

УДК 621.313.29:311.61:629.4.082.3

В. И. Омеляненко, докт. техн. наук

Л. В. Оверьянова

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина

Е. С. Рябов, канд. тех. наук

ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков, Украина

НЕРЕГУЛЯРНАЯ КОММУТАЦИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ИНЕРЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ

Приводятся алгоритм и математическая модель процесса нерегулярной коммутации в системе электромеханического преобразования энергии инерционного накопителя в составе тягового привода электроподвижного состава, а также проводится количественная оценка нерегулярной коммутации путем имитационного моделирования. Библ. 2, рис. 4.

Ключевые слова: инерционный накопитель, инвертор тока, нерегулярная коммутация, алгоритм процесса, математическая модель

Наводяться алгоритм і математична модель процесу нерегулярної комутації в системі електромеханічного перетворення енергії інерційного накопичувача в складі тягового приводу електрорухомого складу, а також проводиться кількісна оцінка нерегулярної комутації шляхом імітаційного моделювання. Бібл. 2, рис. 4

Ключові слова: інерційний накопичувач, інвертор струму, нерегулярна комутація, алгоритм процесу, математична модель

Введение

Одним из способов экономии энергоресурсов при эксплуатации электроподвижного состава является применение накопителей энергии в его тяговом приводе. Среди возможных технических решений накопительных устройств перспективным, на наш взгляд, является использование инерционного накопителя, представляющего собой сочетание маховика и обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором [1]. Совмещенную конструкцию маховика и электрической машины будем именовать системой электромеханического преобразования энергии (СЭМПЭ).

При работе накопителя в системе тягового привода электроподвижного состава, возникает необходимость в изменении значения электродвижущей силы (ЭДС) обмотки якоря при регулировании мощности СЭМПЭ накопителя в процессе выполнения ним своих функций. Одним из путей такого изменения является включение отдельных фаз в состав якорной обмотки или их выключение. Поэтому, наряду с процессом переключения направления тока в фазе («регулярной коммутацией») [2], коммутатор должен еще выполнять и функции отключения или подключения отдельных фаз к цепи обмотки якоря в момент достижения тока нулевого значения, то есть обеспечивать так называемую «нерегулярную коммутацию».

Целью исследований, результаты которых изложены в статье, является установление алгоритма процесса нерегулярной коммутации и создание математической модели этого процесса, а также количественная оценка нерегулярной коммутации путем имитационного моделирования для тестового СЭМПЭ.

Алгоритм и математическая модель процесса нерегулярной коммутации. Схема накопителя с двухполюсной четырехфазной электрической машиной и коммутатором на базе IGBT-транзисторов показана на рис. 1. Приняты следующие обозначения: ω – частота вращения ротора; τ – полюсное деление; n_1, n_2, n_3, n_4 и k_1, k_2, k_3, k_4 – начала и концы секций катушек, соответственно; 1, 2, 3, 4 – коммутаторы; K_1, K_2, K_3, K_4 – ключи; VD_1, VD_2, VD_3, VD_4 – диоды; C_1, C_2 – конденсаторы; I_d – ток источника; U – напряжение на зажимах.

Рассматриваемая СЭМПЭ инерционного накопителя будет выполнять свои функции только при условии безусловного обеспечения изменения направления тока в фазах якорной обмотки в определенные моменты времени. Этот процесс по аналогии с коллекторными машинами называют процессом коммутации.

Его этапы, математическая модель, влияние различных параметров на процесс изменения тока и напряжения на всех элементах устройства коммутатора подробно изложены в работе [2].

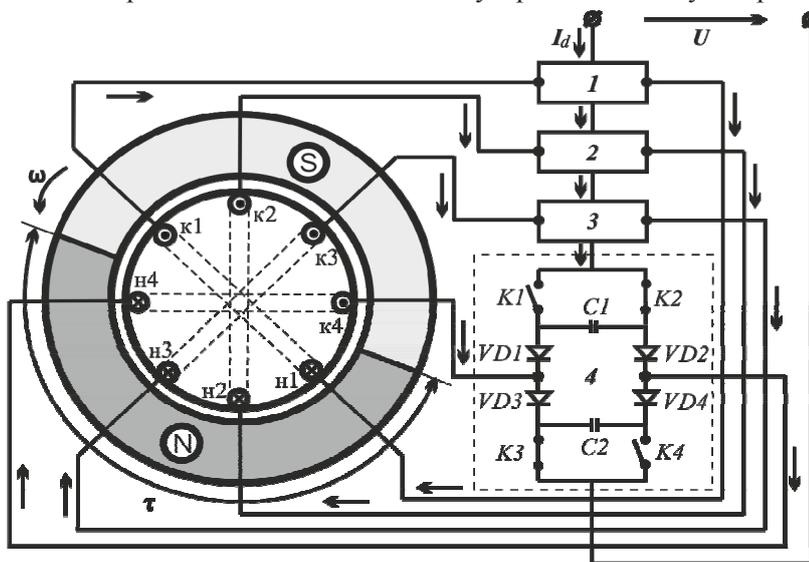


Рис. 1

Упомянутые исследования касались коммутаторов на базе быстродействующих тиристоров, которым свойственна неполная управляемость и относительно большое время выключения (20...60 мкс). Исключить упомянутые недостатки тиристорной схемы возможно путем применения в качестве элементной базы коммутатора IGBT-транзисторов, что позволит обеспечить полную управляемость процессами их включения и выключения, малое время переключения (10...1000 нс), а также уменьшение емкости коммутирующих конденсаторов.

Установим алгоритм процесса нерегулярной коммутации в СЭМПЭ накопителя и разработаем его математическую модель. Схема для анализа исследуемых процессов представляет собой инвертор тока с отсекающими диодами.

В качестве нагрузки в диагональ моста включена фаза якорной обмотки СЭМПЭ, которая представлена эквивалентными параметрами – индуктивностью L_ϕ , активным сопротивлением R_ϕ и ЭДС e_ϕ , наведенной в фазе коммутирующего контура.

При составлении математической модели принято, что источник энергии обладает свойствами источника тока. Кроме этого оговорим еще два обстоятельства.

Первое. ЭДС фазы обмотки якоря представим как функцию конструктивного параметра K_m , включающего в себя конструктивные особенности электрической машины, мгновенных значений индукции в активной зоне B_δ и тока якоря I_a [6]: $e_\phi = f(K_m, B_\delta, I_a)$. Рассмотрение процесса коммутации будем проводить при постоянной частоте вращения ротора, поскольку процессы, имеющие место в коммутирующей фазе, протекают значительно быстрее, чем изменяется частота вращения ротора.

Второе. Для удобства рассмотрения коммутационных процессов и составления математической модели, каждый из транзисторов и включенный последовательно ему блокирующий диод заменим идеальным ключом.

Исходя из принятого допущения и учитывая упомянутые выше обстоятельства процесс нерегулярной коммутации при обесточивании фазы обмотки рассмотрим, разделив его на шесть этапов.

Этап А (рис. 2а). На этом этапе ключи $K1$ и $K4$ проводят ток I_d через соответствующую фазу обмотки. Коммутирующие конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются до максимального напряжения

$$U_C = E_\phi + I_d \sqrt{2L_\phi / C},$$

где E_ϕ – амплитудное значение ЭДС фазы обмотки якоря; C – емкость конденсаторов.

Диоды $VD4$ и $VD5$ закрыты напряжением

$$U_{d4(5)} = -U_C + I_d R_\phi + e_\phi$$

Этап В (рис. 2б). С целью спада тока до нулевого значения, необходимо ключи $K1$ и $K4$ перевести в запертое состояние, а ключи $K2$ и $K3$ – в проводящее. При этом коммутирующие конденсаторы $C1$ и $C2$ разряжаются током I_d

$$I_d = -C(du_c / dt)$$

и напряжение на них меняется во времени согласно выражению

$$u_c = U_C - (I_d / C)t$$

Напряжения на диодах $VD4$ и $VD5$ также будут меняться во времени по выражению

$$u_{d4(5)} = -U_C - (I_d / C)t + I_d R_\phi + e_\phi$$

Когда $u_{d4(5)}$ станет равным нулю, диоды $VD4$ и $VD5$ откроются и этап B завершится. Время протекания этого этапа составит

$$t = C (U_C - I_d R_\phi - e_\phi) / I_d$$

Напряжение на коммутирующем конденсаторе к моменту окончания этапа коммутации:

$$U_C = I_d R_\phi + e_\phi$$

Этап С (рис. 2в). Этот этап начинается после открытия диодов $D4$ и $D5$. Ток I_d , протекающий через ключи $K2$ и $K3$ разветвляется на два пути: через диоды $D4$ и $D5$ протекает ток i_k , а через конденсаторы $C1$ и $C2$ – ток $I_d - i_k$. В фазе обмотки якоря на этом этапе будет протекать ток $I_d - 2i_k$.

Электромагнитные процессы, имеющие место в коммутирующей фазе, описываются как:

$$\begin{cases} \frac{du_c}{dt} = -(I_d - i_k) / C; \\ \frac{di_k}{dt} = (e_\phi - u_c + R_\phi(I_d - 2i_k)) / 2L_\phi. \end{cases}$$

Этап C завершится, когда ток фазы $I_d - 2i_k$ станет равным нулю. При этом ЭДС изменит свое направление действия на противоположное и конденсаторы $C1$ и $C2$ перезарядятся до напряжения

$$U_C = 1 / C \int_{t_B}^{t_C} (I_d - i_k) dt.$$

До этого момента процессы, протекающие в коммутирующей фазе при нерегулярной коммутации, аналогичны процессам при регулярной коммутации.

Этап D (рис. 2з). В момент достижения током фазы нулевого значения ключ *K2* закрывается, а ключ *K1* открывается. В полученной схеме, соответствующей рассматриваемому этапу, протекают процессы, связанные с зарядом конденсаторов *C1* и *C2* и протеканием тока в нагрузке при изменяющейся ЭДС. Все диоды находятся в проводящем состоянии.

При этом конденсатор *C1* заряжается током i_1 , а конденсатор *C2* – током i_2 . Через диоды *VD3* и *VD5* протекают токи $I_d - i_1$ и $I_d - i_2$, соответственно. В фазе обмотки якоря на этом этапе протекает ток $i_1 - i_2$. Электромагнитные процессы на этапе D описываются следующим образом:

$$\begin{cases} u_{c1} = e_{\phi} + R_{\phi}(i_1 - i_2) + L_{\phi}(d(i_1 - i_2)/dt); \\ u_{c2} = e_{\phi} + R_{\phi}(i_1 - i_2) + L_{\phi}(d(i_1 - i_2)/dt); \\ i_1 = -C(du_{c1}/dt); \\ i_2 = -C(du_{c2}/dt). \end{cases}$$

Дозаряд конденсатора *C2* прекратится при достижении током i_2 нуля. Этим обусловлено окончание текущего этапа. Диод *VD6* запретится, и напряжение на нем будет равно:

$$u_{d6} = e_{\phi} + R_{\phi}i_1 + L_{\phi}(di_1/dt) - u_{c2}.$$

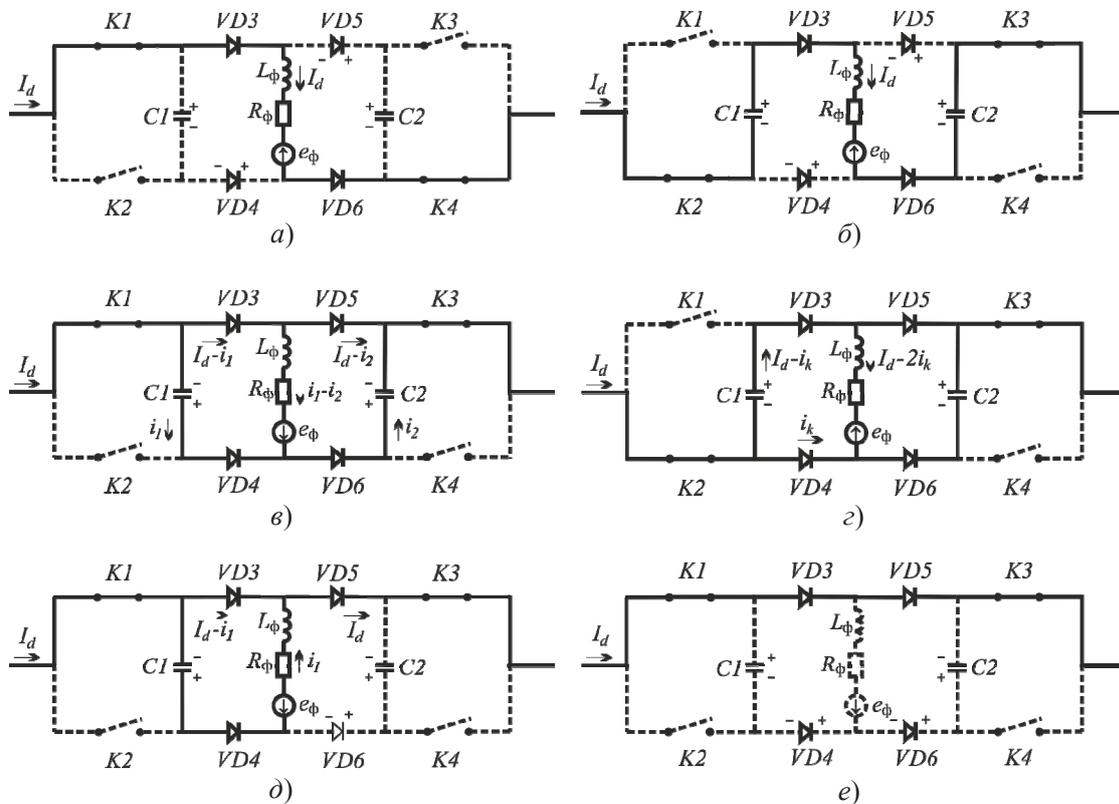


Рис. 2

Этап F (рис. 2д). Конденсатор *C1* продолжает перезаряжаться током i_1 . Этот же ток протекает через фазу обмотки. В случае достижения током i_1 значения I_d , диод *VD3* закроется. Напряжение на нем равно:

$$u_{d3} = -u_{c1} + e_{\phi} + R_{\phi}i_1 + L_{\phi}(di_1/dt).$$

При этом ток будет изменяться согласно выражению:

$$i_1 = -C(du_{c1}/dt).$$

При определенных сочетаниях параметров инвертора тока и режимов работы накопителя запираение диода *VD3* на этом этапе нерегулярной коммутации вообще может не иметь места. Поэтому схема, иллюстрирующая этот процесс, не приводится.

Этап G. На этом этапе схема имеет вид (рис. 2е).

Этот этап наступает, когда конденсатор *C1* перезарядится до напряжения

$$U_C = 1/C \int_{t_F}^{t_G} i_1 dt,$$

и ток фазы i_1 спадет до нуля. Диод $D4$ запретится напряжением:

$$u_{d4} = -u_{c1} - e_{\phi}.$$

Внешний источник тока будет переведен в режим установившегося короткого замыкания.

Таким образом, установлен алгоритм процесса нерегулярной коммутации, который обеспечивается несинхронным переключением ключей в инверторе тока. Приведенная математическая модель позволяет составить представление о закономерностях процессов, протекающих в инверторе при нерегулярной коммутации, находить длительность этапов процесса, определять требуемые номиналы для каждого элемента схемы.

Имитационное моделирование. Математическая модель нерегулярной коммутации дает возможность понимания физической сущности процессов, протекающих в фазе обмотки якоря и элементах коммутатора. В зависимости от соотношения параметров исследуемой схемы и режимов работы накопителя коммутационные процессы могут протекать не в строгой последовательности описанных выше этапов, что затруднит цифровое моделирование на основании полученных аналитических зависимостей. Кроме того, параметры применяемых полупроводниковых приборов также могут оказывать существенное влияние на процессы нерегулярной коммутации. В связи с этим представляется целесообразным разработать имитационную модель СЭМПЭ, что позволит исследовать работу системы наиболее полным образом без изменения аналитических зависимостей. Для создания имитационной модели СЭМПЭ накопителя выбрана среда визуального программирования Simulink, которая в сочетании с пакетом Matlab предоставляет широкие возможности для моделирования исследуемой системы.

Приведенная на рис. 3 модель состоит из следующих компонент: подсистемы External source, имитирующей источник питания; подсистемы Invertor, имитирующей исследуемый инвертор тока; подсистемы Measurement system, представляющей собой совокупность регистраторов сигналов; подсистемы Control system, имитирующей систему управления инвертором тока.

В подсистеме Invertor «собирается» инвертор тока. В диагональ его моста в качестве нагрузки включена фаза якорной обмотки. Портами Conn 1 и Conn 2 фазный мост подключается к внешней цепи (подсистема External source), которая представлена источником тока. Изменяющаяся ЭДС фазы обмотки задается в виде функции $e_{\phi} = f(K_m, B_{\delta}, I_a)$ и поступает на один из входов инвертора.

Текущее значение тока фазы отслеживается подсистемой Control system и при достижении его

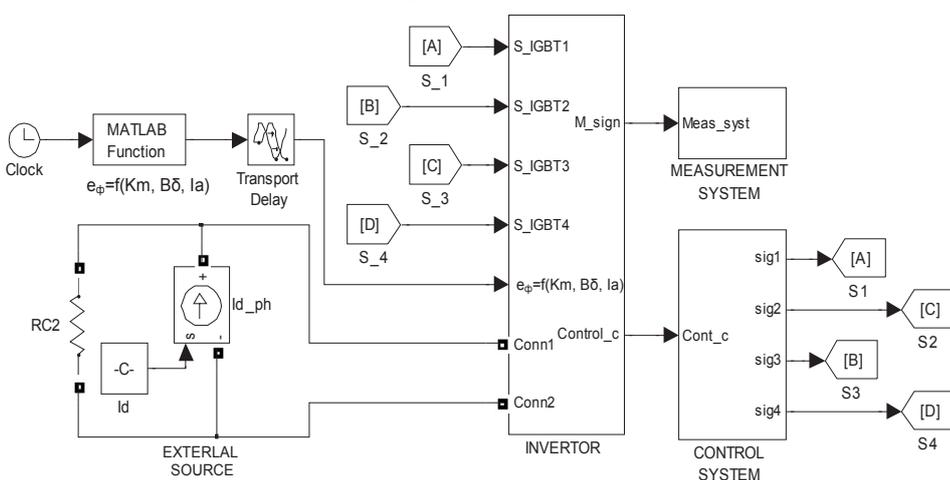


Рис. 3

значения нулю, подает сигнал на изменение алгоритма коммутации. Это обеспечивает перевод работы схемы в режим установившегося короткого замыкания и тем самым прекращение протекания тока фазы. Созданная имитационная модель дает возможность количественно оценить влияние номиналов элементов схемы инвертора тока на протекание процессов нерегулярной коммутации при включении или исключении отдельных фаз из состава якорной обмотки под током при необходимости регулирования уровня напряжения СЭМПЭ в различных режимах его работы.

Результаты моделирования процессов нерегулярной коммутации. Цифровое моделирование процессов регулярной и нерегулярной коммутации было проведено для тестового накопителя, обеспечивающего энергию обмена 6,3 МДж, с кольцевым маховиком массой 110 кг, внешним радиусом 0,225 м, внутренним радиусом 0,11 м, высотой 0,335 м и максимальной частотой вращения 18260 об/мин. Исходя из геометрических размеров маховика и его частоты вращения

значения нулю, подает сигнал на изменение алгоритма коммутации. Это обеспечивает перевод работы схемы в режим установившегося короткого замыкания и тем самым прекращение протекания тока фазы. Созданная имитационная модель дает возможность количественно оценить влияние номиналов элементов схемы

предложена четырех полюсная электрическая машина с петлевой обмоткой со следующими геометрическими размерами и параметрами: диаметр якоря – 0,214 м; активная длина якоря – 0,253 м; число фаз – 4; число катушек в фазе – 4; число витков в катушке – 2; размеры катушки без учета лобовой части – 0,253×0,168 м; поперечное сечение катушки – 80 мм², активное сопротивление фазы якоря – 0,00125 Ом; индуктивность фазы якоря – 7,625·10⁻⁶ Гн; геометрическая постоянная – 0,048. Емкость коммутирующих конденсаторов инвертора тока – 10⁻⁵ Ф.

Система электромеханического преобразования энергии накопителя должна обеспечивать выдачу и прием электрической энергии при максимальном напряжении 700 В и токе 400 А.

Проведенные ранее исследования регулярной коммутации, которая обеспечивается попарно синхронным переключением ключей *VT1*, *VT4* и *VT2*, *VT3* и состоит из четырех этапов, показали, что длительность коммутации составляет (3...3,3)·10⁻⁵ с, а напряжения на элементах коммутатора колеблются в пределах 400...520 В [2].

Результаты цифрового исследования нерегулярной коммутации накопителя приведены на рис. 10 в виде функций времени тока фазы якоря *i_a* и ЭДС фазы обмотки якоря *e_φ*, соответственно.

На рис. 4а приведены результаты при выключении фазы из состава якорной обмотки под током. Особенность работы схемы в данном режиме заключается в том, что ток фазы при достижении нулевой отметки, изменяет свое направление протекания на противоположное и, достигнув установленного значения, спадает до нуля. Процесс коммутации носит в целом замедленный характер. Общая длительность процесса коммутации 5·10⁻⁵ с, что составляет около 1% от времени нахождения фазы в активной зоне полюсного деления. Что касается напряжений на элементах коммутатора, то их величина колеблется в пределах 300...420 В.

На рис. 4б приведены результаты при включении фазы в состав якорной обмотки. Особенность работы схемы в этом режиме – включение фазы СЭМПЭ под прямое напряжение в момент изменения направления действия ЭДС (ее переход через ноль). Общая длительность этого процесса 3·10⁻⁵ с, что соответствует 0,5% от времени нахождения фазы в зоне полюсного деления. Значения напряжений на элементах коммутатора колеблются в пределах 320...470 В.

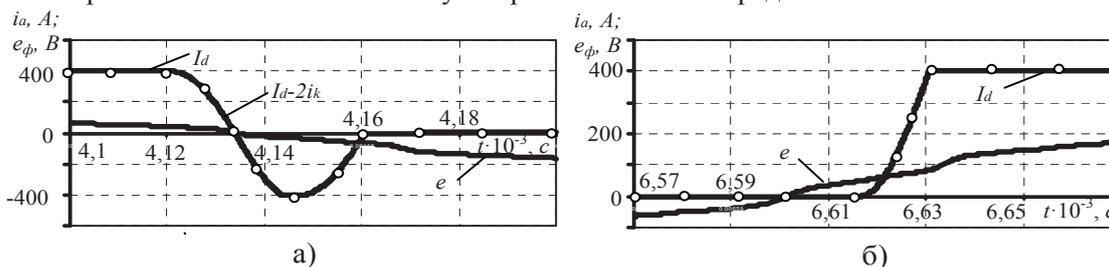


Рис. 4

При цифровом моделировании установлено, что предлагаемый коммутатор при правильно подобранной элементной базе для регулярной коммутации вполне работоспособен и при нерегулярной коммутации, и, таким образом, может обеспечить эффективную работу системы электромеханического преобразования энергии накопителя.

Выводы

Разработан алгоритм нерегулярной коммутации в СЭМПЭ инерционного накопителя, состоящий из отдельных этапов процесса, для каждого из которых созданы математические модели, позволяющие составить представление о закономерностях протекания этого процесса, находить длительность этапов и определять требуемые номиналы для элементов схемы коммутатора.

Отличительной особенностью нерегулярной коммутации является наличие несинхронного переключения ключей в плечах мостового инвертора, в следствии чего количество этапов коммутации возрастает, а также увеличивается продолжительность процесса коммутации при выключении фазы из состава якорной обмотки.

По результатам моделирования установлено, что предлагаемый коммутатор при правильно подобранной элементной базе для регулярной коммутации вполне работоспособен и при нерегулярной коммутации, и, таким образом, может обеспечить эффективную работу системы электромеханического преобразования энергии посредством ступенчатого изменения величины напряжения как в режиме накопления, так и в режиме выдачи накопителем энергии.

Список литературы

1. Омеляненко В.И., Омеляненко Г.В. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения // Техническая электродинамика – 2002 – №4 – С.83–88.

2. Омеляненко Г.В., Омеляненко В.И., Сергеев С.А. Коммутация в системе электромеханического преобразования энергии инерционного накопителя // «Изв. вузов. Электромеханика» – 2002 – №3 – С. 23–29.
УДК 621.313.29:311.61:629.4.082.3

IRREGULAR SWITCHING IN THE SYSTEM OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION OF INERTIA STORAGE DEVICE

V. I. Omelyanenko, L.V. Overyanova
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»
E.S. Ryabov
State Enterprise plant «Electrotyazhmash»

The algorithm and the mathematical model of the irregular switching process in electromechanical energy conversion system of the inertial storage device in the electric rolling stock traction drive are given, as well quantification the irregular switching through simulation modeling is performed. References 2, figures 4.

Key words: *inertial storage device, current inverter, irregular switching, algorithm of process, mathematical model.*

1. Omelyanenko V.I., Omelyanenko G.V. The inertial energy storage systems for traction power supply // Technical Electrodynamics. – 2002 – №4 – P.83-88 (Rus).

2. Omelyanenko G.V., Omelyanenko V.I., Sergeev S.A. Switching to a system of electromechanical energy conversion inertial drive // «Math. universities. Electrical Engineering» – 2002 – №3 – P. 23-29 (Rus).