

Оптимизация виброшумовых характеристик синхронного электропривода

АНАНЬЕВ С.С., ГОЛУБЕВ А.Н., МАРТЫНОВ В.А., КАРАЧЕВ В.Д.

Показано, что для уменьшения радиальных магнитных сил в зазоре m -фазной машины ($m^3 \dots 9$) следует отказаться от ее синусоидального питания, обеспечив принудительное формирование амплитуд гармоник токов с порядковыми номерами, меньшими числа фаз. Получены аналитические выражения для определения реальных сил, на основе которых предложена методика компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов при сохранении требуемого электромагнитного момента. Предложена структура m -фазного синхронного электропривода с улучшенными виброшумовыми характеристиками, настройка системы управления которой основана на разработанной методике оптимизации виброшумовых характеристик.

Ключевые слова: многофазный синхронный электропривод, виброшумовые характеристики, магнитные силы, гармоники радиальной магнитной силы, спектральный вектор

Устранение шума электрических машин – актуальная и сложная проблема. Напряженная борьба с шумом обусловлена как физиологической причиной, т.е. стремлением создать благоприятную рабочую среду, так и чисто технической, так как любой шум вызван вибрацией частей машины. Испытывающие большое напряжение вибрирующие части часто являются причиной отказов, а также старения машины.

Шумы и вибрации вызываются силами, которые могут носить магнитный, механический и аэродинамический характер. Магнитные шумы обусловлены магнитными силами, изменяющимися во времени и пространстве и действующими между отдельными частями машины [1]. Шумы могут быть вызваны радиальными, тангенциальными и осевыми силами. Широкие возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля и, следовательно, на виброшумовые характеристики открывают увеличение числа фаз исполнительного двигателя, в частности синхронного (СД), что позволяет оптимизировать целый спектр других технико-экономических показателей электропривода (ЭП) [2, 3]. Снижение шумов и вибраций путем применения многофазных машин ($m > 3$) обусловлено уменьшением тангенциальных сил, вызванных пульсациями электромагнитного момента СД [3, 4]. С увеличением числа фаз статорной обмотки происходит разрежение гармонического состава поля в воздушном зазоре, способствующее устранению асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных.

Другая причина возникновения вибраций обусловлена радиальной магнитной силой, пропорциональной квадрату магнитной индукции в зазоре. Эта сила вызывает динамические деформации статорного кольца, которые и являются источником магнитных шумов [1].

Особенно большие вибрации могут вызвать радиальные силы второго и четвертого порядка.

Как показано в [3], для более полной реализации преимуществ многофазного варианта синхронного ЭП в энергетическом отношении следует строить систему автоматического управления (САУ) по многоканальному принципу (рис. 1), при котором каждый канал соответствует своей подструктуре (энергетическому каналу) m -фазного СД как объекта управления [2]. Такой подход к построению САУ позволяет уменьшить и значение радиальной силы.

Распределение магнитной индукции от обмотки статора вдоль рашочки магнитопровода:

$$B_s(a) = \frac{m_0 q m}{p d} \sum_{n=1,3}^{n < m} \dot{a} J_{(n)} \sin \frac{pn}{2} (I_{sq(n)} \cos na + I_{sd(n)} \sin na),$$

где $J_{(n)} = \sum_{n=n \pm 2mk}^{\neq} \dot{a} \frac{x_s(n)}{n} \gg \frac{x_{sn}}{n} + \frac{x_{sn+2m}}{n+2m} + \frac{x_{sn-2m}}{n-2m};$

$$x_{s(n)} = \frac{\sin \frac{pn}{2m}}{q \sin \frac{pn}{2mq}}.$$

Распределение магнитной индукции от неявнополюсного ротора на основе постоянного магнита вдоль рашочки магнитопровода:

$$B_r(a) = \begin{cases} \dot{a} \frac{B_{rm}}{Da} (a+p), & -p \leq a < -p+Da \\ \dot{a} B_{rm}, & -p+Da \leq a < -Da \\ \dot{a} \frac{B_{rm}}{Da} a, & -Da \leq a < Da \\ \dot{a} B_{rm}, & Da \leq a < p-Da \\ \dot{a} \frac{B_{rm}}{Da} (a-p), & p-Da \leq a < p \end{cases} =$$

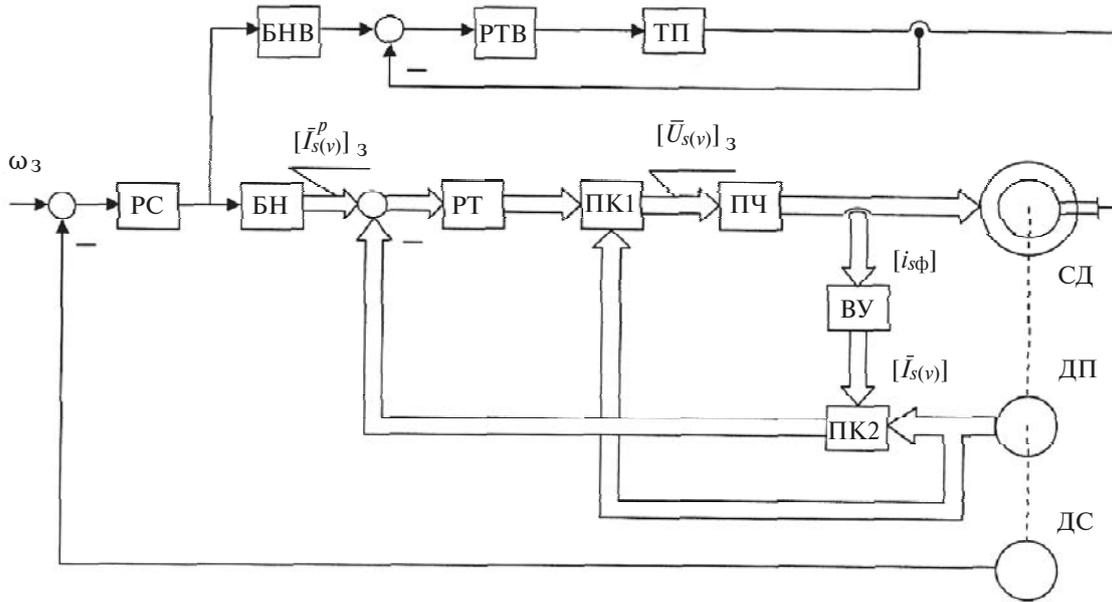


Рис. 1

$$= \sum_{n=1,3} \frac{4B_{rm}}{\rho n} \frac{\sin nDa}{nDa} \sin na.$$

Распределение радиальной силы вдоль расточки магнитопровода:

$$p(a) = \frac{1}{2m_0} B^2(a) = \frac{1}{2m_0} (B_s(a) + B_r(a))^2 = \frac{1}{2m_0} (B_s^2(a) + B_r^2(a) + 2B_s(a)B_r(a)). \quad (1)$$

С использованием спектральных векторов электромагнитных переменных, приведенных к n-м пространственным гармоническим [2],

$$\bar{Y}_{(n)} = \frac{2}{m} \sum_{i=1} \sum_{k=1} \frac{m}{N} \sum_{k=1} \frac{N}{N} y_{ik} e^{jnp \frac{2}{N} (k-1) + \frac{1}{m} (i-1) \frac{2\pi}{N}}$$

где y_{ik} – некоторая электромагнитная переменная k-й фазы i-й N-фазной (из общего числа m/N) симметричной системы гальванически связанных фаз, для слагаемых правой части (1) можно записать [5]:

$$\frac{1}{2m_0} B_s^2(a) = \frac{1}{4m_0} \sum_{n=1,3} \sum_{m=1,3} \frac{qm}{\rho d} \sum_{n=1,3} \sum_{m=1,3} J_{(n)} J_{(m)} \sin \frac{pn}{2} \cdot \sin \frac{pm}{2} ((I_{sq(n)} I_{sq(m)} + I_{sd(n)} I_{sd(m)}) \cos(n-m)a + (I_{sq(n)} I_{sq(m)} - I_{sd(n)} I_{sd(m)}) \cos(n+m)a + 2I_{sq(n)} I_{sd(m)} \sin(n+m)a);$$

$$\frac{1}{2m_0} B_r^2(a) = \frac{B_{rm}^2}{2m_0} \sum_{n=1,3} \frac{4Da}{3p} + \frac{8}{pDa}$$

$$\sum_{n=2,4} \frac{1}{n^2} \sum_{e} \cos nDa - \frac{\sin nDa}{nDa} \sum_{\phi} \cos na \sum_{\phi}$$

$$\frac{1}{2m_0} B_s(a) B_r(a) = \frac{qm B_{rm}}{\rho^2 d} \sum_{n=1,3} \sum_{m=1,3} \sum_{n=1,3} \frac{J_{(n)}}{n}$$

$$\sin \frac{pn}{2} \frac{\sin nDa}{nDa} (I_{sq(n)} (\sin(n+n)a + \sin(n-n)a) + I_{sd(n)} (\cos(n-n)a - \cos(n+n)a)),$$

где d, q – ортогональные оси системы координат, «привязанной» к ротору СД.

Выделяя из этих слагаемых вторые гармоники радиальной силы для результирующих продольной и поперечной составляющих второй гармоники радиальной силы, получаем:

$$P_{2d} = \frac{1}{4m_0} \sum_{e} \frac{qm}{\rho d} \sum_{\phi} J_{(1)}^2 (I_{sq(1)}^2 - I_{sd(1)}^2) -$$

$$- 2 \sum_{n=1,3} \sum_{m=1,3} J_{(n)} J_{(n+2)} (I_{sq(n)} I_{sq(n+2)} + I_{sd(n)} I_{sd(n+2)}) +$$

$$+ \frac{B_{rm}^2}{\rho m_0} \sum_{e} \cos 2Da - \frac{\sin 2Da}{2Da} \sum_{\phi} \frac{qm B_{rm}}{\rho^2 d} \sum_{n=1,3} \sum_{m=1,3} J_{(n)} I_{sd(n)} \cdot \sin \frac{pn}{2} \sum_{e} \frac{1}{n+2} \frac{\sin(n+2)Da}{(n+2)Da} - \frac{1}{n} \frac{\sin nDa}{nDa} \sum_{\phi} - \frac{\sin Da}{Da} J_{(1)} I_{sd(1)} \sum_{\phi}$$

$$P_{2q} = \frac{1}{2m_0} \sum_{e} \frac{qm}{\rho d} \sum_{\phi} J_{(1)}^2 (I_{sq(1)} I_{sd(1)} + \frac{qm B_{rm}}{\rho^2 d}$$

$$I_{sq(n)} = \frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} J_{(n)} I_{sq(n)} \sin \frac{pn}{2} + \frac{1}{n} \frac{\sin nDa}{nDa} \ddot{\varphi} + \frac{\sin Da}{Da} J_{(1)} I_{sq(1)} \ddot{\varphi}$$

Аналогично можно получить выражения для продольной и поперечной составляющих четвертой гармоники радиальной силы:

$$P_{4d} = \frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} \frac{q m B_{rm}^2}{p d} (J_{(1)} J_{(3)} (I_{sq(1)} I_{sq(3)} - I_{sd(1)} I_{sd(3)}) + \sum_{n=1,3}^{n \leq m} J_{(n)} J_{(n+4)} (I_{sq(n)} I_{sq(n+4)} + I_{sd(n)} I_{sd(n+4)}) + \frac{B_{rm}^2}{4 p m_0 D a e} \cos 4Da - \frac{\sin 4Da}{4Da} \ddot{\varphi} + \frac{q m B_{rm}^2}{p^2 d} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} J_{(n)} I_{sd(n)} \cdot \sin \frac{pn}{2} + \frac{1}{n} \frac{\sin nDa}{nDa} \ddot{\varphi} - \frac{\sin 3Da}{9Da} J_{(1)} I_{sd(1)} + \frac{\sin Da}{Da} J_{(3)} I_{sd(3)} \ddot{\varphi}$$

$$P_{4q} = \frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} \frac{q m B_{rm}^2}{p d} (J_{(1)} J_{(3)} (I_{sq(1)} I_{sd(3)} + I_{sq(3)} I_{sd(1)}) + \frac{q m B_{rm}^2}{p^2 d} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} J_{(n)} I_{sq(n)} \sin \frac{pn}{2} + \frac{1}{n} \frac{\sin nDa}{nDa} \ddot{\varphi} + \frac{\sin 3Da}{9Da} J_{(1)} I_{sq(1)} - \frac{\sin Da}{Da} J_{(3)} I_{sq(3)} \ddot{\varphi}$$

Квадраты амплитуд радиальных сил:

$$P_{2m}^2 = P_{2d}^2 + P_{2q}^2; \quad P_{4m}^2 = P_{4d}^2 + P_{4q}^2.$$

Соответственно, квадрат действующего значения тока статора

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} (I_{sq(n)}^2 + I_{sd(n)}^2)$$

и электромагнитный момент

$$M = \frac{m}{2} p \sum_{n=1,3}^{n \leq m} n i \psi L_{m(n)} I_{sq(n)}.$$

Можно поставить задачу компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов при сохранении требуемого значения электромагнитного момента:

$$F = P_{2m}^2 + \frac{f}{1-f} \frac{B_{rm}^2}{d^2} I_s^2 = \min,$$

где $f \in (0;1)$ – вспомогательная переменная.

В целевой функции учитывается только вторая гармоника радиальной силы как оказывающая наиболее сильное влияние на шум и вибрацию машины. Четвертая гармоника радиальной силы оказывает в 16 раз меньшее влияние на магнитный шум.

Численные эксперименты показывают, что в плане снижения второй гармоники радиальной магнитной силы продольные составляющие векторов тока статора, приведенных к высшим пространственным гармоникам, играют незначительную роль в отличие от продольной составляющей спектрального вектора тока для первой пространственной гармоники. Высшие гармоники влияют на уменьшение действующего значения тока. При этом для достижения лучшего энергетического эффекта спектральные векторы тока статора для высших пространственных гармонических должны содержать лишь поперечные составляющие [3]. Их продольные составляющие должны быть равны нулю: $I_{sd(n)} = 0, n = 3, 5, \dots, m$.

Задача оптимизации решается в два этапа: на первом определяются значения q -х составляющих спектральных векторов тока статора $\bar{I}_{s(n)}$, на втором – продольная составляющая вектора тока статора, приведенного к первой пространственной гармонике [2].

На первом этапе определяется минимальное значение действующего тока:

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \sum_{n=1,3}^{n \leq m} I_{sd(n)}^2 + \sum_{n=1,3}^{n \leq m} (I_{sq(n)}^2) = \min @ \sum_{n=1,3}^{n \leq m} (I_{sq(n)}^2) = \min$$

при обеспечении требуемого момента

$$M - \frac{m}{2} p \sum_{n=1,3}^{n \leq m} n i \psi L_{m(n)} I_{sq(n)} = 0,$$

для чего вводится функция

$$F = \sum_{n=1,3}^{n \leq m} I_{sq(n)}^2 + \frac{1}{f} M - \frac{m}{2} p \sum_{n=1,3}^{n \leq m} n i \psi L_{m(n)} I_{sq(n)} \ddot{\varphi}$$

где l – вспомогательная переменная.

Тогда, решая уравнения $\frac{\partial F}{\partial I_{sq(n)}} = 0; \frac{\partial F}{\partial l} = 0$, полу-

чаем

$$I_{sq(n)} = \frac{2M}{mp} = \frac{n i \psi L_{m(n)}}{\sum_{n=1,3}^{n \leq m} (n i \psi L_{m(n)})^2} \quad (2)$$

В соответствии с (2) в многоканальной САУ на рис. 1 задаются значения составляющих $I_{sq(n)}$ векторов тока статора.

На втором этапе решается задача компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов, для чего используется функция

$$F = P_{2d}^2 + P_{2q}^2 + \frac{f}{1-f} \frac{B_{rm}^2}{d^2} I_{sd(1)}^2 = \min.$$

Решение уравнения $\frac{\partial F}{\partial I_{sd(1)}} = 0$ позволяет вычис-

лить значение продольной составляющей вектора тока $I_{sd(1)}$ для выбранного значения переменной f , определяющей требуемый уровень снижения радиальной силы.

В качестве примера на рис. 2 для 9-фазного СД ($P_H = 2300$ Вт, $\omega_H = 314$ рад/с) приведены расчетные кривые относительных суммарных значений амплитуд второй и четвертой гармоник радиальной силы $P_m^* = (P_{2m} + P_{4m} / 16)^*$ (по отношению к величине $P_m = (P_{2m} + P_{4m} / 16)$ для аналогичного по основным параметрам 3-фазного СД, питаемого синусоидальным напряжением) в функции относительного момента (по отношению к его номинальному значению) на валу для $f = 0,95$: 1 – при питании напряжением синусоидальной формы; 2 – при реализации управления по структуре на рис. 1 и $I_{sd(1)} = 0$; 3 – при реализации управления по структуре на рис. 1 с оптимизированным значением $I_{sd(1)}$.

На рис. 3 представлена зависимость относительных (по отношению к 3-фазному СД при питании напряжением синусоидальной формы) потерь в статорной обмотке 9-фазного СД в функции относительных значений амплитуд второй гармоники радиальной силы P_{2m}^* при номинальных значениях частоты вращения и момента нагрузки на валу ($f = 0,95$).

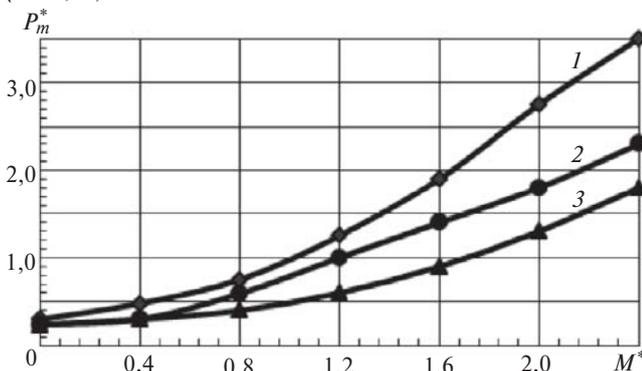


Рис. 2

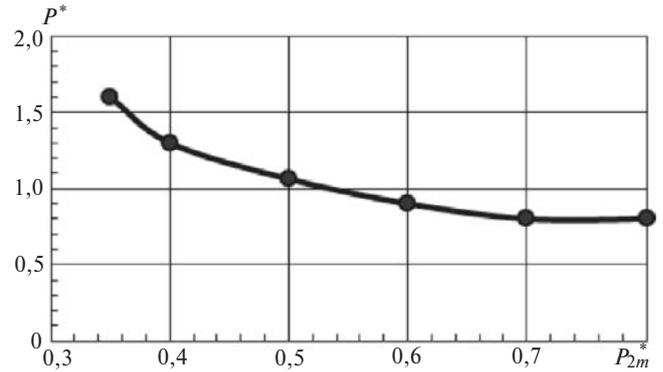


Рис. 3

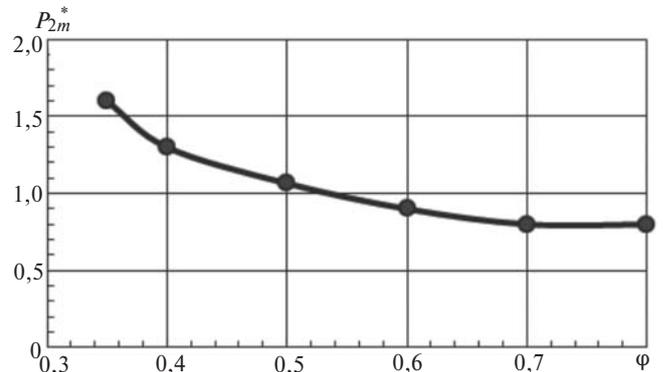


Рис. 4

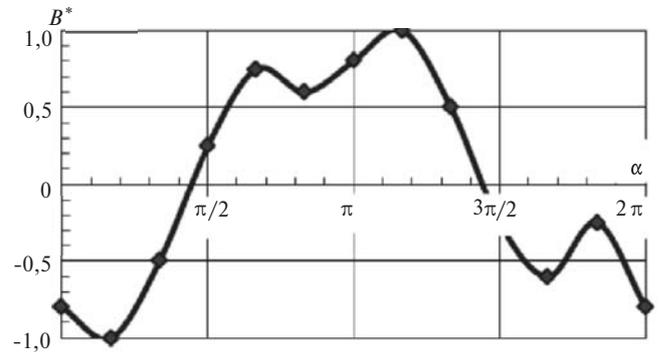


Рис. 5

На рис. 4 показана зависимость относительных значений P_{2m}^* (по отношению к P_{2m} для 9-фазного СД при $j = 0,95$) от переменной f .

На рис. 5 приведена кривая распределения относительного значения (по отношению к амплитудному) магнитной индукции в воздушном зазоре 9-фазного СД при двукратном снижении радиальной силы.

Выводы. 1. Питание многофазного СД напряжением синусоидальной формы не улучшает его виброшумовые характеристики по сравнению с 3-фазной машиной; уменьшение величины радиальных сил обеспечивает питание m -фазного СД ($m > 3$) несинусоидальным напряжением, формируемым многоканальной САУ при $I_{sd(1)}^1 = 0$.

2. Снижение уровня радиальных сил связано с ростом потерь в статорной обмотке СД, что обу-

словлено увеличением составляющей $I_{sd(1)}$ вектора тока статора, приведенного к первой пространственной гармонике; при двукратном снижении радиальной силы эти потери примерно соответствуют номинальным.

3. Оптимизация виброшумовых характеристик m -фазного СД определяет несинусоидальную форму распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. — М.: Энергия, 1981, 352 с.
2. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой. — Электротехника, 1998, № 9, с. 8–13.
3. Голубев А.Н., Лапин А.А. Многофазный синхронный электропривод. — Электричество, 2005, № 2, с. 43–47.
4. Мартынов В.А., Голубев А.Н. Моделирование электромагнитных процессов в многофазных синхронных двигателях с постоянными магнитами. — Электричество, 2013, № 9, с. 37–41.
5. Ананьев С.С., Голубев А.Н., Мартынов В.А., Белоногов В.Г., Карачев В.Д. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками и его моделирование. — Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2013, № 2, с. 62–66.

[27.03.14]

Авторы: Ананьев Сергей Станиславович окончил в 2006 г. электромеханический факультет Ива-

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 2, pp. 49–53.

новского государственного энергетического университета (ИГЭУ). В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Асинхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками» в ИГЭУ. Начальник отдела Ярославского электромашиностроительного завода ОАО «ELDIN».

Голубев Александр Николаевич окончил в 1976 г. электромеханический факультет Ивановского энергетического института (ИЭИ). В 1994 г. защитил докторскую диссертацию «Многофазный асинхронный регулируемый электропривод для высокодинамических систем подвижных установок» в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете. Профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий ИГЭУ.

Мартынов Владимир Александрович окончил в 1977 г. электромеханический факультет ИЭИ. В 1997 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию «Математическое моделирование переходных процессов электрических машин на основе численного метода расчета электромагнитного поля». Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий ИГЭУ.

Карачев Валерий Дмитриевич окончил в 2012 г. электромеханический факультет ИГЭУ. Аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий ИГЭУ.

Optimizing the Vibration and Noise Characteristics of a Synchronous Electric Drive

S.S. ANAN'YEV, A.N. GOLUBEV, V.A. MARTYNOV and V.D. KARACHEV

The article deals with a topical and intricate problem, namely, the possibility of removing noise produced by electrical machines due to radial, tangential, and axial magnetic forces. Noise combating efforts are taken not only in order to set up comfortable working environment, but also in view of purely technical considerations, because any kinds of noise are a means of machine vibration, leading to machine ageing and failure. It is shown that, in order to reduce radial magnetic forces in the gap of an m -phase machine ($m > 6-9$), measures should be taken for forcedly generating the amplitudes of current harmonic components with ordinal numbers smaller than the number of phases instead of using sine-wave power supply. Analytic expressions for determining the radial forces are obtained. The obtained expressions are used as a basis for proposing a procedure for compromise minimization of the effective stator current and magnetic noises while retaining the required electromagnetic torque. The structure of an m -phase synchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics is proposed, the control system of which is adjusted using a procedure for optimizing vibration and noise characteristics.

Key words: multiphase synchronous electric drive, vibration and noise characteristics, magnetic forces, radial magnetic force harmonic components, spectral vector

REFERENCES

1. Geller B., Gamata V. *Vysshye garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* (Higher harmonics in asynchronous machines). Moscow, Publ. Energiya, 1982, 352 p.
2. Golubev A.N., Lapin A.A. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 1998, No. 9, pp. 8–13.
3. Golubev A.N., Lapin A.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2005, No. 2, pp. 8–13.
4. Martynov V.A., Golubev A.N. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, No. 9, pp. 37–41.
5. Anan'yev S.S., Golubev A.N., Martynov V.A., Belonogov V.G., Karachev V.D. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University)*, 2013, No. 2, pp. 62–66.

Authors: Ananyev Sergei Stanislavovich (Yaroslavl, Russia) – Cand. Techn. Sci., Head of the Department, Yaroslavl electric engineering plant of JSC «ELDIN».

Golubev Aleksandr Nikolayevich (Ivanovo, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrotechnics and Electrotechnology, Ivanovo State Power Engineering University (ISPEU).

Martynov Vladimir Aleksandrovich (Ivanovo, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor, Head of the Department of Theoretical Basics of Electrotechnics and Electrotechnology, ISPEU.

Karachev Valerii Dmitriyevich (Ivanovo, Russia) – Ph. D. Student of the Department of Theoretical Basics of Electrotechnics and Electrotechnology, ISPEU.