

УДК 621.313.333

Александр Николаевич Голубев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий, Россия, Иваново, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Многофазный электропривод переменного тока с улучшенными виброшумовыми характеристиками

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из важнейших задач, возникающих при разработке современных электроприводов, является улучшение их виброшумовых характеристик. В рамках традиционных трехфазных систем подходы к решению этой задачи достаточно хорошо изучены и в определенной степени себя исчерпали. Новые широкие возможности в этом плане открывает построение электромеханической системы переменного тока на основе исполнительных двигателей с увеличенным числом фаз статорной обмотки ($m > 3$).

Материалы и методы. Использован метод исследования регулировочных характеристик m -фазного двигателя на основе спектральных векторов электромагнитных параметров, приведенных к пространственным гармоникам поля.

Результаты. Предложены многоканальные принципы построения m -фазных асинхронного и синхронного электроприводов, обеспечивающие целенаправленное формирование электромагнитного состояния исполнительного двигателя по всем его энергетическим каналам как объекта управления. Рассмотрены способы его реализации.

Выводы. Целенаправленное формирование конфигурации магнитного поля в зазоре многофазных ($m > 3$) асинхронного и синхронного двигателей является одним из эффективных способов улучшения виброшумовых характеристик электромеханической системы за счет уменьшения тангенциальных и радиальных сил.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, многофазный асинхронный двигатель, многофазный синхронный двигатель, временные гармоники, пространственные гармоники, тангенциальные силы, радиальные силы, виброшумовые характеристики

Aleksandr Nikolaevich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrical Technologies Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Multiphase AC electric drive with improved vibration-noise characteristics

Abstract

Background. One of the most important tasks when developing modern electric drives is to improve their vibration-noise characteristics. Within the framework of traditional three-phase systems, approaches to solve this problem are well studied and have exhausted themselves to some extent. In this regard, the development of an electromechanical alternating current system based on executive motors with an increased number of phases of the stator winding ($m > 3$) gives a wide range of new possibilities.

Materials and methods. The author has studied the adjustment characteristics of an m -phase motor based on spectral vectors of electromagnetic parameters reduced to spatial harmonics of the field.

Results. Multi-channel principles for the development of m -phase asynchronous and synchronous electric drives have been proposed. They ensure the targeted formation of the electromagnetic state of the executive motor along all the energy channels as a control object. The ways of its implementation have been considered.

Conclusions. The targeted formation of the magnetic field configuration in the gap of multiphase ($m > 3$) asynchronous and synchronous motors is one of the effective ways to improve the vibration-noise characteristics of an electromechanical system by reducing tangential and radial forces.

Key words: AC electric drive, multiphase asynchronous motor, multiphase synchronous motor, temporal harmonics, spatial harmonics, tangential forces, radial forces, vibration-noise characteristics

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.061-065

Введение. Одной из приоритетных задач, встающих при разработке современных электроприводов (ЭП), является оптимизация их виброшумовых характеристик. Подходы к решению этой задачи в рамках традиционных трехфазных ЭП достаточно хорошо изучены и в определенной степени себя исчерпали. В то же время новые широкие возможности в этом плане открывает построение электромеханической системы (ЭМС) переменного тока на основе исполнительных асинхронных (АД) и синхронных (СД) двигателей с увеличенным числом фаз статорной обмотки ($m > 3$). Указанное связано с двумя основными факторами. Во-первых, увеличение числа фаз при прочих равных условиях обуславливает снижение амплитуды пульсаций электромагнитного момента двигателя (при прямо пропорциональном увеличении m их частоты) [1–3], т. е. уменьшение тангенциальных сил. Это связано с тем, что увеличение числа фаз статорной обмотки обуславливает разрежение спектра пространственных гармонических магнитного поля в зазоре машины в направлении устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных, обуславливающих дополнительные постоянные составляющие электромагнитного момента двигателя при его питании несинусоидальным напряжением [1, 4].

Иллюстрацией указанному являются полученные экспериментально зависимости относительных виброскоростей (по отношению к ее максимальному значению при $f = 50$ Гц) от числа фаз для АД с номинальными мощностью $P_H = 0,32$ кВт и напряжением $U_H = 10,5$ В (рис. 1).

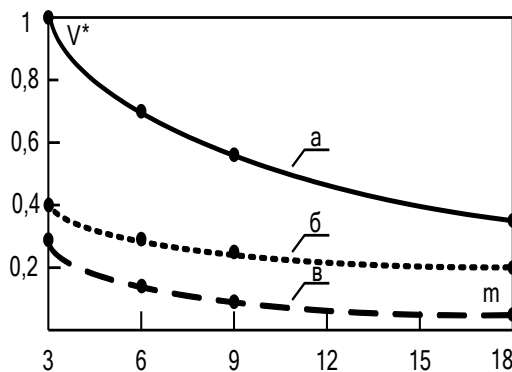


Рис. 1. Кривые относительных виброскоростей при частотах: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 2,5 Гц

С другой стороны, увеличение числа фаз существенно расширяет возможности целенаправленного формирования конфигурации магнитного поля для снижения уровня вибраций за счет уменьшения радиальных сил, действующих на статорное кольцо и вызывающих его динамическую деформацию [6]. Ниже рассматриваются подходы к улучшению виброшумовых показателей ЭМС переменного тока, а также результаты исследований, иллюстрирующих их эффективность.

Материалы и методы. Исследования проводились для случая многоканального управления АД и СД. Как было отмечено, одной из причин возникновения вибраций являются радиальные магнитные силы, значения которых на единицу площади поверхности статора определяются по формуле Максвелла квадратом магнитной индукции в зазоре машины:

$$p(\alpha) = 40B_{\delta}^2(\alpha).$$

Очевидно, что если пространственной кривой распределения индукции в зазоре придать форму меандра, то теоретически пульсации радиальной силы в зазоре $p(\alpha)$ будут отсутствовать. Для статора и ротора радиальные составляющие магнитной индукции (зазор принимается гладким и $\mu \rightarrow \infty$) можно получить путем суммирования индукций отдельных фаз статора и ротора. Введя спектральный вектор электромагнитных переменных, приведенный к v -й пространственной гармонической (m -фазная обмотка выполнена в виде m/N N -фазных симметричных групп) [5]

$$\bar{Y}_{(v)} = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^{m/N} \sum_{k=1}^N y_{ik} e^{j\pi v \left[\frac{2}{N}(k-1) + \frac{1}{m}(i-1) \right]},$$

можно записать формулу для r -й гармонической радиальной силы [5]:

$$p_{rm} = \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} \left| \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq 2k}}^{r-1} H_{(r)l} \bar{I}_{m(l)} \bar{I}_{m(r-l)} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 2k}}^m J_{(r)n} \bar{I}_{m(n+r)} \hat{I}_{m(n)} \right|,$$

где $H_{(r)l}$ и $J_{(r)n}$ – алгебраические функции коэффициентов распределения обмоток для v -й гармоники поля и порядка r радиальной силы [6].

С учетом уменьшения плеча радиальной силы с ростом порядка r на практике целесообразно ограничиться значениями $r \leq 4$. Тогда с учетом целевой функции минимизации потерь

$$\frac{I_{m(3)}^2}{I_{m(1)}^2} + \frac{I_{m(5)}^2}{I_{m(1)}^2} + \frac{I_{m(7)}^2}{I_{m(1)}^2} = \min$$

практические условия минимизации шумов [5] следующие:

$$p_{2\max} \leq 0,2 \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} I_{m(1)}^2;$$

$$p_{4\max} \leq 0,1 \frac{\mu_0 q^2 m^2}{4\pi^2 \delta^2} I_{m(1)}^2.$$

На основе этих условий определяются желаемые соотношения

$$I_{m(v)} / I_{m(1)}.$$

Реализацию векторного принципа управления АД с улучшенными виброшумовыми по-

казателями обеспечивает ЭП, функциональная схема которого приведена на рис. 2, где для каждого из векторов тока предусмотрены два канала регулирования с регуляторами интегрального типа (БРТ). Алгоритм функционирования БКФ приведен в [5].

Расчетные значения радиальных магнитных сил для 9-фазного АД мощностью 2,5 кВт (номинальное напряжение 10,5 В) в данном ЭП приведены в таблице. Анализ показывает, что наиболее значимая в плане создания вибраций вторая пространственная гармоника радиальной

силы в 8 раз меньше, чем при работе АД при синусоидальном питании, и в 3 раза меньше, чем при простейшей прямоугольно-ступенчатой форме питающего напряжения. Аналогично виброскорость, обусловленная радиальными магнитными силами, также уменьшилась соответственно в 8 и 3 раза. На рис. 3 приведена расчетная кривая распределения магнитной индукции вдоль расточки магнитопровода 9-фазного АД в векторном ЭП при номинальной нагрузке.

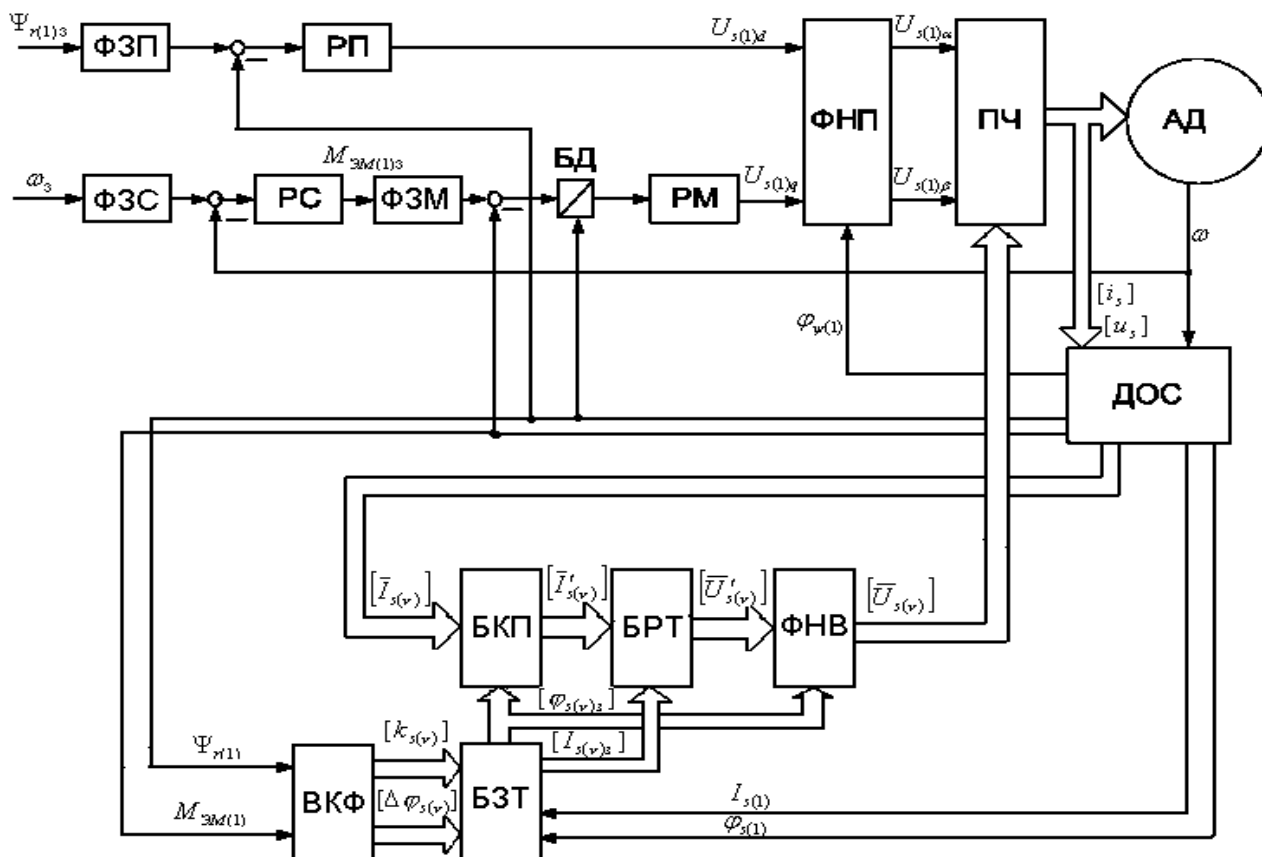
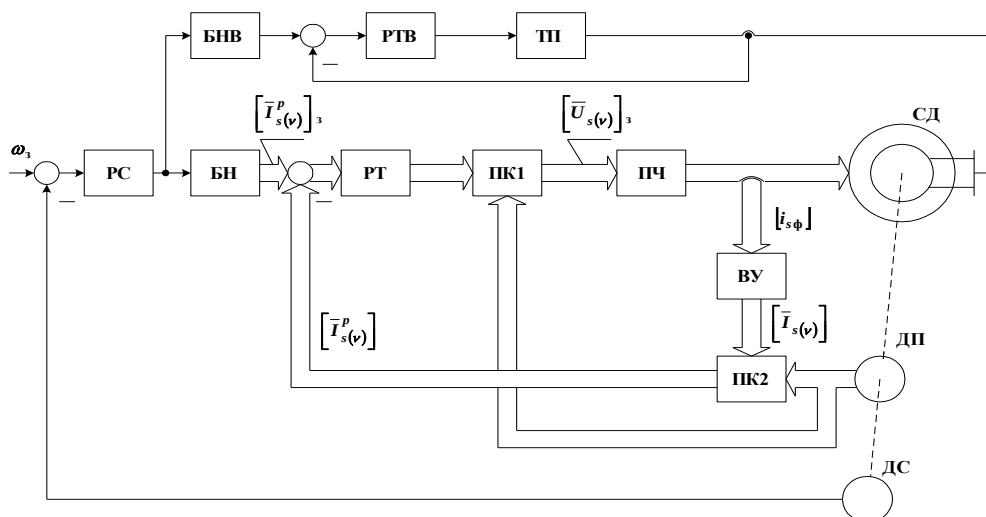


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема m -фазного ЭП: ФЗП, ФЗМ и ФЗС – фильтры задания потоко-сцепления, момента и скорости соответственно; РП, РМ и РС – регуляторы потоко-сцепления, момента и скорости соответственно; БД – блок деления; ФНП – формирователь вектора напряжения $\bar{U}_{s(1)}$; ДОС – датчик обратных свя-зей; БКП – блок координатных преобразований; БРТ – блок регуляторов токов $\bar{I}_{s(v)}$; ФНВ – формирователь век-торов напряжений; ВКФ – блок вычисления коэффициентов усиления и фазовых сдвигов векторов $\bar{I}_{s(v)}$ токов; БЗТ – блок задания токов $\bar{I}_{s(v)}$

Значения пространственных гармоник радиальных магнитных сил в 9-фазном АД

Режим работы	p_{2m} отн	p_{4m} отн
$M = M_H, \omega = \omega_H$	0,128	0,044
$M = 0,1 M_H, \omega = \omega_H$	0,143	0,055
$M = M_H, \omega = 0,001 \omega_H$	0,137	0,057
Ограничение момента ($M = 2M_H, \omega = \omega_H$)	0,596	0,204
Синусоидальное питание ($M = M_H, \omega = \omega_H$)	1,012	0

Как и в случае асинхронного ЭП, построение многофазной ЭМС на базе СД для наиболее полной реализации преимуществ, связанных с увеличением числа фаз статорной обмотки, следует осуществлять по многоканальному принципу, при котором каждой v -й подструктуре m -фазного СД как объекта управления соответствует свой канал регулирования [7]. Функциональная схема такого ЭП приведена на рис. 4.



Следует отметить, что для улучшения энергетических показателей спектральные векторы $\bar{I}_{S(v)} v > 1$ должны содержать только поперечные составляющие, т. е. $\bar{I}_{sd(v)} = 0$.

На практике для упрощения реализации ЭМС количество каналов управления можно ограничить числом, меньшим $B = m[(N-1)/2 + 0,5]/N$, так как энергетика СД в основном определяется низкочастотными гармоническими. С учетом этого для СД с $m \geq 7 \dots 9$ можно ограничить число каналов ($v \leq 7 \dots 9$), положив для высших порядков $v \bar{U}_{S(v)} = 0$.

Поставим задачу компромиссной минимизации магнитных шумов и действующего значения тока статора (при ограничении рассматриваемых гармонических) при обеспечении необходимого электромагнитного момента:

$$F_1 = p_{2m}^2 + \frac{\varphi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_s^2 = \min,$$

где $\phi \in (0;1)$ – некоторая вспомогательная функция.

В приведенной целевой функции учитывается только вторая гармоническая радиальной силы, определяющая основную величину

вибраций СД, так как вклад гармоники $r = 4$ в магнитный шум меньше в 16 раз.

Решение задачи оптимизации осуществляется по следующему алгоритму.

Сначала вычисляются составляющие векторов тока статора исходя из минимизации его действующего значения. Для этого вводится функция

$$F_2 = \sum_{v=13}^{v < m} I_{sq(v)}^2 + \lambda \left(M - \frac{m}{2} \rho \sum_{v=13}^{v < m} v i_f' L_{m(v)} I_{sq(v)} \right),$$

где $L_{m(v)}$ – параметр схемы замещения m -фазного СД [8]; p – число пар полюсов; λ – вспомогательная функция.

Решая уравнения $\frac{\partial F_2}{\partial I_{sg(v)}} = 0$ и $\frac{\partial F_2}{\partial \lambda} = 0$,

находим выражение для задающих значений $I_{sq(v)}$:

$$I_{sq(v)} = \frac{2M}{mp} \frac{vL_{m(v)}i_f'}{\sum_{v=13}^{v<m} (vL_{m(v)}i_f')^2}.$$

На втором этапе решается задача минимизации магнитных вибраций и тока статора с использованием функции

$$F_3 = p_{2d}^2 + p_{2q}^2 + \frac{\varphi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_{sd(1)}^2 = \min.$$

Решение уравнения $\frac{\partial F_3}{\partial I_{sd(1)}} = 0$ дает за-

данную величину $I_{sd(1)}$ для принятого значения параметра φ , определяющего требуемый уровень радиальной силы.

Проведенные численные эксперименты показали эффективность предложенного алгоритма оптимизации виброшумовых характеристик СД. В частности, для 9-фазного СД мощностью 2,5 кВт относительное значение суммарных амплитуд гармоник радиальных сил

$p_m^* = (p_{2m} + p_{4m} / 16)^*$ (по отношению к аналогичным параметрам 3-фазного СД той же мощности, питаемого синусоидальным напряжением) при номинальной нагрузке ($\varphi = 0,95$) равно 0,5, а при двойном моменте на валу СД – 0,45. При $I_{sd(1)} = 0$ указанные отношения равны соответственно 0,8 и 0,64.

Выводы. Целенаправленное формирование конфигурации магнитного поля в зазоре многофазных ($m > 3$) АД и СД является одним из эффективных способов улучшения виброшумовых характеристик ЭМС за счет уменьшения тангенциальных и радиальных сил.

Исследование предложенных структур асинхронного и синхронного ЭП с оптимизированными виброшумовыми показателями показало эффективность принятых решений.

Список литературы

1. McLean G.W., Nix G.F., Alwash S.R. Performance and design of induction motors with square-wave excitation // Proc. IEE. – 1969. – Vol. 116, No. 8. – P. 1405–1411.
2. Бражников В.Ф., Соустин Б.П. Теория установившихся электромагнитных процессов в многофазном асинхронном инверторном электроприводе: в 2 ч. / Краснояр. ун-т. – Красноярск, 1985. – 330 с.
3. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.
4. Кац Ю.Г. Взаимодействие временных и пространственных гармоник в многофазной электрической машине // Вопросы теории и расчета мощных электромашинно-тиристорных комплексов. – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1979. – С. 90–99.
5. Построение электроприводов переменного тока с пониженным уровнем шумов / С.С. Ананьев,

А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, и др. // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 30–35.

6. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

7. Голубев А.Н. Синхронный многофазный электропривод с управлением по многоканальному принципу // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 62–67.

8. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.

References

1. McLean, G.W., Nix, G.F., Alwash, S.R. Performance and design of induction motors with square-wave excitation. *Proc. IEE*, 1969, vol. 116, no. 8, pp. 1405–1411.
2. Brazhnikov, V.F., Soustin, B.P. *Teoriya ustannovivshikhsya elektromagnitnykh protsessov v mnogofaznom asinkhronnom invertornom elektroprivoде: v 2 ch.* [Theory of steady-state electromagnetic processes in a multiphase asynchronous inverter electric drive: in 2 part]. Krasnoyarsk, 1985. 330 p.
3. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy [Mathematical model of a synchronous motor with a multiphase stator coil]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.
4. Kats, Yu.G. Vzaimodeystvie vremennykh i prostranstvennykh garmonik v mnogofaznoy elektricheskoy mashine [Interaction of temporal and spatial harmonics in a multiphase electric machine]. *Voprosy teorii i rascheta moshchnykh elektromashinno-tiristornykh kompleksov* [Theory and calculation issues of powerful electric machine-thyristor complexes]. Leningrad: VNIIElektromash, 1979, pp. 90–99.
5. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N., Martynov, V.A., Karachev, V.D., Aleynikov, A.V. Postroenie elektroprivodov peremennogo toka s ponizhennym urovnem шумов [Construction of AC electric drives with a reduced noise level]. *Elektrotehnika*, 2015, no. 5, pp. 30–35.
6. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.
7. Golubev, A.N. Sinkhronnyy mnogofaznyy elektroprivoд s upravleniem po mnogokanal'nomu printsipu [Synchronous multiphase electric drive with multichannel control]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 62–67.
8. Golubev, A.N., Lapin, A.A. Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy [Mathematical model of a synchronous motor with a multiphase stator coil]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.