

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.1:629.458.27

*Ю. А. Рудченко, А. В. Козлов, А. А. Толстенков*

### ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

UDC 621.313.1:629.458.27

*Y. A. Rudchenko, A. V. Kozlov, A. A. Tolstenkov*

### PROBLEMS OF THEORY AND PRACTICE OF GEARLESS ELECTRIC DRIVES OF PERIODIC MOTION

#### **Аннотация**

В данной статье определены границы применимости колебательных электроприводов в народном хозяйстве, рассмотрены принципы построения электродвигателей колебательного движения, выделены при этом наиболее перспективные, показано, что наибольшая часть потребных амплитуд и частот может обеспечиваться самими электроприводами без использования механических преобразователей, которые значительно снижают общий коэффициент полезного действия электромеханической системы.

#### **Ключевые слова:**

безредукторные электроприводы, колебательное движение, автоколебательный режим, асинхронный электродвигатель, виброустановки, преобразование энергии, механические характеристики, тиристорные коммутаторы, однофазный режим, автореверс.

#### **Abstract**

The paper determines the scope of application of oscillating electric drives in national economy, and considers the design principles of oscillatory motion electric motors, those with better prospects being singled out. It is shown that the greater part of required amplitudes and frequencies can be provided by electric drives themselves without using mechanical convertors, the latter significantly reducing total efficiency factor of the electromechanical system.

#### **Key words:**

gearless electric drives, oscillatory motion, self-oscillation mode, induction motor, oscillatory installations, energy conversion, mechanical data, thyristor commutator, single-phase mode, auto-reverse.

#### **Введение**

Невозможно назвать область народного хозяйства, где не использовалось бы в том или ином виде колебательное движение. В [1] сообщается о 50 различных направлениях применения устройств с колебательным движением рабочего инструмента в девяти крупнейших отраслях производства. И это

далеко не полный перечень. Его можно было бы дополнить, например, информацией о биомеханической вибростимуляции спортсменов, о вибрационных лечебных процедурах, вибрационных косметических аппаратах, вибрационной автоматической сборке деталей, интенсификации физических и химических процессов и т. д.

В машиностроении наиболее часто используются колебания инструмента при различных методах виброобработки, причем электропривод должен обеспечивать частоту колебаний  $10^{-2} \dots 10^4$  Гц, амплитуду  $10^{-7} \dots 1$  м, ускорение  $0,5 \dots 10^4$  м/с<sup>2</sup> по линейным координатам и частоту  $0,1 \dots 50$  Гц, амплитуду  $0,01 \dots 5$  рад, ускорение  $1 \dots 2 \cdot 10^3$  рад/с<sup>2</sup> по угловым координатам.

Режим колебания должен быть регулируемым, потому что правильный подбор его параметров существенно снижает усилие обработки, повышает стойкость инструмента, улучшает качество изделий и увеличивает производительность труда. Колебания рабочего инструмента для большинства технологических операций однокоординатные и могут быть гармоническими, трапецеидальными, пилообразными и т. д. Наиболее жесткие требования предъявляются к точности колебаний при виброобработке. Здесь чаще всего требуются синусоидальные колебания обкатываемого инструмента, стабильные одновременно по амплитуде, частоте и фазе. При виброобразивной обработке очень эффективными оказываются двух- и трехкоординатные колебания (круговые, эллиптические, винтовые и т. д.).

В строительстве, сельском хозяйстве, горной, химической и текстильной промышленности, испытательной и бытовой технике используются линейные колебания инструмента с частотами  $1 \dots 10^3$  Гц, амплитудами  $10^{-5} \dots 3$  м, ускорениями  $10^{-3} \dots 10^4$  м/с<sup>2</sup> и угловые с частотами  $1 \dots 400$  Гц, амплитудами  $10^{-3} \dots 3$  рад и ускорениями  $2 \dots 10^4$  рад/с<sup>2</sup>.

По уникальности технических требований, предъявляемых к некоторым электроприводам, особое место занимают сейсморазведка, текстильная промышленность и виброкалибровочная техника. Так, при вибрационном просвечивании Земли амплитуда колебательного усилия достигает  $10^6$  Н, вибропрокидка челноков в ткацких станках производится с амплитудой до 3 м, а стабильность пилообразных колебаний

нитеводителя намоточных устройств и гармонических колебаний виброголовок калибровочных станков должна быть равной: по амплитуде  $1 \dots 3$  %, по частоте  $0,1 \dots 1$  % и фазе  $2 \dots 5$  %.

В виброустановках, применяемых в сельском хозяйстве, горной и химической промышленности, достаточно регулировать только амплитуду и частоту колебаний, причем не в процессе работы и дискретно. К виброустановкам, используемым в других отраслях народного хозяйства, предъявляются повышенные требования в отношении управляемости приводов. Для полнейшего обеспечения технологического процесса они должны регулироваться плавно и на ходу, а параметры режима колебаний: амплитуда, частота, фаза и гармонический состав – отдельно или комплексно.

Широко используются механические колебания в технике измерения, контроля и управления, занимающей амплитудно-частотную область с границами: по линейным колебаниям –  $10^{-3} \dots 10^3$  Гц,  $10^{-6} \dots 3$  м,  $2 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup>; по угловым –  $10^{-2} \dots 10^2$  Гц,  $10^4 \dots 10^3$  рад,  $2 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^4$  рад/с<sup>2</sup>. Эта область применения колебательных приводов отличается необходимостью плавного регулирования в рабочем режиме всех параметров колебаний с последующей стабилизацией их по амплитуде и частоте с точностью  $0,5 \dots 10$  %, по фазе –  $2,5 \dots 20^\circ$ . Иногда в экспериментальных измерительных установках используются низкочастотные гармонические колебания ( $10^{-1} \dots 10^{-3}$  Гц), пилообразные и гармонические колебания с перемещением нейтрали в оптико-электрических устройствах различного назначения, а также двухкоординатные колебания для получения разнообразных траекторий сканирования.

Из сказанного следует, что современные электроприводы колебательно-го движения должны не только обеспечивать плавное регулирование на ходу амплитуды, частоты и фазы во всей или

части области потребных колебаний рабочего инструмента по линейным координатам –  $10^{-3} \dots 10^4$  Гц,  $10^{-7} \dots 3$  м,  $2 \cdot 10^{-7} \dots 10^4$  м/с,  $10^{-1} \dots 10^{-6}$  Н; по угловым координатам –  $10^{-2} \dots 4 \cdot 10^2$  Гц,  $10^{-3} \dots 10^4$  Гц,  $2 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^4$  рад/с<sup>2</sup>,  $10^{-3} \dots 10^4$  Н·м и их стабилизацию с точностью до 1 % по амплитуде, 0,1 % по частоте и 2 % по фазе, но и создавать многокоординатные и разнообразные законы колебания.

### **Основная часть**

Существует большое число принципов построения электродвигателей колебательного движения на основе различного числа и порядка преобразований электрической, магнитной и тепловой энергии в механическую энергию колебаний.

В электрических электродинамических двигателях с однократным преобразованием электрической энергии в механическую используется известный эффект (закон Ампера) взаимодействия постоянного магнитного потока с переменным током подвижной катушки. В магнитных магнитодинамических двигателях с преобразованием магнитной энергии в механическую применяется тот же закон, но взаимодействие осуществляется между переменным по направлению магнитным потоком и постоянным током подвижной обмотки.

Магнитоэлектрические электродинамические и электромагнитные магнитодинамические двигатели отличаются тем, что в первых используется предварительное преобразование энергии переменного магнитного потока в энергию переменного тока, а во вторых, наоборот, переменный ток преобразуется в переменный поток.

Электрические и магнитоэлектрические электростатические колебательные двигатели основаны на эффекте притяжения обкладок конденсатора электрическим полем, а магнитные и электромагнитные магнитостатические – на эффекте притяжения ферромагнитно-

го материала магнитным полем (закон Максвелла).

В электрических и магнитоэлектрических электрострикционных, а также магнитных и электромагнитных магнитострикционных двигателях используются эффекты изменения размеров тел, выполненных из соответствующих материалов, под воздействием электрического (закон Липпмана) и магнитного (закон Джоуля) полей.

Аналогичный эффект расширения и сжатия под воздействием тепловой энергии применяется в тепловых и электротермических колебательных двигателях. Причем в последних колебания тепловой энергии создаются переменным электрическим током.

Индукционно-динамические двигатели строятся так же, как и электродинамические, на основе закона Ампера, но в них используется электромагнитная индукция (закон Фарадея) для наведения переменного тока в подвижном короткозамкнутом витке от переменного тока неподвижной обмотки.

Многократное преобразование энергии осуществляется также в индукционных и магнитогидродинамических двигателях колебательного движения. В первых используется взаимодействие перемещающегося в пространстве магнитного поля с твердым токопроводящим элементом, а во вторых – с жидким.

Описанные типы электродвигателей относятся к двигателям колебательного движения, построение которых рационально. Здесь отсутствуют, например, термоэлектрические, химико-электрические и другие двигатели, которые можно построить, однако применение их заведомо нецелесообразно в большинстве случаев из-за малого коэффициента преобразования.

Кроме того, не представлены механические колебательные двигатели без преобразования вида энергии и движения, использующие, например, часовой механизм, а также двигатели с механическими преобразователями од-

нонаправленного движения в колебательное.

Обзор технических параметров основных типов электродвигателей колебательного движения показывает, что не существует колебательных электродвигателей, способных создать все потребные амплитуды и частоты колебаний, и что наибольшая часть области потребных амплитуд и частот перекрывается параметрами электродинамических, электрогидравлических и электромашинных приводов без механических преобразователей. Причем сравнение их по областям располагаемых амплитуд и частот колебаний убеждает в преимуществе безредукторных электромашинных вибровозбудителей.

Первые попытки возбуждения и использования колебательных режимов работы электродвигателей вращательного и поступательного движения были сделаны более 80 лет назад [2]. Первоначально использовались только асинхронные электродвигатели, позднее появились электроприводы с синхронными, шаговыми двигателями, двигателями постоянного тока, но и в настоящее время наиболее распространены в таких приводах АД линейного и вращательного движения, а также МДП [3, 4].

Общая классификация электроприводов с электродвигателями вращательного и поступательного движения, работающими в колебательных режимах без механических преобразователей, довольно широка. Приведем наиболее распространенные типы таких приводов.

Замкнутые системы электроприводов с последовательно соединенными генератором и двигателем постоянного тока легко реализуются на серийных электрических машинах, но они не обеспечивают широких диапазонов регулирования параметров режима колебаний.

Следующий тип – электроприводы, использующие принцип слежения за периодическим сигналом на основе питания переменным током (напряжени-

ем) якорной обмотки или обмотки возбуждения электродвигателя постоянного тока либо при использовании питания модулированным током (напряжением) двигателей переменного тока, либо с помощью периодического импульсного управления шаговыми электродвигателями. Подобные приводы обеспечивают колебания выходного вала (штока) по самым разнообразным законам, позволяют плавно, с высокой точностью и в широких пределах регулировать параметры режима колебаний, но необходимость иметь хорошо управляемое задающее устройство периодических сигналов заданной формы значительно усложняет их схему.

Наиболее просты в техническом исполнении системы разомкнутого типа. Они могут быть либо с вынужденным периодическим реверсом электромагнитного усилия путем специального питания электродвигателей, либо с самореверсом вследствие наличия автоколебательных процессов. Реверс может быть мягким, когда электромагнитное усилие в момент смены направления движения уменьшается до нуля, и жестким, когда электромагнитное усилие существенно не изменяется.

В ряде электроприводов колебательного движения с мягким вынужденным реверсом используются те же принципы, что и в следящих электроприводах колебательного движения: питание переменным напряжением обмоток якоря или возбуждения двигателя постоянного тока, применение различных видов модуляции напряжений питания первичного элемента двигателя переменного тока.

Наиболее перспективно использование линейной фазовой модуляции, которая, например, в двухфазных АД, может быть реализована различными способами. Фазовый способ позволяет получить диапазоны плавного регулирования амплитуды, частоты и положения нейтрали колебаний до четырех порядков, дает возможность создания са-

мых различных законов колебаний без специальных задающих устройств периодических сигналов.

Асинхронные приводы с питанием постоянным и модулированным по амплитуде переменным напряжением просты, надежны, легко реализуются с помощью поочередного переключения управляемых вентилях и пригодны как для двухфазных, так и для трехфазных АД вращательного и линейного движения при питании как от однофазной, так и от трехфазной сети.

Мягкий периодический реверс осуществляется, если вращать дуговой статор АД вращательного движения или индуктор линейного АД вокруг оси, перпендикулярной к продольной оси двигателя. Этот способ позволяет исключить высокочастотные пульсации магнитного поля, неизбежные при питании напряжениями, модулированными по амплитуде и фазе.

Колебательное движение в электродвигателях с жестким периодическим реверсом наиболее просто реализуется с помощью концевых контактных или бесконтактных переключателей полярности или фазы напряжения питания. Жесткий реверс в электроприводах колебательного движения на основе шагового режима АД осуществляется вследствие периодического изменения положения оси магнитного поля путем переключения вентилях, включенных в фазные обмотки по одному или по два, соединенных встречно-параллельно. Питательная сеть может быть постоянного или переменного тока. В последнем случае по фазным обмоткам проходит пульсирующий ток, что вследствие проявляющегося при этом эффекта динамического торможения в конце шага дает более жесткую фиксацию шагов. Надежность таких электродвигателей дискретных колебаний снижена из-за возникновения в момент переключения вентилях больших ударных токов и усилий (моментов).

Во многих электродвигателях ко-

лебательного движения используется автореверс (самореверс). Он возникает, например, при питании АД через конденсаторы или концевые переключатели, управляемые при движении бегуна (ротора). Самореверс происходит также в электродвигателях, выполненных из двух частей, в которых создаются электромагнитные усилия, направленные навстречу друг другу.

Известны исследования автоколебательных АД, работающих на неустойчивой части механической характеристики при однофазном включении трехфазного АД. Связь ротора с колеблющейся нагрузкой осуществляется обязательно через пружину – механическую или «электрическую». «Электрическая» пружина обычно выполняется в виде отрицательной обратной связи по положению бегуна (ротора) и дает возможность регулировать собственную частоту двигателя.

Автоколебания возникают и в явнополюсных электродвигателях, соединенных с нагрузкой через пружину и имеющих в нейтральном положении частично смешанные оси первичного и вторичного элементов.

Электродвигатели колебательного движения с самореверсом очень просты в исполнении, но обеспечиваемые ими диапазоны регулирования параметров колебаний невелики.

Известны многочисленные попытки реализации разомкнутых автоколебательных электроприводов на основе автореверса (самореверса).

В 1922 г. Р. Trombetta предложил реализовать молот на основе линейного асинхронного электродвигателя [2], в котором бегущее магнитное поле коммутировалось концевыми выключателями (включателями).

Уже в 1925 г. Я. С. Япольский предложил на этой идее создавать так называемые магнитофугальные ударные машины [5], в которых статор ЛАД подключался к источнику электроэнергии изменяемой частоты в зависимости от

скорости бойка. Им сообщалось о том, что удалось создать молот на 400 кг с частотой 100 ударов в минуту при КПД около 40 %.

Исследования, проведенные во Всесоюзном энергетическом институте, показали, что использование АД в качестве привода молота для забивки свай нецелесообразно, т. к. система в целом получается громоздкой и имеет небольшой КПД (12...16 %), причем КПД самого молота не превышает 35 %.

Тем не менее, разработки электроприводов, использующих путевые переключатели контактного или бесконтактного типа для реверса движения, продолжают и находят практическое применение в качестве привода вибрирующих рулей, лучковых пил, бойка ударных механизмов, рекламы и часов, масляных выключателей.

Общим недостатком автореверса на основе путевых переключателей является жесткость реверса, сопровождающаяся большими ударными токами и электромагнитными усилиями, что существенно снижает надёжность и долговечность работы таких приводов. Надо отметить, что использование возвратных пружин уменьшает этот недостаток, но полностью устранить его не может.

Интерес к автореверсу, как к наиболее удобному принципу построения автоколебательных электроприводов, привел к созданию колебательных электродвигателей специальных конструкций. В некоторых из них использовались рассмотренные выше путевые переключатели, но они встраивались непосредственно в двигатель.

Так, например, в разработанном для машин ударного действия линейном асинхронном электродвигателе цилиндрического типа с коротким бегуном бойком реверс осуществляется тиристорным коммутатором, управляемым двумя концевыми индуктивными датчиками, намотанными в пазы ЛАД. При массе бойка 2...2,5 кг достигается час-

тота колебаний 1...3 Гц, которая регулируется изменением напряжения электропитания в диапазоне 180...305 В.

Очень плодотворной оказалась идея создания электродвигателей колебательного движения на основе двух встречно-включенных электродвигателей, создающих встречно-направленные электромагнитные усилия. Известны разработки таких составных электродвигателей как постоянного, так и переменного тока. В первом случае обмотка индуктора (возбуждения) общая, а обмотка бегуна (якоря) от середины намотана противоположно. Пусковой момент отсутствует, поэтому необходим первоначальный толчок, после которого составные части двигателя начинают «перебрасывать» якорь друг другу встречно-направленными усилиями. Во втором случае обмотка индуктора ЛАД состоит из двух частей, а бегун общий. Причем части обмотки индуктора могут быть как трёхфазные так и однофазные, а бегун исполняется короткозамкнутым или обмотанным. Обязательно имеются на бегуне концевые пружины. Такой привод применялся для челноков ткацких станков и обеспечивал частоту колебаний 9 Гц, размах колебаний 355 мм при массе бегуна с челноком 78 г и потребляемой мощности 120 Вт.

Известны разработки подобных электродвигателей, в которых статорные группы обмоток исполняются так, что центральная обмотка является общей для обеих групп. Причём поля могут быть встречно-бегущими, а могут дополняться центральным пульсирующим полем. В составных электродвигателях с направленными навстречу друг другу электромагнитными усилиями осуществляется мягкий реверс, когда электромагнитные усилия в момент смены направления движений уменьшаются до нуля, что исключает появления электроточковых и силовых ударов. Однако необходимость изготовления электродвигателя специальной конструкции, существенно отличающейся от серийной, сдерживает

развитие этого принципа построения автоколебательных приводов.

То же относится и к колебательным электродвигателям синхронно-реактивного или редукторного исполнения, в которых оси зубцовых зон магнитных систем подвижного и неподвижного элементов в нейтральном положении смещены относительно друг друга. Первоначальное смещение и последующий автоколебательный режим обеспечиваются пружиной.

Наибольший интерес представляет создание автоколебательного режима в серийных асинхронных электродвигателях, обеспечивающего мягкий реверс.

Одной возможностью этого является использование известного из теории электрических машин периодического изменения по гармоническому закону взаимной индуктивности статорных обмоток.

В [6] А. Г. Голован показал, что при последовательном включении конденсаторов и статорных обмоток АД в некоторых случаях возникает качание угловой скорости около среднего значения. Это происходит из-за наличия в статоре двух систем трёхфазных токов частоты сети  $f_1$  и частоты модуляции  $f_2$  взаимной индуктивности обмоток. Дальнейшие исследования [7] показали, что в АД малой мощности последовательное подключение конденсаторов или резисторов может привести к автоколебательному движению, если статорная цепь не однофазная и настроена в резонанс напряжений.

Такой принцип позволил создать автоколебательный электропривод на основе линейного электродвигателя с медным кольцевым бегуном для водила механизма намотки в ткацких станках, обеспечивающим частоту колебаний до 50 Гц, амплитуду до 600 мм при потребляемой мощности 100 ВА.

Ещё более перспективен подход к построению автоколебательных приводов, при котором реализуется мягкий реверс на основе общего принципа по-

строения автоколебательных механических систем разомкнутого типа: создание консервативной пары «масса–упругость» и воздействие на неё активным нелинейным электромагнитным усилением, компенсирующим диссипативные нагрузки.

Наиболее удобен для реализации этого принципа асинхронный электродвигатель, ротор которого обладает моментом инерции, а механическая характеристика нелинейна и имеет как устойчивые, так и неустойчивые участки работы. Для создания автоколебаний необходимо только присоединить к валу электродвигателя позиционный элемент, обладающий упругостью в том или ином виде. Это может быть механическая, магнитная или электрическая пружина. В последнем случае можно управлять собственной частотой колебаний.

Наибольший интерес исследователей-электромехаников вызывал автоколебательный режим однофазного электродвигателя с подпружиненным валом. Условия возникновения устойчивых угловых колебаний в таком электроприводе исследовались Н. П. Власовым более 70 лет назад [8].

Сначала А. Г. Ивахненко [9], а затем В. И. Антипенко [10] изучают возможность управления автоколебаниями за счёт введения в статорные цепи однофазного АД активно-реактивных сопротивлений.

Подобным образом создаются автоколебания в линейных асинхронных электродвигателях, если его бегун закреплён на пружине.

Автоколебания возникают и в трёхфазных АД с подпружиненным ротором.

Во всех этих случаях обязательным условием возникновения автоколебаний является наличие в механической характеристике АД участка с отрицательной крутизной и на его валу пружины.

Несмотря на перспективность, внедрение этого подхода сдерживается

необходимостью использования серийных однофазных электродвигателей, не выпускаемых на большие мощности, а также ненадёжностью механических пружин.

### Заключение

Использование автоколебательно-го режима общепромышленных трёхфазных асинхронных электродвигателей, включённых в трёхфазную сеть, упрощает реализацию, но не даёт существенного выигрыша по мощности из-за малой величины колебательной составляющей электромагнитного момента по сравнению с постоянной составляющей,

работающей на сдвиг нейтрали колебаний, т. е. на одностороннее поджатие пружины.

Решением указанных недостатков является пересоединение обмоток общепромышленного трёхфазного асинхронного электродвигателя для подключения к однофазной электрической цепи с целью перевода его в однофазный режим работы и замена механической пружины маятником, имитирующим «упругость», что позволит предельно упростить реализацию и повысить надёжность автоколебательных систем рассматриваемого типа [11, 12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Луковников, В. И.** Электропривод колебательного движения / В. И. Луковников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. **Trombetta, P.** The electric hammer / P. Trombetta // I. American Inst. Electric Eng. – 1922. – Vol. 41, № 4. – P. 46–52.
3. **Грачев, С. А.** Безредукторный электропривод периодического движения / С. А. Грачев, В. И. Луковников. – Минск : Выш. шк., 1991. – 160 с.
4. **Аристов, А. В.** Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания / А. В. Аристов. – Томск : ИПФ ТПУ, 2000 – 176 с.
5. **Япольский, Я. С.** Магнитофугальные ударные машины / Я. С. Япольский // Электричество. – 1925. – № 11. – С. 646–653.
6. **Голован, А. Г.** Механическое качание асинхронной машины при её работе с последовательно включёнными конденсаторами / А. Г. Голован, Чж. Чен-Шен // Электричество. – 1962. – № 10. – С.12–15.
7. **Федотов, В. М.** Асинхронный колебательный электропривод с регулируемой собственной частотой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск : ТПИ, 1982. – 32 с/
8. **Власов, Н. П.** Автоколебательная схема с однофазным асинхронным мотором / Н. П. Власов // Журнал технической физики. – 1935. – Т. V, вып. 4. – С. 641–653.
9. **Ивахненко, А. Г.** Из лабораторной практики / А. Г. Ивахненко // Автоматика. – 1956. – № 2. – С. 38–42.
10. **Антипенко, В. И.** Исследование асинхронного двигателя в автоколебательном режиме / В. И. Антипенко // Автоматика. – 1963. – № 4. – С. 51–62.
11. **Луковников, В. И.** Обобщённая модель маятникового электропривода / В. И. Луковников, Л. В. Веппер, А. Е. Спорик // Современные проблемы машиноведения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель : ГПИ, 1998. – Т. 2. – С. 86–88.
12. **Луковников, В. И.** Анализ электромеханической автоколебательной системы «асинхронный электродвигатель – упругий элемент» / В. И. Луковников, Ю. А. Рудченко // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 61–66.

### LIST OF LITERATURE

1. **Lukovnikov, V. I.** Oscillatory motion electric drive / V. I. Lukovnikov. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
2. **Trombetta, P.** The electric hammer / P. Trombetta // I. American Inst. Electric Eng. – 1922. – Vol. 41, № 4. – P. 46–52.
3. **Grachev, S. A.** Gearless electric drive of periodic motion / S. A. Grachev, V. I. Lukovnikov. – Minsk : Vysh. shk., 1991. – 160 p.
4. **Aristov, A. V.** Oscillatory motion electric drive with double-way feed machine / A. V. Aristov. – Tomsk : IPF TPU, 2000. – 176 p.



5. **Yapolsky, Y. S.** Magnetic hammering machines / Y. S. Yapolsky // *Electricity*. – 1925. – № 11. – P. 646–653.
6. **Golovan, A. G.** Mechanic oscillation of asynchronous machine during its operation with in-series capacitors / A. G. Golovan, Chen-Shen Chang // *Electricity*. – 1962. – № 10. – P. 12–15.
7. **Fedotov, V. M.** Asynchronous oscillatory electric drive with regulated intrinsic frequency : author's abstract of PhD dissertation. – Tomsk, TPI, 1982. – 32 p.
8. **Vlasov, N. P.** Self-oscillation system with single-phase asynchronous motor / N. P. Vlasov // *Technical physics journal*. – 1935. – T. V, issue 4. – P. 641–653.
9. **Ivakhnenko, A. G.** From laboratory practice / A. G. Ivakhnenko // *Automation*. – 1956. – № 2. – P. 38–42.
10. **Antipenko, V. I.** Research of asynchronous motor in self-oscillation mode / V. I. Antipenko // *Automation*. – 1963. – № 4. – P. 51–62.
11. **Lukovnikov, V. I.** Generalized model of pendulum electric drive / V. I. Lukovnikov, L. V. Vepper, A. E. Sporik // *Modern problems of engineering science : materials of Intern. scient.-techn. conf.* – Gomel : GPI, 1998. – Vol. 2. – P. 86–88.
12. **Lukovnikov, V. I.** Analysis of electromechanical self-oscillation system «asynchronous motor – elastic member» / V. I. Lukovnikov, Y. A. Rudchenko // *Her. of the GGTU named after P. O. Sukhoi*. – 2003. – № 1. – P. 61–66.

#### LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Lukovnikov, V. I.** Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya / V. I. Lukovnikov. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 152 s.
2. **Trombetta, P.** Elektricheskij molot / P. Trombetta // *I. Amerikan. Inst. Elektr. Inzh.* – 1922. – T. 41, № 4. – S. 46–52.
3. **Grachev, S. A.** Bezreduktornyj elektroprivod periodicheskogo dvizheniya / S. A. Grachev, V. I. Lukovnikov. – Minsk : Vysh. shk., 1991. – 160 s.
4. **Aristov, A. V.** Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya s mashinoy dvojnogo pitaniya / A. V. Aristov. – Tomsk : IPF TPU, 2000. – 176 s.
5. **Yapolsky, Y. S.** Magnitofugal'nye udarnye mashiny / Y. S. Yapolsky // *Elektrichestvo*. – 1925. – № 11. – S. 646–653.
6. **Golovan, A. G.** Mekhanicheskoe kachanie asinkhronnoj mashiny pri eyo rabote s posledovatel'no vklyuchennymi kondensatorami / A. G. Golovanand, Chen-Shen Chang // *Elektrichestvo*. – 1962. – № 10. – S. 12–15.
7. **Fedotov, V. M.** Asinkhronnyj kolebatelnyj elektroprivod s reguliruyemoy sobstvennoj chastotoj : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – Tomsk : TPI, 1982. – 32 s.
8. **Vlasov, N. P.** Avtokolebatel'naya sistema s odnofaznym asinkhronnym motorom / N. P. Vlasov // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 1935. – T. V, vyp. 4. – S. 641–653.
9. **Ivakhnenko, A. G.** Iz laboratornoj praktiki / A. G. Ivakhnenko // *Avtomatika*. – 1956. – № 2. – S. 38–42.
10. **Antipenko, V. I.** Issledovanie asinkhronnogo dvigatelya v avtokolebatel'nom rezhime / V. I. Antipenko // *Avtomatika*. – 1963. – № 4. – S. 51–62.
11. **Lukovnikov, V. I.** Obobshchennaya model' mayatnikovogo elektroprivoda / V. I. Lukovnikov, L. V. Vepper, A. E. Sporik // *Sovremennye problemy mashinovedeniya : materialy MNTK*. – Gomel : GPI, 1998. – T. 2. – S. 86–88.
12. **Lukovnikov, V. I.** Analis elektromekhanicheskoy avtokolebatel'noj sistemy «asinkhronnyj elektrodvigatel' – uprugy element» / V. I. Lukovnikov, Y. A. Rudchenko // *Vestn. GGTU im. P. O. Sukhogo*. – 2003. – № 1. – S. 61–66.

*Статья сдана в редакцию 12 сентября 2011 года*

**Юрий Александрович Рудченко**, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-795-35-18.  
**Андрей Владимирович Козлов**, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-664-40-93.  
**Андрей Александрович Толстенков**, аспирант, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-322-79-37.

**Yury Alexandrovich Rudchenko**, Associate Professor, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. Tel.: +375-447-95-35-18.  
**Andrey Vladimirovich Kozlov**, Associate Professor, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. Tel.: +375-296-64-40-93.  
**Andrey Alexandrovich Tolstenkov**, Associate Professor, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. Tel.: +375-293-22-79-37.