

УДК 621.313.333

А. А. СТАВИНСКИЙ, О. О. ПЛАХТЫРЬ, Л. В. ВАХОНИНА, О. О. ПАЛЬЧИКОВ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ СМЕЩЕНИЕМ ЗУБЦОВЫХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ч.1. ДОБАВОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И ПОТЕРИ

Обгрунтовано спосіб зниження додаткових втрат короткозамкнених асинхронних двигунів використанням роторів з тангенціальним зсувом ділянок стрижнів розділених проміжними кільцями і відповідно зі зсувом гармонічних складових магнітного поля, викликаних зубчастістю активних поверхонь і дискретністю розподілу обмоток. Наведено вираз коефіцієнта ослаблення гармонік поля при тангенціальному зсуві ділянок стрижнів і зубців магнітопроводу.

Ключові слова: асинхронний двигун, зубцеві гармоніки, додаткові втрати, зсув, компенсація, зовнішній ротор.

Обоснован способ снижения добавочных потерь короткозамкнутых асинхронных двигателей использованием роторов с тангенциальным смещением участков стержней разделенных промежуточными кольцами и соответственно со смещением гармонических составляющих магнитного поля, вызванных зубчатостью активных поверхностей и дискретностью распределения обмоток. Приведено выражение коэффициента ослабления гармоник поля при тангенциальном смещении участков стержней и зубцов магнитопровода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, зубцовые гармоника, добавочные потери, сдвиг, компенсация, внешний ротор.

Purpose. Presentation of way to improve additional active power losses of induction motor with partitioned magnetic core and rotor winding with intermediate squirrel-cage rings by tangential shift of higher harmonics of magnetic field, which were caused by tooth components of air gap conductance and discrete distribution of winding. **Methodology.** The proof of compensation effect of higher components of electromotive forces is based on the analytic method of specific conductivity of air gap. **Results.** The possibility of mutual compensation of electromotive forces from tooth higher harmonics by shift of parts of teeth and bars by proportions of teeth segmentations has been shown. Formula of tangential displacement of rotor winding has been derived. **Originality.** At present, the tendency of reducing active power losses of electrical machines is a reduction of electromagnetic loads and an increasing the length and material consumption of machine, which is contrary to requirement of resource conservation in the construction of electrical machines. But the way, which is proposed in this article, is implemented by shift of teeth and parts of winding bars in adjacent sections of rotor magnetic core. **Practical value.** The practical reduction of electromotive forces from tooth harmonics of gap conductivity and magnetomotive forces is achieved by mutual shift by a quarter (half) of tooth division of two symmetrical rotor sections, each of which is consisted of two half-shifted (quarter) tooth segmentation parts.

Key words: induction motor, additional losses, tooth harmonics, displacement, compensation, external rotor.

Постановка проблеми. Более 90 % электричества производимого электростанциями преобразуется в механическую энергию посредством асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором. Даже незначительное снижение потерь устройств преобразования электроэнергии обеспечивает существенный технико-экономический эффект [1]. Согласно приведенному в [2] фрагменту норматива Европейского союза, принятого к введению с 2010 года, коэффициент полезного действия (КПД) АД общего назначения в диапазоне мощности от 1,5 до 250 кВт должен возрасти соответственно с 0,75 до 0,9 и с 0,94 до 0,975. При этом «традиционная» конструкция таких АД с дискретными зубцово-пазовыми структурами и диском пазов является неизменной на протяжении прошедшего и начала нового столетий [3, 4]. Мировой тенденцией последних десятилетий разработок указанных АД является повышение КПД снижением электромагнитных нагрузок и увеличением активной длины [2, 4], что противоречит требованиям ресурсосбережения. При этом имеются возможности снижения потерь и материалоемкости использованием «скрытых резервов» и конструктивно-структурных преобразований активной части, а также специальных исполнений АД, в частности с внешним ротором (рис. 1) [5, 6].

Анализ последних исследований. Изобретение в конце 19 века зубцово-пазовой структуры магнитопроводов позволило повысить надежность, значительно снизить массогабаритные и улучшить энергетические показатели электрических машин. При

этом подобные структуры являются причиной искажения распределения индукции в рабочем зазоре и конструктивно-технологическим ограничителем КПД электрических машин [3, 7, 8]. Добавочные потери несинусоидальности поля, обусловленные гармониками магнитодвижущих сил (МДС) и проводимости зазора снижают КПД АД на 1-2 % [8, 9].

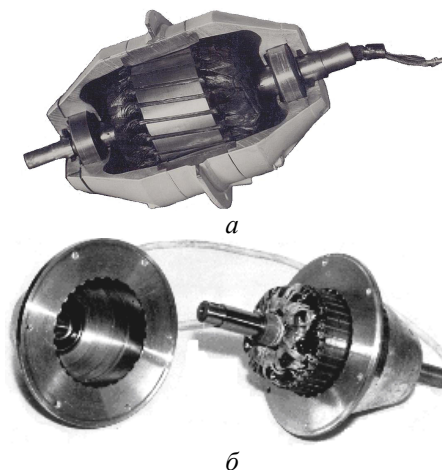


Рис. 1 – Варианты обращенного двигателя: а – с установкой ротора в двух подшипниковых щитах; б – с двухсекционным конусно-плоскостным магнитопроводом и отлитыми заодно с обмоткой корпусами установки подшипников

Основным способом ослабления влияния дискретности зубцово-пазовых конструкций магнитопроводов электрических машин и несинусоидальности источников питания регулируемых АД является снос

пазов ротора. Замена прямых пазов (зубцов) на скошенные вызывает осевые составляющие магнитной вибрации и значительные добавочные потери от поперечных токов и эффективна лишь при изолировании пазов [8-11]. Изолирование пазов (стержней литой обмотки) ротора затруднительно и практически не используется. Скос изолированных пазов статора исключает добавочные потери, но увеличивает среднюю длину витка, массу, потери и материалоемкость обмотки, поэтому используется редко.

Известны также АД с секционированными роторами и промежуточными короткозамыкающими кольцами (ПКЗК) в сочетании со скосом пазов или смещением стержней. В таких АД с тангенциальным смещением участков стержней снижены добавочные потери, но ПКЗК выходят на активную поверхность, что требует секционирования (разделения на пакеты магнитопровода) статора с увеличением длины и основных потерь, а также материалоемкости и трудоемкости производства машины [8-11].

Скошенные изолированные пазы статора применялись, в связи с ограниченным диаметром ротора, при сквозном (через отверстия в ярме) креплении подшипниковых щитов в обращенных АД (рис. 1, а). Эти АД усовершенствованы (рис. 1, б), при снижении трудоемкости производства, уровней вибрации и шума, использованием двухсекционного ротора с шевронным скосом и тангенциальным смещением пазов, а также фланцевым выступом ПКЗК для крепления привода – рабочего колеса вентилятора [12].

Несмотря на экспериментально-практическое подтверждение эффективности тангенциального смещения участков стержней и соответственно зубцовых гармоник магнитного поля [8-12], АД с секционированными роторами и ПКЗК применяются ограниченно [12]. Также отсутствуют публикации с анализом электромагнитных особенностей подобных АД.

Цель работы – анализ влияния на характеристики АД тангенциального смещения (углового поворота) в соседних зонах вдоль активной длины гармонических составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре, вызванных дискретностью зубцово-пазовых структур.

Изложение основного материала исследования. Анализ совместного влияния на характеристики АД различных видов тангенциальной периодической несимметрии активной части ввиду сложной структуры магнитного поля не представляется возможным. Поэтому целесообразно раздельное рассмотрение каждого из факторов искажения распределения магнитного поля на моделях АД с идеализированными электромагнитными системами.

Относительно простым и достаточно точным для учета названных выше особенностей является метод удельной магнитной проводимости зазора [7]. Исходя из указанного метода, гармонический состав удельных электродвижущих сил (ЭДС) АД определяется выражением

$$e(\alpha, t) = k_{\psi} \frac{\partial}{\partial t} B_{\delta}(\alpha, t) = k_{\psi} \frac{\partial}{\partial t} [F(\alpha, t) \lambda_{\delta}(\alpha, t)], \quad (1)$$

где k_{ψ} – коэффициент потокоцепления;

α – электрическая угловая координата;

t – время; $B_{\delta}(\alpha, t)$ – функция распределения индукции в зазоре, определяемая изменением вдоль α

суммарной МДС $F(\alpha, t)$ и удельной проводимости зазора $\lambda_{\delta}(\alpha, t)$.

Оценка изменения структуры ЭДС АД при тангенциальном смещении гармонических составляющих индукции, вызванных зубчатостью, может быть выполнена с использованием модели АД со статором, на «гладкой» поверхности которого распределена виртуальная синусная обмотка, создающая в рабочем зазоре идеализированное магнитное поле. Ротор содержит зубчатый магнитопровод состоящий, по крайней мере, из двух частей (секций). Одна секция повернута относительно другой на угол β . На периферии зубцов и пазов ротора распределена общая для каждой части короткозамкнутая обмотка в виде тонкостенного цилиндра, представляющего собой равномерный активный проводящий слой. Участки активных элементов модели удовлетворяют условиям полной электромагнитной симметрии относительно линии (линий) разделения при концентричном расположении ротора относительно статора.

При заданных условиях суммарная МДС модели АД синусоидальна, а функция $\lambda_{\delta}(\alpha, t)$ в случае, когда статор гладкий, а вращающийся магнитопровод зубчатый, для зон двух секций будет иметь вид:

$$\lambda_{\delta}'(\alpha, t) = \lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zk} \cos \left[\frac{kz}{p} (\alpha - \Omega t) \right]; \quad (2)$$

$$\lambda_{\delta}''(\alpha, t) = \lambda_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zk} \cos \left[\frac{kz}{p} (p(\gamma \pm \beta) - \Omega t) \right], \quad (3)$$

где λ_0 – удельная постоянная магнитная проводимость эквивалентного равномерного зазора;

λ_{zk} – амплитуда k -ой гармоники удельной проводимости зубчатости ротора;

z и Ω – число зубцов и угловая скорость вращения ротора;

p – число полюсов обмотки статора;

γ – геометрическая угловая координата ($\alpha = p\gamma$).

Выражение ЭДС (1) данной гипотетической модели без учета зубчатости, а также аналогичные выражения, учитывающие проводимости (2), (3) для зон обмоток, соответствующих двум частям ротора, имеют вид:

$$e_0(\alpha, t) = k_{\psi} \omega_1 \lambda_0 F_m \sin(p\gamma - \omega_1 t) = E_m \sin(p\gamma - \omega_1 t); \quad (4)$$

$$e_{\Sigma}'(\gamma, t) = e_0(\gamma, t) + k_{\psi} F_m \cos(p\gamma - \omega_1 t) \frac{\Omega}{p} \times \\ \times \sum_{k=1}^{\infty} kz \lambda_{zk} \sin \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + \quad (5)$$

$$+ k_{\psi} \omega_1 F_m \sin(p\gamma - \omega_1 t) \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zk} \cos \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right]; \\ e_{\Sigma}''(\gamma, t) = e_0(\gamma, t) + k_{\psi} F_m \cos(p\gamma - \omega_1 t) \frac{\Omega}{p} \times \\ \times \sum_{k=1}^{\infty} kz \lambda_{zk} \sin \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \pm \beta \right) \right] + \quad (6)$$

$$+ k_{\psi} \omega_1 F_m \sin(p\gamma - \omega_1 t) \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{zk} \cos \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \pm \beta \right) \right],$$

где ω_1 – угловая частота сети,

F_m – амплитуда суммарной МДС.

Дополнительные относительно (4) зубцовые слагаемые ЭДС (5), (6) создают высокочастотные добавочные потери в зубцах и обмотке ротора, а зубцовые составляющие магнитного поля демпфируются токами зубцовых контуров [8, 9].

На основании сравнения (4), (5) и (6) можно сделать вывод, что улучшение характеристик АД возможно взаимной компенсацией составляющих второго и третьего слагаемых ЭДС $e_{\Sigma}^{(v)}(\gamma, t)$, наведенных гармониками магнитного поля порядка kz в зоне активной части, соответствующей $\lambda'_{\delta}(\alpha, t)$, аналогичными ЭДС волны $\lambda''_{\delta}(\alpha, t)$ при повороте частей магнитопровода ротора на угол $\beta = \pi/(kz)$. Условием противофазности наиболее значимых дополнительных групп ЭДС порядка z является смещение гармонических составляющих проводимостей (2), (3) и индукций порядка z в частях АД на угол $\beta' = \pi/z$ (рис. 2, а):

$$B'_{\delta}(\alpha, t) = B_{\delta m} \cos(p\gamma - \omega_1 t) + B_{z1} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \times \cos \left[z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + B_{z2} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \cos \left[2z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + B_{z3} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \cos \left[3z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + \cos(p\gamma - \omega_1 t) \sum_{k=4}^{\infty} B_{zk} \cos \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right]; \quad (7)$$

$$B''_{\delta}(\gamma, t) = B_{\delta m} \cos(p\gamma - \omega_1 t) - B_{z1} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \times \cos \left[z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + B_{z2} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \cos \left[2z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] - B_{z3} \cos(p\gamma - \omega_1 t) \cos \left[3z \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \right] + \cos(p\gamma - \omega_1 t) \sum_{k=4}^{\infty} B_{zk} \cos \left[kz \left(\gamma - \frac{\Omega t}{p} \right) \pm k\pi \right], \quad (8)$$

где $B_{\delta m}$ – амплитудное значение $B_{\delta}(\alpha, t)$, B_{zk} – амплитуда дополнительной гармоники индукции порядка k , обусловленная зубчатостью.

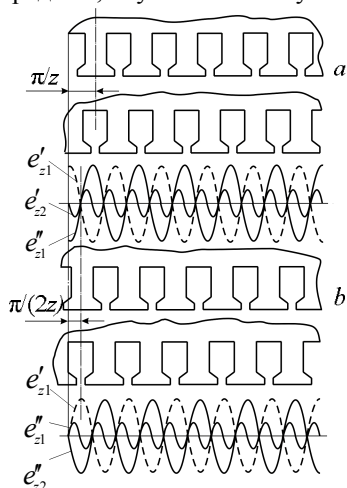


Рис. 2 – Варианты тангенциального смещения зубцов и основных зубцовых гармоник ЭДС $e_{z1(2)}^{(v)}$ порядков $k = 1$ и $k = 2$: а – на половину; б – четверть зубцового шага в магнитопроводе из четырех секций и обмотке ротора

Из (7) и (8) следует, что дополнительно к группам ЭДС $e_{z1}^{(v)}(\gamma, t)$ порядков z и $3z$, взаимно компенсируются также все нечетные ЭДС порядков $k = 6i \pm 1$ ($i = 1, 2, 3, \dots$), а устранение влияния на характеристики АД дополнительных групп ЭДС $e_{z2}^{(v)}(\gamma, t)$ четных порядков, кратных трем, возможно при повороте двух частей АД на угол $\beta'' = \pi/(2z)$ (рис. 2, б). При этом, для исключения влияния гармоник порядка z , каждая из повернутых на $\pi/(2z)$ частей должна быть соответственно разделена на два участка, повернутых на угол π/z (рис. 2, а). Для соответствующей рис. 2 модели АД сумма ЭДС от гармонических составляющих зубчатости из диапазона, соответствующего практически обоснованному ограничению, будет близка к нулю:

$$e_{\Sigma}(\alpha, t) = e'_{z1}(\alpha, t) + e''_{z1}(\alpha, t) + e'_{z2}(\alpha, t) + e''_{z2}(\alpha, t) \approx 0, \quad (9)$$

где $e_{z1(2)}^{(v)}(\gamma, t)$ – ЭДС от зубцовых гармоник магнитного поля соответствующих (7, 8).

Анализ влияния тангенциального смещения гармоник дискретности распределения обмотки ротора на гармонический состав ЭДС может быть выполнен на основе замены в предыдущей модели АД рассредоточенного проводящего слоя на дискретную короткозамкнутую обмотку из z проводников, равномерно распределенных на гладкой поверхности двух симметричных частей магнитопровода ротора. Участки каждого проводника обмотки одной части повернуты относительно участков тех же проводников второй части на угол β .

Синусоидальное поле обмотки статора индуцирует в обмотке ротора синусоидальный ток частоты скольжения, образующий, при $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$, МДС с гармоническими составляющими порядка [7]

$$\mu = 1 \pm kz / p. \quad (10)$$

Для указанного спектра МДС реакции ротора в системе координат, связанной со статором, в соответствии с [7], можно записать:

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{R\mu} \cos[\mu(\alpha - \Omega t) - (\Omega_1 - \Omega)t - \varphi_{\mu}], \quad (11)$$

где $F_{R\mu}$ и Ω_1 – амплитуда μ -й гармонической МДС и частота вращения ротора;

φ_{μ} – угол сдвига между синусоидальной МДС статора и μ -й гармонической МДС ротора.

Для модели АД с гладкими активными поверхностями магнитопровода выражения индукции для участков зазора, соответствующих повернутым частям обмотки ротора, с учетом (10) и (11) имеют вид:

$$B'_{\delta}(\alpha, t) = \lambda_0 \left\{ F'_m \cos(p\gamma - \omega_1 t - \varphi'_0) + \sum_{k=1}^{\infty} F_{\mu k} \cos \left[\left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) (p\gamma - \Omega t) - \Delta\Omega t - \varphi_{\mu} \right] \right\} = B'_{\delta m} \cos(p\gamma - \omega_1 t - \varphi'_0) + \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k} \cos \left[\left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) (p\gamma - \Omega t) - \Delta\Omega t - \varphi_{\mu} \right]; \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
B_{\delta}''(\alpha, t) &= \lambda_0 \left\{ F_m'' \cos(p\gamma - \omega_1 t - \varphi_0'') + \right. \\
&+ \sum_{k=1}^{\infty} F_{\mu k}'' \cos \left[\left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) \left(p(\gamma \pm \beta) - \left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) \Omega t - \Delta \Omega t - \varphi_{\mu} \right) \right] \left. \right\} = \\
&= B_{\delta m}'' \cos(p\gamma - \omega_1 t - \varphi_0'') + \\
&+ \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}'' \cos \left[\left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) \left(p(\gamma \pm \beta) - \left(1 \pm \frac{kz}{p} \right) \Omega t - \Delta \Omega t - \varphi_{\mu} \right) \right],
\end{aligned} \quad (13)$$

где $F_m^{(v)}$ и $\varphi_0^{(v)}$ – соответственно амплитуда основной гармоники суммарной МДС и сдвиг фаз между $F_m^{(v)}$ и амплитудной МДС статора в частях АД;

$\Delta \Omega$ – разность Ω_1 и Ω .

Величины суммарных МДС в частях рассматриваемой модели АД:

$$F_m'(\alpha, t) = F_S \cos(p\gamma - \omega_1 t) + F_{R1} \cos(p\gamma - \omega_1 t - \varphi_R);$$

$$F_m''(\alpha, t) = F_S \cos(p\gamma - \omega_1 t) + F_{R1} \cos(p(\gamma \pm \beta) - \omega_1 t - \varphi_R),$$

где F_S – амплитуда синусоидальной МДС статора; F_{R1} – амплитуда первой гармонической МДС ротора (при $k = 0$, $F_{R1\mu} = F_{R1}$);

φ_R – сдвиг фаз между F_S и F_R .

Выражения (12) и (13) представленные, после тригонометрических преобразований и для упрощения записи, при $t = 0$, имеют вид:

$$\begin{aligned}
B_{\delta}'(\gamma) &= B_{\delta m}' \cos(p\gamma - \varphi_0') + \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}' \cos \left[\left(1 + \frac{kz}{p} \right) p\gamma - \varphi_{\mu} \right] + \\
&+ \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}' \cos \left[\left(1 - \frac{kz}{p} \right) p\gamma - \varphi_{\mu} \right] = \\
&= B_{\delta m}' \cos(p\gamma - \varphi_0') + 2 \cos(p\gamma - \varphi_{\mu}) \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}' \cos(kz\gamma);
\end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
B_{\delta}''(\gamma) &= B_{\delta m}'' \cos(p\gamma - \varphi_0'') + \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}'' \cos \left[\left(1 + \frac{kz}{p} \right) p(\gamma \pm \beta) - \varphi_{\mu} \right] + \\
&+ \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}'' \cos \left[\left(1 - \frac{kz}{p} \right) p(\gamma \pm \beta) - \varphi_{\mu} \right] = \\
&= B_{\delta m}'' \cos(p\gamma - \varphi_0'') + 2 \cos[p(\gamma \pm \beta) - \varphi_{\mu}] \sum_{k=1}^{\infty} B_{\mu k}'' \cos[kz(\gamma \pm \beta)].
\end{aligned} \quad (15)$$

На основе сравнения (14) и (15) с (7) и (8) можно заключить, что тангенциальное смещение участков одноименных проводников частей ротора на $\beta' = \pi/z$ и на $\beta'' = \pi/(2z)$ с целью воздействия на ЭДС, обусловленные несинусоидальностью МДС, эквивалентно аналогичному смещению зубцов с целью компенсации ЭДС гармоник проводимости. При соблюдении условий электромагнитной симметрии смещаемых участков ротора для дополнительных ЭДС второй модели справедливо выражение (9), что согласуется с положением об идентичности порядков и скоростей движения гармоник МДС и проводимости зазора [7].

Однако взаимная компенсация или ослабление влияния на характеристики гармонических составляющих, обусловленных дискретностью распределения обмотки, в отличие от ослабления зубцовых гармоник проводимости первой модели, связано со снижением ЭДС от основной гармоники магнитного поля. Ослабление ЭДС ротора от основной и высших пространственных гармоник поля при угловом сдвиге одноименных проводников

смежных секций учитывается, аналогично скосу пазов, коэффициентом тангенциального смещения. При электромагнитной симметрии n смещаемых частей магнитопровода указанный коэффициент для любой v -й гармоники поля в зазоре АД можно определить соотношением:

$$\begin{aligned}
k_{\text{cmv}} &= [e_{zv1} + e_{zv2} + \dots + e_{zvn}] / (ne_{zv1}) = \\
&= \frac{\Phi_{zv1} + \Phi_{zv2} + \dots + \Phi_{zvn}}{n\Phi_{zv1}} = \frac{\Phi_{yv1} + \dots + \Phi_{yvn}}{n\Phi_{yv1}},
\end{aligned} \quad (16)$$

где e_{zv1} – составляющая ЭДС зубцового контура индуцируемая потоком Φ_{zv1} гармоники магнитного поля порядка v , входящим в часть зубца, ось которого совпадает с координатой амплитудного значения указанной гармоники B_{mv} ; e_{zvn} – составляющая ЭДС зубцового контура индуцируемая потоком Φ_{zvn} той же гармоники, входящим в n -ю часть зубца, повернутую на угол β_n от положения максимального потокосцепления с B_{mv} ; $\Phi_{yv1} \dots \Phi_{yvn}$ – приходящиеся на единицу активной длины l_{δ} удельные составляющие потоков $\Phi_{zv1} \dots \Phi_{zvn}$.

Входящие в (16) величины удельных потоков взаимной индукции определяются интегрированием кривой $B_v(\alpha, t)$ в пределах зубцового деления в момент времени $t = 0$:

$$\Phi_{yv1} = \int_{\gamma=-\pi/z}^{\gamma=\pi/z} B_{mv} \cos(vp\gamma) d\gamma = \frac{2B_{mv}}{pv} \sin(vp\pi/z); \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{yvn} &= \int_{\gamma=-\pi/z}^{\gamma=\pi/z} B_{mv} \cos[vp(\gamma \pm \beta_n)] d\gamma = \\
&= \frac{2B_{mv}}{pv} \sin(vp\pi/z) \cos(v\beta_n).
\end{aligned} \quad (18)$$

С учетом (17) и (18), выражение (16) для контура из n частей, а также контура с $n = 2$, можно преобразовать к виду:

$$k_{\text{cmv}} = \frac{1}{n} \left[1 + \sum_{i=1}^{i=n-1} \cos(v\beta_i) \right] / n; \quad k_{\text{cmv}(n=2)} = \cos^2(vp\beta/2). \quad (19)$$

Из (19) следует, что при $\gamma_{\text{cm}} = \pi/v$, $k_{\text{cmv}} = 0$, что соответствует условию взаимной компенсации ЭДС и отсутствию в стержнях ротора тока гармоники порядка v .

Можно аналогично (1)–(15) показать, что тангенциальное смещение зубцов ротора на половину зубцового шага статора или аналогичное смещение пакетов секционированного статора приводит к подавлению зубцовых гармоник статора. Совместное подавление зубцовых гармоник статора и ротора аналогично (рис. 2) возможно в АД с четырехсекционным ротором со средним смещением двух симметричных пар секций и смещением секций в каждой паре на половину зубцовых делений ротора и статора. Согласно [10, 12] тангенциальное смещение стержней и секций ротора эффективней скоса пазов в части улучшения виброакустических характеристик. Однако необходимы разработка и использование специальных и приемлемых по технологическим требованиям конструкций роторов с закрытыми ПКЗК.

Выводы.

1. Обоснована можливість зниження добавочних потерь АД взаємної компенсацією ЕДС зубцових гармонік провідимості зазора і МДС при взаємному сдвігу на $\pi(2z)$ или π/z двох симетричних секцій ротора, кожна з яких складається з двох сдвинуваних відповідно на π/z і $\pi(2z)$ часток.

2. Зміна основної і вищих гармонік ЕДС при зміщенні стержневих часток секцій улічується відповідним коефіцієнтом $k_{смв}$.

Список литературы

1. Шидловський А.К. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990–2000 / А.К. Шидловський, Г.М. Федоренко // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 3-12.
2. Гловацкий А.В. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе / А.В. Гловацкий, Л.П. Кубарев, Л.Н. Макаров // Электротехника. – 2008. – № 4. – С. 2-8.
3. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей / В.М. Казанский // Электричество. – 1996. – № 8. – С. 43-48.
4. Конохов Н.Н. Выбор главных размеров и геометрии активных частей электрических машин при разных концепциях развития их конструкции / Н.Н. Конохов // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 1. – С. 20-23.
5. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин / А.А. Ставинский // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 44-48.
6. Ставинский А.А. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами / А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 41-45.
7. Геллер Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата, Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
8. Гаинцев Ю.В. Методы снижения добавочных потерь в низковольтных асинхронных двигателях / Ю.В. Гаинцев // Электротехническая промышленность. Электрические машины. – 1975. – № 3. – С. 19-22.
9. Радин В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей ИНТЕР-ЭЛЕКТРО / В.И. Радин, И. Лондин, В.Д. Розенкноп и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
10. Чельдышев А.М. Результаты исследований асинхронных машин с многопакетными роторами / А.М. Чельдышев, В.И. Бреев // Исследование параметров и характеристик электрических машин переменного тока. Межвузовский сборник. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова. – 1983. – С. 11-18.
11. Williamson S. Cage induction motors with intertings / S. Williamson, N.K. Adams // IEEE Proceedings. – 1989. – Vol. 136. – ptB. – № 6. – p. 263-274. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/35426/>. – Дата обращения 10 января 2017.
12. Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого электровентилятора / А.А. Ставинский // Электротехн. пр-во. Передовой

опыт и науч.-техн. достижения для внедрения: Отрасл. информ. сб. – 1990. – С. 4-7.

References (transliterated)

1. Shydlovskiy A.K., Fedorenko G.M. *Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990–2000* [Macroeconomic and electrical engineering trends of Ukrainian electric power industry, 1990-2000]. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2002. no.1. pp. 3–12.
2. Glovatskiy A.V., Kubarev L.P., Makarov L.N. *Osnovnye napravleniya razvitiya elektricheskikh mashin i elektromekhanicheskikh sistem na ikh osnove* [Main directions of development of electrical machines and electromechanical systems based on them]. *Elektrotekhnika*. 2008. no. 4. pp. 2-8.
3. Kazanskiy V.M. *Krizis i perspektivy razvitiya malyykh asinkhronnykh dvigateley* [Crisis and prospects of development of small induction motors]. *Elektrichestvo*. 1996. no. 8. pp. 43-48.
4. Konokhov N.N. *Vybor glavnykh razmerov i geometrii aktivnykh chastey elektricheskikh mashin pri raznykh kontseptsyakh razvitiya ikh konstruktzii* [Selection of main dimensions and geometry of active parts of electric-ray machines at different concepts of their design]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2010. no. 1. pp. 20-23.
5. Stavinskiy A.A. *Osobennosti naznacheniya i ispol'zovaniya spetsial'nykh elektricheskikh mashin* [Features of destination and use of special electric machines]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2008. no.1. pp. 44-48.
6. Stavinskiy A.A., Palchykov O.O. *Tselevyye funktsii sravnitel'nogo analiza energeticheskoy effektivnosti elektromagnitnykh sistem asinkhronnykh dvigateley s vnutrennimi i vneshnimi rotorami* [Target function of comparative analysis of the energy efficiency of electromagnetic systems of induction motors with internal and external rotors]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2015. no. 1. pp. 41-45.
7. Geller B., Gamata V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous machines]. Moscow, *Energiya Publ.*, 1981. 352 p.
8. Gaintsev Yu.V. *Metody snizheniya dobavochnykh poter' v nizkovol'tnykh asinkhronnykh dvigateleyakh* [Methods of reducing additional losses in low-voltage induction motors]. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. *Elektricheskije mashiny*. 1975. no. 3. pp. 19-22.
9. Radin V.I., Londin I., Rozenknap V.D. and etc. *Unifitsirovannaya seriya asinkhronnykh dvigateley INTER-ELEKTRO* [Unified series INTER-ELECTRO of induction motors]. Moscow, *Energoatomizdat*, 1990. 432 p.
10. Cheldyshev A.M., Breev V.I. *Rezultaty issledovaniy asinkhronnykh mashin s mnogopaketnymi rotorami* [Research results of induction machines with multipacket rotors]. *Issledovanie parametrov i kharakteristik elektricheskikh mashin peremennogo toka. Mezhuvozkivskiy sbornik*. Sverdlovsk: UPI im. S.M. Kirova, 1983. pp. 11-18.
11. Williamson S., Adams N.K. *Cage induction motors with intertings*. IEEE Proceedings. 1989, Vol. 136. no. 6, pp. 263–274. Available at <http://ieeexplore.ieee.org/document/35426/> (accessed 10.01.2017).
12. Stavinskiy A.A. *Asinkhronnyy dvigatel' s dvukhpaketnym vneshnim rotorom dlya privoda sudovogo vstraivaemogo elektroventilyatora* [Induction motor with two sets external rotor for drive of ship embedded fan]. *Elektrotekhn. pr-vo. Peredovoy opyt i nauch.-tekhn. Dostizheniya dlya vnedreniya: Otrasl. inform. sb.* 1990. pp. 4-7.

Поступила (received) 07.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Асинхронні двигуни з тангенційним зсувом зубцових гармонік магнітного поля. Ч.1. Додаткові електрорушійні сили і втрати / А.А. Ставинський, О.О. Плахтир, Л.В. Вахоніна, О.О. Пальчиков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 16 – 21. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением зубцовых гармоник магнитного поля. Ч.1. Добавочные электродвижущие силы и потери / А.А. Ставинский, О.О. Плахтырь, Л.В. Вахонина, О.О. Пальчиков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та

електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 16 – 21 –
Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Induction motors with tangential displacement of tooth harmonic of the magnetic field. Pt. 1. Additional electromotive forces and losses / A.A. Stavinskii, O.O. Plakhtyr, L. V. Vakhonina, O.O. Palchykov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 16 – 21 . – Bibliogr.: 12. – ISSN 2409-9295.

«Сведения об авторах /About the Authors»

Ставинський Андрій Андрійович, доктор технічних наук, професор, Миколаївський національний аграрний університет, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; тел.: +38(0512) 36-49-63.

Ставинский Андрей Андреевич, доктор технических наук, профессор, Николаевский национальный аграрный университет, заведующий кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; тел.: +38(0512) 36-49-63.

Andrey Andreyevych Stavinskii, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Mykolaiv State Agrarian University, Chair of the Department of Electricity, Electrical and Electromechanical; tel.: +38(0512) 36-49-63.

Плахтир Олег Олегович, кандидат технічних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; e-mail: slyguy_78@mail.ru

Плахтырь Олег Олегович, кандидат технических наук, доцент, Николаевский национальный аграрный университет, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; e-mail: slyguy_78@mail.ru

Oleg Olegovich Plakhtyr, PhD in Engineering sciences, Mykolaiv State Agrarian University, Associate Professor of the Department of Electric power, Electrical engineering and Electromechanics; e-mail: slyguy_78@mail.ru

Вахоніна Лариса Володимирівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; тел.: +38(050) 521-92-00.

Вахонина Лариса Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, Николаевский национальный аграрный университет, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; тел.: +38(050) 521-92-00.

Larisa Vladimirovna Vakhonina, PhD in Physico-mathematical sciences, Mykolaiv State Agrarian University, Associate Professor of the Department of Electric power, Electrical engineering and Electromechanics; tel.: +38(050) 521-92-00 .

Пальчиков Олег Олегович, асистент кафедри суднових електроенергетичних систем, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; тел.: +38(512) 55-96-89; e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

Пальчиков Олег Олегович, ассистент кафедры судовых электроэнергетических систем, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова; тел.: +38(512) 55-96-89; e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

Oleg Olegovich Palchykov, Assistant of the Department of Ship Electrical Power Systems at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding; tel.: +38(512) 55-96-89; e-mail: ole2013hulk@yandex.ua