

engineering devices using a magnetic field finite element modeling library]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 55–61.

14. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhev, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [De-

velopment of a non-linear model of a three-phase transformer to study the effect of asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.

15. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

Тихонов Андрей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, e-mail: aitispu@mail.ru

Tikhonov Andrey Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Physics, e-mail: aitispu@mail.ru

Стулов Алексей Вадимович,

ООО «Трансформер», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по техническому развитию, e-mail: alxstl@mail.ru

Stulov Alexey Vadimovich,

Transformer LLC, PhD in Engineering, Deputy Director General for Technical Development, e-mail: alxstl@mail.ru

Снитко Ирина Сергеевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Snit'ko Irina Sergeevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Подобный Александр Викторович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Podobny Alexander Viktorovich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

УДК 621.313.333

РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫМ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ВИБРОШУМОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.Н. ГОЛУБЕВ, В.Г. БЕЛОНОГОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: Belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Ужесточающиеся требования к характеристикам электромеханических систем включают в себя задачу улучшения виброшумовых показателей электропривода. В настоящее время эта задача решается в основном в рамках традиционных трехфазных систем управления. Новые возможности ее решения открывает переход на многофазный вариант построения электропривода. Целью исследования является улучшение виброшумовых характеристик электропривода за счет разработки системы многофазного управления, обеспечивающей целенаправленное формирование конфигурации поля в зазоре многофазной электрической машины.

Материалы и методы. Для проведения исследований использована модель многофазного синхронного двигателя, учитывающая пространственную несинусоидальность распределения поля в зазоре. Модель позволяет представить структуру двигателя как объекта управления в виде совокупности параллельных подструктур, число которых зависит от числа фаз.

Результаты. Предложена методика конструкторского проектирования синхронного двигателя при произвольном числе фаз обмотки на базе полевой модели машины. Корректность получаемых с помощью методики результатов обеспечивается учетом реальной геометрии магнитопровода и насы-

щения стали. Предложена многоканальная система управления электроприводом, отличающаяся целенаправленным формированием конфигурации поля в зазоре многофазной электрической машины. Разработана расчетная модель электропривода, сочетающая в себе полевую модель двигателя и систему управления. Модель двигателя реализована в программном комплексе EICut, модель системы управления – в комплексе MatLab (Simulink).

Выводы. По сравнению с традиционным трехфазным исполнением электропривода при синусоидальном питающем напряжении, предложенные варианты формирования поля в зазоре синхронного двигателя обеспечивают уменьшение пондеромоторной силы на 8–14 %. Инженерную методику проектирования m -фазного синхронного двигателя с постоянными магнитами и структуру многоканальной САУ предлагается использовать при разработке электроприводов с улучшенными виброшумовыми характеристиками.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный двигатель, виброшумовые характеристики, программный комплекс EICut, многоканальная система управления электроприводом

THE DEVELOPMENT OF MULTI-CHANNEL CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-PHASE SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH IMPROVED VIBRATION NOISE CHARACTERISTICS

A.N. GOLUBEV, V.G. BELONOGOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: Belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Abstract

Background. Constantly increasing requirements for the performance of electromechanical systems include the task of improving the vibration and noise characteristics of the electric drive. Currently, this problem is solved mainly by using traditional three-phase systems. The transition to a multiphase version of the electric drive construction opens up new opportunities for its solution. The aim of the study is to improve the vibration and noise characteristics of the electric drive through the development of a multiphase control system that provides targeted formation of the field configuration in the gap of a multiphase electric machine.

Materials and methods. To conduct the research, the model of a multiphase synchronous motor proposed by the authors was used. The model considers the spatial non-sinusoidality of the field distribution in the gap and enables to represent the engine as a set of parallel substructures, the number of which depends on the number of phases.

Results. The technique to design a synchronous motor with an arbitrary number of winding phases based on the field model of the machine has been proposed. The correctness of the results obtained is ensured by the real geometry of the magnetic circuit and steel saturation. The multi-channel control system of the electric drive, characterized by the targeted formation of field configuration in the gap of a multiphase electric machine has been proposed. The calculation model of the electric drive has been developed. The model combines the field model of the engine and the control system. The engine model is implemented in the EICut software package, the control system model is implemented in the MatLab (Simulink) complex.

Conclusions. Compared to the traditional three-phase design of the electric drive with a sinusoidal supply voltage, the options for forming a field in the gap of a synchronous motor considered in the article provide a reduction in ponderomotive force by 8–14 %. The engineering methodology for designing an m -phase synchronous permanent magnet motor with permanent magnets and the structure of the multi-channel control system can be applied when developing electric drives with improved vibration and noise characteristics.

Key words: synchronous electrical drive, multiphase drive, vibronoise characteristics, EICut software package, multi-channel control system for electric drive

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.043-050

Введение. Перспективным вариантом построения современной электромеханической системы является ее реализация на основе исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Эти машины имеют относительно простую кон-

струкцию, отличаются высокой надежностью, в течение длительного времени (от 5 до 10 лет, а в космической промышленности 15 лет и более) сохраняют первоначальные магнитные характеристики

[1, 2, 3] ¹. Уже очевидно, что улучшение характеристик и увеличение удельной мощности таких машин дает значительный экономический эффект и при этом область их применения постоянно расширяется. Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам они являются наиболее перспективными электрическими машинами в диапазоне малых и средних мощностей, особенно для моментных систем электропривода (ЭП), как уже отмечалось, конструктивно просты, надежны, имеют абсолютно жесткие механические характеристики и не требуют затрат энергии на возбуждение.

Один из вопросов, который необходимо решать при создании ЭП с улучшенными технико-экономическими показателями, является улучшение его виброшумовых характеристик. Как показывает практика и анализ литературы [4], этому вопросу уделяется самое пристальное внимание. Задача устранения шума связана как с физиологией человека, то есть стремлением создать наиболее комфортные условия труда работнику или бесшумную среду пользователю, так и с чисто технико-экономическими факторами, такими как надежность и срок службы, ведь известно, что любой шум вызван вибрацией частей машины. Вибрирующие части испытывают большее механическое напряжение и в большом числе случаев являются причиной отказов и уменьшения гарантированного срока эксплуатации машин. Кроме того, электрические машины, как правило, работают в комплексе с другими устройствами и механизмами, вибрации электрических машин могут быть причиной вибрации всего агрегата.

Материалы и методы. *Магнитные шумы.* Источником магнитного шума являются магнитные силы, изменяющиеся во времени и пространстве и действующие между активными частями машины. В случае синхронных машин – это тангенциальные и радиальные магнитные силы, действующие между статором и ротором, изменяющиеся во времени и пространстве [5].

Переход на увеличенное число фаз ($m > 3$) статорной обмотки двигателей переменного тока, в частности СДПМ, помимо улучшения основных энергетических и

регулируемых характеристик ЭП [5] позволяет эффективно решать обозначенную выше задачу путем целенаправленного формирования геометрии поля в зазоре машины. Следует указать, что многофазный вариант построения ЭП автоматически снижает вибрации и шумы, вызванные тангенциальными силами, обусловленными пульсациями электромагнитного момента. Это связано с устранением из спектра поля асинхронных пространственных гармоник [6]. Вместе с тем увеличение числа фаз без принятия специальных дополнительных мер по формированию конфигурации поля не решает задачи уменьшения радиальных сил, действующих между статором и ротором и вызывающих изменяющуюся во времени деформацию статорного кольца, что и является причиной соответствующих ей шумов. Радиальная сила пропорциональна квадрату индукции в воздушном зазоре. Из этого следует, что оптимальной в указанном отношении формой распределения поля в зазоре является меандр или трапецеидальная. Выражения для ортогональных составляющих магнитной индукции в зазоре и соответствующих им сил достаточно просто могут быть получены из упрощенной модели машины, базирующейся на использовании допущений о гладком (равномерном) воздушном зазоре, т.е. отсутствии зубчатости сердечника статора, а также отсутствии насыщения [6, 7].

Программа моделирования. Для корректного анализа данного вопроса необходимо оперировать с адекватной математической моделью СДПМ, учитывающей реальную геометрию магнитопровода и пространственное распределение обмотки, а также насыщения стали. Такой подход может быть реализован на использовании современных программных средств, к которым относится отечественный интерактивный программный комплекс EICut. Важным достоинством этого комплекса является то, что в данной среде достаточно просто создать собственные настройки с использованием любого языка программирования. Эти возможности были реализованы с использованием программного языка Visual C++ для написания прикладного программного продукта EngineBuilder.exe. Структура программы включает в себя следующие функциональные блоки: расчетный блок; блок построения полевой модели ЭП; блок те-

¹ Статьи от компании Danfoss в сфере промышленности. Синхронные двигатели с постоянными магнитами. <https://drives.ru/tipy-dvigatelay/sinhronnye-dvigately-s-magnitami/> (дата обращения: 18.03.2020).

стирования модели; блок создания системы управления MatLab (Simulink).

Расчетный блок реализует расчет в интерактивном режиме геометрии m -фазного СДПМ на основе заданных технических требований на проектирование. При расчете используются методика и расчетные соотношения, изложенные в [8, 9].

Важной составляющей является задание исходных данных для проектирования (рис. 1). Актуальность такого проектирования связана с тем, что в настоящее время у нас отсутствует промышленное производство m -фазных ($m > 3$) СДПМ.

Шаг 1-1. Общие параметры

НОМИНАЛЬНЫЙ_МОМЕНТ: 24
 НОМИНАЛЬНЫЙ_ФАЗОВЫЙ_ТОК: 29.2
 ЧАСТОТА_ПИТАНИЯ: 50
 ЧИСЛО_ПАР_ПОЛЮСОВ: 2
 УГОЛ_НАГРУЗКИ: 0.2
 КПД: 0.96
 ЧИСЛО_ФАЗ_ДВИГАТЕЛЯ: 3
 МАГНИТНАЯ_ИНДУКЦИЯ_МАГНИТА: 1.17
 КОЭРЦИТИВНАЯ_СИЛА_ПО_ИНДУКЦИИ_МАГНИТА: 800000

Шаг 1-2. Параметры ротора

КОЭФИЦИЕНТ_ИНДУКЦИИ_ПРИ_ХОЛОСТОМ_ХОДЕ: 0.6
 КОЭФИЦИЕНТ_НАПРЯЖЕННОСТИ_МАГНИТНОГО_ПОЛЯ: 0.735
 КОЭФИЦИЕНТ_РАССЕИВАНИЯ_ХОЛОСТОГО_ХОДА: 1.15
 КОЭФИЦИЕНТ_ПАДЕНИЯ_МАГНИТНОГО_НАПРЯЖЕНИЯ: 1.15
 КОЭФИЦИЕНТ_ПРИВЕДЕНИЯ_МДС_РЕАКЦИИ_ЯКОРЯ: 0.85
 КОЭФИЦИЕНТ_УДАРНОСТИ: 1.2
 КОЭФИЦИЕНТ_ФОРМЫ_ПОЛЯ: 1.11
 КРАТНОСТЬ_ТОКА_КЗ: 6
 КОЭФИЦИЕНТ_ЗАПОЛНЕНИЯ_МАГНИТА: 0.558

Шаг 1-3. Параметры ротора

СООТНОШЕНИЕ_ДЛИНЫ_К_ДИАМЕТРУ_МАГНИТА: 1.11
 КОЭФИЦИЕНТ_ЗАПАСА_НА_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ_МАГНИТА: 1.25
 КОЭФИЦИЕНТ_ПОЛЮСНОГО_ПЕРЕКРЫТИЯ: 0.986
 ВЫСОТА_БАШМАКА: 0
 ОБМОТОЧНЫЙ_КОЭФИЦИЕНТ: 0.945
 КОЭФИЦИЕНТ_ДИАМЕТРА_ВТУЛКИ: 0.44
 СООТНОШЕНИЕ_ШИРИНЫ_БАШМАКА_К_ПОЛЮСУ: 0.993

Шаг 1-4. Параметры статора

ЧИСЛО_ПАЗОВ_НА_ПОЛЮС_И_ФАЗУ: 1.5
 ЧИСЛО_ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ_ВЕТВЕЙ_ОБМОТКИ: 1
 ЧИСЛО_ПРОВОДНИКОВ_В_ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ_ВЕТВЯХ: 8
 ДОПУСТИМАЯ_ПЛОТНОСТЬ_ТОКА_В_ВЕТВИ: 575
 КОЭФИЦИЕНТ_ДИАМЕТРА_ИЗОЛИРОВАННОГО_ПРОВОДА: 1.08
 КОЭФИЦИЕНТ_ЗАПОЛНЕНИЯ_ПАЗА: 0.53
 ИНДУКЦИЯ_ЗУБЦА: 1.14

Шаг 1-5. Параметры статора

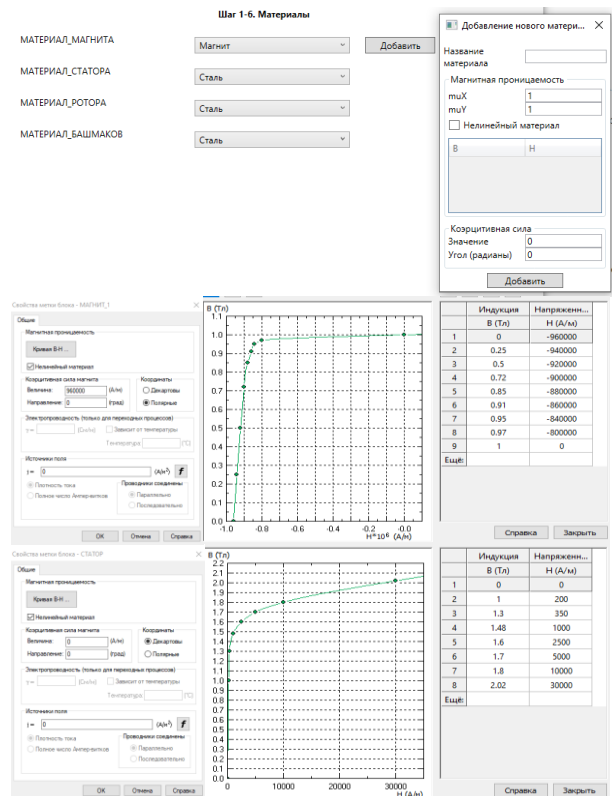
КОЭФИЦИЕНТ_ЗАПОЛНЕНИЯ_ПАКЕТА_СТАТОРА: 0.95
 ДОПУСТИМАЯ_ИНДУКЦИЯ_СПИНКИ_СТАТОРА: 1.5
 ВЫСОТА_ШЛИЦА: 0.07
 ВЫСОТА_КЛИНА: 0.07
 СООТНОШЕНИЕ_ШИРИНЫ_ШЛИЦА_К_ПАЗУ: 0.5

Рис. 1. Задание основных энергетических характеристик и геометрии СДПМ

Определение свойств активных материалов (рис. 2) реализовано на этапе задания на двигатель (шаги 1–6), причем

проектировщик может воспользоваться как библиотекой свойств материалов, так и задать свои исходные данные, а может и вообще не учитывать нелинейность свойств материалов, решая линейную задачу и, соответственно, ускоряя процессы вычислений.

На основе исходных данных производится расчет основных параметров СДПМ и задание на создание модели в среде EICut.



Шаг 2-1. Основные расчеты

НОМИНАЛЬНАЯ_ЧАСТОТА_ВРАЩЕНИЯ	1500
УГЛОВАЯ_СКОРОСТЬ_ВРАЩЕНИЯ	157,0796
НОМИНАЛЬНАЯ_МОЩНОСТЬ	3084,3247
НОМИНАЛЬНОЕ_ФАЗНОЕ_НАПРЯЖЕНИЕ	37,4222
ИНДУКЦИЯ_ПРИ_ХОЛОСТОМ_ХОДЕ	0,702
НАПРЯЖЕННОСТЬ_МАГНИТНОГО_ПОЛЯ	588000

Шаг 2-2. Расчет ротора

ОБЪЕМ_МАГНИТА	294,2141
ДИАМЕТР_МАГНИТА	9,1098
ДЛИНА_МАГНИТА	10,1119
ДЛИНА_РОТОРА	10,1119
ДИАМЕТР_РОТОРА	9,1098
ВЫСОТА_ВОЗДУШНОГО_ЗАЗОРА	0,2095
ДЛИНА_СРЕДНЕЙ_МАГНИТНОЙ_ЛИНИИ	9,825
ПОЛЮСНОЕ_ДЕЛЕНИЕ_РОТОРА_ПО_МАГНИТУ	7,1548

Шаг 2-3. Расчет ротора

ДЛИНА_ДУГИ_ПОЛЮСНОГО_БАШМАКА	7,1047
ШИРИНА_ПОЛЮСНОЙ_ДУГИ	7,0547
ШИРИНА_МАГНИТА	6,3704
ПЛОЩАДЬ_СЕЧЕНИЯ_МАГНИТА	7,274
ЛИНЕЙНАЯ_НАГРУЗКА_НА_МАГНИТ	40467,7636
ВЫСОТА_МАГНИТА	1,1853
ВНУТРЕННИЙ_ДИАМЕТР_МАГНИТА	6,7392
ДИАМЕТР_ВТУЛКИ	2,9652

Шаг 2-4. Расчет статора

ПЛОЩАДЬ_ПОВЕРХНОСТИ_МАГНИТА: 71,3358
 МАГНИТНЫЙ_ПОТОК_В_ЗАЗОРЕ: 0,0044
 НОМИНАЛЬНАЯ_ЭДС_ХОЛОСТОГО_ХОДА: 57,9421
 ЧИСЛО_ВИТКОВ_В_ФАЗЕ: 63,4253
 ЧИСЛО_ПАЗОВ_СТАТОРА: 18
 ЧИСЛО_ПРОВОДНИКОВ_В_ПАЗУ: 169,1341
 ПЛОЩАДЬ_СЕЧЕНИЯ_ПРОВОДА: 0,0063

Шаг 2-5. Расчет статора

ДИАМЕТР_ПРОВОДА: 0,0899
 ДИАМЕТР_ПРОВОДА_С_ИЗОЛЯЦИЕЙ: 0,0971
 ПЛОЩАДЬ_СЕЧЕНИЯ_ПРОВОДА_С_ИЗОЛЯЦИЕЙ: 0,0074
 ПЛОЩАДЬ_ПАЗА: 2,3628
 ВНУТРЕННИЙ_ДИАМЕТР_СТАТОРА: 9,5289
 ЗУБЦОВОЕ_ДЕЛЕНИЕ_СТАТОРА: 1,6631
 ИНДУКЦИЯ_В_ЗАЗОРЕ: 0,6104
 ШИРИНА_ЗУБЦА: 0,9374

Шаг 2-6. Расчет статора

ШИРИНА_ПАЗА_МИН: 0,7501
 ВЫСОТА_СПИНКИ_СТАТОРА: 1,5551
 ШИРИНА_ПАЗА_СРЕД: 1,1004
 ШИРИНА_ПАЗА_МАКС: 1,4508
 ВЫСОТА_ПАЗА: 2,1471
 ДИАМЕТР_СТАТОРА_С_ПАЗАМИ: 14,1032
 ВНЕШНИЙ_ДИАМЕТР_СТАТОРА: 17,2134
 ШИРИНА_ШЛИЦА: 0,3751

Рис. 2. Окна задания свойств материалов

Блок построения модели осуществляет: открытие программного комплекса EICut; отрисовку геометрии; присвоение меток блокам; прописание заданных и расчетных свойств (рис. 3).

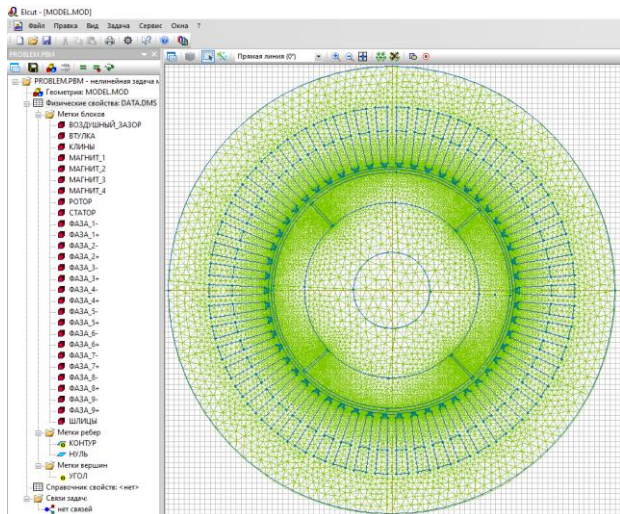


Рис. 3. Окно с расчетной моделью в EICut

Блок тестирования позволяет тестировать как текущую модель, так и модели из библиотеки файлов с различными решениями (рис. 4).

Система управления. Необходимо отметить, что полученные данные применимы к статическому состоянию ЭП. Блок создания системы управления MatLab (Simulink) позволяет получить данные динамических процессов ЭП.



Рис. 4. Окно с результатами тестирования разработанных СДПМ

Специфика многофазного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением заключается в том, что для обеспечения полезной работы высших временных гармоник тока с порядковым номером, меньшим m , за счет создания ими дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента, в отличие от систем с асинхронным двигателем, необходимо существенно усложнять систему управления синхронным ЭП при ограничении его регулировочных возможностей [5]. В этой связи, как показано в [5], целесообразно в качестве исполнительного двигателя использовать СДПМ, когда при обеспечении ортогональной ориентации приведенных спектральных векторов тока статора к продольной оси ротора автоматически обеспечиваются высокие энергетические характеристики. Функциональная схема такой САУ имеет вид (рис. 5). Здесь РС и РТ – регуляторы скорости и ортогональных спектральных составляющих векторов тока статора, приведенных к v -м пространственным гармоникам [5] соответственно. При этом задания на составляющие этих

векторов по продольной оси принимаются равными нулю; БН – блоки нелинейности, реализующие задания на формирование фазных токов СДПМ, обеспечивающих конфигурацию поля в зазоре, снижающую уровень радиальных сил; ПК1 и ПК2 – координатные преобразователи; ВУ – вычислительное устройство, определяющее ортогональные составляющие приведенных спектральных векторов тока статора.

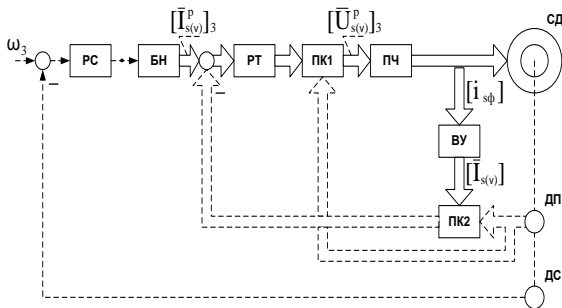


Рис. 5. Функциональная схема синхронного ЭП

Данная функциональная схема реализована на основе представления модели СДПМ как объекта управления в виде математической модели, состоящей из параллельных подструктур, соответствующих соотношениям [6]:

$$\bar{U}_{s(v)}^p = \bar{i}_{s(v)}^p R_s + p \bar{\Psi}_{s(v)}^p + jv\omega \bar{\Psi}_{s(v)}^p;$$

$$\bar{\Psi}_{s(v)}^p = (L_{s1} + L_{m(v)}) \bar{i}_{s(v)}^p + M_{(2v)}^p \hat{i}_{s(v)}^p + M_{f(v)}^p i_{m0}^p;$$

$$M_{эм(v)} = \frac{m}{2} z_p v \operatorname{Im} \left\{ M_{(2v)}^p \bar{i}_{s(v)}^{p2} + i_{m0}^p M_{f(v)}^p \bar{i}_{s(v)}^p \right\};$$

$$M_{эм} = \sum_{v=1} M_{эм(v)};$$

где $i_{m0}^p = const$.

Этим уравнениям в среде MatLab (Simulink) соответствует расчетная схема, приведенная на рис. 6.

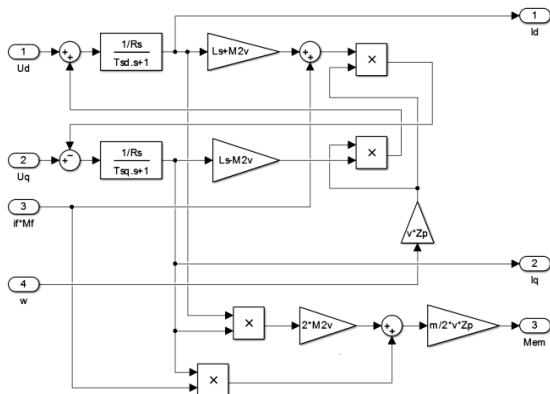


Рис. 6. Расчетная схема СДПМ в среде MatLab (Simulink)

Модель системы управления реализована на базе Simulink, она работает вместе с математической моделью СДПМ (рис. 7).

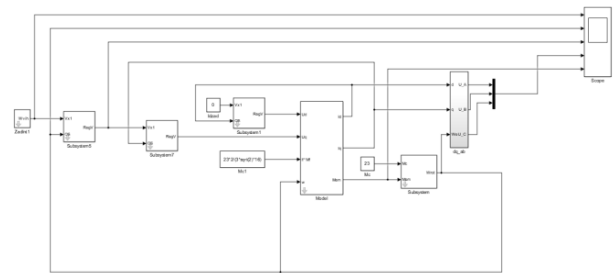


Рис. 7. Модель САУ в среде Simulink

Результаты. Разработанная модель позволяет достаточно удобно исследовать статические и различные динамические режимы синхронного ЭП.

В качестве примера на рис. 8 приведены кривые переходных процессов по скорости и составляющим электромагнитного момента от различных пространственных гармоник при пуске на номинальную скорость 9-фазного СДПМ при номинальной нагрузке.

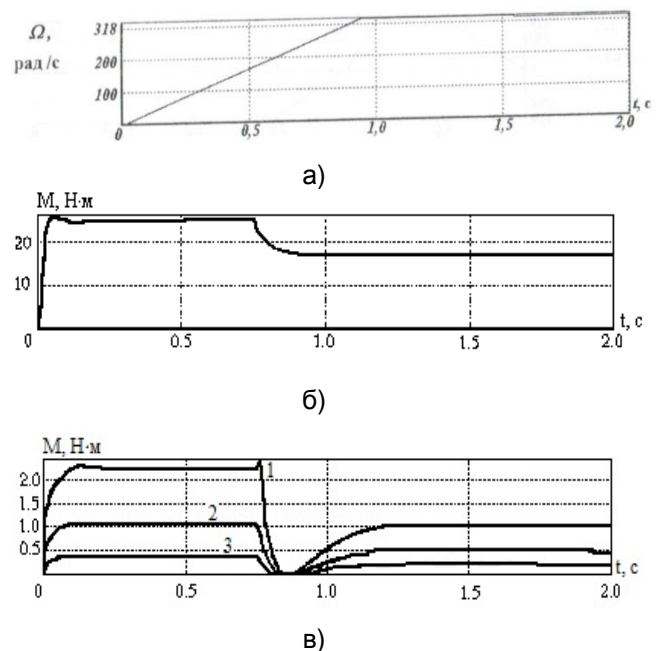


Рис. 8. Кривые переходного процесса при пуске на номинальную скорость 9-фазного ЭП: а – $\omega(t)$; б – $M_{эм(1)}(t)$; в: 1 – $M_{эм(3)}(t)$; 2 – $M_{эм(5)}(t)$; 3 – $M_{эм(7)}(t)$

На рис. 9 приведены некоторые формы фазных токов 9-фазного СДПМ, а на рис. 10 – соответствующие им кривые распределения пондеромоторной силы.

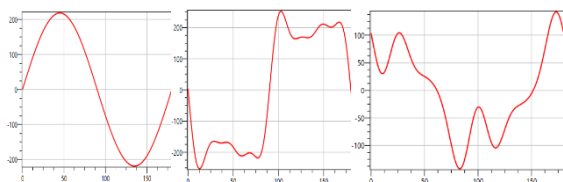


Рис. 9. Формы фазных токов

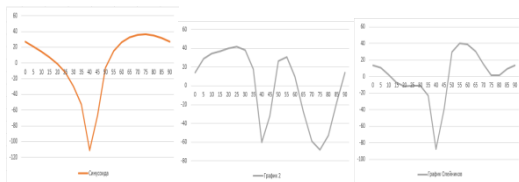


Рис 10. Эпюры пондеромоторной силы

Результаты численного сравнения этих кривых приведены в таблице.

Результаты сравнительного анализа пондеромоторной силы

	Ср. сила	%	Разница, %
Синусоида	133,4	100	0
Трапеция	114,56	85,87	-14,13
Призв. усил. гармоник	123,13	92,3	-7,7

Анализ полученных данных подтверждает положение о необходимости целенаправленного формирования поля для снижения радиальных сил. Так, формирование распределения поля в зазоре, близкого к трапецеидальному, привело к снижению силы, действующей на кольцо статора, а следовательно, и к снижению вибраций на 14 %.

Выводы. Показано, что увеличение числа фаз исполнительного СДПМ является эффективным вариантом реализации ЭП с пониженным уровнем шумов.

Представленный вариант построения синхронного ЭП обеспечивает уменьшение радиальных магнитных сил, его отличительной особенностью является многоканальный, соответствующий числу фаз исполнительного СДПМ принцип построения САУ.

Предложенная инженерная методика проектирования синхронного двигателя с использованием программного комплекса Elcut обеспечивает пользователю возможность осуществлять проектирование и исследование виброшумовых и других электромагнитных характеристик машины с произвольным, а не только с традицион-

ным трехфазным числом фаз статорной обмотки; при этом использование в структуре расчетного модуля полевой модели машины, учитывающей реальную геометрию магнитопровода, пространственное распределение обмотки и насыщение стали, повышает корректность получаемых результатов по исследованию виброшумовых характеристик.

Представленные результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенного многоканального принципа построения синхронного ЭП с улучшенными виброшумовыми характеристиками. В сравнении с традиционным трехфазным исполнением ЭП, при синусоидальном питающем напряжении рассмотренные варианты формирования поля в зазоре СДПМ обеспечивают уменьшение пондеромоторной силы на 8–14 %.

Список литературы

1. Левкин Д. Синхронный двигатель с постоянными магнитами. Инженерные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://engineeringsolutions.ru/motorcontrol/pmsm/> (дата обращения: 19.03.2020).
2. Павлов О.П. Синхронный двигатель с постоянными магнитами, управляемый при помощи прогнозирующей модели [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2019. – № 25. – С. 135–138. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/263/61104/> (дата обращения: 18.03.2020).
3. Meiling Tang, Shengxian Zhuang. On Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Current Predictive Compensation // Energies, MDPI, Open Access Journal. – 2018. – Vol. 12(1). – P. 1–15.
4. Колосов Ю.В., Барановский В.В. Защита от вибраций и шума на производстве: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.
5. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками и его моделирование / С.С. Ананьев, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 33–39.
6. Белоногов В.Г., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками на основе исполнительного синхронного двигателя постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 23–27.
7. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
8. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2006. – 430 с.

9. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.

References

1. Levkin, D. *Sinkhronnyy dvigatel' s postoyannymi magnitami. Inzhenernye resheniya* [Permanent magnet synchronous motor. Engineering solutions]. Available at: <https://engineeringsolutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

2. Pavlov, O.P. Sinkhronnyy dvigatel' s postoyannymi magnitami, upravlyaemyy pri pomoshchi prognoziruyushchey modeli [Permanent magnet synchronous motor controlled by predictive model]. *Molodoy uchenyy*, 2019, no. 25, pp. 135–138. Available at: <https://moluch.ru/archive/263/61104/>

3. Meiling, Tang, Shengxian, Zhuang. On Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Current Predictive Compensation. *Energies*, MDPI, Open Access Journal, 2018, vol. 12(1), pp. 1–15.

4. Kolosov, Yu.V., Baranovskiy, V.V. *Zashchita ot vibratsiy i shuma na proizvodstve* [Vibration and Noise Protection: A Tutorial]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2011. 38 p.

5. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N., Martynov, V.A., Belonogov, V.G., Karachev, V.D. Sinkhronnyy elektroprivod s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami i ego modelirovaniye [Synchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics and its modeling]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 33–39.

6. Belonogov, V.G., Golubev, A.N., Martynov, V.A. Sinkhronnyy elektroprivode s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami na osnove ispolnitel'nogo sinkhronnogo dvigatelya postoyannymi magnitami [Synchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics based on a synchronous permanent magnet motor]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 23–27.

7. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.

8. Gol'dberg, O.D. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* [Electrical Machine Design]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 430 p.

9. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* [Electrical Machine Design]. Moscow: Yurayt, 2011. 767 p.

Голубев Александр Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий, телефон (4932) 26-99-03, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Golubev Alexander Nikolaevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology, telephone (4932) 26-99-03, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Белоногов Владимир Григорьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», начальник военного учебного центра, телефон (4932) 26-99-19, e-mail: belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Belonogov Vladimir Grigorievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Head of Military Training Centre, telephone (4932) 26-99-19, e-mail: belonogovvladimir@vk.ispu.ru