

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Показано, что характер протекания энергетических процессов индукционно-динамического преобразователя ударной дѣи существенно определяется формой импульсу струму возбуждения. Розглянуті схеми збудження індуктора від ємнісного накопичувача, що реалізують перемінно-полярний, однопієриодний і аперіодичний імпульси. Проаналізовані критерії ефективності, що враховують: корисну роботу та втрати в активних елементах; корисну роботу та енергію джерела; прискорювальну масу, енергію джерела та імпульс аксіальної сили, яка діє на якорь, а також залишкову енергію в ємнісному накопичувачі.

Показано, что характер протекания энергетических процессов индукционно-динамического преобразователя ударного действия во многом определяется формой импульса тока возбуждения. Рассмотрены схемы возбуждения индуктора от емкостного накопителя, реализующие переменнo-полярный, однопериодный и аперіодический импульсы. Проанализированы критерии эффективности, учитывающие: полезную работу и потери в активнo-х элементах; полезную работу и энергию источника; ускоряемую массу, энергию источника и импульс аксиальной силы, действующий на якорь, а также остаточную энергию в емкостном накопителе.

ВВЕДЕНИЕ

Ударные электромеханические преобразователи являются одними из наиболее эффективных устройств, предназначенных для ускорения различных массивных объектов до высоких скоростей или возбуждения силовых импульсов повышенной мощности. Среди указанного класса устройств особое место занимает индукционно-динамический преобразователь (ИДП) ударного действия, обеспечивающий индукционное взаимодействие стационарного индуктора, который импульсно возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), и электропроводящего якоря, установленного с возможностью аксиального перемещения относительно индуктора [1, 2]. В результате такого взаимодействия на начальном этапе рабочего процесса происходит импульсное отталкивание электропроводящего якоря от стационарного индуктора.

На основе ИДП разрабатываются различные линейные ускорители массивных объектов, называемые в иностранной литературе *coil-gun*, и ударные индукционно-динамические электродвигатели, развивающие значительные механические нагрузки импульсного характера [3, 4]. Эти преобразователи характеризуются кратковременным рабочим циклом, высокими скоростными показателями, развиваемыми на коротком активном участке, и удельными параметрами, обусловленными интенсивными импульсными нагрузками при незначительной массе, что связано с отсутствием специального магнитопровода.

Однако для ИДП характерна низкая эффективность преобразования накопленной энергии ЕНЭ в механическую, совершаемую подвижным якорем. Полезная механическая работа может представлять собой, например, разгон исполнительного элемента до высокой скорости, быстрое объемное сжатие газа, ударное деформирование жесткого объекта, срабатывание пускового механизма, возбуждение силового импульса, например, в земле при сейсморазведке, в активном объеме испытательного стенда и др.

Из-за невысокой эффективности электромеханического преобразования в ИДП возникают вопросы: куда уходит значительная часть энергии, обуславливая повышенные потери, и каким образом эту энергию можно перенаправить в полезную работу.

В отличие от электромеханических преобразователей продолжительного действия для ИДП ударного действия не разработаны общепринятые критерии оценки эффективности их работы.

Целью статьи является анализ энергетических процессов и оценка критериев эффективности, учитывающая различные аспекты преобразования энергии в ИДП.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При возбуждении неподвижного индуктора от ЕНЭ в коаксиально установленном электропроводящем якоре наводятся вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем индуктора приводит к возникновению аксиальной электродинамической силы, приводящей к отталкиванию якоря от индуктора. Для учета неравномерности распределения индуцированных токов в массивном ускоряемом якоре в электрической схеме замещения якорь можно представить совокупностью N элементарных короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по поверхности диска и имеющих изменяемую магнитную связь с первичным контуром – индуктором, подключаемым к емкостному накопителю. В таком случае электрические процессы в ИДП можно описать системой дифференциальных уравнений [5]:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \\ \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\ R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\ + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\ R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\ \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,$$

где i_0, L_0, R_0 – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора; i_k, L_k, R_k – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого k -го контура якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z относительно индуктора; M_{kp} – взаимоиנדуктивность между соответствующими токовыми контурами ($k \neq p$); T_k – температура k -го токового контура; C, U_0 – соответственно емкость и напряжение ЕНЭ.

Аксиальное перемещение Δz якоря с исполни-

тельным элементом возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k^N i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z),$$

и их скорость можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k^N i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_P \times \\ \times \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),$$

где m_1, m_2 - масса якоря и исполнительного элемента, соответственно; K_P - коэффициент упругости пружины; K_T - коэффициент динамического сопротивления; γ_a - плотность воздуха; β_a - коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{2m} - наружный диаметр силовой пластины.

Для определения температуры индуктора или якоря, изменяемой в течение рабочего процесса и распределенной по сечению, используется нелинейное уравнение теплопроводности

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T),$$

где $c^*(T)$ - усредненная удельная теплоемкость; γ - усредненная плотность материала; $j(t)$ - плотность тока; $\lambda_w(T)$ - коэффициент теплопроводности; k_z - коэффициент заполнения индуктора; $\rho(T)$ - удельное сопротивление.

Рассмотрим ИДП, обеспечивающий стремительный разгон исполнительного элемента и сжатие упругой пружины. В качестве базового варианта принят преобразователь, индуктор и якорь которого выполнены в виде коаксиально расположенных дисков с наружным диаметром 100 мм. Индуктор представляет собой пропитанный эпоксидной смолой плоский диск высотой 10 мм, который плотно намотан в два ряда медной шиной прямоугольного сечения. Якорь выполнен в виде медного диска толщиной 2,0 мм. Для возбуждения индуктора используется ЕНЭ с базовыми параметрами $U_0=500$ В и $C=3000$ мкФ. Масса ускоряемого исполнительного элемента составляет $m_2=0,25$ кг. В исходном состоянии якорь плотно прижат к индуктору при помощи возвратной пружины, которая взаимодействует с исполнительным элементом и имеет коэффициент упругости $K_P=75$ кН/м.

При расчетах будем полагать отсутствие деформации элементов преобразователя и отдачи индуктора, считая перемещения якоря строго аксиальным. Влиянием вспомогательных элементов преобразователя, в частности подводящих и соединительных проводов, электронных приборов пренебрегаем.

Рассмотрим три схемы возбуждения индуктора:

- "переменно-полярный импульс" (ППИ), при которой реализуется полный разряд ЕНЭ с возникновением колебательно-затухающего тока;
- "однополупериодный импульс" (ОИ), при которой реализуется полярный однополупериодный импульс тока с помощью тиристора при сохранении заряда в ЕНЭ;
- "аперриодический импульс" (АИ), при которой реализуется полярный аперриодический импульс тока с помощью тиристора при шунтировании индуктора обратным диодом и отсутствии остаточного заряда в ЕНЭ.

На рис. 1 представлены плотность тока в неподвижном индукторе j_1 и усредненная плотность тока в перемещаемом якоре j_2 при использовании указанных схем возбуждения индуктора.

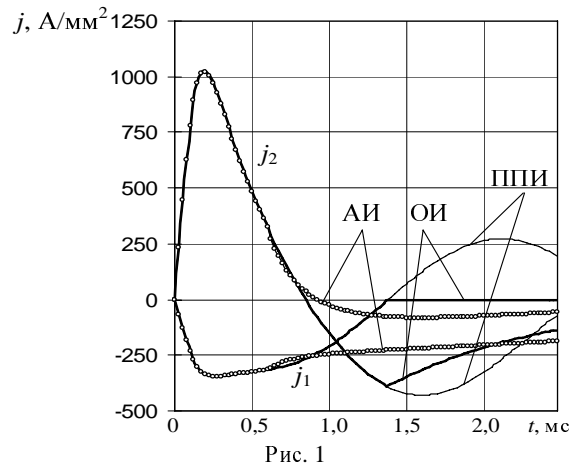


Рис. 1

Характер протекания токов в активных элементах преобразователя во многом определяется схемой возбуждения индуктора. Однако различия в токах проявляются лишь через определенное время (0,6...0,7 мс) после начала рабочего процесса. При этом в схемах ОИ и АИ ток индуктора не меняет полярности, а ток якоря изменяет полярность через 0,8...0,9 мс. Вследствие этого электродинамическая сила между якорем и индуктором меняет характер взаимодействия из отталкивания на притяжение. При этом необходимо учитывать, что на якорь помимо электродинамической действуют и иные силы, прежде всего – это сила сжатия пружины, направленные противоположно силе отталкивания якоря от индуктора.

На рис. 2 представлены результирующая сила f , действующая на якорь, который перемещается на расстояние ΔZ со скоростью V , а также значения превышений температур индуктора θ_1 и якоря θ_2 для схемы ППИ (жирные линии), схемы ОИ (тонкие линии) и схемы АИ (линии с метками).

Аксиальная сила, действующая на якорь, имеет импульсный характер, обусловленный электродинамическим отталкиванием от индуктора, с последующим изменением знака, связанного в основном с воздействием сжимаемой пружины (рис. 2,а). Из-за изменения полярности аксиальной силы начинает сразу же снижаться скорость, которая через определенное время меняет знак. Якорь вместе с исполнительным элементом перемещается на некоторое максимальное расстояние от индуктора ΔZ_m , после чего следует обратное движение (рис. 2,б).

При всех схемах возбуждения начальные электромеханические и тепловые параметры одинаковы, в том числе максимальные значения силы f и скорости V , однако в последующем наблюдается значительное различие. Так максимальное перемещение якоря и скорость в конце рассматриваемого временного интервала наблюдаются при использовании схемы ППИ. Однако при такой схеме наблюдается наибольший нагрев якоря, в то время как индуктор наиболее нагревается при использовании схемы АИ (рис. 2,в).

Рассмотрим энергетические диаграммы рассматриваемого преобразователя при использовании указанных схем возбуждения. На рис. 3 показана динамика изменения основных составляющих энергий в ИДП в течение рабочего процесса при использовании схем возбуждения индуктора: ИИП (а), ОИ (б) и АИ (в).

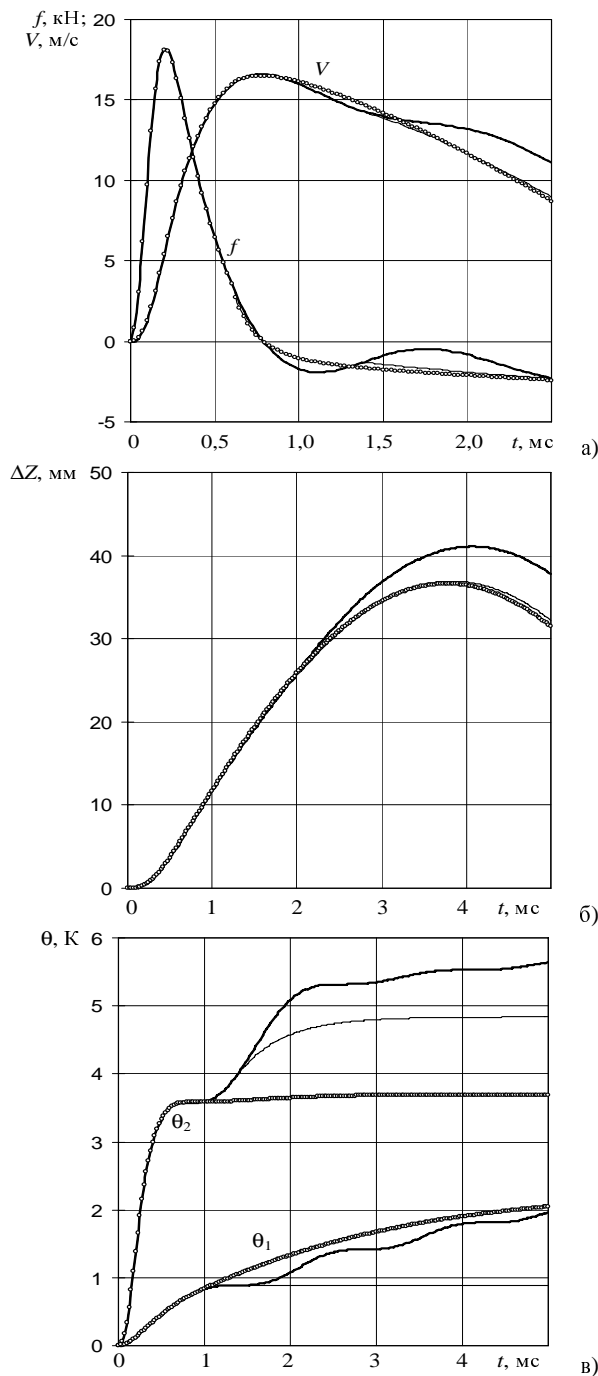


Рис. 2

Составляющими энергиями являются:

$$W_{p1} = \int_0^t i_0^2(t) R_0 dt - \text{потери в индукторе};$$

$$W_{p2} = \sum_k \int_0^t i_k^2(t) R_k dt - \text{потери в якоре};$$

$$W_m = 0,5 \sum_{k=0}^{N+1} L_k i_k^2(t) + \sum_{k=0}^{N+1} \sum_{n=1}^N M_{kn}(z) \cdot i_k(t) \cdot i_n(t), \quad (k \neq n) - \text{магнитная энергия};$$

$$W_{kin} = 0,5(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) - \text{кинетическая энергия};$$

$$W_c = 0,5 \cdot C \cdot u_c^2(t) - \text{энергия ЕНЭ};$$

$$W_{pr} = 0,5 \cdot K_p \Delta Z^2(t) - \text{энергия сжатия пружины}.$$

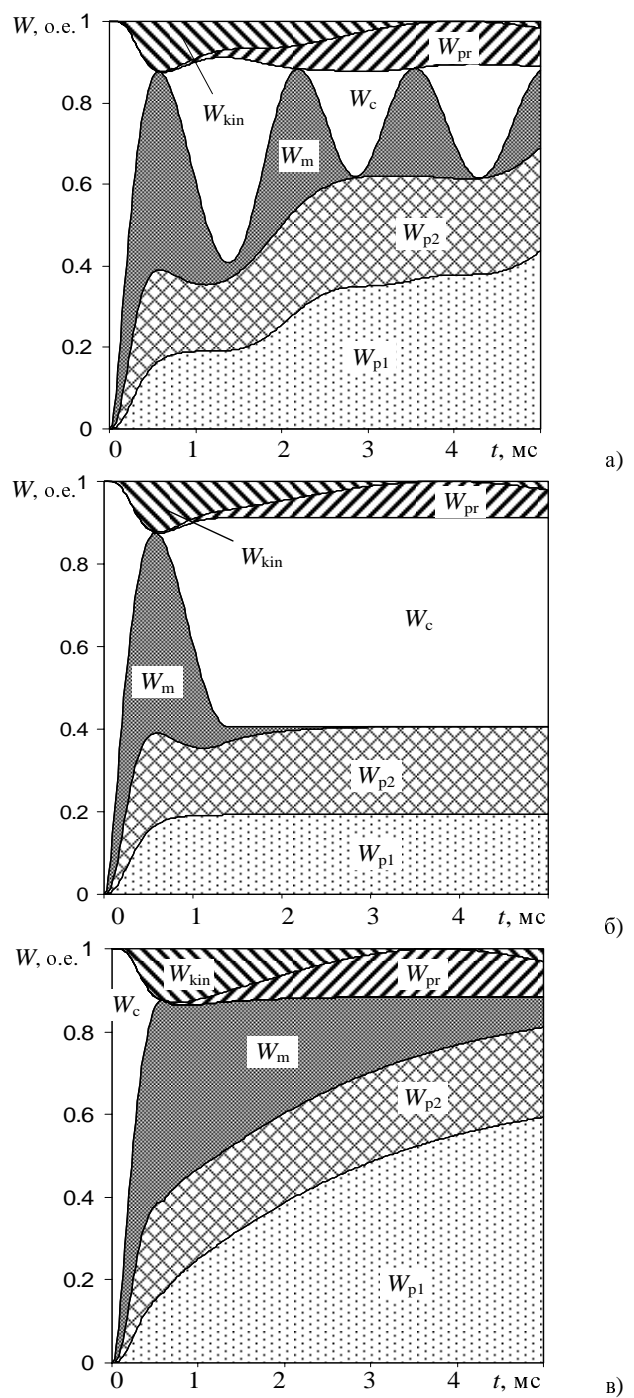


Рис. 3

Как следует из рис. 3 характер изменения различных составляющих энергий во многом зависит от схемы возбуждения преобразователя.

Так, при использовании схемы ППИ, реализующей полный разряд ЕНЭ, к концу рассматриваемого рабочего интервала основными становятся все возрастающие потери в индукторе W_{p1} и якоре W_{p2} . Здесь наблюдается колебательный процесс между энергией магнитного поля W_m и энергией ЕНЭ W_c , оказывающий влияние и на остальные составляющие энергий (рис. 3,а).

При использовании схемы ОИ, реализующей однопериодный импульс, потери в индукторе и якоре выходят на стабильный уровень уже через 1,5...2 мс, не достигая столь значительных величин, как в схеме ППИ. При этом энергия магнитного поля W_m быстро затухает, и к концу рассматриваемого рабоче-

го интервала основной становится сохраненная энергия в ЕНЭ W_c (рис. 3,б).

При использовании схемы АИ, реализующей аperiодический импульс, основная часть энергии идет на нагрев индуктора, энергия магнитного поля затухает, но постепенно, в то время как энергия емкостного накопителя обнуляется практически в начале (0,8 мс) рабочего процесса (рис. 3,в).

Отметим, что кинетическая энергия W_{kin} и энергия сжатия пружины W_{pr} в процессе работы ИДП, перераспределяется между собой, переходя из одной в другую, практически сохраняя неизменную их суммарную величину. Однако при отсутствии пружины эта суммарная энергия, представляющая собой лишь кинетическую энергию, снижается по сравнению с их суммарным значением, что объясняется более существенным уменьшением магнитной связи между индуктором и якорем.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для оценки эффективности работы ИДП используем ряд критериев, оценивающих его работу с различных аспектов. В традиционных электрических машинах продолжительного действия в качестве критерия эффективности для двигателей используется КПД – отношение полезной механической к подведенной электрической мощности. При этом оперируют усредненными во времени значениями мощностей, например за период, не учитывая изменений для каждого конкретного момента времени.

Для ИДП ударного действия использовать понятия мощности не целесообразно. Здесь необходимо оперировать понятиями энергии, анализируя, каким образом энергия заряженного ЕНЭ преобразуется в кинетическую или иную механическую энергию за рабочий цикл. При этом можно использовать начальные и конечные значения энергий для ИДП. Однако более перспективным является представление критериев эффективности не в виде одного значения, а в виде динамически изменяемой величины, что позволяет оценивать потенциальные возможности преобразователя на основе, например, максимальных значений критериев, предусматривая возможность прерывания рабочего процесса, например, путем ограничения тока в индукторе при помощи электронной схемы.

Поскольку преобразование энергии емкостного накопителя в полезную работу (ускорение якоря и сжатие пружины) сопровождается потерями в неподвижном индукторе и ускоряемом якоре, первый критерий эффективности можно выразить следующим образом:

$$\eta_1(t) = \frac{100 \cdot [(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + K_p \cdot \Delta Z^2(t)]}{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + 2 \sum_{k=0}^{N+1} \int i_k^2(t) R_k(T_k) dt + K_p \cdot \Delta Z^2(t)}, \%$$

Аналогичное выражение для критерия эффективности ИДП использовано в работах [1, 6].

Второй критерий эффективности использует отношение полезной работы к исходной энергии ЕНЭ

$$\eta_2(t) = 100 \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + K_p \Delta Z^2(t)}{C \cdot U_0^2}, \%$$

Аналогичное выражение для критерия эффективности ИДП использовано в работах [7, 8].

Третий критерий эффективности можно выразить через значение импульса аксиальной силы, действующей на якорь в течение всего рабочего процесса, что важно, например, для силового воздействия

на сжимаемую пружину [9]

$$\eta_3(t) = \frac{100 \cdot C^{-1} U_0^{-2} \left(\int_0^t f(t, z) dt \right)^2}{m_1 + m_2}, \%$$

Рассмотрим динамику изменения этих критериев при использовании схемы ППИ (а), ОИ (б) и АИ (в) (рис. 4).

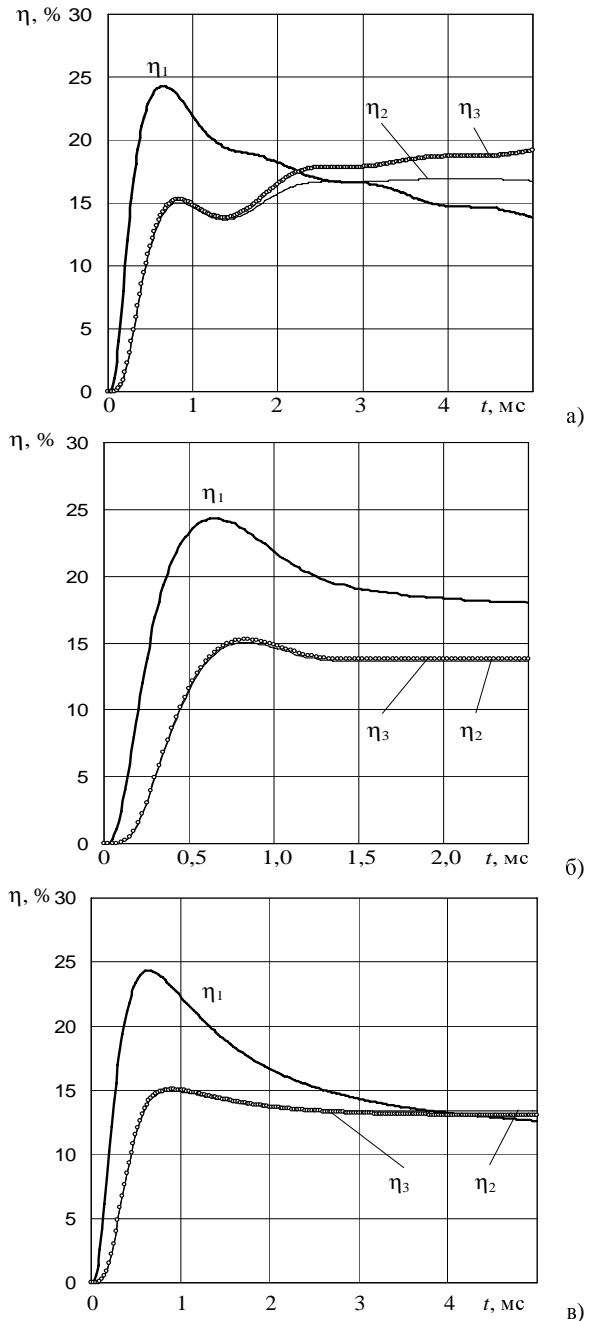


Рис. 4

Все критерии эффективности резко возрастают в начале работы преобразователя, после чего наблюдается их понижение. Критерий η_1 , учитывающий потери в индукторе и якоре, возрастает до наибольшей величины (около 24%), но он и сильнее снижается. Критерии η_2 и η_3 в начале рабочего процесса практически совпадают, а различие между ними проявляется позже. До первого максимума характер поведения всех критериев не зависит от схемы возбуждения индуктора, однако в конце

наблюдается интересная особенность – возрастание критерия η_1 при использовании схемы ППИ, в то время как в остальных схемах величина этого критерия со временем понижается.

Таким образом, по всем указанным выше критериям наиболее эффективной является схема ППИ, а наименее эффективной – схема АИ. Заметим, что только при использовании схемы АИ можно применять полярный ЕНЭ, выполненный на базе компактных электролитических конденсаторов большой емкости [5].

В схеме возбуждения ОИ после рабочего цикла сохраняется значительная часть энергии в ЕНЭ, которую можно использовать для последующего рабочего цикла. Если учитывать только потраченную энергию ЕНЭ на рабочий цикл, второй и третий критерии можно видоизменить следующим образом:

$$\eta_2^* = 100 \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + K_p \Delta Z^2}{C \cdot (U_0^2 - U_1^2)}, \%,$$

$$\eta_3^* = \frac{100 \cdot C^{-1} (U_0^2 - U_1^2)^{-1} \left(\int_0^t f(t, z) dt \right)^2}{m_1 + m_2}, \%,$$

где U_1 – остаточное напряжение ЕНЭ после рабочего цикла.

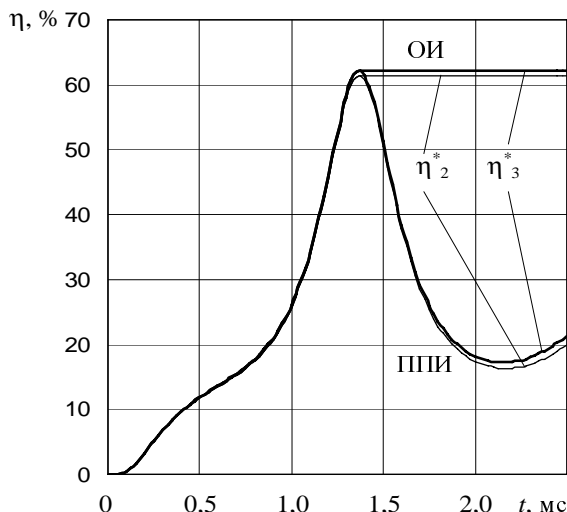


Рис. 5

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИДП НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

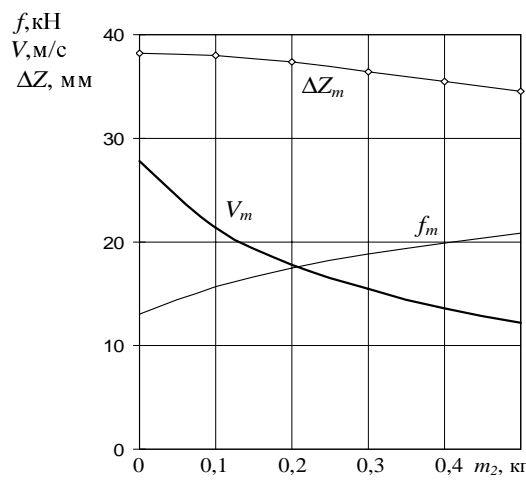
Рассмотрим влияние массы ускоряемой нагрузки и соотношений параметров ЕНЭ на эффективность работы преобразователя, возбуждаемого по схеме ОИ.

На рис. 6,а представлены зависимости максимальных значений аксиальной силы f_m , скорости V_m и перемещения ΔZ_m якоря в зависимости от массы ускоряемого исполнительного элемента m_2 . С увеличением массы ускоряемого исполнительного элемента m_2 максимальные значения скорости и перемещения якоря снижаются, но при этом величина действующей на якорь электродинамической силы возрастает. Последнее обстоятельство объясняется более сильным магнитным взаимодействием якоря и индуктора.

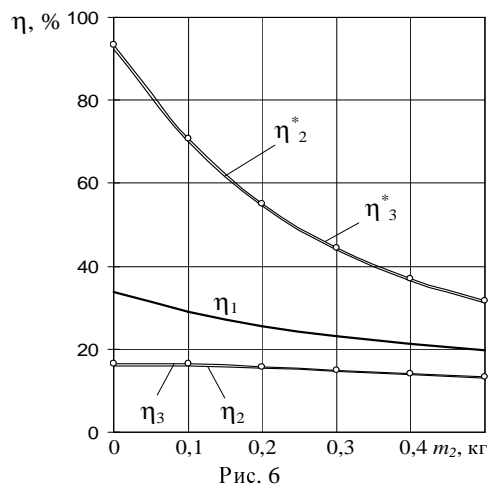
В результате увеличения массы ускоряемого исполнительного элемента от 0 до 0,5 кг эффективность ИДП по всем критериям снижается, даже критериев η_3 и η_3^* , учитывающих импульс электродинамической силы, действующей на якорь (рис. 6,б). Однако степень уменьшения этих критериев различна: η_1 – на 41

%, $\eta_{2,3}$ – на 18 %, $\eta_{2,3}^*$ – на 66 %. Заметим, что критерии η_2 и η_3 изменяются практически синхронно, хотя учитывают различные аспекты работы ИДП.

Параметры емкостного накопителя – напряжение U_0 и емкость C , при сохранении его энергии существенно влияют на эффективность работы электромеханического преобразователя (рис. 7). С увеличением емкости и соответствующим уменьшением зарядного напряжения снижаются все электромеханические параметры преобразователя: максимальные значения аксиальной силы f_m , скорости V_m и перемещения ΔZ_m якоря (рис. 7,а). В результате такого перераспределения параметров источника уменьшаются и все критерии эффективности ИДП.



а)



б)

Рис. 6

Поскольку при минимальных значениях емкости и массы ускоряемого исполнительного элемента рассматриваемого диапазона параметров эффективность преобразователя максимальна, рассмотрим энергетические процессы ИДП, который возбуждается от ЕНЭ с энергией 375 Дж и емкостью 1 мФ при отсутствии исполнительного элемента ($m_2 = 0$) (рис. 8). По сравнению с базовым вариантом (рис. 2,б) критерии эффективности данного преобразователя существенно повышаются: η_1 – на 40,6%, η_2 – на 56,7%, η_3 – на 57,5%. Это достигается за счет снижения потерь в индукторе W_{p1} на 33,6 % и в якоря W_{p2} – на 22%, что можно объяснить более короткими токовыми импульсами. А механическая энергия, представляющая собой сумму энергий кинетической W_k и сжатия пружины W_{pr} , возрастает на 40 %.

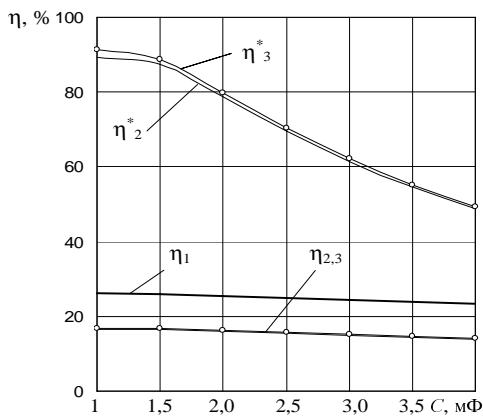
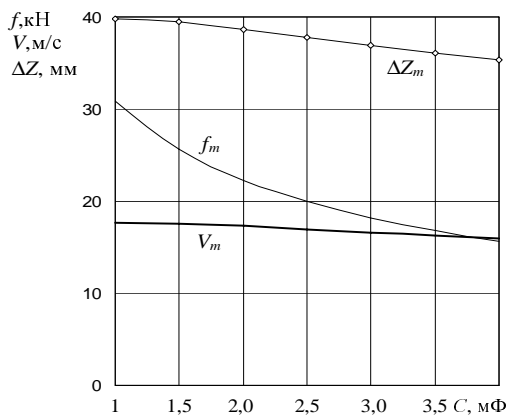


Рис. 7

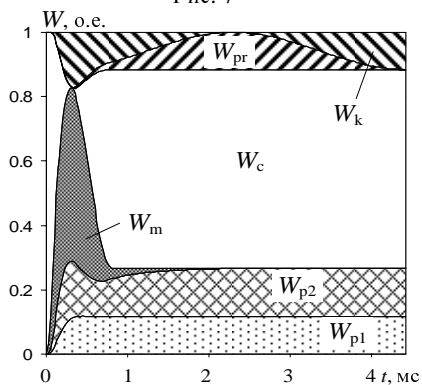


Рис. 8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер протекания энергетических процессов ИДП ударного действия во многом определяется схемой возбуждения индуктора от ЕНЭ, реализующей переменного-полярный, однополупериодный или аperiodический импульс тока.

Проанализированы критерии эффективности, учитывающие: полезную работу и потери в активных элементах; полезную работу и энергию ЕНЭ; ускоряемую массу, энергию ЕНЭ и импульс аксиальной силы, действующий на якорь. Исследована динамика изменения этих критериев для основных схем возбуждения индуктора.

Показано, что при использовании схемы, обеспечивающей однополупериодный импульс тока в индукторе, энергия в ЕНЭ частично сохраняется после рабочего цикла, и критерий эффективности ИДП, учитывающий остаточную энергию, превышает 60%.

Установлено, что при минимальных значениях емкости и массы ускоряемого исполнительного элемента эффективность преобразователя максимальна, что объясняется более короткими, но мощными силовыми импульсами, действующими на якорь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.A.Andrews, J.R.Devine, "Armature design for coaxial induction launchers", IEEE Trans. Magnetics, vol. 27, № 1, pp. 639-643, 1991.
2. Ю.Н.Васьковский, С.М.Рогач, В.Т.Чермерис, "Математическое моделирование индукционно-динамического ударного двигателя", Техн. электродинамика, № 4, С. 42-48, 1984.
3. R. Kaye, "Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers", IEEE Trans. Magnetics, vol. 41, № 1, pp. 194-199, 2005.
4. В.А. Тюткин, "Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов", Электротехника, № 11, С. 24-28, 2002.
5. В.Ф.Болух, А.М.Марков, В.Ф.Лучук, И.С.Щукин, "Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя", Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы сучасної електротехніки, Ч. 2, сс. 65-70, 2006.
6. B.M.Novac, P.Senior, I.R.Smith et al, "Studies of a very high efficiency cryogenic launcher", IEEE Trans. Magnetics, vol. 37, № 1, pp. 123-128, 2001.
7. M.Liao, Z.Zabar, D.Czarkowski et al, "On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher" // IEEE Trans. Magnetics, vol. 35, № 1, pp. 148-153, 1999.
8. В.П.Гальетов, Е.Г.Иванов, "Повышение эффективности электромагнитного индукционного ускорителя проводников", Журнал прикладной механики и техн. физики, № 4, С. 105-108, 1979.
9. В.Ф.Болух, "Эффективность электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа. Критерии и анализ", Электротехніка і електромеханіка, № 3. - С. 13-18, 2004.

Поступила 26.09.08

Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.,
 Марков Александр Михайлович, с.н.с.,
 Лучук Владимир Федосеевич, к.т.н., с.н.с.,
 Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.
 Национальный технический университет
 "Харьковский политехнический институт"
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
 каф. "Общая электротехника" и "Электрические машины",
 тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua,
 tech@tetra.kharkiv.com.