

УДК 621.313.333

Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками на основе исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами

В.Г. Белоногов, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: BelonogovVladimir@yandex.ru, alenikgo@yandex.ru, zav@toe.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Снижение уровня шумов и вибраций исполнительного электропривода является одной из важнейших задач при его разработке. Методы решения данной проблемы в рамках традиционных трехфазных систем достаточно хорошо изучены и практически исчерпали себя. Одним из новых вариантов построения электропривода, в частности синхронного, с улучшенными виброшумовыми характеристиками является его реализация на основе исполнительного двигателя с увеличенным числом фаз. Однако известные подходы к синтезу электромеханической системы на его основе не учитывают специфику m -фазной ($m > 3$) машины как объекта управления.

Материалы и методы: Исследования проведены с использованием математического аппарата приведенных спектральных векторов и программного пакета для моделирования полей методом конечных элементов Elcut.

Результаты: Показано, что увеличение числа фаз исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами позволяет улучшить виброшумовые характеристики электропривода на его основе за счет уменьшения тангенциальных и радиальных магнитных сил. Предложена методика оптимизации виброшумовых характеристик синхронного электропривода, а также метод создания полевой модели синхронного двигателя с использованием среды Elcut.

Выводы: Увеличение числа фаз исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами является перспективным вариантом построения электропривода с пониженным уровнем шумов. Предложенный вариант построения многоканальной САУ обеспечивает уменьшение радиальных магнитных сил.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный двигатель, виброшумовые характеристики, математическая модель, многоканальная САУ, постоянные магниты, векторное управление.

Synchronous electrical drive with optimized vibronoise characteristics based on actuating synchronous motors with permanent magnets

V.G. Belonogov, A.N. Golubev, V.A. Martynov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: BelonogovVladimir@yandex.ru, alenikgo@yandex.ru, zav@toe.ispu.ru

Abstract

Background: Noise and vibration reduction of the electric drive is one of the most relevant goals in its development. Methods for solving this problem in the framework of the traditional three-phase systems have been well studied and their capabilities are practically exhausted. One of the new design variants of the electric drive, of the synchronous type, in particular, with improved vibronoise characteristics is its implementation on the basis of the actuating motor with an increased number of phases. However, the known approaches to the synthesis of the electromechanical system on its basis ignore the specificity of the m -phase ($m > 3$) machine as a control object.

Materials and methods: The study has employed mathematical tools of reduced spectral vectors and software package for field simulation by the Elcut finite-element method.

Results: It is shown that increasing the number of phases of the actuating synchronous drive with permanent magnets helps optimize its vibronoise characteristics due to reduction of tangential and radial magnetic forces. A procedure of synchronous electrical drive vibronoise characteristics optimization has been suggested, as well as a method of creating a field model using the Elcut environment.

Conclusion: It has been shown that increasing the number of phases of the actuating permanent magnet synchronous motor (PMSM) is a promising option for constructing low-noise ED. The suggested variant of constructing a multi-channel automatic control system (ACS) presented here provides radial magnetic forces reduction.

Key words: synchronous electrical drive, multiphase drive, vibronoise characteristics, simulator, multi-channel ACS, permanent magnets, vector control.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.023-027

Борьба с шумом электрических машин по-прежнему остается актуальной задачей, что обусловлено стремлением создать бесшумную ра-

бочую среду, а также в связи с тем, что вызывающие шум вибрации частей машины часто являются причиной отказов и старения машины.

Одной из основных составляющих общего шума электрической машины является магнитный шум, вызываемый изменяющимися во времени и пространстве магнитными силами [1]. Увеличение числа фаз статорной обмотки исполнительного двигателя расширяет возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля в зазоре машины, в частности синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), а следовательно, позволяет оптимизировать виброшумовые характеристики электропривода (ЭП).

Переход на многофазный ($m > 3$) вариант исполнения двигателя уже сам по себе обуславливает уменьшение тангенциальных составляющих магнитных сил, вызванных пульсациями момента на валу СД. Это объясняется разрежением гармонического спектра поля многофазной машины в направлении устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных, обуславливающих появление дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента [2, 3].

Как известно [4, 5], при описании процессов в 3-фазных машинах каждой электромагнитной переменной ставится в соответствие один двухкоординатный вектор на плоскости. При числе фаз $m > 3$ это приводит к потере однозначной связи между реальными фазными переменными и проекциями результирующего вектора, т. е. к неадекватности математического описания двигателя. Для решения данной задачи был предложен аппарат приведенных спектральных векторов [2]. Его суть заключается в представлении каждой временной координаты вектора состояния m -фазной машины в виде линейной комбинации обобщенных векторов на плоскости. Эти векторы определенным образом сопрягаются со спектром пространственных гармоник поля. Каждый включает в себе соответствующую только ему часть энергетического потока электрической машины. При этом достаточно легко устанавливается иерархия векторов в отношении их влияния на общую энергетику электромагнитного преобразователя. Для m -фазного двигателя, обмотка которого соединена в m/N N -фазных симметричных групп, не связанных гальванически, некоторый электромагнитный параметр y_{ki} k -й фазы i -й N -фазной системы статорной обмотки однозначно определяется через $\frac{m}{N} \left[\frac{(N-1)}{2} + 0,5 \right]$ (где $[\]$ – оператор выделения целой части) векторов на плоскости вида

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

Данный вектор называется спектральным вектором, приведенным к v -й пространственной гармонической [2].

Для наиболее полной реализации преимуществ многофазного ЭП был предложен многоканальный принцип построения САУ с m -фазным СДПМ (рис. 1), обеспечивающий целенаправленное формирование электромагнитного состояния в блоке нелинейности (БН) по всем энергетическим каналам системы (каждый канал определяется своим вектором $\bar{Y}_{(v)}$), что обеспечивает, на основе принудительной ориентации векторов тока статора для высших пространственных гармоник, получение дополнительных постоянных составляющих момента [2, 6].

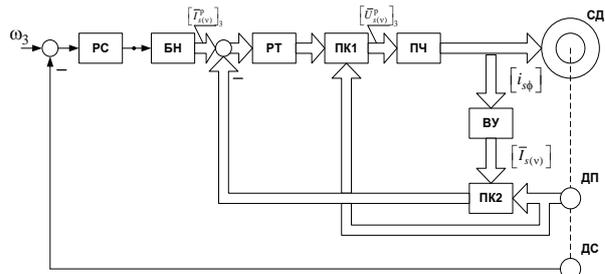


Рис. 1. Структура многоканальной САУ с m -фазным двигателем: РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПК-преобразователи координат; ВУ – вычислительное устройство; БН – блок нелинейности

В качестве примера на рис. 2 для 9-фазного синхронного ЭП мощностью 6 кВт с принципом управления, реализующим ортогональную ориентацию векторов $I_{s(v)}^p$ (где индекс « p » указывает на систему координат, связанную с ротором) относительно продольной оси ротора, приведены полученные путем имитационного моделирования кривые составляющих электромагнитного момента от гармоник $v = 1, 3, 5, 7$ при пуске на номинальную скорость с номинальной нагрузкой на валу.

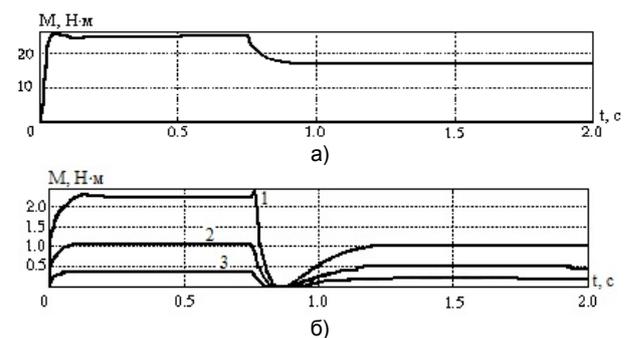


Рис. 2. Кривые переходного процесса при пуске на номинальную скорость 9-фазного ЭП: а – $M_{эм(1)}(t)$; б – 1 – $M_{эм(3)}(t)$; 2 – $M_{эм(5)}(t)$; 3 – $M_{эм(7)}(t)$

Другой составляющей магнитных сил, вызывающих вибрации, является действующая в любой точке воздушного зазора радиальная магнитная сила, величина которой пропорциональна квадрату индукции в зазоре. Эта сила вызывает динамические деформации статорного кольца, которые, соответственно, являются

источником магнитных шумов [1]. Особенно большие вибрации могут вызвать второй и четвертый порядки этой силы.

Для уменьшения радиальных сил необходимо задавать соответствующие значения составляющих векторов тока статора $I_{sd(v)}^p$ в многоканальной САУ. Значения поперечных и продольных составляющих приведенных векторов тока статора определяются с учетом минимизации действующих значений тока статора

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \left(I_{sd(1)}^2 + \sum_{v=1,3}^{v < m} I_{sq(v)}^2 \right) = \min,$$

$$\sum_{v=1,3}^{v < m} I_{sd(v)}^2 = \min,$$

при обеспечении требуемого момента

$$M - \frac{m}{2} Z_p \sum_{v=1,3}^{v > m} v \cdot i'_f \cdot L_{m(v)} I_{(v)} = 0$$

и компромиссной минимизации действующего значения тока статора и магнитных шумов [4]

$$F = P_{2d}^2 + P_{2d}^2 + \frac{\varphi}{1 - \varphi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_{sd(1)}^2 = \min,$$

где P_2 – магнитная сила второго порядка.

Отсюда путем соответствующих преобразований и введения вспомогательных переменных можно получить следующие выражения для поперечных и продольных составляющих приведенных векторов тока статора:

$$I_{sq(v)} = \frac{2M}{mZ_p} \frac{v i'_f L_{m(v)}}{\sum_{\mu=1,3}^{\mu < m} (\mu \cdot i'_f L_{m(\mu)})^2};$$

$$I_{sd(1)} = \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} - q} - \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} + q} - \frac{b}{2a},$$

где a , b , p и q – некоторые алгебраические функции индукции магнита ротора и конструктивных параметров СДПМ [6].

При этом в фазных токах исполнительного СДПМ присутствуют гармоники только с порядковыми номерами, меньшими числа фаз, определяющие дополнительные постоянные составляющие момента. Для достижения лучшего энергетического эффекта приведенный вектор тока статора для каждой гармоники должен содержать лишь поперечную составляющую, продольная составляющая (кроме $I_{sd(1)}$) должна быть равна нулю:

$$I_{sd(v)} = 0, v = 3, 5, \dots, < m.$$

Необходимым условием корректного исследования виброшумовых характеристик является использование полевой модели исполнительного двигателя. В качестве исполнительного двигателя в исследованиях был принят 9-фазный СДПМ ($P_n = 2300$ Вт, $\omega_n = 314$ рад/с).

Для решения задачи по созданию полевой модели был применен пакет *ELCUT*, интерактивный программный комплекс для моделиро-

вания полей методом конечных элементов. Применение *ELCUT* позволило при меньшем количестве допущений существенно повысить точность и адекватность расчета поля в СДПМ и его важнейших характеристик. Одной из важнейших особенностей комплекта является то, что в данной среде легко создать свои собственные настройки с использованием любого языка программирования.

Данная особенность в полной мере используется в виде программы, реализованной нами на языке *Visual C++*. В программе прописаны формулы [7, 8] для построения геометрии электрических машин. Исходя из задания на исполнительный двигатель, подпрограмма рассчитывает геометрию всех частей электрической машины и дает программные указания пакету *ELCUT* на построение полевой модели исполнительного двигателя. При этом учитывают нелинейные свойства стали, магнита, материалы проводников и т.д.

Имея алгоритм управления и модель исполнительного двигателя, в среде *Matlab Simylink* была собрана модель САУ (рис. 3).

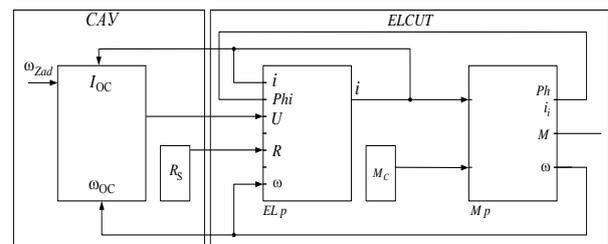


Рис. 3. Модель САУ синхронного привода с исполнительным двигателем в среде *ELCUT*

Блок расчета токов *ELp* вычисляет значения токов фаз статора через уравнения состояния ветвей:

$$[u] = \omega \frac{d[\psi_0]}{d\alpha} + [L] \frac{d[i]}{dt} + [R][i], \quad (1)$$

где $[u]$ – матрица-столбец напряжений; ω – угловая скорость вращения ротора; $[\psi_0]$ – матрица потокосцеплений статора, обусловленная действием только постоянных магнитов ротора (так как потокосцепления каждой фазы имеют одинаковую зависимость и сдвинуты на $\frac{2\pi}{m}$ радиан,

то заранее при помощи *ELCUT* вычисляем зависимость $\psi(\alpha)$ для одной фазы, а во время расчета заполняем таблицу на каждом шаге); α – угол поворота ротора; $[L]$ – матрица самоиндуктивностей и взаимоиндуктивностей статорной обмотки (заполняется при пуске модели без ферромагнитных вставок на роторе); $[i]$ – матрица-столбец токов; $[R]$ – матрица сопротивлений статорной обмотки.

После преобразований уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d[i]}{dt} = [L^{-1}] \left([U] - \omega \frac{d[\psi_0]}{d\alpha} - [R][i] \frac{d[i]}{dt} \right).$$

Блок расчета момента M_p вычисляет момент при помощи программного комплекса *ELCUT*, считая ротор двигателя неподвижным и задавая текущие значения токов и угол поворота ротора.

Уравнение движения имеет вид

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_{\Delta} - M_C); \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega,$$

где M_C – момент нагрузки:

$$\begin{cases} M_C = const, \text{ если } \omega > 0, \\ M_C = const, \text{ если } \omega < 0, \\ M_C = M_{\Delta}, \text{ если } \omega = 0 \text{ и } M_{\Delta} = const + M_{\text{покоя}}, \end{cases}$$

где $M_{\text{покоя}}$ – добавочная составляющая трения покоя; M_{Δ} – электромагнитный момент.

Ввиду существенной длительности расчета была также предложена математическая модель исполнительного двигателя (рис. 4), которая может быть реализована в среде *MatLab (Simulink)*. При этом для адекватности расчета некоторые параметры машины были заранее рассчитаны в среде *ELCUT* полевой модели СДПМ.

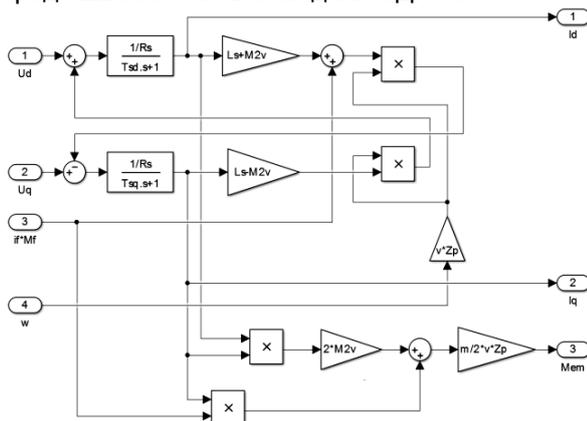


Рис. 4. Подструктура модели m -фазного СДПМ для v -й пространственной гармонической

В качестве примера на рис. 5 представлены кривые относительной магнитной индукции, полученные в результате исследований на математической модели САУ.

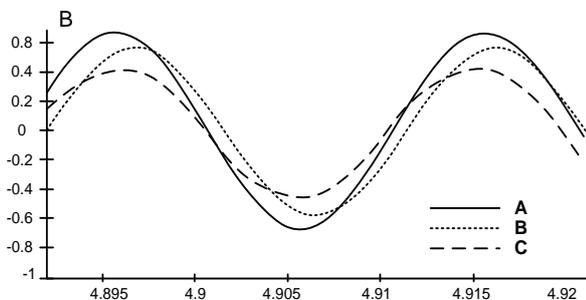


Рис. 5. Графики распределения магнитной индукции в зазоре: А – 3-фазного СДПМ при синусоидальных токах; В – 9-фазного СДПМ при синусоидальных токах; С – 9-фазного СДПМ с предложенным алгоритмом задания векторов тока

Результаты исследований показывают (см. таблицу), что 9-фазный ЭП с многоканальным принципом построения САУ при синусоидальном питании обеспечивает (при сохранении величины момента) уменьшение амплитуды магнитной индукции, по сравнению с 3-фазным ЭП, на 14 %, а 9-фазный ЭП с многоканальным принципом построения САУ, реализующей предложенный выше алгоритм снижения радиальных сил, обеспечивает уменьшение амплитуды магнитной индукции, по сравнению с 3-фазным ЭП, на 37 %. Это, соответственно, приводит к снижению магнитного шума и вибраций.

Тип СДПМ	Индукция ротора, Тл	Индукция статора, Тл	Полная индукция, Тл
3-фазный СДПМ (sin)	0,6	0,3024	0,717
9-фазный СДПМ (sin)	0,6	0,1706	0,623
3-фазный СДПМ (алгоритм)	0,6	0,2037	0,452

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. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
5. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
6. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками и его моделирование / С.С. Ананьев, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 62–66.
7. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.
8. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

References

1. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous drives]. Moscow, Energiya, 1981. 352 p.
2. Golubev, A.N., Lapin, A.A. *Matematicheskaya model' sinkhronnogo dvigatelya s mnogofaznoy statornoy obmotkoy* [Mathematical model of asynchronous motor with a multi-phase stator winding]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 8–13.
3. Golubev, A.N., Lapin, A.A. *Mnogofaznyy sinkhronnyy elektroprivod* [Multi-phase synchronous electric drives]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 2, pp. 43–47.
4. Onishchenko, G.B. *Elektricheskij privod* [Electric drives: university study-guide]. Moscow, Akademiya, 2013. 288 p.
5. Veynger, A.M. *Reguliruemyy sinkhronnyy elektroprivod* [Controlled synchronous electric drives]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 224 p.
6. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N., Martynov, V.A., Belonogov, V.G., Korolev, V.D. *Sinkhronnyy elektroprivod s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami i ego modelirovanie* [Synchronous drive with improved vibration characteristics and its simulation]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 3, pp. 62–66.

7. Kopylov, I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1993. 464 p.

8. Balagurov, V.A., Galteev, F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Permanent magnet electric power generators]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 280 p.

Белоногов Владимир Григорьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
начальник учебного военного центра,
e-mail: BelonogovVladimir@yandex.ru

Голубев Александр Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: alenikgo@yandex.ru

Мартынов Владимир Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: zav@toe.ispu.ru