

УДК 621.313

П 14

## СХЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЧЕРЕДОВАНИЯ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП В АСИНХРОННЫХ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ КОНТРРОТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

О. О. Пальчиков, магистр

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

**Аннотация.** Рассмотрены возможные варианты укладки катушечных групп обмотки в пространстве между двумя секциями статора в асинхронном контрроторном двигателе. Предложены оценочные формулы для определения средней длины участка катушечной группы и межсекционного расстояния, а также активного сопротивления и коэффициента лобового рассеяния фазы обмотки статора.

**Ключевые слова:** секционированный асинхронный контрроторный двигатель, технология укладки катушечных групп, межсекционное пространство, активное сопротивление фазы обмотки, коэффициент лобового рассеяния фазы обмотки статора.

**Анотація.** Розглянуто можливі варіанти укладання катушкових груп обмотки в просторі між двома секціями статора в асинхронному контрроторному двигуні. Запропоновано оціночні формули для визначення середньої довжини ділянки катушкової групи і міжсекційної відстані, а також активного опору і коефіцієнта лобового розсіювання фази обмотки статора.

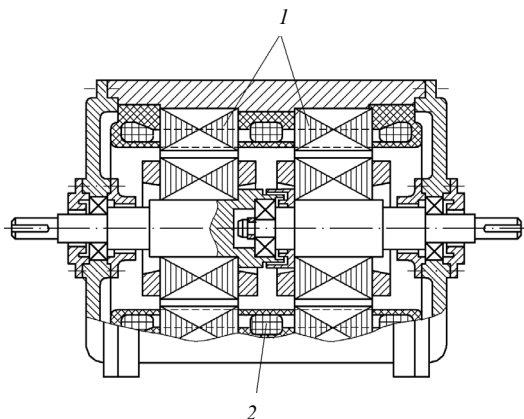
**Ключові слова:** секціонований асинхронний контрроторний двигун, технологія укладання катушкових груп, міжсекційний простір, активний опір фази обмотки, коефіцієнт лобового розсіювання фази обмотки статора.

**Abstract.** The possible variants of the coil groups laying technology have been considered in space between two sections of the stator in an asynchronous counter-rotating motor. The evaluation formulas for definition of the average area length of the coil group and the intersection distance are suggested. The evaluation formulas of the active resistance and the coil-end leakage coefficient of the stator winding phase are also suggested.

**Keywords:** partitioned asynchronous counter-rotating motor, laying technology of coil groups, intersection distance, active resistance of winding phase, coefficient of stator winding phase.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Возможности усовершенствования судовых механизмов на основе встречного вращения рабочих элементов показаны в работах [5, 6]. Одним из эффективных вариантов источника механической мощности в таких механизмах может быть асинхронный секционированный контрроторный двигатель (АСКРД) [2] (рис. 1). Проблемным вопросом проектирования АСКРД является определение параметров части обмотки в пространстве между секциями статора, в пределах которого изменяется порядок чередования катушечных групп, с учетом особенностей их укладки и размещения.



**Рис. 1.** Конструктивная схема АСКРД: 1 – секции магнитопровода статора; 2 – участок обмотки статора между секциями

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известны публикации [5, 7], в которых приводится схема изменения чередования катушечных групп типа  $AZBXCY-AYCXBZ$ . Однако отсутствуют выражения для оценки параметров обмотки в межсекционном пространстве АСКРД.

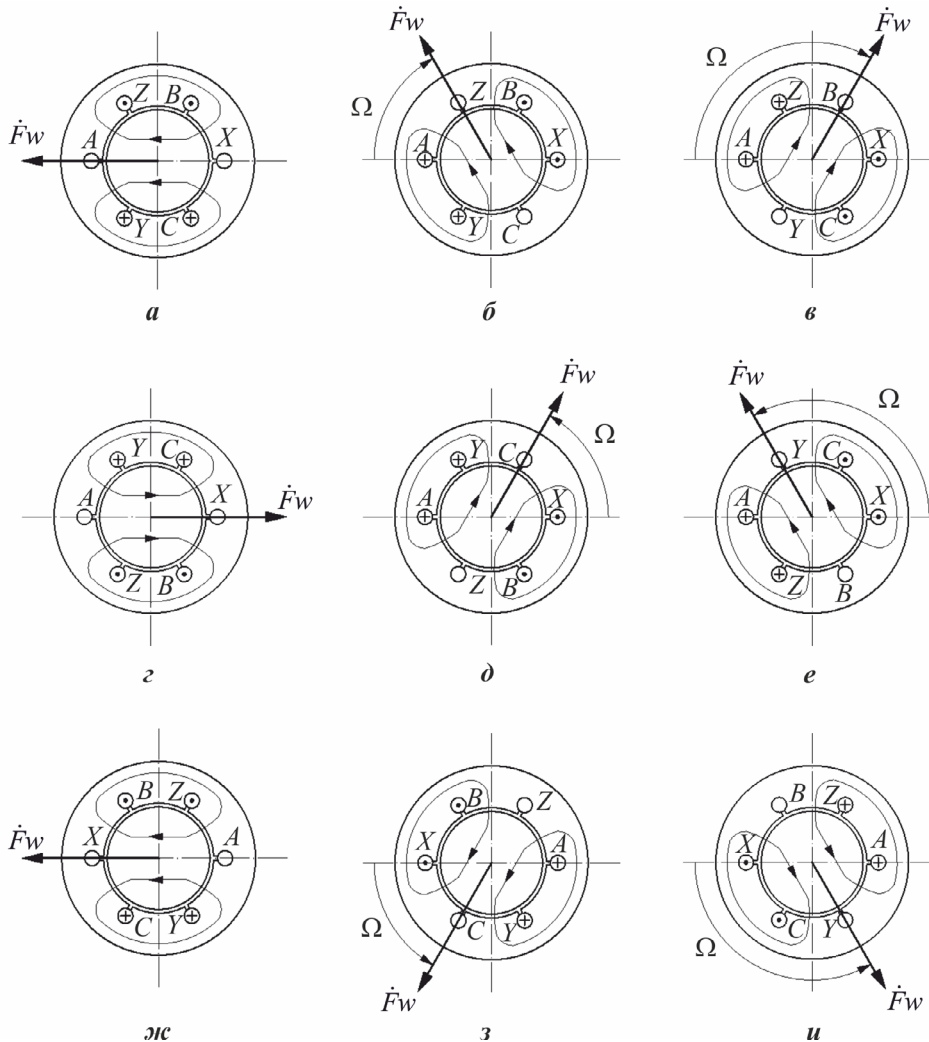
**ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ** является анализ вариантов схем изменения чередования катушечных групп обмотки статора АСКРД и особенностей их укладки с обеспечением минимальной длины межсекционного пространства, а также определение параметров указанной обмотки.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Контрроторность подвижных элементов АСКРД (см. рис. 1) помимо конструкции подшипникового узла [2] обеспечивается встречным вращением магнитодвижущих сил (МДС) с синхронной частотой вращения  $\Omega_1$  в зонах отдельных секций магнитопровода. Возможные варианты комбинаций включения фаз обмотки с 60-градусной фазной зоной [1], удовлетворяющие приведенному выше требованию и создающие вращение МДС в первой секции статора АСКРД по часовой стрелке и во второй секции против часовой стрелки, определяются чередованиями  $AZBXCY$ ,  $XCYAZB$ ,  $CYAZBX$ ,  $ZBXCYA$ ,  $BXCYAZ$ ,  $YAZBXC$ , а также  $AYCXBZ$ ,  $XBZAYC$ ,  $CXBZAY$ ,

$ZAYCXB, BZAYCX, YCXBZA$ . При этом все комбинации схем обмоток секций статора сводятся к двум вариантам изменения чередования фаз в межсекционном пространстве. Так, если принять схему чередования фаз обмотки  $AZBXCY$  в первой секции АСКРД, то чередование фаз обмотки второй секции

будет  $AYCXBZ$  или  $XBZAYC$ . На рис. 2 показаны положения вектора МДС при чередовании фаз  $AZBXCY$  ( $a$ – $в$ ),  $AYCXBZ$  ( $г$ – $е$ ),  $XBZAYC$  ( $ж$ – $и$ ), соответствующие моментам времени  $t = 0$  ( $a, г, ж$ ),  $t = \pi/3$  ( $б, д, з$ ),  $t = 2\pi/3$  ( $в, е, и$ ).



**Рис. 2.** К пояснению создания встречного вращения магнитного поля в смежных секциях статора:  $a$ – $в$  – вращение вектора магнитодвижущей силы с чередованием фаз  $AZBXCY$  первой секции;  $г$ – $е$  – изменение направления вращения вектора магнитодвижущей силы с чередованием фаз  $AYCXBZ$  второй секции;  $ж$ – $и$  – изменение направления вращения вектора магнитодвижущей силы с чередованием фаз  $XBZAYC$

Длина части витка между секциями магнитопровода в каждой катушке, входящей в катушечную группу обмотки статора АСКРД, различна, поэтому для создания симметричной обмотки необходимо обеспечить одинаковую длину проводов всех трех фаз. Идентичности средней длины витка каждой катушки фазы обмотки АСКРД можно достичь двумя способами: изменением геометрии лобовых частей или достижением равенства усредненной длины участков проводов трех фаз в межсекционном пространстве машины. Укладка обмотки в соответствии с первым вариантом осложняется тем, что кроме отличия длин

участков катушечных групп в пространстве между секциями статора необходимо учитывать тип обмотки (однослойная, двухслойная), количество полюсов и катушек на полюс и фазу [4]. Поэтому схемы укладки обмотки АСКРД  $AZBXCY$ – $AYCXBZ$ ,  $AZBXCY$ – $XBZAYC$ , приведенные на рис. 3,  $a$  и  $б$ , построены по второму способу симметрирования проводников катушечных групп в межсекционном пространстве.

Согласно упрощенной схеме чередования фаз  $AZBXCY$ – $AYCXBZ$  (рис. 3,  $a$ ), соответствующей первому варианту укладки, проводники стороны катушечной группы фаз (СКГФ)  $YY$  и  $CC$  укладываются под

некоторым углом  $\alpha$  к плоскости шихтованного пакета статора. Угол  $\alpha$  должен обеспечивать изгиб смежных катушечных групп радиусом, равным высоте паза статора  $h_{н1}$ . При этом СКГФ  $BB$  и  $ZZ$  устанавливаются

поверх СКГФ  $YY$  и  $CC$  с возможностью некоторого их выдвигания для обеспечения условия равенства

$$l_{AA} = l_{XX} = (l_{BB} + l_{YY})/2 = (l_{CC} + l_{ZZ})/2. \quad (1)$$

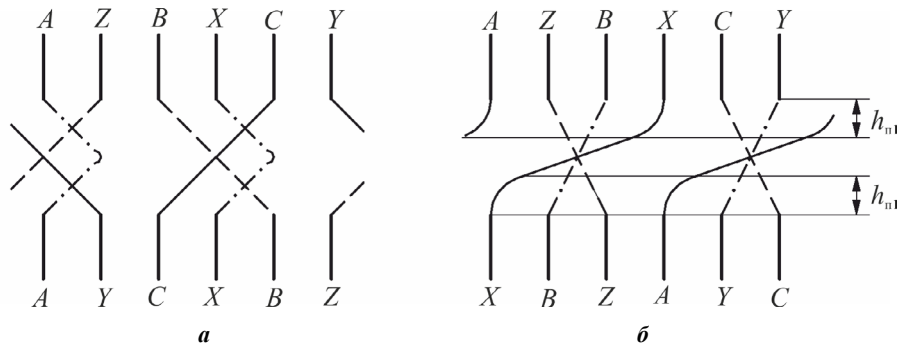


Рис. 3. Схемы изменения чередования катушечных групп в межсекционном пространстве  $AZBXCXY-AYCXBZ$  (а) и  $AZBXCXY-XBZAYC$  (б): (—) – проводники первого слоя укладки; (---) – второго слоя укладки; (- · -) – ортогональной укладки

Проводники  $AA$  и  $XX$  укладываются в ортогональной плоскости к плоскости укладки СКГФ  $YY$  и  $CC$ .

В схеме  $AZBXCXY-XBZAYC$  (см. рис. 3,б) предлагается укладывать СКГФ  $AA$  и  $XX$  в одной плоскости, что позволяет обеспечить равенство внутренних межсекционных вылетов проводников катушечных групп размеру высоты паза  $h_{н1}$ . При такой укладке СКГФ  $AA$  и  $XX$  в средней части проходят практически параллельно плоскости шихтованного листа магнитопровода статора, СКГФ  $YY$  и  $ZZ$  укладываются поверх СКГФ  $AA$  и  $XX$ , а СКГФ  $BB$  и  $CC$  располагаются в ортогональной плоскости к плоскости проводников СКГФ  $AA$  и  $XX$  и при необходимости выдвигаются для обеспечения равенства (1).

Для определения длины межсекционного пространства  $d_1$  рассмотрим проводники СКГФ  $YY$  на рис. 4,а. Для указанных проводников, уложенных по схеме  $AZBXCXY-AYCXBZ$  (см. рис. 3,а), величина межсекционного пространства (см. рис. 4,а)

$$d_1 = kx_1 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где  $k$  – конструктивный коэффициент, обеспечивающий выполнение условия (1), находящийся в пределах  $k = 2 \dots 3$ ;  $x_1$  – расстояние между пазами укладки проводников СКГФ  $YY$  разных секций;  $\alpha$  – угол укладки.

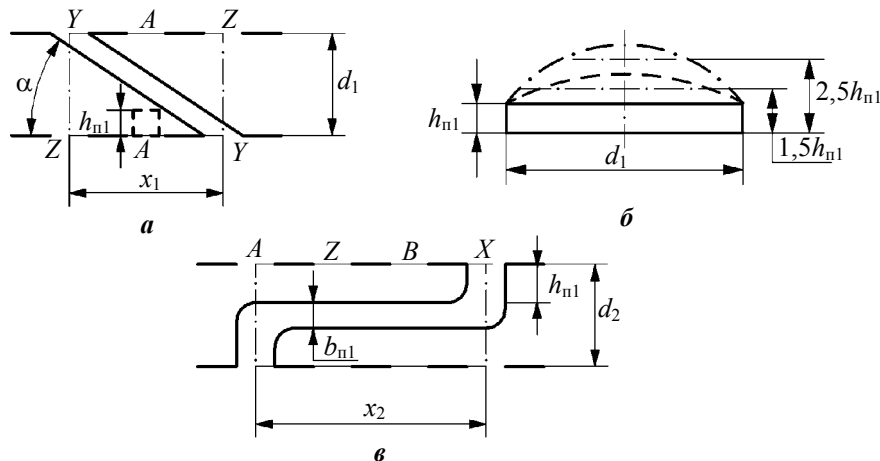


Рис. 4. К пояснению определения геометрических параметров участков обмотки между секциями схем  $AZBXCXY-AYCXBZ$  (а, б) и  $AZBXCXY-XBZAYC$  (в)

Указанное расстояние  $x_1$  определяется выражением

$$x_1 = \pi D / (p q m), \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр активной поверхности статора;  $p$  – количество пар полюсов;  $q$  – зубцовое деление на полюс и фазу;  $m$  – количество фаз.

Тангенс угла наклона  $\operatorname{tg} \alpha$  (см. рис 4,а) находится из условия обеспечения укладки проводников смежных СКГФ (проекция участка их изгиба  $y_1$  равна высоте паза  $h_{н1}$ ):

$$\operatorname{tg} \alpha = 2h_{н1} p q m / (\pi D). \quad (4)$$

Подстановка (3) и (4) преобразует выражение (2) к виду

$$d_1 = \frac{k\pi D}{pqm} \cdot \frac{2h_{n1}pqm}{\pi D} = 2kh_{n1}. \quad (5)$$

Длина участка проводников СКГФ  $YU$   $l'_{YU}$  (см. рис. 4,а) находится как гипотенуза прямоугольного треугольника:

$$l'_{YU} = \sqrt{(d_1)^2 + (x_1)^2}. \quad (6)$$

Аналогично определяется длина участка СКГФ  $ZZ$   $l'_{ZZ}$  (рис. 4,б) с учетом того, что ее средняя часть поднята на высоту  $z_1$ , равную 1,5 высоты паза  $h_{n1}$ :

$$l'_{ZZ} = \sqrt{(l'_{YU})^2 + 9(h_{n1})^2}. \quad (7)$$

Длина участка СКГФ  $AA$   $l'_{AA}$  (см. рис. 4,б) находится следующими образом:

$$l'_{AA} = \sqrt{(d_1)^2 + 25(h_{n1})^2}. \quad (8)$$

При этом длина  $l'_{AA}$  также может быть найдена при подстановке (6) и (7) в условие (1):

$$l'_{AA} = (l'_{YU} + l'_{ZZ})/2. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) должны быть тождественными, в противном случае следует увеличивать коэффициент  $k$ . При  $k > 2$  симметричность фаз обмотки статора АСКРД этим способом не может быть достигнута. Тогда необходимо переходить к схеме изменения чередования фаз  $AZBXCY-XBZAYC$  (см. рис. 3,б) или к способу симметрирования изменением геометрии лобовых частей обмотки.

Основные геометрические параметры: межсекционное расстояние  $d_2$  и средняя длина участка СКГФ  $l''_{AA}$  для схемы  $AZBXCY-XBZAYC$  (см. рис. 4,в):

$$d_2 = 2h_{n1} + b_{n1}; \quad (10)$$

$$l''_{AA} = 2h_{n1} + x_2. \quad (11)$$

Здесь  $b_{n1}$  – ширина паза;  $x_2$  – расстояние между пазами укладки проводников СКГФ  $XX$  разных секций АСКРД, определяемое по формуле

$$x_2 = 1,5\pi D/(pq).$$

Исходя из (9) и (11) с учетом [4], активное сопротивление фазы обмотки АСКРД определим как

$$r = wl_{cp}/(\rho_m a c S),$$

где  $w$  – количество витков;  $\rho_m$  – проводимость меди;  $a$  – количество параллельных ветвей;  $c$  и  $S$  – количество и площадь элементарных проводников в пазу;  $l_{cp}$  – средняя длина витка обмотки.

Величина  $l_{cp}$  определяется следующим выражением:

$$l_{cp} = 2(l_1 + l_n + l_{AA}),$$

где  $l$  – длина сердечника статора;  $l_n$  – длина лобовой части двигателя;  $l_{AA}$  – средняя длина участка СКГФ, вычисляются по выражениям (9) и (11).

Так как совокупность участков катушечных групп в пространстве между секциями статора (см. рис. 1) можно считать условной дополнительной «лобовой» частью обмотки статора с длиной  $d_{1(2)}$ , определяющейся выражениями (5), (10), а проводимости пазового и дифференциального рассеяния не изменяются при наличии промежуточных участков обмотки между секциями, задача определения индуктивного сопротивления обмотки фазы статора АСКРД сводится к уточнению коэффициента рассеяния лобовых частей обмотки  $\lambda_{n1(2)}$  [4]:

$$\lambda_{n1(2)} = 0,34(q/l)(l_n + d_{1(2)}/2 - 0,64\beta\tau), \quad (12)$$

где  $\beta$  – коэффициент укорочения;  $\tau$  – полюсное деление.

Согласно (8), (9) и (11) в схеме укладки  $AZBXCY-XBZAYC$  (см. рис. 3,б) средняя длина участка СКГФ между секциями статора примерно на 25 % меньше и, соответственно, меньше активное сопротивление обмотки и расход меди. На основе сравнения величин (5) и (10) в схемах соединения  $AZBXCY-AUCXBZ$  и  $AZBXCY-XBZAYC$  можно констатировать уменьшение межсекционного расстояния почти вдвое, что, согласно (12), приводит дополнительно к улучшению массогабаритных и энергетических показателей АСКРД, снижает также активное сопротивление фаз обмотки схемы  $AZBXCY-XBZAYC$ .

Необходимо отметить большую технологичность укладки проводов в схеме  $AZBXCY-XBZAYC$ , так как при такой укладке условие (1) обеспечивается только выдвижением проводов СКГФ  $BB$  и  $CC$ . Для схемы  $AZBXCY-AUCXBZ$  (см. рис. 3,а) выражение (1) на практике достигается изгибом проводников всех СКГФ –  $YU, CC, AA, XX, BB, ZZ$ . Однако это может полностью не обеспечить симметрирование фаз, и тогда необходимо увеличивать значение коэффициента  $k$ , что увеличит межсекционное расстояние  $d_1$  и ухудшит технико-экономические показатели АСКРД. Чередование  $AZBXCY-AUCXBZ$  достигается при больших перегибах участков катушек между секциями по сравнению со схемой  $AZBXCY-XBZAYC$ , что снижает надежность обмотки в целом.

Например для АСКРД, соответствующего асинхронному двигателю традиционной конструкции [3], мощностью 7,5 кВт, с синхронной частотой вращения  $\Omega_1 = 1500$  об/мин параметры конструктивной схемы  $AZBXCY-AUCXBZ$ :  $d_1 = 92,5$  мм;  $l'_{AA} = 105$  мм; для конструктивной схемы  $AZBXCY-XBZAYC$ :  $d_2 = 46,25$  мм;  $l''_{AA} = 77$  мм.

## ВЫВОДЫ

1. Получены выражения оценки межсекционного расстояния и средней длины катушечных групп в пространстве между секциями статора, а также уточнены выражения определения активного сопротивления обмотки фазы и коэффициента проводимости рассеяния лобовых частей АСКРД.

2. Схема изменения чередования катушечных групп  $AZBXCY-XBZAYC$ , по сравнению со схемой  $AZBXCY-AYCXBZ$ , обеспечивает снижение межсекционного расстояния почти вдвое, а также уменьшает среднюю длину участка СКГФ в межсекционном пространстве примерно на 25 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Костенко, М. П.** Электрические машины [Текст] : в 2 ч. Ч. 2. Машины переменного тока / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л. : Энергия, 1973. – 548 с.
- [2] **Пат. 65002 Україна, МПК H02K5/16 (2011).** Электродвигун контрроторного обергання [Текст] / Ставинський А. А., Пальчиков О. О. – № u201104982 ; заявл. 20.04.11 ; опубл. 25.11.11, Бюл. № 22.
- [3] Проектирование электрических машин [Текст] : учеб. для втузов / под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высшая школа, 1984. – 431 с.
- [4] Проектирование электрических машин [Текст] : учеб. для вузов / под ред. И. П. Копылова. – М. : Энергия, 1980. – 495 с.
- [5] **Ставинский, А. А.** Возможности усовершенствования судовых осевых электровентиляторов на основе асинхронных контрроторных двигателей [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Матер. Всеукр. науч.-техн. конф. з міжнар. участю ПАЕТЗ-2011. – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 40–43.
- [6] **Ставинский, А. А.** Перспективы ресурсосбережения при разработке систем электродвижения морских подвижных объектов на основе асинхронных контрроторных двигателей [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // Матер. Всеукр. науч.-техн. конф. з міжнар. участю ПАЕТЗ-2011. – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 34–39.
- [7] **Ставинский, А. А.** Энергосбережение при разработке судовых электромеханических систем встречного вращения [Текст] / А. А. Ставинский // Судостроение. – 2011. – № 6. – С. 35–38.

---

© О. О. Пальчиков

Надійшла до редколегії 14.02.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський