

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

---

УДК 621.313

**Юрий Борисович Казаков**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

**Даниил Сергеевич Смирнов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

**Мирослав Александрович Киселев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: Miroslav.kiselev97@yandex.ru

### Улучшение гармонического состава магнитного поля в трехфазных электродвигателях с дробными зубцовыми обмотками путем совмещения схем звезды и треугольника

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В многополюсных электродвигателях применяются дробные зубцовые обмотки якоря с дискретным ее распределением по пазам, что приводит к появлению неосновных низших и высших пространственных гармоник магнитного поля со значительными амплитудами, которые вызывают повышенное дифференциальное рассеяние, пульсации электромагнитного момента, провалы в механической характеристике, увеличивают добавочные потери, уровни электромагнитного шума и вибраций. В связи с этим актуальным является решение задачи улучшения гармонического состава магнитного поля таких обмоток, снижения амплитуд неосновных гармоник.

**Материалы и методы.** В исследовании трехфазная 6-зонная дробная зубцовая обмотка заменена трехфазной совмещенной 12-зонной обмоткой, состоящей из двух трехфазных дробных зубцовых обмоток, соединенных одна в «звезду», другая в «треугольник». Эффективность обмоток оценена по изменениям амплитуд гармоник, коэффициентов дифференциального рассеяния и несинусоидальности распределения полей. Исследование проведено с применением моделирования магнитного поля методом конечных элементов.

**Результаты.** Разработана структура трехфазной симметричной совмещенной дробной зубцовой обмотки. Приведены примеры обмоток. Рассчитаны параметры диаграмм магнитодвижущих сил. Получены распределения магнитодвижущих сил и индукций. Определены амплитуды гармоник, коэффициенты дифференциального рассеяния и несинусоидальности распределений полей. Установлено, что при совмещении схем «звезда» и «треугольник» в трехфазных дробных зубцовых обмотках амплитуда основной гармоники магнитодвижущей силы совмещенной обмотки возрастает на 3,38 %, индукция магнитного поля якоря на 4,69 %, индукция результирующего магнитного поля при нагрузке на 1,3 %, по сравнению с несовмещенной обмоткой. Коэффициент дифференциального рассеяния совмещенной обмотки уменьшается, в отличие от коэффициента несовмещенной обмотки на 25,8 %, коэффициенты гармонических искажений также уменьшаются: магнитодвижущей силы якоря на 8,0 %, индукции магнитного поля якоря на 8,49 %, индукции результирующего магнитного поля при нагрузке на 3,29 %, обмоточный коэффициент совмещенной дробной зубцовой обмотки на 3,5 % больше, чем для несовмещенной обмотки.

**Выводы.** Совмещение схем «звезда» и «треугольник» в дробной зубцовой обмотке, выполнение условий ее реализации и предложенная структура обмотки позволяют в трехфазных многополюсных электродвигателях снизить амплитуды неосновных гармоник магнитного поля, улучшить его гармонический состав, приблизить форму поля к синусоидальной, уменьшить коэффициенты дифференциального рассеяния, гармонических искажений магнитодвижущей силы и индукции магнитного поля, что позволяет снизить дополнительные потери в двигателе, шум и вибрации. Возросший на 3,5 % обмоточный коэффициент совмещенной дробной зубцовой обмотки повышает эффективность электродвигателей с такой обмоткой.

**Ключевые слова:** трехфазные дробные зубцовые обмотки, совмещение схем звезды и треугольника, гармоники магнитного поля, моделирование, исследование

**Yurii Borisovich Kazakov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

**Daniil Sergeevich Smirnov**

Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

**Miroslav Alexandrovich Kiselev**

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: Miroslav.kiselev97@yandex.ru

## Improving harmonic composition of the magnetic field in three-phase electric motors with fractional tooth windings by combining star and delta circuits

### Abstract

**Background.** Multi-pole electric motors use fractional tooth armature winding with discrete distribution over the slots. It leads to appearance of minor low and high spatial harmonics of the magnetic field with significant amplitudes, which cause high differential scattering, pulsation of the electromagnetic torque, dips in the mechanical characteristic, increase of additional losses, levels of electromagnetic noise and vibrations. Thus, it is important to improve the harmonic composition of the magnetic field of such windings, and reduce the amplitudes of minor harmonics.

**Materials and methods.** During the study a three-phase 6-zone fractional tooth winding is replaced by a three-phase combined 12-zone winding. It consists of two three-phase fractional tooth windings, one has star connection, the other one has triangle connection. The efficiency of the windings is estimated based on changes in the harmonic amplitudes, differential scattering coefficients and non-sinusoidality of field distribution. Modeling of the magnetic field using the finite element method has been carried out.

**Results.** The structure of a three-phase symmetrical combined fractional tooth winding has been developed. The examples of windings have been given. The parameters of magnetomotive force diagrams have been calculated, and magnetomotive forces and inductions have been distributed. The authors have determined harmonic amplitudes, differential scattering coefficients and non-sinusoidality of field distributions. When combining the star and delta circuits in three-phase fractional tooth windings, the amplitude of the fundamental harmonic of the magnetomotive force of the combined winding increases by 3,38 %, the induction of the armature magnetic field by 4,69 %, the induction of the resulting magnetic field under load by 1,3 %, compared to the uncombined winding. The differential scattering coefficient of the combined winding decreases by 25,8 % in contrast to the coefficient of the uncombined winding. The harmonic distortion coefficients are lower. The magnetomotive force of the armature is by 8,0 % lower, the induction of the armature magnetic field is by 8,49 %, the induction of the resulting magnetic field under load is by 3,29 %. The winding coefficient of the combined fractional tooth winding is 3,5 % higher compared to the uncombined winding.

**Conclusions.** Combination of the star and delta circuits in a fractional tooth winding, fulfillment of the conditions for its implementation and the proposed winding structure allows us to reduce the amplitudes of minor harmonics of the magnetic field, improve its harmonic composition, bring the field shape closer to sinusoidal, reduce the coefficients of differential scattering, harmonic distortions of the magnetomotive force and magnetic field induction in three-phase multi-pole electric motors. It allows us to reduce additional losses in the motor, noise and vibration. The winding coefficient of the combined fractional tooth winding increased by 3,5 % improves the efficiency of electric motors with such a winding.

**Key words:** three-phase fractional tooth windings, combination of star and delta circuits, magnetic field harmonics, modeling, research

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.051-058

**Состояние вопроса.** В многополюсных электродвигателях (ЭД) с числом полюсов  $2p$  при ограниченном числе пазов сердечника якоря  $Z$  могут применяться дробные зубцовые обмотки (ДЗО) якоря с числом пазов на полюс и фазу

$q < 1$ , т. е. с дискретным и достаточно редким распределением фазных обмоток по пазам сердечника. ДЗО состоят из катушек, размещенных по одной на каждом зубце сердечника якоря. Шаг ДЗО у принимают близким полюсному делению  $\tau$ .

При  $y = 1$  зубцовое деление  $Z$  выполняют минимально отличающимся от  $2p$ , но не равным  $2p$ , при этом  $Z$  кратно числу фаз ЭД.

ДЗО технологичны в изготовлении, имеют минимальный вылет лобовых частей, что позволяет снизить осевой размер ЭД, расход меди, активное сопротивление и электрические потери в лобовых частях, индуктивность лобового рассеяния. ДЗО обладают повышенной надежностью, так как у них отсутствуют пересечения лобовых частей катушек разных фаз. Применение ДЗО перспективно при изготовлении ЭД повышенной удельной мощности и момента, в том числе обращенных для привода устройств с внешней вращающейся частью: пропеллеров беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (рис. 1), вентиляторов, мотор-колес электротранспорта и средств индивидуальной мобильности, электролебедок, обрабатывающих устройств с абразивной наружной поверхностью и др.



Рис. 1. Обращенный магнитоэлектрический ЭД с дробной зубцовой обмоткой для БПЛА

Различающееся по полюсам размещение ДЗО в пазах сердечника якоря приводит к отличающимся распределениям магнитодвижущих сил (МДС) под разными полюсами, поэтому анализ распределения МДС ЭД с ДЗО необходимо проводить на всем полюсном пространстве зазора в  $2p$ . Основной пространственной гармоникой в этом случае является гармоника, определяемая  $p$ .

Дискретное распределение ДЗО приводит к отличию распределения МДС ДЗО от синусоидальной формы, присутствию неосновных низших и высших, по отношению к основной, пространственных гармоник [1, 2, 3] со значительными амплитудами МДС, которые вызывают повышенное дифференциальное рассеяние, пульсации электромагнитного момента [4], провалы в механической характеристике при пуске ЭД, увеличивают добавочные потери, уровни электромагнитного шума и вибраций.

Так, для трехфазной ДЗО с  $q = 2/5$  и  $2p = 10$  на окружности зазора в  $10\tau$  основной является пространственная гармоника  $v = 5$ . Значимы амплитуды неосновных гармоник, например амплитуда МДС низшей гармоники  $v = 1$  достигает 36 %, амплитуда МДС высшей гармоники  $v = 7$  достигает 71 % амплитуды МДС основной гармо-

ники [4]. При этом МДС гармоник  $v = 1$ ,  $v = 7$  и некоторых других создают обратно вращающиеся магнитные поля по отношению к прямо вращающемуся магнитному полю основной гармоники, что снижает результирующий электромагнитный момент, вызывает дополнительные потери. Для трехфазной ДЗО с  $q = 2/7$  и  $2p = 14$  основной является пространственная гармоника  $v = 7$ . При этом МДС гармоник  $v = 1$ ,  $v = 13$  и некоторых других создают прямо вращающиеся с основной гармоникой магнитные поля, а МДС гармоник  $v = 5$ ,  $v = 11$  и некоторых других создают обратно вращающиеся магнитные поля.

Для повышения эффективности применения ДЗО целесообразно снижение неосновных низших и высших пространственных гармоник магнитного поля. Для этого используются разные способы [5, 6, 7, 8, 9]: изменение ширины магнитов, изменение ширины катушек, неравнобитковые катушки, зубцы с разными зубцовыми делениями, магнитопроводящие пазовые клинья, магнитные барьеры для локального изменения в сердечнике магнитного сопротивления, увеличение до 4 числа слоев ДЗО, повышение до 12 числа фазных зон. Отмечено, что наилучший эффект достигается при использовании нескольких отдельных ДЗО с пространственным сдвигом осей этих обмоток и фазовым сдвигом токов в них, достигаемым при питании этих ДЗО от разных по количеству ДЗО источников с фазовым сдвигом напряжений. Это позволяет снизить амплитуды МДС некоторых неосновных гармоник до 90 %, потери в магнитах – до 39 %, добавочные потери, индуктивность дифференциального рассеяния – до 40 %, пульсации момента, вибрации и электромагнитный шум. Но необходимость нескольких источников питания снижает привлекательность способа.

Актуально улучшение гармонического состава магнитного поля в трехфазных ЭД с ДЗО, например, путем совершенствования структуры ДЗО. Оценка мер по снижению пространственных гармоник магнитного поля должна проводиться на основе уточненных методик расчета [10].

**Материалы и методы.** Для улучшения гармонического состава магнитного поля в трехфазных ЭД с ДЗО предлагается трехфазную 6-зонную ДЗО заменить трехфазной совмещенной 12-зонной ДЗО, состоящей из двух трехфазных ДЗО, соединенных одна по схеме «звезда»  $Y$ , другая по схеме «треугольник»  $D$ , с равными амплитудами МДС. Фазные зоны трехфазной 6-зонной ДЗО  $A$ ,  $z$ ,  $B$ ,  $x$ ,  $C$ ,  $y$  разбиваются в 12-зонной ДЗО на фазные зоны  $A_Y$  и  $A_D$ ,  $Z_Y$  и  $Z_D$ ,  $B_Y$  и  $B_D$ ,  $X_Y$  и  $X_D$ ,  $C_Y$  и  $C_D$ ,  $Y_Y$  и  $Y_D$ . Намотка двух ДЗО  $Y$  и  $D$  выполняется со сдвигом магнитных осей фаз в пространстве на угол  $\pi/6$ . Сами ДЗО  $Y$  и  $D$  соединяются параллельно или последовательно при выполнении условия совместной работы. Последовательное соединение ДЗО  $Y$  и  $D$  (рис. 2) имеет определенные преимущества по сравнению с параллельным соединением [11].

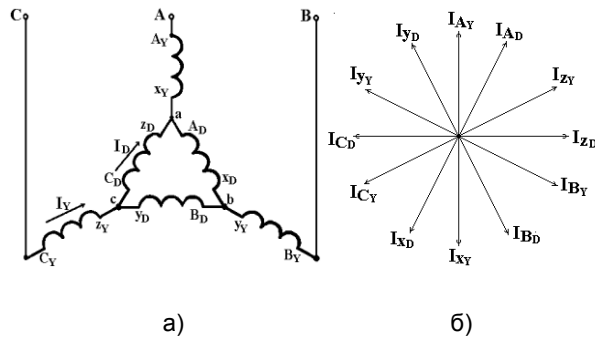


Рис. 2. Трехфазная совмещенная ДЗО с последовательным соединением  $Y$  и  $D$  (а), токи в фазах (б)

Для питания совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  используется только один источник напряжения, совмещенная ДЗО включается на общее трехфазное напряжение сети ( $A, B, C$ ). Фазные токи обмоток  $Y$  и  $D$  становятся сдвинутыми на  $1/12$  временного периода с соотношением токов  $I_Y/I_D = \sqrt{3}$ , сечения обмоточных проводов определяются значениями токов. Количества витков  $W_Y$  и  $W_D$  в фазах обмоток определяются фазными напряжениями, и если ДЗО  $Y$  и  $D$  содержат по равному количеству  $Z/2$  катушек, то желательно стремиться к  $W_D/W_Y = \sqrt{3}$  и к отношениям активных  $R_D/R_Y$  и индуктивных  $X_D/X_Y$  сопротивлений, равным 3. По электромагнитным свойствам трехфазная совмещенная ДЗО  $Y$  и  $D$  аналогична шестифазной 12-зонной ДЗО. Совмещенная трехфазная ДЗО  $Y$  и  $D$  впервые предложена в [12], свойства ее не анализировались.

Улучшение гармонического состава магнитного поля оценивалось по изменениям коэффициента дифференциального рассеяния на основе анализа диаграмм Гергеса, амплитуд пространственных гармоник магнитного поля, коэффициентов несинусоидальности МДС и коэффициентов несинусоидальности индукции в зазоре с использованием моделирования магнитного поля ЭД методом конечных элементов с учетом нелинейности магнитных характеристик и насыщения магнитопровода, магнитного потока индуктора, реакции якоря, реальной формы зубцово-пазовой зоны сердечников, дискретности распределения ДЗО по пазам. Использовались расчетные системы Ansys Maxwell и Elcut.

**Результаты.** Улучшение гармонического состава магнитного поля в трехфазных ЭД с ДЗО достигнуто совмещением схем  $Y$  и  $D$ . Предложена структура такой совмещенной ДЗО. Выполнение симметричной совмещенной трехфазной ДЗО  $Y$  и  $D$  возможно только при определенных соотношениях  $p$  и  $Z$  [12]. Так, для  $q = 2/5$  и  $Z/2p = 6/5$  ДЗО  $Y$  и  $D$  возможна при  $p$ , кратном 5; для  $q = 2/7$  и  $Z/2p = 6/7$  – при  $p$ , кратном 7, например: при  $Z = 12$  и  $p = 5$ , или при  $Z = 24$  и  $p = 10$ , или при  $Z = 12$  и  $p = 7$ , или при  $Z = 24$  и  $p = 14$ . На рис. 3 представлена симметричная совмещенная ДЗО трехфазного ЭД для  $2p = 10$ ,  $Z = 12$ ,  $q = 2/5$  с последовательным соединением  $Y$  и  $D$ .

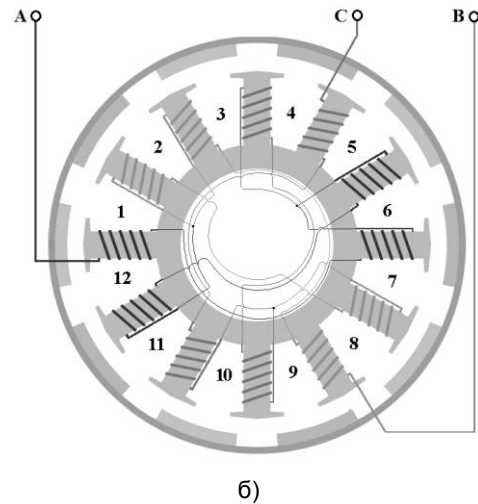
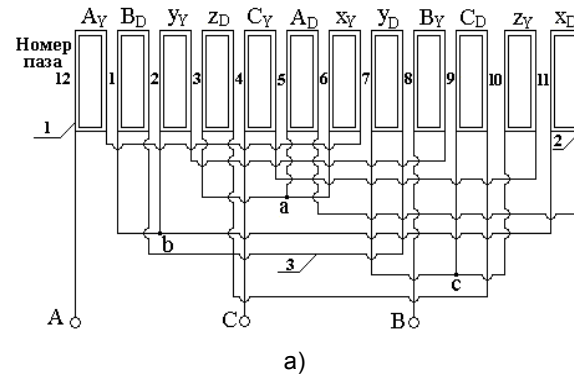


Рис. 3. Трехфазная совмещенная ДЗО с последовательным соединением схем  $Y$  и  $D$  (а) в обращенном магнитоэлектрическом ЭД (б) для  $2p = 10$ ,  $Z = 12$ ,  $q = 2/5$ : 1 – зубцовые катушки  $Y$ ; 2 – катушки  $D$ ; 3 – межкатушечные соединения

Интегральный вклад пространственных гармоник МДС оценивался по коэффициенту дифференциального рассеяния  $\sigma_d$ , определяющего индуктивность дифференциального рассеяния, на основе анализа построенных многоугольников МДС – диаграмм Гергеса. Сформированные диаграммы двух разных ДЗО с  $2p = 10$  и  $Z = 12$  представлены на рис. 4.

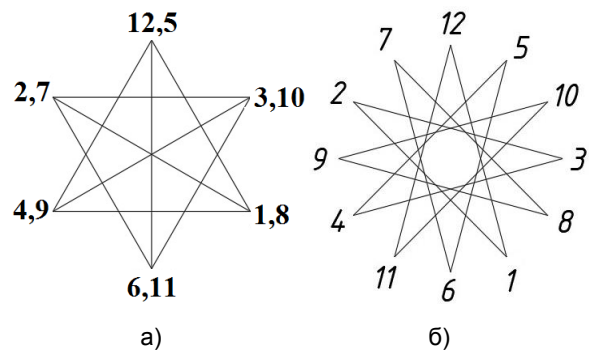


Рис. 4. Диаграммы МДС Гергеса трехфазных ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$ : а – 6-зонная несовмещенная; б – 12-зонная совмещенная  $Y$  и  $D$ ; 1, 2, ..., 12 – номера векторов МДС пазов

Диаграммы Гегеса обеих ДЗО имеют центральную симметрию, что свидетельствует об отсутствии четных пространственных гармоник. Многоугольники МДС замыкаются более чем за один обход, при  $p = 5$  – за 5 обходов, что свидетельствует об присутствии низших пространственных гармоник.

Рассчитаны параметры диаграмм:

– радиус окружности диаграммы для основной гармоники (о.е.)

$$r = Zk_{об} / 2\pi p, \quad (1)$$

где  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент:

$$k_{об} = \frac{\sin\left(\frac{p\pi}{Z}\right) \sin\left(\frac{b\alpha}{2}\right)}{b \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}; \quad (2)$$

$\alpha$  – пазовый угол:

$$\alpha = \frac{2\pi p}{Z}; \quad (3)$$

$b$  – число катушек в катушечной группе;

– полярный момент инерции междупазовых точек диаграммы (о.е.)

$$r_d^2 = \sum_{i=1}^Z R_i^2 / Z; \quad (4)$$

– коэффициент дифференциального рассеяния ДЗО

$$\sigma_d = r_d^2 / r^2 - 1. \quad (5)$$

Параметры диаграмм МДС трехфазных ДЗО с  $2p = 10$  и  $Z = 12$  представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры диаграмм МДС трехфазных ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$

| Параметр   | Трехфазная ДЗО         |                             | Изменение, % |
|------------|------------------------|-----------------------------|--------------|
|            | 6-зонная несовмещенная | 12-зонная совмещенная Y и D |              |
| $b$        | 2                      | 1                           | –50          |
| $\alpha$   | $5\pi/6$               | $5\pi/6$                    | 0            |
| $k_{об}$   | 0,933                  | 0,966                       | 3,5          |
| $r$        | 0,356                  | 0,369                       | –3,65        |
| $r_d^2$    | 1,0                    | 0,933                       | –3,4         |
| $\sigma_d$ | 7,89                   | 5,85                        | –25,8        |

Обмоточный коэффициент совмещенной ДЗО Y и D на 3,5 % больше, чем для несовмещенной ДЗО, что обеспечивает повышение эффективности ЭД с совмещенной ДЗО. Коэффициенты дифференциального рассеяния ДЗО с  $q < 1$  значительно больше, чем в распределенных обмотках с  $q > 1$  (см., например, [11]), что свидетельствует о значительном вкладе неосновных гармоник в МДС ДЗО. Для совмещенной ДЗО Y и D, по сравнению с 6-зонной несовмещенной ДЗО, коэффициент дифференциального рассеяния существенно снижен

(на 25,8 %), что значительно больше, чем может быть достигнуто при совмещении схем Y и D в распределенных обмотках с  $q > 1$ .

Распределения МДС пазов ( $f_p$ ) трехфазных ДЗО с  $2p = 10$  по  $Z = 12$  пазам на пространстве  $10\tau$  представлено на рис. 5 для моментов времени, когда токи в фазах составляют (о.е., рис. 2,б):

– для 6-зонной ДЗО Y:  $I_A = 1,0$ ,  $I_x = -1,0$ ,  $I_B = -0,5$ ,  $I_y = 0,5$ ,  $I_z = 0,5$ ,  $I_C = -0,5$ ;

– для совмещенной 12-зонной ДЗО Y и D:  $I_{AY} = 1,0$ ,  $I_{AD} = 0,866$ ,  $I_{xD} = -0,866$ ,  $I_{xy} = -1,0$ ,  $I_{By} = -0,5$ ,  $I_{BD} = -0,866$ ,  $I_{yY} = 0,5$ ,  $I_{yD} = 0,866$ ,  $I_{CY} = -0,5$ ,  $I_{CD} = 0,0$ ,  $I_{zY} = 0,5$ ,  $I_{zD} = 0,0$ .

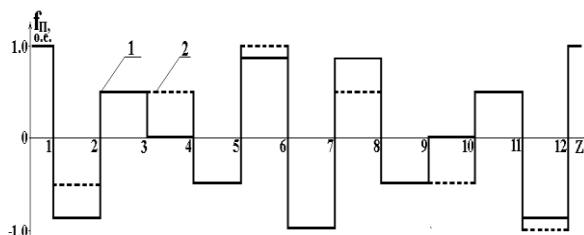


Рис. 5. Распределения намагничивающих сил по пазам трехфазных ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$ : 1 – совмещенная 12-зонная Y и D; 2 – 6-зонная несовмещенная

Распределения МДС обмоток различаются на разных полюсных делениях и существенно отличаются от синусоидальной формы. Распределение МДС совмещенной ДЗО Y и D более ступенчатое, чем для 6-зонной несовмещенной ДЗО, более четко выражены все 10 полюсов.

Диаграммы Гегеса не учитывают влияния МДС гармоник по отдельности. Выполнен гармонический анализ распределений МДС с ее разложением в ряд Фурье. Рассчитаны амплитуды МДС ( $F_{Mv}$ ) значимых пространственных гармоник (табл. 2). Определены коэффициенты гармонических искажений МДС:

$$K_{искМДС} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1, v \neq 5}^{36} F_{Mv}^2}}{F_{M5}}. \quad (6)$$

Результаты разложения распределения МДС (например,  $F_{M1}$  и  $F_{M7}$ ) для 6-зонной несовмещенной ДЗО совпадают с данными [4], что свидетельствует о корректности результатов. Выявлено, что амплитуды МДС  $F_{M5}$  основной  $v = 5$  гармоники обеих ДЗО максимальны,  $F_{M5}$  для 12-зонной совмещенной ДЗО Y и D, по сравнению с 6-зонной ДЗО, возросла на 3,38 %, существенно ослаблена  $F_{M1}$ , создающая обратно вращающееся магнитное поле, в обеих ДЗО  $F_{Mv}$  незначительны при  $v$ , кратном трем, в совмещенной трехфазной ДЗО Y и D, как аналоге шестифазной ДЗО,  $F_{Mv}$  незначительны при  $v$ , близких к числам, кратным 6, т.е. при  $v = 11, 13, 23, 25, 35, 37$ . Для совмещенной ДЗО Y и D наблюдается одинаковое парное симметричное изменение  $F_{Mv}$  для гармоник, соседних с гармоникой, кратной 6, например для  $v = 5$  и  $v = 7$ , или



для  $v = 11$  и  $v = 13$ , или для  $v = 17$  и  $v = 19$ . Коэффициенты гармонических искажений МДС ДЗО с  $q < 1$  значительно больше ( $K_{искМДС} = 0,85–0,92$ ), чем в распределенных обмотках с  $q > 1$ , что свидетельствует о существенном отличии распределения МДС ДЗО от синусоидальной формы. Но для совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  коэффициент гармонических искажений МДС меньше на 8,0 %, что свидетельствует о лучшей форме распределения МДС и приближении ее формы к синусоидальной.

Таблица 2. Амплитуды гармоник МДС трехфазных ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$

| $v$          | Амплитуды гармоник МДС трехфазных ДЗО ( $F_{mv}$ , о.е.) |                                 | Изменение, % |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------|
|              | 6-зонная несовмещенная                                   | 12-зонная совмещенная $Y$ и $D$ |              |
| 1            | 0,358897                                                 | 0,001853                        | –99,48       |
| 5            | 1,0                                                      | 1,033796                        | 3,38         |
| 7            | 0,714085                                                 | 0,7383082                       | 3,39         |
| 11           | 0,0326778                                                | 0,0002444                       | –99,25       |
| 13           | 0,0027566                                                | 0,0001109                       | –99,56       |
| 17           | 0,2941999                                                | 0,3041051                       | 3,37         |
| 19           | 0,2630112                                                | 0,2719659                       | 3,40         |
| 23           | 0,0156532                                                | 0,0001584                       | –98,99       |
| 25           | 0,0143113                                                | 0,0000702                       | –99,51       |
| 29           | 0,172509                                                 | 0,1782955                       | 3,35         |
| 31           | 0,1611555                                                | 0,1666614                       | 3,42         |
| 35           | 0,01030121                                               | 0,0001335                       | –98,71       |
| $K_{искМДС}$ | 0,9233                                                   | 0,8494                          | –8,0         |

Эффективность применения совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  уточнена анализом распределений магнитных потоков в ЭД на основе численного моделирования магнитного поля с учетом нелинейности магнитной характеристики стали, МДС индуктора и якоря, зубчатости сердечника якоря, дискретности распределения МДС ДЗО по пазам сердечника. Распределение линий магнитного потока в обращенном магнитоэлектрическом ЭД представлено на рис. 6.

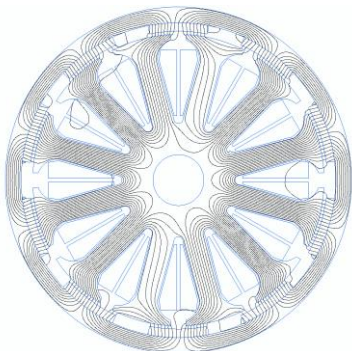


Рис. 6. Линии магнитного потока в ЭД с совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$

Распределение магнитной индукции от действия поля якоря в зазоре ЭД на пространстве в  $10\tau$  для амплитуд МДС зубцовых катушек  $F_{мзк} = 619,92$  А с учетом их фазовых углов

(рис. 2,б) представлено на рис. 7. Распределение индукции коррелирует с распределением МДС якоря совмещенной ДЗО (рис. 5).

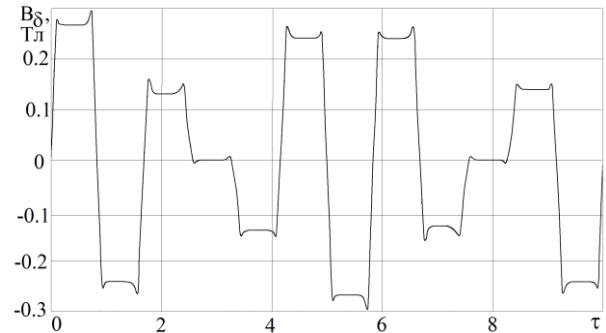


Рис. 7. Распределение магнитной индукции поля якоря в зазоре ЭД с совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$  для  $F_{мзк} = 619,92$  А

Гармонический состав распределений индукции в зазоре ЭД с разными ДЗО представлен в табл. 3.

Таблица 3. Амплитуды гармоник индукции в зазоре трехфазного ЭД с ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$  для  $F_{мзк} = 619,92$  А

| Амплитуды гармоник индукции в зазоре ( $B_{\delta mv}$ , Тл) трехфазного ЭД с ДЗО |          |             |     |          |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|-----|----------|-------------|
| $v$                                                                               | 6-зонная | совмещенная | $v$ | 6-зонная | совмещенная |
| 1                                                                                 | 0,063842 | 0,003409    | 19  | 0,048743 | 0,050800    |
| 3                                                                                 | 0,003182 | 0,001822    | 21  | 0,000600 | 0,001006    |
| 5                                                                                 | 0,188750 | 0,197600    | 23  | 0,005689 | 0,000562    |
| 7                                                                                 | 0,137780 | 0,142980    | 25  | 0,001233 | 0,001773    |
| 9                                                                                 | 0,002228 | 0,002240    | 27  | 0,001721 | 0,002090    |
| 11                                                                                | 0,008532 | 0,000603    | 29  | 0,020752 | 0,021050    |
| 13                                                                                | 0,002122 | 0,000779    | 31  | 0,022915 | 0,023968    |
| 15                                                                                | 0,003688 | 0,003398    | 33  | 0,000423 | 0,000800    |
| 17                                                                                | 0,048712 | 0,049556    | 35  | 0,003306 | 0,000521    |

Амплитуды индукции основной  $v = 5$  гармоники  $B_{\delta m5}$  для обеих ДЗО максимальны, но  $B_{\delta m5}$  для совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$ , по сравнению с 6-зонной ДЗО, больше на 4,69 %;  $B_{\delta m1}$ , создающая обратно вращающееся магнитное поле, существенно ослаблена в обеих ДЗО;  $B_{\delta mv}$  незначительны при  $v$ , кратном трем, в совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$ ;  $B_{\delta mv}$  незначительны при  $v$ , близких к числам, кратным 6, т.е. при  $v = 11, 13, 23, 25, 35, 37$ .

Распределение индукции результирующего магнитного поля в зазоре ЭД при нагрузке – совместном действии МДС высокоэнергетических магнитов с  $F_{пм} = 1990$  А и совмещенной ДЗО  $Y$  и  $D$  с  $F_{мзк} = 619,92$  А на пространстве в  $10\tau$  – представлено на рис. 8.

Воздействие магнитного поля ДЗО якоря при нагрузке ЭД и влияние зубчатости сердечника якоря изменяют распределение магнитного поля магнитов. Несимметричная реакция якоря

несимметрично искажает результирующее магнитное поле, но все 10 полюсов явно выражены. Распределения индукции различаются на разных полюсных делениях и существенно отличаются от синусоидальной формы. Гармонический состав распределений индукции результирующего магнитного поля в зазоре ЭД при нагрузке представлен в табл. 4.

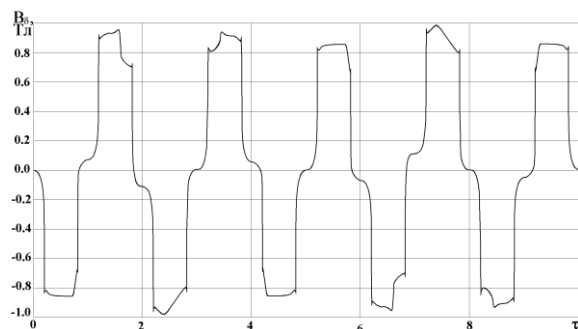


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в зазоре ЭД с совмещенной ДЗО Y и D с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$  при  $F_{пм} = 1990$  А,  $F_{мзк} = 619,92$  А

Таблица 4. Амплитуды гармоник индукции в зазоре трехфазного ЭД с ДЗО с  $2p = 10$ ,  $Z = 12$  для  $F_{мзк} = 619,92$  А и  $F_{пм} = 1990$  А

| Амплитуды гармоник индукции в зазоре ( $B_{\delta m \nu}$ , Тл) трехфазного ЭД с ДЗО |          |             |       |          |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|-------|----------|-------------|
| $\nu$                                                                                | 6-зонная | совмещенная | $\nu$ | 6-зонная | совмещенная |
| 1                                                                                    | 0,027755 | 0,010410    | 19    | 0,043440 | 0,044243    |
| 3                                                                                    | 0,051872 | 0,049128    | 21    | 0,010119 | 0,011137    |
| 5                                                                                    | 0,884580 | 0,895990    | 23    | 0,004953 | 0,001236    |
| 7                                                                                    | 0,071806 | 0,065329    | 25    | 0,180010 | 0,179950    |
| 9                                                                                    | 0,024876 | 0,024262    | 27    | 0,001335 | 0,000757    |
| 11                                                                                   | 0,007838 | 0,003536    | 29    | 0,035068 | 0,033903    |
| 13                                                                                   | 0,004821 | 0,007184    | 31    | 0,033102 | 0,034137    |
| 15                                                                                   | 0,057259 | 0,059073    | 33    | 0,006390 | 0,007094    |
| 17                                                                                   | 0,039311 | 0,034316    | 35    | 0,082261 | 0,080155    |

Амплитуды индукции основной  $\nu = 5$  гармоники  $B_{\delta m 5}$  для обеих ДЗО максимальны, но  $B_{\delta m 5}$  для совмещенной ДЗО Y и D, по сравнению с 6-зонной ДЗО, больше на 1,3 %,  $B_{\delta m 1}$ , создающая обратно вращающееся магнитное поле, ослаблена.

Рассчитаны коэффициенты гармонических искажений индукции:

$$K_{искB\delta} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=1, \nu \neq 5}^{36} B_{\delta m \nu}^2}}{B_{\delta m 5}}, \quad (7)$$

которые для разных ДЗО и разных магнитных полей представлены в табл. 5.

Коэффициенты гармонических искажений индукций ДЗО с  $q < 1$  значительно больше, чем в распределенных обмотках с  $q > 1$ , что говорит о существенном отличии распределения индукций в зазоре ЭД с ДЗО от синусоидальной

формы. Применение совмещения схем Y и D в ДЗО позволяет снизить  $K_{искB\delta}$  на 8,49 %, что свидетельствует о большем приближении формы индукции к синусоидальной. Воздействие сильного магнитного поля высокоэнергетических магнитов снижает гармоническое искажение индукции и эффект от применения совмещения схем Y и D в ДЗО.

Таблица 5. Коэффициенты искажения индукции в зазоре трехфазного ЭД с ДЗО при  $2p = 10$ ,  $Z = 12$

| Магнитное поле          | $K_{искB\delta}$ |                   | Изменение, % |
|-------------------------|------------------|-------------------|--------------|
|                         | 6-зонная         | совмещенная Y и D |              |
| Якоря (рис. 7)          | 0,900941         | 0,824441          | –8,49        |
| Результирующее (рис. 8) | 0,271544         | 0,262613          | –3,29        |

**Выводы.** Предложенное совмещение схем «звезда» и «треугольник» в дробной зубцовой обмотке, выполнение условий ее реализации и структура обмотки позволяют в трехфазных многополюсных электродвигателях улучшить гармонический состав магнитного поля, что снижает дополнительные потери в двигателе, шум и вибрации.

Установлено, что амплитуда магнитодвижущей силы основной гармоники совмещенной обмотки больше на 3,38 %, амплитуда индукции основной гармоники магнитного поля якоря больше на 4,69 %, амплитуда индукции основной гармоники результирующего магнитного поля при нагрузке ЭД больше на 1,3 %, чем для несовмещенной обмотки. Для совмещенной обмотки существенно ослаблены амплитуды гармоник, создающих обратно вращающиеся магнитные поля.

Результаты сравнительного анализа полученных значений коэффициентов: дифференциального рассеяния, гармонических искажений магнитодвижущей силы якоря, гармонических искажений индукции магнитного поля якоря, гармонических искажений индукции результирующего магнитного поля при нагрузке ЭД для совмещенной обмотки меньше, чем для несовмещенной, что свидетельствует о снижении влияния неосновных пространственных гармоник магнитного поля в совмещенной обмотке и о приближении формы поля к синусоидальной.

Установлено, что обмоточный коэффициент совмещенной дробной зубцовой обмотки на 3,5 % больше, чем для несовмещенной обмотки, что повышает эффективность трехфазных электродвигателей с совмещенной дробной зубцовой обмоткой.

#### Список литературы

1. Шевченко А.Ф., Честюнина Т.В. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 3–7.

2. **Пантелеев С.В.** Анализ особенностей магнитного поля синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой в полигармоническом режиме работы // *Вест. нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 343–355.

3. **Гейнрих Г.О., Шевченко А.Ф., Бабицкий Д.Ю.** Магнитодвижущие силы беспазовых электрических машин с дробными обмотками с числом катушек на полюс и фазу  $q < 1$  // *Электротехника.* – 2024. – № 2. – С. 27–34.

4. **Бабицкий Д.Ю., Топорков Д.М., Гейнрих Г.О.** Пульсации момента в машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами // *Электротехника.* – 2024. – № 3. – С. 20–27.

5. **Способы** улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками / Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков, А.Г. Приступ, З.С. Темлякова // *Электротехника.* – 2021. – № 6. – С. 31–36.

6. **Бабицкий Д.Ю., Шевченко А.Ф.** Об улучшении гармонического состава магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток // *Электротехника.* – 2023. – № 5. – С. 29–33.

7. **Unequal** teeth design to reduce electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings permanent-magnet machine / S. Zhu, J. Ji, W. Zhao, et al. // *Journal of Magnetism.* – 2019. – Vol. 24, No. 4. – P. 657–667.

8. **Torque** pulsation reduction in fractional-slot concentrated-windings IPM motors by lowering sub-harmonics / G. Liu, F. Zhai, Q. Chen, G. Xu // *IEEE Transactions on Energy Conversion.* – 2019. – Vol. 34, No. 4. – P. 2084–2095.

9. **Попов И.Л., Топорков Д.М., Бабицкий Д.Ю.** Применение магнитопроводящего клина в конструкции статора синхронных явнополюсных машин с дробной зубцовой обмоткой // *Электротехника.* – 2024. – № 5. – С. 40–45.

10. **Захаренко А.Б., Белокурова Н.А., Осикова К.С.** Минимизация коэффициента несинусоидальности индукции для магнитоэлектрических машин с индуктором, намагниченным по схеме Хальбаха // *Вопросы электромеханики.* – 2023. – Т. 197, № 6. – С. 3–9.

11. **The Use** of Combined Star-Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis / Y.B. Kazakov, D.S. Smirnov, M.A. Kiselev, et al. // *Russian Electrical Engineering.* – 2024. – Vol. 95, No. 3. – P. 165–174.

12. **Пат. № 231606 U1** Российская Федерация на полезную модель. Трехфазная электрическая машина: № 2024130268: заявл. 07.10.2024: опубл. 03.02.2025 / Ю.Б. Казаков. – Бюл. № 4.

## References

1. Shevchenko, A.F., Chestyunina, T.V. Analiz magnetodvizhushchikh sil drobnnykh zubtsovyykh obmotok elektricheskikh mashin [Analysis of magnetomotive forces of small toothed windings of electric machines]. *Elektrotehnika*, 2009, no. 12, pp. 3–7.

2. Panteleev, S.V. Analiz osobennostey magnitnogo polya sinkhronnoy elektricheskoy mashiny s mnogofaznoy

drobnnoy zubtsovoy obmotkoy v poligarmonicheskom rezhime raboty [Analysis of the features of the magnetic field of a synchronous electric machine with a multiphase fine-toothed winding in the polyharmonic mode of operation]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya: fiz.-tekhn. nauk*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 343–355.

3. Geynrikh, G.O., Shevchenko, A.F., Babitskiy, D.Yu. Magnitodvizhushchie sily bespazovykh elektricheskikh mashin s drobnymi obmotkami s chislom katushek na polyus i fazu  $q < 1$  [Magnetomotive forces of slotless electric machines with small windings with the number of coils per pole and phase  $q < 1$ ]. *Elektrotehnika*, 2024, no. 2, pp. 27–34.

4. Babitskiy, D.Yu., Toporkov, D.M., Geynrikh, G.O. Pul'satsii momenta v mashinakh s drobnymi zubtsovymi obmotkami i postoyannymi magnitami [Pulsations of torque in machines with small toothed windings and permanent magnets]. *Elektrotehnika*, 2024, no. 3, pp. 20–27.

5. Babitskiy, D.Yu., Toporkov, D.M., Pristup, A.G., Temlyakova, Z.S. Sposoby uluchsheniya garmonicheskogo sostava magnitnogo polya v elektricheskikh mashinakh s drobnymi zubtsovymi obmotkami [The method of improving the harmonic composition of the magnetic field in electric machines with small toothed windings]. *Elektrotehnika*, 2021, no. 6, pp. 31–36.

6. Babitskiy, D.Yu., Shevchenko, A.F. Ob uluchshenii garmonicheskogo sostava magnetodvizhushchey sily drobnnykh zubtsovyykh obmotok [On the improvement of the harmonic composition of the magnetomotive force of small toothed windings]. *Elektrotehnika*, 2023, no. 5, pp. 29–33.

7. Zhu, S., Ji, J., Zhao, W., Zheng, J., Mao, Y., Liu, G. Unequal teeth design to reduce electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings permanent-magnet machine. *Journal of Magnetism*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 657–667.

8. Liu, G., Zhai, F., Chen, Q., Xu, G. Torque pulsation reduction in fractional-slot concentrated-windings IPM motors by lowering sub-harmonics. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, vol. 34, no. 4, pp. 2084–2095.

9. Popov, I.L., Toporkov, D.M., Babitskiy, D.Yu. Primenenie magnetoprovodyashchego klina v konstruktsii statora sinkhronnykh yavnopolyusnykh mashin s drobnnoy-zubtsovoy obmotkoy [Application of a magnetically conducting wedge in the construction of the stator of synchronous open-pole machines with small-toothed winding]. *Elektrotehnika*, 2024, no. 5, pp. 40–45.

10. Zakharenko, A.B., Belokurova, N.A., Osikova, K.S. Minimizatsiya koeffitsienta nesinusoidal'nosti induktsii dlya magnitoelektricheskikh mashin s induktorom, namagnichenym po skheme Khal'bakha [Minimization of the non-sinusoidal induction coefficient for magnetoelectric machines with an inductor magnetized according to the Halbach scheme]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2023, vol. 197, no. 6, pp. 3–9.

11. Kazakov, Yu.B., Smirnov, D.S., Kiselev, M.A., Novikov, I.V., Zakharov, A.V. The Use of Combined Star-Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis. *Russian Electrical Engineering*, 2024, vol. 95, no. 3, pp. 165–174.

12. Kazakov, Yu.B. *Trekhfaznaya elektricheskaya mashina* [Three phase electric machine]. Patent RF, no. 231606, 2025.