідників в котушках, виконуваних як із круглих провідників, так і з прямокутних провідників, що значно спрощує технологію виготовлення обмоток. У двигунах з одним елементарним прямокутним провідником у випадку його надмірно великого поперечного перерізу збільшення кількості паралельних гілок дозволяє пропорційно зменшувати поперечний переріз провідника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гури́н Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

3. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. Турбогенераторы. Расчет и конструкция – М.: Энергия, 1967. – 895 с.
4. Титов В.В. Статорные обмотки с увеличенным числом параллельных ветвей // Электросила. – 1979. – № 32.
5. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 400 с.
6. Лущик В.Д. Универсальная методика расчета обмоточных коэффициентов // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 28-31.

Bibliography (transliterated): 1. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. *Proektirovanie serij jelektricheskikh mashin*. Moscow, Energija Publ., 1978. 480 p. 2. Kopylov I.P., Gorjainov F.A., Klokov B.K. and others. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin. Ucheb. posobie dlja vuzov*. Moscow, Energija, 1980. 496 p. 3. Titov V.V., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A. *Turbogenerator. Raschet i konstrukcija*. Moscow, Energija, 1967. 895 p. 4. Titov V.V. *Statornye obmotki s uvelichennym chisлом parallel'nyh vetvej. Elektrosila*, 1979, no.32. 5. Zherve G.K. *Obmotki jelektricheskikh mashin*. Leningrad, Energoatomizdat. Publ., 1989. 400 p. 6. Lushchik V.D. Universal method of winding coefficients calculation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.1, pp. 28-31.

Надійшла (received) 20.09.2013

Лущик В'ячеслав Данилович¹, д.т.н., проф.,
Тимошенко Володимир Олексійович², голова правління,
¹Донбаський державний технічний університет,
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел/phone +38 099 7654495, e-mail: v.d.luschik@yandex.ua,
²ПАТ "Луганський енергозавод",
91020, Луганськ, вул. Руднева, 56,
тел/phone +38 0642 934412, e-mail: lez-zavod@ukr.net

V.D. Lushchik¹, V.O. Tymoshchenko²
¹Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine
²Public Joint Stock Company "Lugansk Energozavod"
56, Rudnev Str., Lugansk, 91020, Ukraine

A 2-pole winding development technique for asynchronous machines with increased number of parallel branches.

A 2-pole winding development technique is introduced for asynchronous machines with the number of parallel branches in phases increased in 1.5 and 2 times as compared with the number of poles. The technique is confirmed by results of pilot studies.

Key words – asynchronous machine, 2-pole winding, parallel branch, EMF, winding factor.