

В.Ф. Болух, И.С. Щукин, J. Lasocki

## ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ОБМОТОК НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*В електромеханічному індукційному прискорювачі циліндричної конфігурації найбільша амплітуда струму в обмотці індуктора виникає при максимальному початковому зсуві, але амплітуда струму в обмотці якоря при цьому найменша. Найбільша величина струму в обмотці якоря виникає при відсутності початкового зсуву. При збудженні від ємнісного накопичувача енергії електродинамічна сила між обмотками має початкову прискорювальну і подальшу гальмівну складові. Внаслідок цього швидкість якоря спочатку зростає до максимальної величини, але потім зменшується до моменту закінчення електромагнітного процесу. При збудженні прискорювача від джерела змінної напруги (ДЗН) між струмами в обмотках виникає фазовий зсув, що призводить до почергової зміни прискорювальних і гальмівних складових електродинамічної сили. Прискорювальні складові сили переважають над гальмівними складовими, що забезпечує переміщення якоря. При частоті ДЗН 50 Гц амплітуда струму в обмотці якоря менше, ніж в обмотці індуктора. Зі збільшенням частоти ДЗН фазовий зсув між струмами обмоток зменшується, струм в обмотці індуктора зменшується, а в обмотці якоря збільшується. Прискорювальні складові сили збільшуються, а гальмівні – зменшуються. При підвищенні частоти ДЗН до 500 Гц щільність струму в обмотці якоря перевищує аналогічну величину в обмотці індуктора. Бібл. 19, рис. 9.*

**Ключові слова:** електромеханічний індукційний прискорювач, циліндрична конфігурація, початковий зсув обмоток, ємнісний накопичувач енергії, джерело змінної напруги, швидкість якоря.

*В електромеханическом индукционном ускорителе цилиндрической конфигурации наибольшая амплитуда тока в обмотке индуктора возникает при максимальном начальном смещении, но амплитуда тока в обмотке якоря при этом наименьшая. Наибольшая величина тока в обмотке якоря возникает при отсутствии начального смещения. При возбуждении от емкостного накопителя энергии электродинамическая сила между обмотками имеет начальную ускоряющую и последующую тормозящую составляющие. Вследствие этого скорость якоря вначале возрастает до максимальной величины, но затем уменьшается к моменту окончания электромагнитного процесса. При возбуждении ускорителя от источника переменного напряжения (ИПН) между токами в обмотках возникает фазовый сдвиг, приводящий к возникновению чередующихся ускоряющих и тормозящих составляющих электродинамической силы. Ускоряющие составляющие силы преобладают над тормозящими составляющими, что обеспечивает перемещение якоря. При частоте ИПН 50 Гц амплитуда тока в обмотке якоря меньше, чем в обмотке индуктора. С увеличением частоты ИПН фазовый сдвиг между токами обмоток уменьшается, ток в обмотке индуктора уменьшается, а в обмотке якоря увеличивается. Ускоряющие составляющие силы увеличиваются, а тормозящие уменьшаются. При повышении частоты ИПН до 500 Гц плотность тока в обмотке якоря превышает аналогичную величину в обмотке индуктора. Библ. 19, рис. 9.*

**Ключевые слова:** электромеханический индукционный ускоритель, цилиндрическая конфигурация, начальное смещение обмоток, емкостной накопитель энергии, источник переменного напряжения, скорость якоря.

**Введение.** Электромеханические индукционные ускорители (ЭИУ) обеспечивают разгон исполнительного элемента до высокой скорости на коротком активном участке [1-5]. В этих коаксиальных ускорителях неподвижная обмотка индуктора, возбуждаемая либо от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), либо от источника переменного напряжения (ИПН) индуцирует ток в обмотке якоря. Взаимодействие тока обмотки якоря с магнитным полем обмотки индуктора приводит к возникновению электродинамической силы. Под действие аксиальной электродинамической силы обмотка якоря вместе с исполнительным элементом совершают линейное перемещение относительно обмотки индуктора, ускоряясь до высокой скорости. Все электромагнитные и электромеханические процессы в ЭИУ протекают кратковременно с показателями, которые значительно превышают соответствующие показатели линейных электродвигателей с продолжительным режимом работы.

ЭИУ используются во многих сферах науки и техники. Такие ускорители применяются в испытательных установках на ударные нагрузки, в быстродействующих электрических аппаратах и клапанно-коммутационной аппаратуре, в пусковых установках и др. [6-11] Так, в работе [12] описана установка для испытаний электронной техники при столкновении с

подвижным объектом. Стартовые пусковые установки используются также для многих классов беспилотных летательных аппаратов [4, 13]. На основе ЭИУ разрабатываются системы активной защиты бронированных устройств от вражеских объектов на подлете [14].

**Особенности и проблемы ЭИУ.** ЭИУ с осевой симметрией обмоток могут иметь дисковую или цилиндрическую конфигурацию. В дисковом ускорителе обмотки индуктора и якоря выполнены в форме относительно тонких дисков с подобными радиальными размерами. В исходном положении дисковые обмотки устанавливаются на минимальном аксиальном расстоянии друг от друга, при котором магнитная связь максимальна. Но по мере ускорения обмотки якоря магнитная связь между обмотками резко снижается [15].

В цилиндрическом ускорителе обмотки выполнены в форме полых цилиндров, аксиальные размеры которых существенно превышают радиальную толщину обмоток. В таком ускорителе обмотка якоря может совершать аксиальное перемещение внутри или снаружи обмотки индуктора. Это делает такую конструкцию предпочтительной, поскольку при большем перемещении обмотки якоря, а значит и большем времени взаимодействия обеспечивается

эффективная магнитная связь между обмотками. На рис. 1 представлена схема ЭИУ цилиндрической конфигурации с неподвижной наружной обмоткой индуктора 1 и ускоряемой внутренней обмоткой якоря 2. По мере аксиального перемещения обмотки якоря внутри обмотки индуктора магнитная связь, характеризующаяся взаимной индуктивностью  $M_{12}$  между обмотками, сохраняется на большем расстоянии при перемещении обмотки якоря по сравнению с дисковой ускорителем. Это делает конструкцию ускорителя цилиндрической конфигурации более перспективной по сравнению с дисковой конфигурацией.

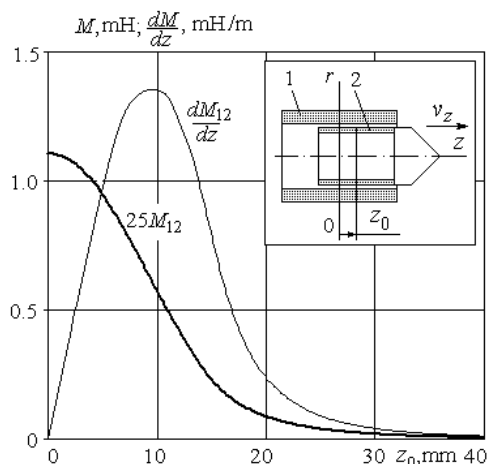


Рис. 1. Зависимость взаимной индуктивности между обмотками  $M_{12}$  и ее градиента  $dM_{12}/dz$  ЭИУ от начального смещения обмоток:  $z_0$  1 – обмотка индуктора; 2 – обмотка якоря

Якорь может быть выполнен в виде многовитковой короткозамкнутой обмотки или в виде массивного электропроводящего элемента. Массивный якорь конструктивно проще и обладает повышенной надежностью. Однако индуцированный ток в массивном якоре распределяется неравномерно по объему, что негативно влияет на электромеханические показатели ЭИУ. В плотно намотанном многовитковом короткозамкнутом якоре, пропитанном и замоноличенном эпоксидной смолой, несмотря на более сложную конструкцию и пониженную надежность, обеспечивается равномерное распределение индуцированного тока по объему [6]. Это делает его более перспективным, особенно для ЭИУ цилиндрической конфигурации.

Однако в ЭИУ цилиндрической конфигурации возникает проблема выбора начального смещения  $z_0$  обмотки якоря относительно обмотки индуктора. Это связано с тем, что при отсутствии указанного смещения, когда центральные плоскости обмоток совпадают, магнитная связь между обмотками будет наибольшей. Соответственно и индуцированный ток в обмотке якоря будет наибольшим. Однако аксиальная электродинамическая сила

$$f_z(t, z) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z),$$

где  $i_1, i_2$  – токи в обмотках индуктора и якоря соответственно,

приводящая обмотку якоря в движение, будет отсутствовать. Это связано с тем, что сила  $f_z$  пропорциональна градиенту взаимной индуктивности в аксиаль-

ном направлении  $dM_{12}/dz$ . По мере увеличения начального смещения  $z_0$  обмотки якоря 2 относительно обмотки индуктора 1 величина взаимной индуктивности  $M_{12}$  между обмотками ослабляется, в то время как градиент взаимной индуктивности  $dM_{12}/dz$  имеет максимум при определенной величине  $z_0$  (рис. 1).

Поскольку токи в обмотках ускорителя протекают кратковременно, то возникает вопрос о выборе начального смещения  $z_0$  обмотки якоря 2 относительно обмотки индуктора 1, при котором ЭИУ цилиндрической конфигурации обеспечивает наибольшую скорость обмотки якоря вместе с исполнительным элементом на выходе ускорителя  $v_{zf}$ .

**Целью статьи** является определение влияния начального смещения обмоток на показатели электромеханического индукционного ускорителя цилиндрической конфигурации при импульсном возбуждении от емкостного накопителя энергии и при кратковременном возбуждении от источника переменного напряжения.

**Математическая модель ЭИУ.** Рассмотрим электромеханический индукционный ускоритель, у которого обмотки плотно намотаны медным проводом круглого сечения и выполнены монолитными путем пропитки эпоксидной смолой с последующим ее затвердеванием. Для учета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов, а также ряда нелинейных зависимостей, например сопротивления от температуры, используем сосредоточенные параметры обмоток, а решения уравнений, описывающих указанные процессы, представим в рекуррентном виде [16]. Математическая модель ЭИУ учитывает меняющуюся магнитную связь между обмотками в процессе возбуждения обмотки индуктора.

При расчете показателей и характеристик ускорителя используется алгоритм циклического действия. Для этого рабочий процесс разбивается на ряд численно малых интервалов времени  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ , в пределах которых все величины считаются неизменными. На  $k$ -ом цикле, используя в качестве начальных значений параметры, рассчитанные в момент времени  $t_k$ , осуществляется расчет параметров в момент времени  $t_{k+1}$ . Для определения токов на интервале времени  $\Delta t$  используем линейные уравнения с неизменными значениями параметров. Малую величину расчетного шага  $\Delta t$  выбираем таким образом, чтобы она не оказывала существенного влияния на результаты компьютерного расчета, обеспечивая при этом необходимую точность.

Изменение пространственного положения обмотки якоря учитывается изменением потокосцепления  $\Psi$  между обмотками [16]:

$$\frac{d\Psi}{dt} = M_{12}(z) \frac{di_n}{dt} + v_z(t) i_n \frac{dM_{12}}{dz},$$

где  $n = 1, 2$  – индексы обмоток индуктора и якоря соответственно;  $v_z$  – скорость перемещения обмотки якоря вдоль оси  $z$ .

Начальные условия математической модели:

$$i_n(0) = 0 \text{ – ток } n\text{-ой обмотки;}$$

$$h_z(0) = z_0 \text{ – перемещение обмотки якоря;}$$

$T_n(0) = T_0$  – температура  $n$ -ой обмотки;  
 $u_c(0) = U_0$  – напряжение ЕНЭ;  
 $u(0) = U_m \sin \psi_u$  – напряжение ИПН;  
 $v_z(0) = 0$  – скорость обмотки якоря вдоль оси  $z$ ,  
 где  $U_m$  – амплитуда напряжения;  
 $\psi_u = 0$  – начальная фаза напряжения ИПН.

Математическая модель электромагнитных процессов ЭИУ при возбуждении от ЕНЭ представлена в работе [17], а при возбуждении от ИПН – в работе [18]. Механические процессы ускорителя учитывают массы обмотки якоря и исполнительного элемента, мгновенное положение обмотки якоря, электродинамическую силу между обмотками и аэродинамическое сопротивление воздушной среды [15]. Тепловые процессы ускорителя учитывают удельную теплоемкость, теплопроводность, плотность материала, удельное сопротивление и плотности токов  $j_n$  обмоток. На охлаждающих поверхностях обмоток используются граничные условия третьего рода, а на оси симметрии – граничные условия второго рода [19].

В качестве основных показателей ЭИУ используются амплитуды плотностей тока в обмотках индуктора  $j_{1m}$  и якоря  $j_{2m}$ , амплитуда электродинамической силы между обмотками  $f_{zm}$ , наибольшая величина скорости якоря  $v_{zm}$ , скорость якоря на выходе ускорителя  $v_{zf}$ , когда затухают электромагнитные процессы, и превышения температуры обмоток индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ .

**Параметры ЭИУ.** Рассмотрим электромеханический ускоритель со следующими параметрами: обмотка индуктора имеет внешний диаметр  $D_{1ex}=39$  мм, внутренний диаметр  $D_{1in}=27$  мм, аксиальную высоту  $H_1=45$  мм, число витков  $N_1=120$ ; обмотка якоря имеет внешний диаметр  $D_{2ex}=26$  мм, внутренний диаметр  $D_{2in}=20$  мм, аксиальную высоту  $H_2=30$  мм, число витков  $N_2=40$ . Обмотки намотаны медным проводом круглого сечения диаметром  $d_0=1,3$  мм.

ЕНЭ имеет энергию  $W_0=625$  Дж и реализуется в двух вариантах. Вариант ЕНЭ I – зарядное напряжение  $U_0=500$  В и емкость  $C_0=5000$  мкФ и вариант ЕНЭ II –  $U_0=707$  В,  $C_0=2500$  мкФ, которые обеспечивают различную длительность электрических процессов.

Источник переменного напряжения имеет амплитуду напряжения  $U_m=100$  В при частотах 50, 250 и 500 Гц и подключается к обмотке индуктора на короткое время ( $t=45$  мс).

Рассмотрим влияние начального смещения  $z_0$  обмотки якоря относительно обмотки индуктора на характеристики ЭИУ цилиндрической конфигурации. Заметим, что для ускорителя с указанными геометрическими параметрами наибольшая величина градиента взаимной индуктивности  $dM_{12}/dz$  имеет место при  $z_{0m} \approx 10$  мм (рис. 1).

**Характеристики ЭИУ при возбуждении от емкостного накопителя энергии.** Рассмотрим характеристики ускорителя при отсутствии начального смещения ( $z_0=0$ ), при максимальном смещении ( $z_0=20$  мм) и при промежуточном смещении, в котором обеспечиваются наибольшие скорости якоря на выходе ускорителя  $v_{zf}$ .

Токи в обмотках ЭИУ имеют колебательно-затухающий характер (рис. 2,а).

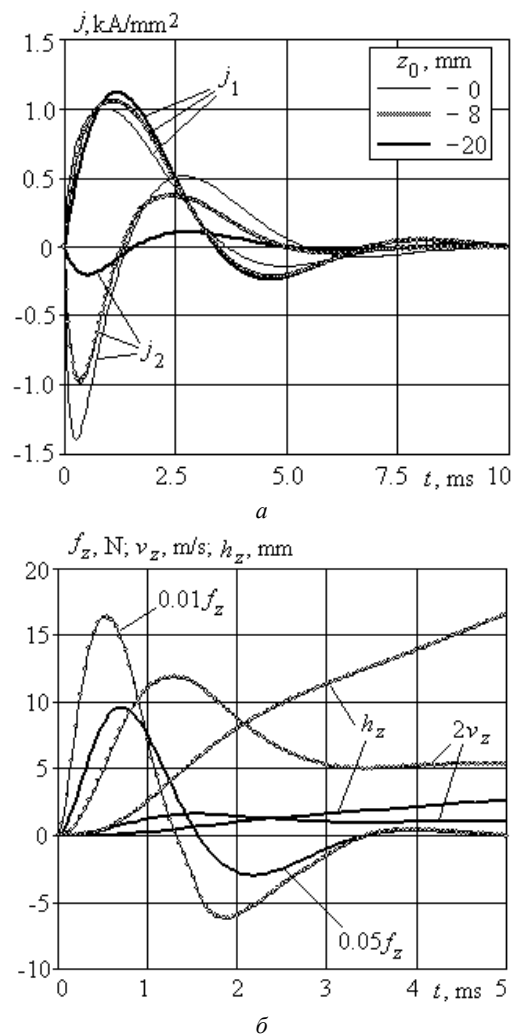


Рис. 2. Электрические (а) и механические (б) характеристики ЭИУ при  $C_0=5000$  мкФ,  $U_0=500$  В

При использовании варианта ЕНЭ I наибольшая амплитуда плотности тока в обмотке индуктора  $j_{1m}=1,12$  кА/мм<sup>2</sup> возникает при максимальном начальном смещении, но амплитуда плотности тока в обмотке якоря при этом наименьшая –  $j_{2m}=0,2$  кА/мм<sup>2</sup>. Наибольшая величина плотности тока –  $j_{2m}=1,4$  кА/мм<sup>2</sup> возникает при отсутствии начального смещения. Отметим, что при любом начальном смещении  $z_0$  токи в обмотках практически затухают через 10 мс.

Электродинамическая сила  $f_z$  между обмотками имеет начальную ускоряющую (положительную) и последующую тормозящую (отрицательную) составляющие (рис. 2,б). Ускоряющая составляющая силы возникает при противоположных полярностях токов в обмотках, а тормозящая – при одинаковых полярностях токов. При промежуточном начальном смещении  $z_0=8$  мм амплитуда ускоряющей составляющей силы составляет  $f_{zm}=1,64$  кН. Вследствие такой закономерности изменения электродинамической силы, скорость якоря вначале возрастает до максимальной величины  $v_{zm}=5,94$  м/с, а затем уменьшается к моменту окончания электромагнитного процесса в 2,23 раза. Перемещение обмотки якоря  $h_z$  нелинейно увеличивается со временем на активном участке разгона, на котором происходит электродинамическое взаимодействие между обмотками.

Очевидно, что величина перемещения  $h_z$  существенно выше при начальном смещении обмоток  $z_0=8$  мм, чем при  $z_0=20$  мм. При  $z_0=0$  мм механические показатели ЭИУ цилиндрической конфигурации равны нулю. При  $z_0=8$  мм превышение температуры обмотки индуктора составляет  $\theta_1=6,3$  К, а превышение температуры обмотки якоря –  $\theta_2=2,4$  К.

При использовании варианта ЕНЭ II амплитуды плотностей токов в обмотках ЭИУ увеличиваются (рис. 3,а). Наибольшая амплитуда плотности тока в обмотке индуктора возникает при максимальном начальном смещении  $z_0=20$  мм и составляет  $j_{1m}=1,28$  кА/мм<sup>2</sup>. Амплитуда плотности тока в обмотке якоря при этом минимальна и составляет  $j_{2m}=0,26$  кА/мм<sup>2</sup>. При отсутствии смещения ( $z_0=0$  мм) плотность тока в обмотке якоря максимальна и составляет  $j_{2m}=1,9$  кА/мм<sup>2</sup>.

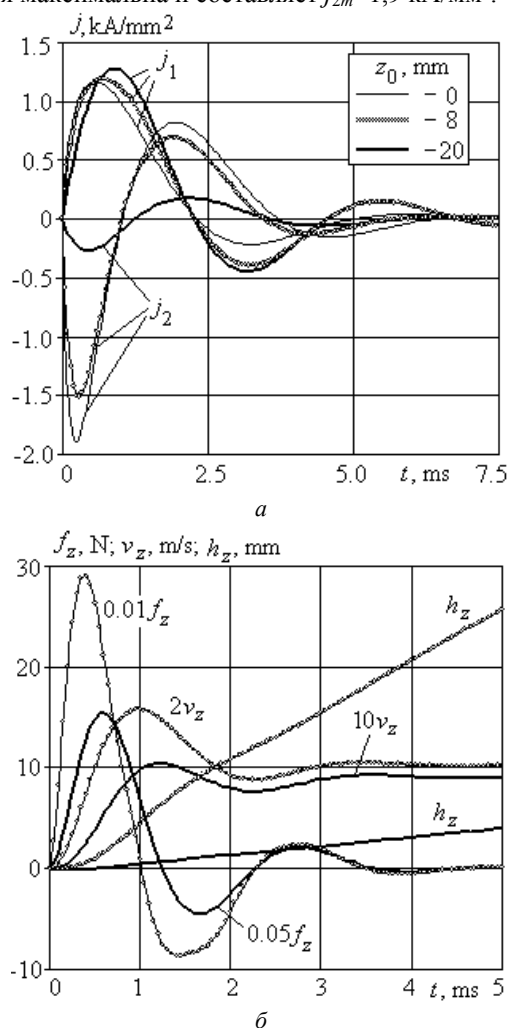


Рис. 3. Электрические (а) и механические (б) характеристики ЭИУ при  $C_0=2500$  мкФ,  $U_0=707$  В

Электродинамическая сила  $f_z$  между обмотками также имеет начальную ускоряющую и последующую тормозящую составляющие (рис. 3,б). При промежуточном начальном смещении обмоток ( $z_0=6$  мм) амплитуда ускоряющей составляющей силы увеличивается до величины 2,9 кН. Скорость обмотки якоря первоначально возрастает до максимально величины  $v_{zm}=7,91$  м/с, а затем уменьшается к моменту окончания электромагнитного процесса в 1,54 раза. При  $z_0=6$  мм превышение температуры обмотки индуктора

составляет  $\theta_1=5,9$  К, а превышение температуры обмотки якоря –  $\theta_2=5,0$  К.

Таким образом, несмотря на более короткое силовое воздействие, использование ЕНЭ с пониженной емкостью  $C_0$  и повышенным напряжением  $U_0$  обеспечивает более высокие скоростные показатели ЭИУ цилиндрической конфигурации. Однако это реализуется при различном начальном смещении обмоток  $z_0$ .

Оценить влияние начального смещения обмотки якоря  $z_0$  на показатели ускорителя, возбуждаемого от ЕНЭ, позволяет рис. 4. Независимо от варианта ЕНЭ основные зависимости ЭИУ имеют следующий характер. При использовании варианта ЕНЭ I и увеличении  $z_0$  от 0 до 20 мм амплитуда плотности тока в обмотке индуктора возрастает незначительно (на 11,2 %), а в обмотке якоря уменьшается значительно (в 6,98 раз). Вследствие этого превышение температуры обмотки индуктора возрастает на 19,1 %, а превышение температуры обмотки якоря уменьшается в 32,1 раза. Однако амплитуда электродинамической силы  $f_{zm}$  и скорость на выходе ускорителя  $v_{zf}$  имеют выраженные максимумы в зависимости от начального смещения обмоток  $z_0$ . Наибольшая амплитуда силы  $f_{zm}=1,72$  кН имеет место при  $z_0 \approx 6$  мм, а наибольшая скорость  $v_{zf}=2,66$  м/с – при  $z_0 \approx 8$  мм.

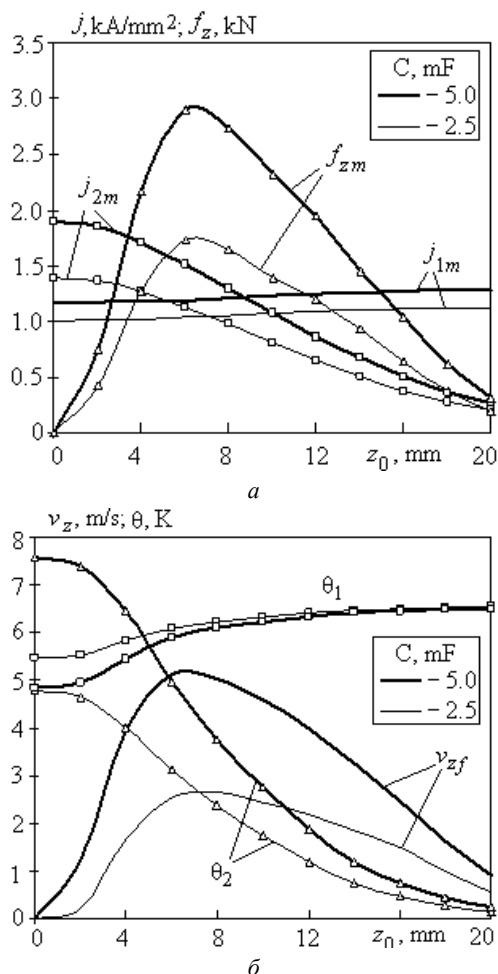


Рис. 4. Зависимость показателей ЭИУ от начального смещения обмоток при возбуждении от ЕНЭ

При возбуждении ЭИУ от варианта ЕНЭ II амплитуды плотностей токов в обмотках увеличиваются,

как и превышения их температур. Однако наибольшая скорость  $v_z=5,11$  м/с имеет место при  $z_0 \approx 6,5$  мм.

**Характеристики ЭИУ при возбуждении от источника переменного напряжения.** Рассмотрим возбуждение ЭИУ цилиндрической конфигурации при возбуждении от источника переменного напряжения. Если ИПН имеет частоту  $\nu=50$  Гц, то между токами в обмотках при начальном смещении  $z_0=6$  мм возникает значительный фазовый сдвиг, приводящий к возникновению чередующихся ускоряющих и тормозящих составляющих электродинамических сил (рис. 5).

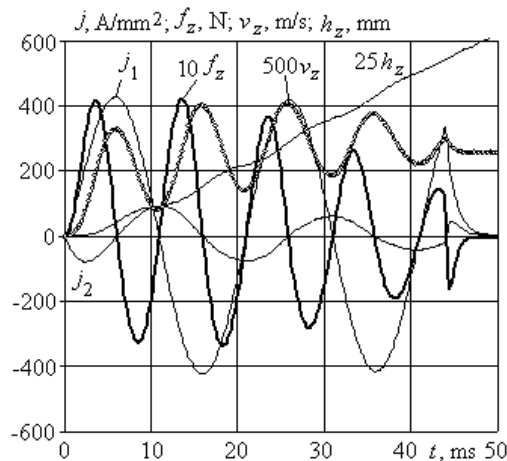


Рис. 5. Электромеханические характеристики ЭИУ при возбуждении от ИПН с частотой 50 Гц при  $z_0=6$  мм

Поскольку ускоряющие составляющие силы преобладают над тормозящими составляющими, то обмотка якоря перемещается относительно обмотки индуктора на расстояние  $h_z$  со скоростью  $v_z=0,51$  м/с. При такой частоте ИПН амплитуда тока в обмотке якоря примерно в 4 раза меньше, чем в обмотке индуктора. Причем плотность тока в обмотке якоря по мере ее перемещения относительно обмотки индуктора уменьшается.

Поскольку с увеличением частоты ИПН фазовый сдвиг между токами обмоток уменьшается, то соответственно уменьшается и тормозящая составляющая электродинамической силы. На рис. 6 представлены электромеханические характеристики ускорителя при возбуждении от ИПН с частотой 250 Гц при  $z_0=8$  мм. При таком возбуждении по сравнению с возбуждением с частотой 50 Гц ток в обмотке индуктора уменьшается, а в обмотке якоря увеличивается. В начальный период возбуждения плотности токов в обмотках соизмеримы. Однако из-за уменьшения магнитной связи между обмотками плотность тока в обмотке индуктора выходит на установившееся значение, а в обмотке якоря практически полностью затухает к окончанию периода возбуждения.

Но из-за большего перемещения обмотки якоря относительно обмотки индуктора за одно и то же время магнитная связь уменьшается быстрее, что приводит к более сильному затуханию электродинамической силы. Эта сила затухает практически через 30 мс. Ее ускоряющие составляющие увеличиваются, а тормозящие уменьшаются, что приводит к большей скорости на выходе ускорителя  $v_z=1,9$  м/с, чем при частоте ИПН 50 Гц.

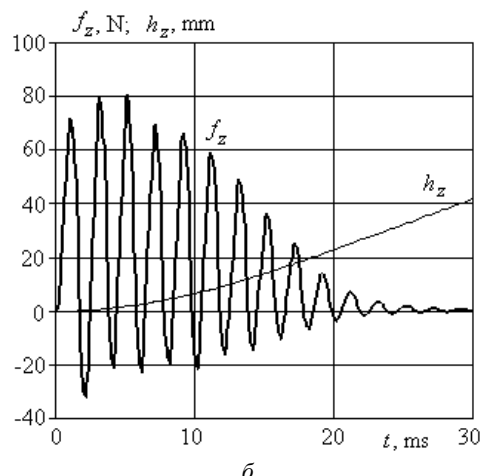
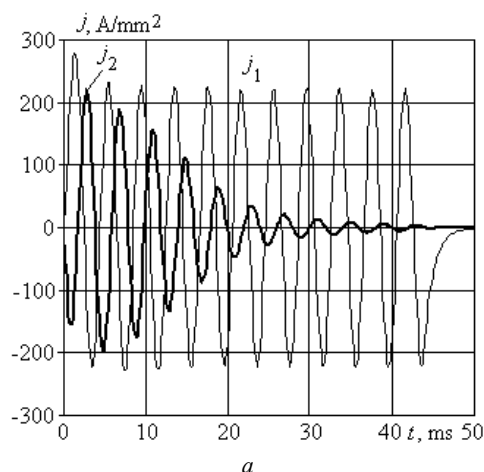


Рис. 6. Электромеханические характеристики ЭИУ при возбуждении от ИПН с частотой 250 Гц при  $z_0=8$  мм

При максимальном начальном смещении между обмотками ( $z_0=20$  мм) происходят следующие изменения в электромеханических процессах (рис. 7). При практически неизменной плотности тока в обмотке индуктора  $j_1$  плотность тока в обмотке якоря  $j_2$  на начальном этапе существенно уменьшается из-за ослабленной магнитной связи. Однако со временем ток в обмотке якоря и электродинамическая сила затухают с меньшей скоростью. Это обусловлено тем, что из-за пониженной скорости  $v_z$  якорь перемещается на меньшее расстояние относительно обмотки индуктора.

При повышении частоты ИПН до 500 Гц изменяется соотношение между амплитудами токов в обмотках на начальном этапе (рис. 8). Величина плотности тока в обмотке якоря превышает аналогичную величину в обмотке индуктора. При этом фазовый сдвиг между обмотками еще в большей степени уменьшается. Вследствие этого тормозящие составляющие электродинамической силы уменьшаются, что приводит к увеличению скорости якоря на выходе ускорителя до величины  $v_z=2,2$  м/с, несмотря на уменьшение ускоряющих составляющих силы.

Оценить влияние начального смещения обмотки якоря на показатели ЭИУ цилиндрической конфигурации при возбуждении от ИПН позволяет рис. 9.

При увеличении начального смещения обмотки якоря  $z_0$  от 0 до 20 мм максимальная скорость на выходе ускорителя сильно зависит от частоты ИПН.

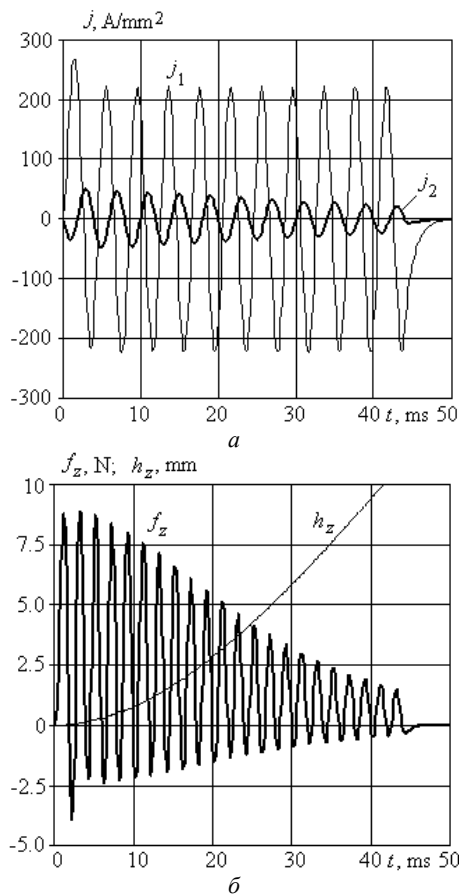


Рис. 7. Электромеханические характеристики ЭИУ при возбуждении от ИПН с частотой 250 Гц при  $z_0=20$  мм

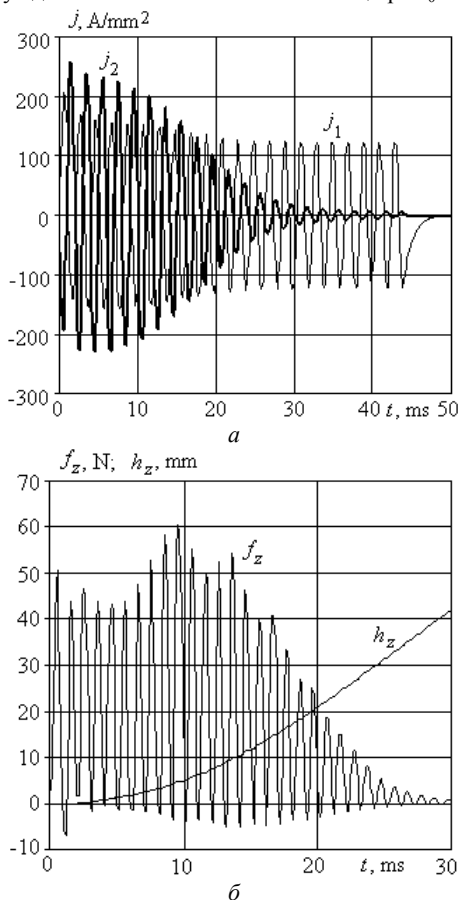


Рис. 8. Электромеханические характеристики ЭИУ при возбуждении от ИПН с частотой 500 Гц при  $z_0=4$  мм

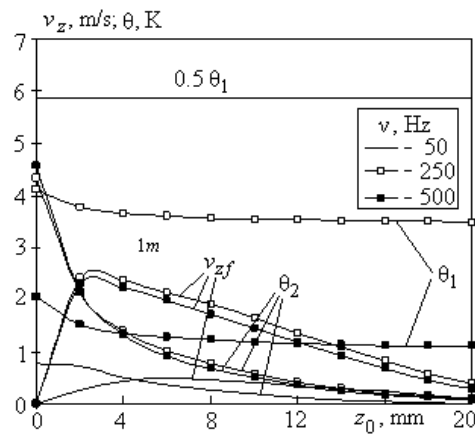


Рис. 9. Зависимость показателей ЭИУ от начального смещения обмоток при возбуждении от ИПН

При частоте 50 Гц наибольшая скорость на выходе ускорителя  $v_z=0,5$  м/с реализуется при  $z_0=6,2$  мм, при частоте 250 Гц  $-v_z=2,4$  м/с при  $z_0=3,1$  мм, а при частоте 500 Гц  $-v_z=2,29$  м/с при  $z_0=2,3$  мм. При увеличении частоты ИПН превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  уменьшается, а превышение температуры обмотки якоря  $\theta_2$  увеличивается.

При частоте 50 Гц величина  $\theta_1$  практически не зависит от начального смещения обмоток. Но при более высоких частотах с увеличением начального смещения величина  $\theta_1$  незначительно уменьшается. Превышение температуры обмотки якоря  $\theta_2$  уменьшается в большей степени от величины  $z_0$  по сравнению с превышением температуры обмотки индуктора.

Таким образом, при возбуждении ЭИУ от ЕНЭ начальное смещение обмоток должно составлять примерно  $z_0 \approx 0,6z_{0m}$ , где  $z_{0m}$  расстояние, на котором обеспечивается наибольшая величина  $dM_{12}/dz$  между обмотками. При возбуждении ЭИУ от ИПН начальное смещение  $z_0$  необходимо выбирать в зависимости от его частоты: при частоте 50 Гц  $-z_0 \approx 0,6z_{0m}$ , а при частотах 250 Гц и 500 Гц  $-z_0 \approx 0,2z_{0m}$ .

#### Выводы.

При возбуждении ЭИУ цилиндрической конфигурации наибольшая амплитуда плотности тока в обмотке индуктора возникает при максимальном начальном смещении, но амплитуда плотности тока в обмотке якоря при этом наименьшая. Наибольшая величина плотности тока в обмотке якоря возникает при отсутствии начального смещения.

При возбуждении от ЕНЭ электродинамическая сила между обмотками имеет начальную ускоряющую и последующую тормозящую составляющие. Вследствие этого скорость якоря вначале возрастает до максимально величины, но уменьшается к концу электромагнитного процесса.

При возбуждении ЭИУ цилиндрической конфигурации от ИПН между токами в обмотках возникает фазовый сдвиг, приводящий к возникновению чередующихся ускоряющих и тормозящих составляющих электродинамических сил. Ускоряющие составляющие силы преобладают над тормозящими составляющими, что обеспечивает перемещение якоря.

При частоте ИПН 50 Гц амплитуда тока в обмотке якоря меньше, чем в обмотке индуктора. С увели-

чением частоты ИПН до 250 Гц фазовый сдвиг между токами обмоток уменьшается. Ток в обмотке индуктора уменьшается, а в обмотке якоря увеличивается. Ускоряющие составляющие силы увеличиваются, а тормозящие уменьшаются. При повышении частоты ИПН до 500 Гц величина плотности тока в обмотке якоря превышает аналогичную величину в обмотке индуктора. При этом фазовый сдвиг между обмотками еще в большей степени уменьшается.

При частоте ИПН 50 Гц наибольшая скорость  $v_{zf}=0,5$  м/с реализуется при начальном смещении обмоток  $z_0=6,2$  мм, при частоте 250 Гц наибольшая скорость  $v_{zf}=2,4$  м/с реализуется при  $z_0=3,1$  мм, а при частоте 500 Гц наибольшая скорость  $v_{zf}=2,29$  м/с реализуется при  $z_0=2,3$  мм.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guangcheng F., Wang Y., Xu Q., Xinyi N., Yan Z. Design and analysis of a novel three-coil reconnection electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 814-820. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2018.2874287>.
2. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1104-1109. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2362996>.
3. Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов. *Автометрия*, 2012, т. 48, № 4, С. 93-103. Режим доступа: <https://sibran.ru/upload/iblock/351/351e97d4b2077fe372df589eaba527ee.pdf> (Дата звернення: 15.05.2021).
4. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 310-313. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2002.805921>.
5. Чемерис В.Т. Многоступенчатый индукционный ускоритель макротел: поиск технических решений. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*, 2011, № 3 (40), С. 45-51.
6. Болюх В.Ф., Шукин И.С. *Линейные индукционно-динамические преобразователи*. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
7. Novakovic Z., Vasic Z., Ilic I., Medar N., Stevanovic D. Integration of tactical - medium range UAV and catapult launch system. *Scientific Technical Review*, 2016, vol. 66, no. 4, pp. 22-28. doi: <https://doi.org/10.5937/str1604022n>.
8. Angquist L., Baudoin A., Norrga S., Nee S., Modeer T. Low-cost ultra-fast DC circuit-breaker: Power electronics integrated with mechanical switchgear. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 1708-1713. doi: <https://doi.org/10.1109/icit.2018.8352439>.
9. Герасимов Ю.В., Каретников Г.К., Селиванов А.Б., Фионов А.С. Оценка относительной конечной массы наноспутника, доставляемой в околоземное пространство с помощью импульсных стартовых и корректирующих устройств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*, 2013, № 3 (92), С. 69-76. Режим доступа: <http://vestnikmach.ru/articles/116/116.pdf> (Дата звернення: 15.05.2021).
10. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 1, pp. 607-610. doi: <https://doi.org/10.1109/20.101103>.
11. Bissal A. *On the design of ultra-fast electro-mechanical actuators. Licentiate Thesis*. Stockholm, Sweden, 2013. 76 p. Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:617236/FULLTEXT01.pdf> (Дата звернення: 15.05.2021).
12. Торлин В.Н. Ветрогон А.А., Огрызков С.В. Поведение электронных блоков и устройств под действием ударных нагрузок при ДТП. *Автомобильный транспорт*, 2009, № 25, С. 178-180. Режим доступа: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/8071/39.pdf> (Дата звернення: 15.05.2021).
13. Kondratiuk M., Ambroziak L. Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 163-177. doi: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.1.163>.
14. Li S., Gui Y., Yu C., Liu P., Zhang P., Li J. Study on the effect and the direction accuracy of active electromagnetic protection system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 351-353. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008850>.
15. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 31-40. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.05>.
16. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type. *Technical Electrodynamic*, 2021, no. 3, pp. 28-36. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.028>.
17. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. *Volume 2B: Advanced Manufacturing*, Nov. 2019, 8 p. doi: <https://doi.org/10.1115/imece2019-10388>.
18. Bolyukh V.F., Kashansky Yu.V., Schukin I.S. Features of excitation of a linear electromechanical converter of induction type from an AC source. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 1, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.1.01>.
19. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode, *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 10, pp. 571-576. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371212100045>.

#### REFERENCES

1. Guangcheng F., Wang Y., Xu Q., Xinyi N., Yan Z. Design and analysis of a novel three-coil reconnection electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 814-820. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2018.2874287>.
2. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1104-1109. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2362996>.
3. Kostsov E.G. Microelectromechanical accelerator of solids. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, no. 48, pp. 401-409. doi: <https://doi.org/10.3103/S8756699012040115>.
4. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 310-313. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2002.805921>.
5. Chemeris V.T. Multistage induction accelerator of a macro-object: search for technical solutions. *Artillery and small arms*, 2011, no. 3 (40), pp. 45-51. (Rus).
6. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induksionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
7. Novakovic Z., Vasic Z., Ilic I., Medar N., Stevanovic D. Integration of tactical - medium range UAV and catapult launch system. *Scientific Technical Review*, 2016, vol. 66, no. 4, pp. 22-28. doi: <https://doi.org/10.5937/str1604022n>.

8. Angquist L., Baudoin A., Norrga S., Nee S., Modeer T. Low-cost ultra-fast DC circuit-breaker: Power electronics integrated with mechanical switchgear. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 1708-1713. doi: <https://doi.org/10.1109/icit.2018.8352439>.
9. Gerasimov Yu.V., Karetnikov G.K., Selivanov A.B., Fionov A.S. Evaluation of relative final mass of a nanosatellite delivered to the near-earth space using a pulsed launcher and a pulsed correcting thruster. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 3 (92), pp. 69-76. (Rus). Available at: <http://vestnikmach.ru/articles/116/eng/116.pdf> (accessed 15 May 2021).
10. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 1, pp. 607-610. doi: <https://doi.org/10.1109/20.101103>.
11. Bissal A. *On the design of ultra-fast electro-mechanical actuators. Licentiate Thesis*. Stockholm, Sweden, 2013. 76 p. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:617236/FULLTEXT01.pdf> (accessed 15 May 2021).
12. Torlin V.N., Vetrogon A.A., Ogryzkov S.V. Behavior of electronic units and devices under the influence of shock loads in an accident, *Automobile transport*, 2009, vol. 25, pp. 178-180. (Rus). Available at: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/80/7/1/39.pdf> (accessed 15 May 2021).
13. Kondratiuk M., Ambroziak L. Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 163-177. doi: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.1.163>.
14. Li S., Gui Y., Yu C., Liu P., Zhang P., Li J. Study on the effect and the direction accuracy of active electromagnetic protection system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 351-353. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008850>.
15. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 31-40. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.05>.
16. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 3, pp. 28-36. doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.03.028>.
17. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. *Volume 2B: Advanced Manufacturing*, Nov. 2019, 8 p. doi: <https://doi.org/10.1115/imece2019-10388>.
18. Bolyukh V.F., Kashansky Yu.V., Schukin I.S. Features of excitation of a linear electromechanical converter of induction type from an AC source. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 1, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.1.01>.
19. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode, *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 10, pp. 571-576. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371212100045>.

Надійшла (Received) 10.07.2021  
 Прийнята (Accepted) 25.09.2020  
 Опублікована (Published) 26.10.2021

Болух Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Шукин Игорь Сергеевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
 Lasocki Jakub<sup>3</sup>, PhD, Associate Professor,

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2, e-mail: vfbolyukh@gmail.com (Corresponding author)

<sup>2</sup>ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd», 61024, Харьков, ул. Гуданова, 18, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

<sup>3</sup>Warsaw University of Technology, Narbutta 84, 02-524, Warsaw, Poland, e-mail: jakub.lasocki@pw.edu.pl

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>2</sup>, J. Lasocki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>Firm Tetra, LTD, 18, Gudanova Str., Kharkiv, 61024, Ukraine.

<sup>3</sup>Warsaw University of Technology, Narbutta 84, 02-524, Warsaw, Poland,

### Influence of the initial winding displacement on the indicators of the electromechanical induction accelerator of cylindrical configuration.

**Purpose.** The purpose of the article is to determine the influence of the initial displacement of the windings on the indicators of an electromechanical induction accelerator of a cylindrical configuration with pulsed excitation from a capacitive energy storage and with short-term excitation from an alternating voltage source. **Methodology.** To take into account the interrelated electrical, magnetic, mechanical and thermal processes, as well as a number of nonlinear dependencies, we use the lumped parameters of the windings, and the solutions of the equations describing these processes are presented in a recurrent form. The mathematical model of the accelerator takes into account the variable magnetic coupling between the windings during the excitation of the inductor winding. When calculating the parameters and characteristics of the accelerator, a cyclic algorithm is used. **Results.** At a frequency of an alternating voltage source of 50 Hz, the current amplitude in the armature winding is less than in the inductor winding. With an increase in the source frequency to 250 Hz, the phase shift between the winding currents decreases. The current in the inductor winding decreases, and in the armature winding it increases. The accelerating components of the force increase, and the braking ones decrease. With an increase in the source frequency to 500 Hz, the current density in the armature winding exceeds that in the inductor winding. In this case, the phase shift between the windings is further reduced. **Originality.** When a cylindrical accelerator is excited, the largest amplitude of the current density in the inductor winding occurs at the maximum initial displacement of the windings, but the amplitude of the current density in the armature winding is the smallest. The largest value of the current density in the armature winding occurs in the absence of an initial displacement. When excited from a capacitive energy storage, the electrodynamic force between the windings has an initial accelerating and subsequent braking components. As a result, the speed of the armature initially increases to a maximum value, but decreases towards the end of the electromagnetic process. When a cylindrical accelerator is excited from an alternating voltage source, a phase shift occurs between the currents in the windings, which leads to the appearance of alternating accelerating and decelerating components of electrodynamic forces. The accelerating components of the force prevail over the braking components, which ensures the movement of the armature. **Practical value.** At a frequency of an alternating voltage source of 50 Hz, the highest speed at the output of the accelerator  $v_f=0.5$  m/s is realized at an initial displacement of the windings  $z_0=6.2$  mm, at a frequency of 250 Hz, the highest speed  $v_f=2.4$  m/s is realized at  $z_0=3.1$  mm, and at a frequency of 500 Hz the highest speed  $v_f=2.29$  m/s is realized at  $z_0=2.3$  mm. References 19, figures 9.

**Key words:** electromechanical induction accelerator, cylindrical configuration, initial winding displacement, capacitive energy storage, alternating voltage source, armature speed.