

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОВИБРОПРИВОДА

Ю.С. Сергеев<sup>1</sup>, В.М. Сандалов<sup>1</sup>, Г.Е. Карпов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Представлены математические модели вентильно-индукторного двигателя и электронного коммутатора с алгоритмом 90-градусной коммутации фаз двигателя. Проведен междисциплинарный расчет построенных моделей. Результатами моделирования являются графики зависимостей токов в обмотках и напряжений на обмотках электромеханического преобразователя от времени. Разработан и изготовлен экспериментальный образец вентильно-индукторного вибропривода с микропроцессорным управлением, исследования которого подтвердили адекватность моделей.

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный электропривод, математическая модель, алгоритмы управления, вибромашины.

### Введение

В современном промышленном производстве наметилась устойчивая тенденция интенсификации различных технологических процессов. Одним из ее резервов является применение управляемых вибрационных машин и процессов. Область их применения весьма обширна [1, 2]: машиностроение, строительство, фармацевтическая и пищевая промышленности, медицина, текстильная промышленность, бытовая техника, техника для измерения, контроля и испытаний и т. п. Главным элементом любой вибромашины является вибропривод, позволяющий принудительно задавать различные по форме колебания и управлять амплитудно-фазо-частотными характеристиками исполнительных движений ее рабочего органа. При этом могут применяться различные способы соз-

дания вибраций, например, посредством механических, либо электромагнитных приводов, либо электродвигателей вращательно-колебательного действия. Причем в разных вибромашинах упомянутые способы возбуждения колебаний могут использоваться как отдельно, так и в сочетании. Примером комплексного использования механического вибропривода с электродвигателем вращательно-колебательного действия может быть вибрационный смеситель, приведенный на рис. 1 [3]. При вращении ротора с перфорированными дисками генерируются его круговые колебания, создающие, в свою очередь, циркулирующие закрученные струи перемешиваемых компонентов. Важно заметить, что использование в качестве привода смесителя вентильно-индукторного электропривода (ВИП) позволяет увеличить длину за-

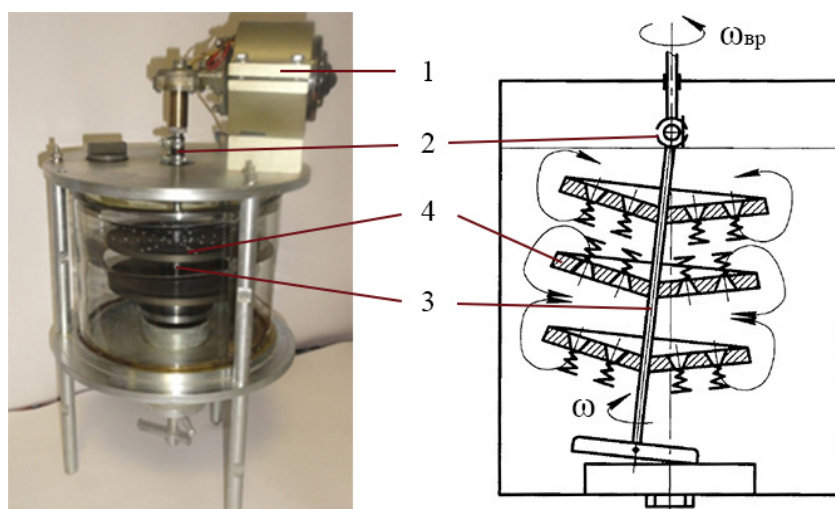


Рис. 1. Вибрационный смеситель многокомпонентных растворов:  
1 – электропривод; 2 – муфта; 3 – ротор; 4 – перфорированные диски

топленных струй за счет пульсаций скорости двигателя [4].

Анализ выполненных работ показал, что некоторое единство взглядов на различные по природе процессы возбуждения колебаний в вибромашинах достигнуто различными исследователями лишь в одном – необходимости регулирования амплитудно-частотных характеристик. Отсюда понятно, что поскольку в каждом способе природа возбуждения различна, то, соответственно, в зависимости от степени изученности того или иного процесса различные исследователи предлагают свои способы управления технологическими параметрами. Наиболее изученным является механическое возбуждение низкочастотных колебаний с помощью дебалансов. В работах [2, 5–8] теоретически и экспериментально показаны природа и степень управляемости процессом. Вскрыты и уже достаточно хорошо изучены механизмы самовозбуждения и самосинхронизации высокочастотных механических колебаний в роторных инерционных системах [9]. Показано, что высокочастотные управляемые вибрации, по сравнению с низкочастотными, позволяют существенно повысить производительность целого ряда технологических процессов. А одновременное возбуждение в одном устройстве вынужденных низкочастотных с высокочастотными колебаниями позволяет наделять его еще и возможностью генерировать механические амплитудно-модулированные колебания [10].

Большой практический интерес вызывают выполненные на высоком уровне исследования, как механических [11, 12], так и электромагнитных [13] инерционно-импульсных систем. Теоретически и экспериментально показано, что целесообразнее всего их применять в быстротекущих виброударных процессах.

Колоссальный объем работы по изучению физических основ возбуждения колебательного режима в электродвигателях выполнили В.И. Луковников, К. Federn, К.Н. Miller, Т.М. Holdsworth [1, 14, 15]. Теоретически показано, что практически любой тип электродвигателя оснатив своей системой управления можно использовать в режиме электропривода колебательного движения. Работы Р.М. Трахтенберга позволили создать импульсные астатические электроприводы с дискретным управлением [16]. Такие системы сочетают достоинства цифровых систем с простотой аналоговых и позволяют управлять скоростью и фазой вращения. Однако жесткие условия работы, ударные нагрузки и необходимость получения значительных ускорений резко ограничивают область применения таких приводов в вибромашинах. Очевидно, что асинхронные приводы не в состоянии обеспечить требуемое быстроедействие и точность, а электромеханические преобразователи с постоянными магнитами – требуемую проч-

ность и живучесть [17, 18]. С точки зрения простоты управления электроприводом не менее интересными являются работы [19, 20] по совершенствованию систем управления вентильно-индукторных двигателей в части повышения качества работы, путем сглаживания пульсаций скорости и момента.

В свою очередь, Ю.А. Голландцев в [20] пошел дальше и разработал метод систематизации многообразия конструктивного исполнения вентильно-индукторных двигателей (ВИД) по критерию соотношения параметров зубцовой зоны, смоделировал переходный и установившийся режимы работы ВИД и предложил учитывать особенности формирования момента в зависимости от текущего положения ротора, опять же с целью сглаживания тех же пульсаций, но применение ВИД в качестве электровиброприводов авторами вообще не рассматривалось.

С позиции простоты впервые в работе [21] предложено в качестве электровибропривода использовать ВИД, поскольку с одной стороны он прост по конструкции, а с другой – его основной недостаток – высокие пульсации тяговых характеристик посредством системы управления можно обратить непосредственно в заданные колебания рабочего органа машины без каких-либо дополнительных механических устройств. Моделирование такого электровибропривода позволит оптимизировать его работу в требуемом режиме пульсаций. Такой подход является принципиально новым.

#### **Актуальность и научная значимость**

В разработку ВИП большой вклад, кроме прочих, внесли М.Г. Бычков и А.Б. Красовский, создавшие имитационные модели ВИП на базе MATLAB-Simulink [22]. В этих моделях взаимосвязи получены на основе аппроксимированных по средним значениям эмпирических зависимостей, что приводит к увеличению погрешности расчетов и требует значительного объема экспериментальных исследований. Отказ от полевых расчетов аргументировался большим объемом вычислений, значительным усложнением моделей и снижением их быстроедействия.

В настоящее время доступны инструменты, позволяющие строить математические модели и проводить динамические расчеты электроприводов методом конечных элементов по мгновенным значениям, а также высокопроизводительные электронно-вычислительные машины – суперкомпьютеры. Использование данных ресурсов позволяет разработать универсальную математическую модель ВИП, основанную на расчете магнитного поля, для исследования вибрационных характеристик электропривода, аномальных режимов работы двигателя, алгоритмов и несимметричных способов управления, влияния технологических погрешностей двигателя на его работу.

## Электромеханические системы

### Математическая модель

Для улучшения возможностей управления параметрами процесса перемешивания был выбран наиболее перспективный четырехфазный вариант двигателя с 8 статорными и 10 роторными полюсами. В связке программных продуктов Ansys Maxwell и Ansys Simplorer была разработана математическая модель вентильно-индукторного электропривода, основанная на модели электромеханического преобразователя, использовавшаяся для проведения магнитостатических расчетов [18]. На рис. 2 представлена схема электронного коммутатора.

Обмотки каждой из четырех фаз подключаются к источнику питания по мостовой схеме, ос-

нованной на МОП-транзисторах. Скорость вращения двигателя задается обратной связью по крутящему моменту с учетом момента инерции  $J$ , равному  $0,001 \text{ кг/м}^2$ .

В разработанной модели электропривода был применен алгоритм 90-градусной коммутации фаз двигателя. На рис. 3 можно увидеть математическую модель для реализации данного алгоритма, построенную в Ansys Simplorer, которая отражает порядок переключения фаз в зависимости от положения ротора. Блок коммутации обмоток одной из фаз, управляющий силовыми ключами электронного коммутатора, продемонстрирован на рис. 4.

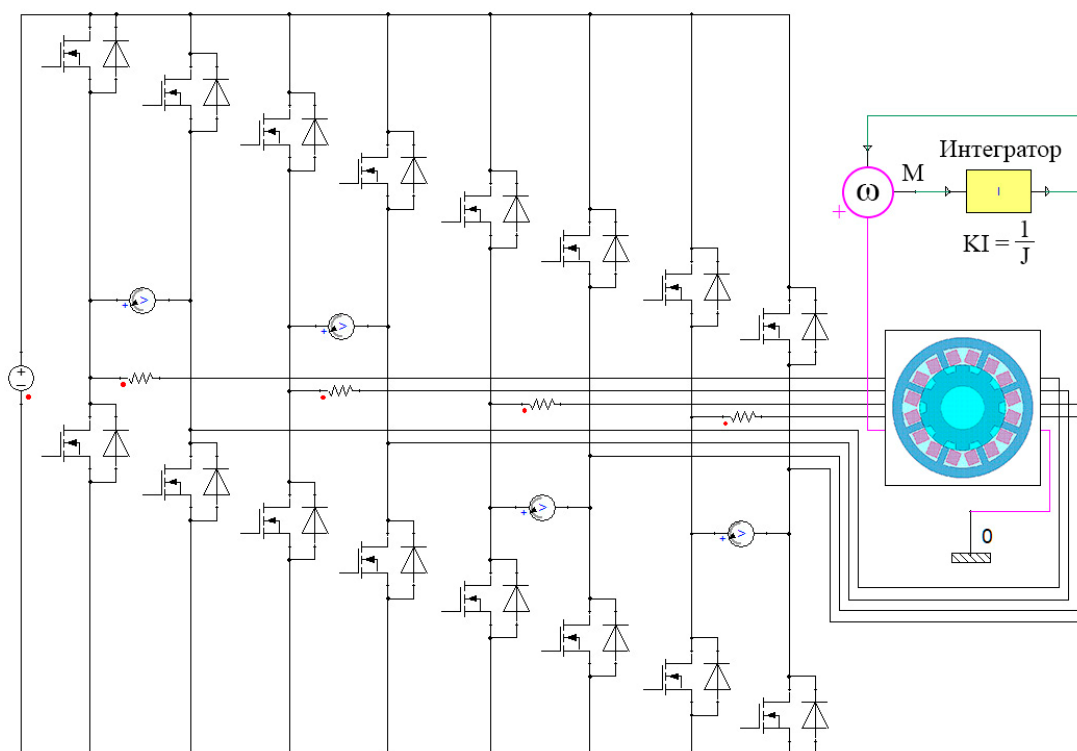


Рис. 2. Схема электронного коммутатора в Ansys Simplorer

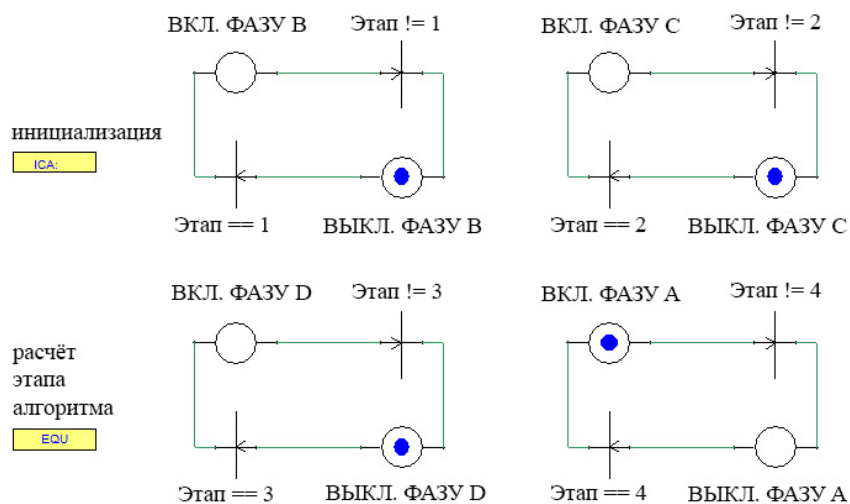


Рис. 3. Модель для реализации алгоритма 90-градусной коммутации

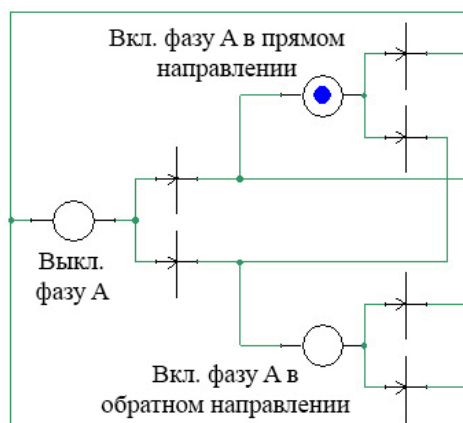


Рис. 4. Блок коммутации обмоток фазы, управляющий силовыми ключами

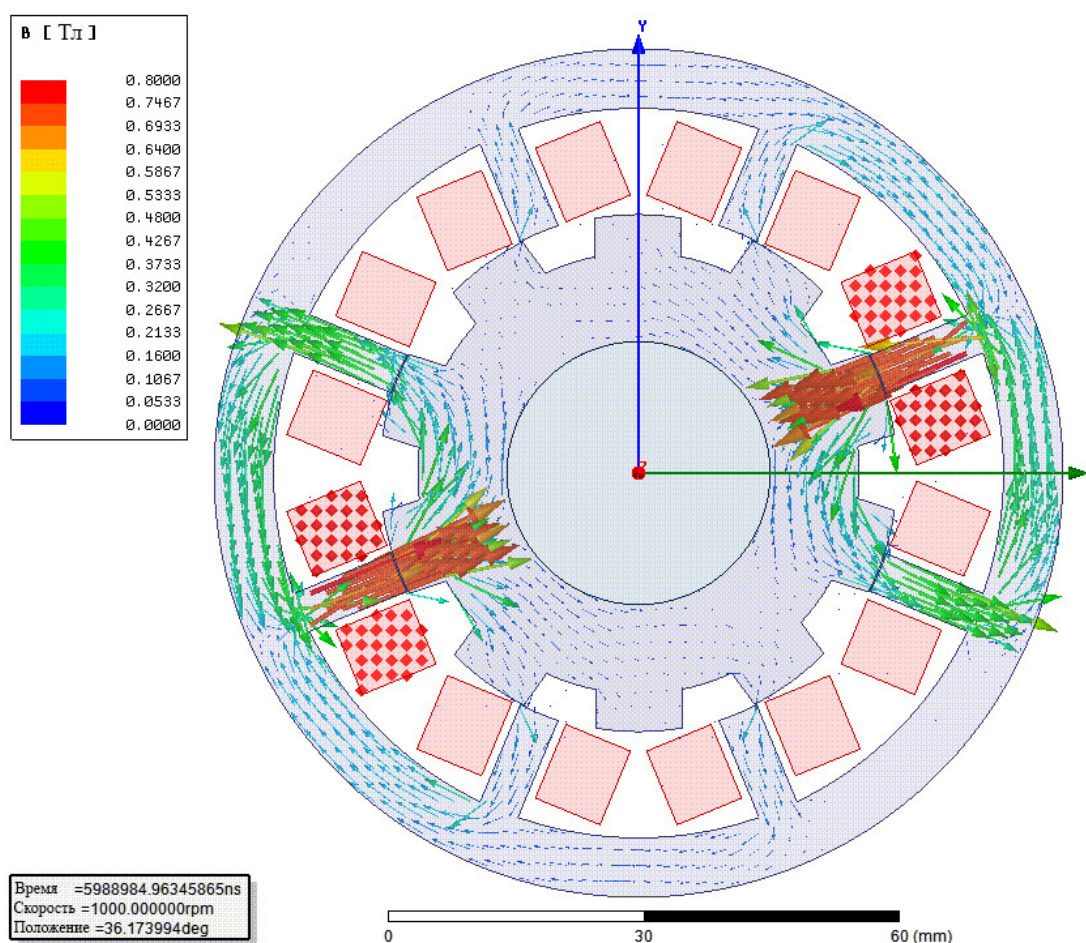


Рис. 5. Процесс симуляции работы модели ВИП в Ansys Maxwell

В ходе проведения компьютерных исследований был реализован процесс симуляции построенной модели вентильно-индукторного привода в Ansys Maxwell в соответствии с рис. 5. Обмотки фаз, по которым течет ток, имеют направленные по оси Z векторы плотности тока. А стрелки в статоре и роторе двигателя отражают векторы магнитной индукции.

За одну секунду симуляции модели двигатель

развил скорость, равную 750 об/мин. При этом пульсации момента силы составляли 95 % от среднего значения, равного 0,1 Н·м, с частотой 500 Гц. Из этого следует, что мощность электропривода не превышает 7,85 Вт при напряжении питания обмоток статора 12 В.

Проведенные исследования выполнены с использованием суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [23].

## Экспериментальный образец

Для проверки адекватности модели разработан и изготовлен опытный образец вентильно-индукторного вибропривода мощностью 100 Вт. После проведения сравнительного анализа существующих программируемых микропроцессоров для системы управления был выбран 32-разрядный сигнальный микроконтроллер TMS320F28335 производства Texas Instruments в составе экспериментальной платы TMS320F28335 Experimenter's Kit [21].

Электронный коммутатор выполнен по четырехфазной мостовой схеме (рис. 6) на базе МОП-транзисторов IRF3415. В качестве датчика обратной связи был использован энкодер Delta Electro-

pics ES3-06CN6941 с разрешением 600 меток на оборот. Программа для микроконтроллера была написана на языке программирования C++ в интегрированной среде разработки Code Composer Studio.

Созданная система управления ВИП позволяет изменять алгоритмы управления «на ходу», создавая требуемые пульсации частоты вращения исполнительного органа машины. Использование микропроцессора открывает возможность программным методом имитировать аномальные режимы работы электропривода, как, например, несимметричное питание или сбой датчика обратной связи. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 7.

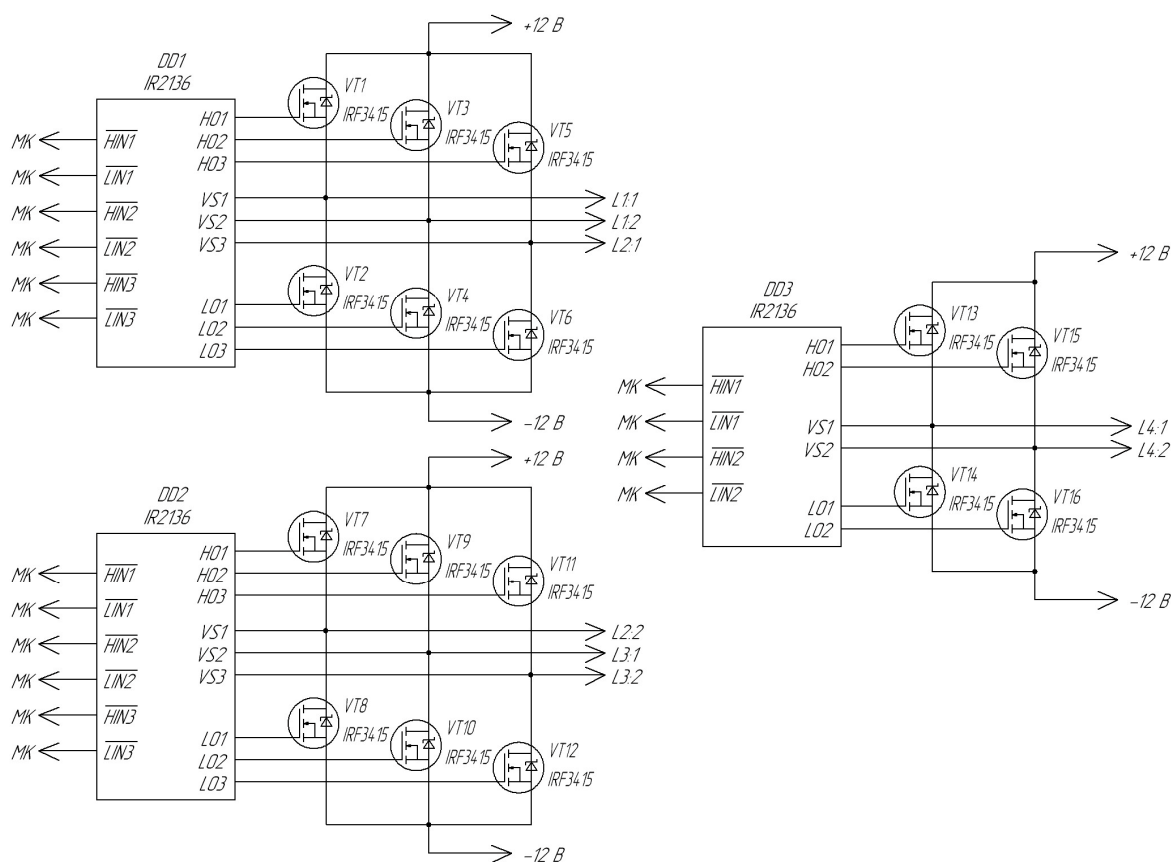


Рис. 6. Схема электронного коммутатора

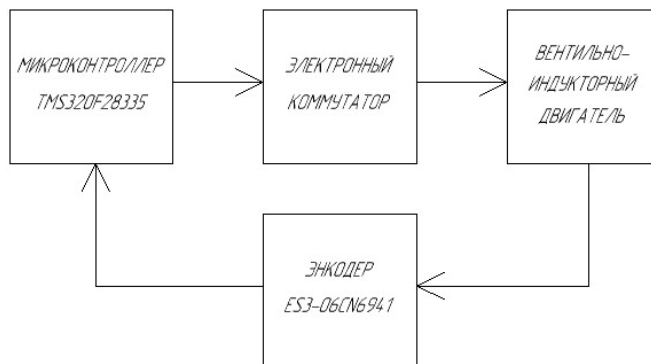


Рис. 7. Структурная схема опытного образца вибропривода



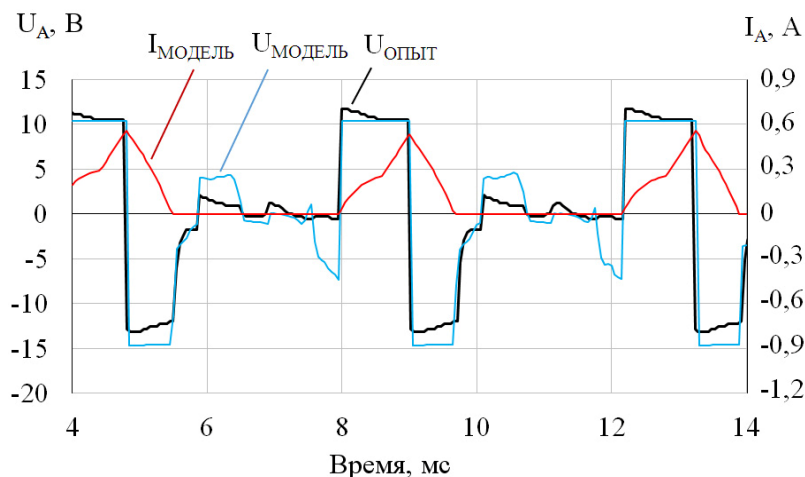


Рис. 8. Результаты расчета математической модели и проведения опыта с экспериментальной установкой

### Результаты исследования

В результате проведения междисциплинарного расчета динамических показателей посредством построенных математических моделей электромеханического преобразователя и электронного коммутатора были получены зависимости токов в обмотках и напряжений на обмотках двигателя от времени (рис. 8) при скорости вращения 1500 об/мин. Также, на рис. 8 представлена осциллограмма напряжения обмоток одной из фаз, снятая во время проведения опыта на экспериментальной установке. Отличия в форме напряжений вызваны некорректным заданием падения напряжения на обратных диодах электронного коммутатора в модели, а также влиянием сопротивления источника питания экспериментальной установки.

### Заключение

1. Построены математические модели вентильно-индукторного электромеханического преобразователя в Ansys Maxwell, электронного коммутатора с 90-градусной коммутацией фаз двигателя в Ansys Simplorer, выполнен их междисциплинарный расчет.

2. Разработан и изготовлен экспериментальный образец вентильно-индукторного электропривода с микропроцессорным управлением на базе микроконтроллера TMS320F28335, позволяющего программным способом изменять алгоритм управления и имитировать неисправные режимы работы привода.

3. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность моделей. При их использовании появляется возможность исследования вибрационных характеристик электропривода, аномальных режимов работы двигателя, алгоритмов и несимметричных способов управления, а также влияния технологических погрешностей двигателя на его работу.

4. Электропривод на основе ВИД эффективнее всего может быть применен для создания сложных исполнительных движений рабочего органа в вибромашинах нового поколения, например, таких как вибрационные смесители-диспергаторы жидких многокомпонентных [4] и диспергаторы [9] твердых конденсированных сред.

Южно-Уральский государственный университет выражает благодарность за финансовую поддержку Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 9.7960.2017/БЧ).

### Литература

1. Луковников, В.И. Электропривод колебательного движения / В.И. Луковников – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
3. А.с. 1664412 СССР, МПК<sup>6</sup> В 06 В 1/16. Способ возбуждения круговых колебаний и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, С.В. Сергеев. – № 4414912/24-28; заявл. 24.04.1988; опубл. 23.07.1991, Бюл. № 27. – 5 с.: ил.
4. Пат. 2543204 Российская Федерация, МПК8 В01F 11/00. Способ перемешивания жидкости / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев, Р.Г. Закиров, В.Г. Некрутов, Е.Н. Гордеев, А.В. Иршин, Б.А. Решетников; заявитель и патентообладатель ООО «Гранулятор». – № 2013121302/05; заявл. 07.05.13; опубл. 27.02.15, Бюл. № 6. – 22 с.: ил.
5. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний: учеб. для вузов / В.Л. Бидерман. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
6. Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Наука. Издат. фирма «Физ.-мат. лит.», 1994. – 394 с.
7. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, пара-

доксы и ошибки / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – 6-е изд. – М.: КомКнига, 2007. – 352 с.

8. Гончаревич, И.Ф. Вибрация – нестандартный путь: вибрация в природе и технике / И.Ф. Гончаревич. – М.: Наука, 1986. – 209 с.

9. Сергеев, С.В. Вибрационные роторные приводы машин: моногр. / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Р.Г. Закиров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 133 с.

10. Пат. 2533743 Российская Федерация, МПК7 В22А 9/04 В02С 18/00. Способ возбуждения колебаний / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Е.Н. Гордеев, Ю.С. Сергеев, В.П. Гоголев, Р.Г. Закиров, А.А. Микрюков, А.В. Иршин – № 2013121307/28; заявл. 07.05.13; опубл. 23.09.14, Бюл. № 32. – 12 с.

11. Балжи, М.Ф. Автотракторный инерционный трансформатор крутящего момента / М.Ф. Балжи // Расчет и конструирование машин: сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1957. – С. 36–50.

12. Пожбелко, В.И. Моделирование и синтез замкнутых механических систем с многократными связями на основе целочисленных решений структурного уравнения механики / В.И. Пожбелко, Е.Н. Ермошина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 6–12.

13. Рагульскис, К. Вибротехника 50 / К. Рагульскис. – Каунас: Vibroengineering, 2013. – 204 с. (на лит. яз.).

14. Federn, K. Drehschwingungen – Prüfmaschinen für umlaufende Maschinenelemente. Entwicklung unter Schwingungstechnische und konstruktionsmethodischen Aspekten / K. Federn, K.H. Miller, R. Pourabdolrahion // Konstruktion im Maschinen-, Apparate- und Gerätebau. – 1974. – Nu. 10. – S. 18–22.

15. Holdsworth, T.M. The use of induction motors as vibration generators / T.M. Holdsworth, R.D. Morris // Sound and Vibration. – 1976. – No. 11. – P. 24–28.

16. Трахтенберг, Р.М. Импульсные астатиче-

ские системы электропривода с дискретным управлением / Р.М. Трахтенберг. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.

17. Воронин, С.Г. Некоторые способы регулировки выходных параметров электропривода с вентильным двигателем при векторном управлении / С.Г. Воронин, Г.Т. Хафизов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 1. – С. 10–13. DOI:10.18503/2311-8318-2016-1(30)-10-13

18. Sandalov, V.M. Dynamic model of switched reluctance vibratory drive / V.M. Sandalov, Yu.S. Sergeev // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83, no. 8. – P. 432–435. DOI: 10.3103/S106837121

19. Бычков, М.Г. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины / М.Г. Бычков, Сусси Риах Самир // Электротехника. – 2000. – № 3. – С. 15–19.

20. Голландцев, Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели прецизионных следящих систем / Ю.А. Голландцев. – СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2004. – 296 с.

21. Сергеев, Ю.С. Разработка микропроцессорной системы управления вентильно-индукторными электровиброприводами / Ю.С. Сергеев, Г.Е. Карпов, А.В. Кононистов // Наука ЮУрГУ. Материалы 68-й научной конференции. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2016. – С. 950–954.

22. Бычков, М.Г. Имитационная модель вентильно-индукторного электропривода при бездатчиковом варианте управления / М.Г. Бычков, А.Б. Красовский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2011. – № SP. – С. 5–17.

23. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Super-computer Resources // Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016). Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1576. – P. 561–573.

**Сергеев Юрий Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; sergeevyus@gmail.com.

**Сандалов Виктор Михайлович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; sandalov\_vm@mail.ru.

**Карпов Георгий Евгеньевич**, аспирант, кафедра «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; georg\_inform@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 мая 2017 г.

## MODELING OF SWITCHED RELUCTANCE ELECTRIC VIBRATION DRIVE

Yu.S. Sergeev<sup>1</sup>, sergeevyus@gmail.com,  
V.M. Sandalov<sup>1</sup>, sandalov\_vm@mail.ru,  
G.E. Karpov<sup>2</sup>, geor\_inform@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article deals with the issue that there is no study on designing switched reluctance electric vibration drives. Mathematical models of electromechanical converter and electronic commutator with 90-degree motor phase commutation algorithm are presented. The interdisciplinary calculation of the built models was carried out. The results of modeling and simulation are motor windings currents and induced voltage graphs. The experimental prototype of the switched reluctance vibration drive with the microprocessor-based control system is developed and manufactured. The experimental research that proves the models adequacy has been performed.

*Keywords:* switched reluctance drive, mathematical model, control algorithms, vibration machines.

South Ural State University is grateful for financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant No. 9.7960.2017/BP).

### References

1. Lukovnikov V.I. *Elektroprivod kolebatelnogo dvizheniya* [Electric Drive of Oscillatory Motion]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.
2. Babichev A.P. *Vibratsionnaya obrabotka detaley* [Vibration Treatment of Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 134 p.
3. Lakirev S.G., Khil'kevich Ya.M., Sergeev S.V. *Sposob vzbuzhdeniya krugovykh kolebaniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for Circular Vibration Excitation and Device for its Implementation]. Patent USSR, no. 1664412, 1991.
4. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Zakirov R.G., Nekrutov V.G., Gordeev E.N., Irshin A.V., Reshetnikov B.A. *Sposob peremeshivaniya zhidkosti* [Liquid Mixing Method]. Patent RF 2543204, no. 2013121302/05; decl. 07.05.13; publ. 27.02.15, Bul. no. 6. 22 p.
5. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy: uchebnyy dlya vuzov* [Theory of Mechanical Oscillations: Textbook for Universities]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1980. 408 p.
6. Blekhman I.I. *Vibratsionnaya mekhanika* [Vibration Mechanics]. Moscow, Fiz.-Mat. Lit. Publ., 1994. 394 p.
7. Panovko Ya.G. *Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh sistem: Sovremennye kontseptsii, paradoksy i oshibki. 6-e izd* [Stability and Vibrations of Elastic Systems: Modern Concepts, Paradoxes and Errors. 6th ed.]. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 352 p.
8. Goncharevich I.F. *Vibratsiya – nestandartnyy put': vibratsiya v prirode i tekhnike* [Vibration – Non-Standard Way: Vibration in Nature and Technology]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 209 p.
9. Sergeev S.V., Reshetnikov B.A., Zakirov R.G. *Vibratsionnye rotornye privody mashin: monografiya* [Vibratory Rotary Drives of Machines: Monograph]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2007. 133 p.
10. Sergeev S.V., Reshetnikov B.A., Gordeev E.N., Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Zakirov R.G., Mikryukov A.A., Irshin A.V. *Sposob vzbuzhdeniya kolebaniy* [Excitation Method of Oscillations]. Patent RF 2533743, no. 2013121307/28; decl. 07.05.13; publ. 23.09.14, Bul. no. 32. 12 p.
11. Balzhi, M. F. [Tractor Inertial Torque Transformer]. *Raschet i konstruirovaniye mashin: sb. nauch. tr.* [Calculation and Design of Machines: Collected Papers]. Chelyabinsk, ChPI Publ., 1957, pp. 36–50. (in Russ.)
12. Pozhbelko V.I., Ermoshina E.N. [Modelling and Synthesis Closed Mechanical Systems with Many-Sided Connections on Base Whole-Numeration Solutions of Structural Equation]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2012, no. 33, pp. 6–12. (in Russ.)
13. Ragul'skis, K. *Vibrotekhnika 50* [Vibrotechnics 50]. Kaunas, Vibroengineering Publ., 2013. 204 p. (in Lithuan.)



14. Federn K., Miller K.H., Pourabdollah R. Drehschwingungen – Prüfmaschinen für umlaufende Maschinenelemente. Entwicklung unter Schwingungstechnische und konstruktionsmethodischen Aspekten. *Konstruktion im Maschinen-, Apparate- und Gerätebau*, 1974, Nu. 10, S. 18–22.
15. Holdsworth T.M., Morris R.D. [The Use of Induction Motors as Vibration Generators]. *Sound and Vibration*, 1976, no. 11, pp. 24–28.
16. Trakhtenberg R.M. *Impul'snye astaticheskie sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniem* [Pulsed Astatic Electric Drive Systems with Discrete Control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 168 p.
17. Voronin S.G., Khafizov G.T. [Some Ways to Adjust the Output Parameters of a Drive with a Switched Motor under Vector Control]. *Electrical Systems and Complexes*, 2016, no. 1, pp. 10–13. (in Russ.). DOI: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-10-13
18. Sandalov, V.M. [Dynamic Model of Switched Reluctance Vibratory Drive]. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 8, pp. 432–435. (in Russ.) DOI: 10.3103/S106837121
19. Bychkov M.G., Sussi Riakh Samir. [Calculation Ratios for Determining the Main Dimensions of Switched Reluctance Machine]. *Russian Electrical Engineering*, 2000, no. 3, pp. 15–19.
20. Gollandtsev Yu.A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli pretsizionnykh sledyashchikh sistem* [Switched Reluctance Motors of Precision Servo Systems]. St. Petersburg, TsNII Elektropribor Publ., 2004. 296 p.
21. Sergeev Yu.S., Karpov G.E., Kononistov A.V. [Microprocessor-Based Control System of Switched Reluctance Electric Vibration Drives Development]. *Nauka YuUrGU. Materialy 68-y nauchnoy konferentsii* [Science of SUSU. Materials of 68th Scientific Conference]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2016, pp. 950–954. (in Russ.).
22. Bychkov M.G., Krasovskiy A.B. [Imitation Model of Rectifier-Inductor Electric Drive with Sensorless Control]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2011, no. SP, pp. 5–17. (in Russ.)
23. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources. *Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. *CEUR Workshop Proceedings*, 2016, vol. 1576, pp. 561–573.

Received 3 May 2017

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сергеев, Ю.С. Моделирование вентильно-индукторного электровибропривода / Ю.С. Сергеев, В.М. Сандалов, Г.Е. Карпов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 90–98. DOI: 10.14529/power170410

### FOR CITATION

Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of Switched Reluctance Electric Vibration Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 90–98. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170410

---