

В.Ф. Болюх, І.С. Щукін

Вплив обмеження тривалості струму обмотки якоря на робочі показники лінійного імпульсного електро механічного перетворювача індукційного типу

Вступ. Лінійні імпульсні електро механічні перетворювачі індукційного типу (ЛІЕПІТ) використовуються в багатьох галузях науки і техніки як ударно-силові пристрої та електро механічні прискорювачі. У них через фазовий зсув між струмом збудження в обмотці індуктора і індукованим струмом в обмотці якоря крім початкових електро динамічних сил (ЕДС) відштовхування виникають і наступні ЕДС тяжіння. Внаслідок цього робочі показники ЛІЕПІТ знижуються. **Метою** статті є підвищення робочих показників лінійних імпульсних електро механічних перетворювачів індукційного типу при роботі в якості ударно-силового пристрою та електро механічного прискорювача за рахунок обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності. **Методика.** Для аналізу електро механічних характеристик та показників ЛІЕПІТ використана математична модель, в якій розв'язки рівнянь, що описують взаємопов'язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, представлені в рекуррентному вигляді. **Результати.** Для усунення ЕДС тяжіння між обмотками ЛІЕПІТ запропоновано обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності шляхом підключення до неї випрямного діода. Встановлено, що при роботі перетворювача в якості ударно-силового пристрою без обмеження струму обмотки якоря величина імпульсу ЕДС після досягнення максимального значення знижується до кінця робочого циклу. За наявності діода в обмотці якоря критерій ефективності, що враховує імпульс ЕДС, силу віддачі, струм і температуру нагрівання обмотки індуктора, підвищується. При роботі перетворювача в якості електро механічного прискорювача без обмеження струму обмотки якоря відбувається зменшення швидкості і ККД, що враховує кінетичну енергію і напругу ємнісного накопичувача енергії в кінці робочого циклу. За наявності діода в обмотці якоря критерій ефективності підвищується, перевищення температури обмотки якоря зменшується, величина максимального ККД збільшується, досягаючи 16,16 %. **Наукова новизна.** Встановлено, що за рахунок обмеження тривалості струму обмотки якоря підвищуються силові показники ЛІЕПІТ при роботі в якості ударно-силового пристрою та швидкісні показники при роботі ЛІЕПІТ в якості електро механічного прискорювача. **Практична цінність.** Встановлено, що за допомогою випрямного діода, підключеного до багатовиткової обмотки якоря, забезпечується однополярність струму, що зумовлює усунення ЕДС тяжіння і підвищення робочих показників ЛІЕПІТ. Бібл. 22, рис. 5.

Ключові слова: лінійний імпульсний електро механічний перетворювач індукційного типу, ударно-силовий пристрій, електро механічний прискорювач, робочі показники, обмеження тривалості струму обмотки якоря.

Введение. Линейные импульсные электро механические преобразователи индукционного типа (ЛИЭПИТ) используются во многих отраслях науки и техники в качестве ударно-силовых устройств и электро механических ускорителей. В них из-за фазового сдвига между током возбуждения в обмотке индуктора и индуцированным током в обмотке якоря помимо первоначальных электро динамических усилий (ЭДУ) отталкивания возникают и последующие ЭДУ притяжения. Вследствие этого рабочие показатели ЛИЭПИТ снижаются. **Целью статьи** является повышение рабочих показателей линейных импульсных электро механических преобразователей индукционного типа при работе в качестве ударно-силового устройства и электро механического ускорителя за счет ограничения длительности индуцированного тока в обмотке якоря до изменения его полярности. **Методика.** Для анализа электро механических характеристик и показателей ЛИЭПИТ использована математическая модель, в которой решения уравнений, описывающих взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, представлены в рекуррентном виде. **Результаты.** Для устранения ЭДУ притяжения между обмотками ЛИЭПИТ предложено ограничение длительности индуцированного тока в обмотке якоря до изменения его полярности путем подключения к ней выпрямительного диода. Установлено, что при работе преобразователя в качестве ударно-силового устройства без ограничения тока обмотки якоря величина импульса ЭДУ после достижения максимального значения снижается к концу рабочего цикла. При наличии диода в обмотке якоря критерий эффективности, учитывающий импульс ЭДУ, силу отдачи, ток и температуру нагрева обмотки индуктора, повышается. При работе преобразователя в качестве электро механического ускорителя без ограничения тока обмотки якоря происходит уменьшение скорости и КПД, учитывающего кинетическую энергию и напряжение емкостного накопителя энергии в конце рабочего цикла. При наличии диода в обмотке якоря критерий эффективности повышается, превышение температуры обмотки якоря уменьшается, величина максимального КПД увеличивается, достигая 16,16 %. **Научная новизна.** Установлено, что за счет ограничения длительности тока обмотки якоря повышаются силовые показатели ЛИЭПИТ при работе в качестве ударно-силового устройства и скоростные показатели при работе ЛИЭПИТ в качестве электро механического ускорителя. **Практическая ценность.** Установлено, что при помощи выпрямительного диода, подключенного к многовитковой обмотке якоря, обеспечивается однополярность тока, что приводит к устранению ЭДУ притяжения и повышению рабочих показателей ЛИЭПИТ. Библ. 22, рис. 5.

Ключевые слова: линейный импульсный электро механический преобразователь индукционного типа, ударно-силовое устройство, электро механический ускоритель, рабочие показатели, ограничение длительности тока обмотки якоря.

Вступ. Лінійні імпульсні електро механічні перетворювачі індукційного типу (ЛІЕПІТ) широко використовуються як для розгону виконавчого елемента до високої швидкості на короткій активній ділянці, так і для створення потужних силових імпульсів на об'єкт впливу при незначному переміщенні виконавчого елемента [1-4]. Такі перетворювачі широко використовую-

ються в багатьох галузях науки і техніки як ударно-силові пристрої і електро механічні прискорювачі.

В якості ударно-силових пристроїв ЛІЕПІТ застосовуються для електро магнітних молотів і перфораторів у будівництві, для бутобів та вібраторів у гірській промисловості, для ударних сейсмічних дже-

рел у геологорозвідці, для молотів з великим діапазоном енергії удару та пристроїв для електродинамічної обробки зварних з'єднань у машинобудуванні, для віброзмішувачів у хімічній та медико-біологічній промисловості, для випробувальних пристроїв, що забезпечують перевірку відповідальної апаратури на ударні навантаження, для магнітно-імпульсних пристроїв, що забезпечують пресування спеціальних порошків кераміки, для пристроїв, що забезпечують очищення технологічних ємностей від налипання сипучих матеріалів, для пристроїв, що забезпечують знищення важливої інформації на накопичувачах при несанкціонованому доступі та ін. [5-9].

В якості електромеханічних прискорювачів ЛІЕПІТ застосовуються для швидкодійних електричних апаратів, для балістичних лазерних гравіметрів, для систем, що забезпечують запуск безпілотних літальних апаратів, для оборонних пристроїв, що забезпечують захист відповідальних об'єктів від пристроїв, що підлітають, для розгінних пристроїв в аерокосмічній техніці та ін. [10-15].

У ЛІЕПІТ в нерухомій обмотці індуктора при підключенні до ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) протікає імпульсний струм, який за допомогою магнітного поля індуктує струм в обмотці якоря. Оскільки в початковий момент часу струми в обмотках мають протилежну полярність, то між ними виникають електродинамічні сили (ЕДС) відштовхування [16].

При роботі перетворювача в якості електромеханічного прискорювача обмотка якоря, яка переміщується під дією ЕДС відштовхування, здійснює розгін виконавчого елемента. А при роботі в якості ударно-силового пристрою обмотка якоря при незначному переміщенні забезпечує передачу силового імпульсу на виконавчий елемент.

У ЛІЕПІТ короткозамкнена обмотка якоря може бути виконана одно-або багатовитковою. При одновитковому виконанні обмотка якоря представляє собою, як правило, масивний електропровідний диск. Однак індукований струм по такому диску розподілений суттєво нерівномірно. При багатовитковому виконанні обмотка якоря щільно намотана проводом відносно малого поперечного перерізу і просочена компаундом на основі епоксидної смоли. У такій обмотці індукований струм розподіляється рівномірно по всьому перерізу, що забезпечує більш рівномірний силовий вплив на виконавчий елемент.

Як показують дослідження, через фазовий зсув між струмом збудження в обмотці індуктора і індукваним струмом в короткозамкненій обмотці якоря крім початкових ЕДС відштовхування виникають і наступні ЕДС тяжіння [17]. Внаслідок цього робочі показники перетворювача знижуються [18]. ЕДС тяжіння виникають через зміну полярності індукovanого струму в обмотці якоря, тоді як полярність струму збудження в обмотці індуктора може залишатися незмінною.

Усунути ЕДС тяжіння можна шляхом обмеження тривалості індукovanого струму в обмотці якоря до зміни його полярності. Для цього в обмотку якоря можна підключити випрямний діод VD (рис. 1). Обмеження струму в магнітно-імпульсній установці для

зміни впливу ЕДС на вторинний електропровідний елемент з використанням керованого вакуумного розрядника описано в роботі [19]. Але в тому дослідженні метою було збільшення ЕДС тяжіння, тоді як для ЛІЕПІТ такі сили є небажаними.

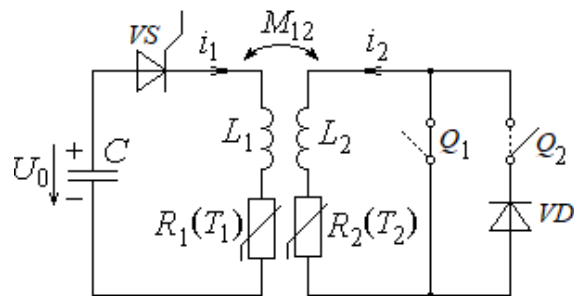


Рис. 1. Електрична схема ЛІЕПІТ за відсутності (Q_1 , Q_2 – суцільні лінії) та наявності (Q_1 , Q_2 – штрихові лінії) діода VD в обмотці якоря

Забезпечення однієї полярності індукovanого струму можна реалізувати шляхом підключення діода VD до багатовиткової обмотки якоря, тому в подальшому будемо саме її розглядати. Однак при цьому не досліджено доцільність обмеження тривалості індукovanого струму в обмотці якоря до зміни його полярності при роботі ЛІЕПІТ в якості ударно-силового пристрою та електромеханічного прискорювача.

Метою статті є підвищення робочих показників лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів індукційного типу при роботі в якості ударно-силового пристрою і електромеханічного прискорювача за рахунок обмеження тривалості індукovanого струму в обмотці якоря до зміни його полярності.

Розглянемо **математичну модель** ЛІЕПІТ, у якій використовуються зосереджені параметри багатовиткових обмоток індуктора та якоря. Для врахування взаємопов'язаних електричних, магнітних, механічних і теплових процесів, а також ряду нелінійних залежностей рішення рівнянь, що описують зазначені процеси, представимо в рекурентному вигляді.

Будемо вважати, що при роботі в якості ударно-силового пристрою переміщення обмотки якоря з виконавчим елементом відсутнє, а при роботі в якості електромеханічного прискорювача якорі переміщається на значну відстань з виконавчим елементом, який має відносно малу масу.

Для збудження ЛІЕПІТ від ЄНЕ використовуємо однополярний імпульс струму в обмотці індуктора, що формується пусковим тиристором VS (рис. 1). Це дозволяє зберігати частину енергії в ЄНЕ до кінця робочого циклу. Для обмеження тривалості індукovanого струму в обмотці якоря до зміни його полярності використовуємо випрямний діод VD . Вважаємо, що для напівпровідникових приладів VS і VD опори в прямому напрямку рівні нулю, а в зворотному напрямку – нескінченно великі.

Електричні процеси в ЛІЕПІТ при роботі в якості ударно-силового пристрою можна описати системою рівнянь:

$$R_1(T_1)i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_1 dt + M_{12} \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_0} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (2)$$

$$R_2(T_2) \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (3)$$

де $n=1, 2$ – індекси обмоток індуктора та якоря відповідно; R_n, L_n, T_n, i_n – активний опір, індуктивність, температура і струм n -ої обмотки відповідно; $M_{12}=M_{21}$ – взаємна індуктивність між обмотками; C_0, U_0 – ємність та початкова (зарядна) напруга ЄНЕ.

При роботі ЛІЕПІТ в якості електромеханічного прискорювача рівняння (1) і (3) набувають вигляду:

$$R_1(T_1)i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + v_z(t)i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = 0; \quad (4)$$

$$R_2(T_2) \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + i_1 v(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0. \quad (5)$$

Рішення рівнянь для струмів в обмотках перетворювача в рекурентному вигляді представлені в роботі [18]. Переміщення h_z і швидкість v_z обмотки якоря відносно обмотки індуктора, що представлені в рекурентному вигляді [10], враховують миттєве значення аксіальних ЕДС між обмотками:

$$f_z(z, t) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z), \quad (6)$$

маси обмотки якоря та виконавчого елемента, щільність середовища переміщення та коефіцієнт аеродинамічного опору.

При роботі ЛІЕПІТ в якості ударно-силового пристрою між обмотками існує тепловий контакт через ізоляційну прокладку. Температури обмоток при цьому можна описати рекурентними співвідношеннями [4], які враховують коефіцієнт теплопровідності та товщину прокладки, коефіцієнти тепловіддачі та теплоємності обмоток.

Для розрахунку характеристик і показників ЛІЕПІТ використовуємо алгоритм циклічної дії [20], що дозволяє врахувати комплекс взаємопов'язаних електричних, магнітних, механічних і теплових процесів і різних нелінійних залежностей, наприклад $R_n(T_n)$, $M_{12}(z)$. При розрахунку робочий процес розбиваємо на ряд чисельно малих інтервалів часу $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, в межах яких усі величини вважаємо незмінними. За отриманими в момент часу t_{k+1} значеннями струму розраховуємо температури обмоток T_1 і T_2 , переміщення h_z і швидкість v_z обмотки якоря, взаємні індуктивності M_{12} між обмотками. При такому підході для визначення струмів на розрахунковому інтервалі часу Δt можна використовувати лінійні рівняння та співвідношення. Величина Δt вибирається таким чином, щоб вона істотно не впливала на результати розрахунку, забезпечуючи при цьому необхідну точність.

Початкові умови математичної моделі:

$T_n(0) = T_0$ – температура n -ої обмотки;

$i_n(0) = 0$ – струм n -ої обмотки;

$h_z(0) = h_{z0}$ – відстань між обмотками;

$u_c(0) = U_0$ – напруга ЄНЕ;

$v_z(0) = 0$ – швидкість обмотки якоря вздовж осі z .

Основні параметри ЛІЕПІТ. Розглянемо ЛІЕПІТ, у якого обмотка індуктора ($n=1$) і обмотка якоря ($n=2$) виконані у вигляді монолітних дискових котушок, щільно намотаних мідним проводом круглого перерізу діаметром $d_0=1,3$ мм і просочених епоксидним компаундом. Зовнішній діаметр обмоток $D_{ex}=100$ мм, їх внутрішній діаметр $D_{in}=10$ мм. Аксіальна висота обмотки індуктора $H_1=6$ мм і обмотки якоря $H_2=3$ мм. Число витків обмотки індуктора $N_1=120$ і обмотки якоря $N_2=60$. Початкова відстань між обмотками $h_{z0}=1$ мм. ЄНЕ має енергію $W_0=500$ Дж і його ємність C_0 змінюється в діапазоні від 0,5 до 5 мФ при відповідній зміні початкової напруги $U_0 = \sqrt{2W_0 C_0^{-1}}$. При роботі ЛІЕПІТ в якості електромеханічного прискорювача маса виконавчого елемента $m_a=0,5$ кг.

Проведемо аналіз електромеханічних характеристик і робочих показників ЛІЕПІТ, у якого в обмотці якоря здійснюється обмеження тривалості індукованого струму до зміни його полярності (Q_1 розімкнений, Q_2 замкнений), порівняно з ЛІЕПІТ, у якого відсутнє таке обмеження (Q_1 замкнений, Q_2 розімкнений) (рис. 1).

При аналізі роботи ЛІЕПІТ враховуватимемо наступні робочі показники: струм збудження, температуру нагрівання обмоток і силу віддачі. Максимальний струм збудження пропорційний амплітуді щільності струму в обмотці індуктора j_{1m} , температура нагрівання обмотки індуктора – перевищенню її температури θ_1 , а сила віддачі – амплітуді ЕДС f_{zm} . Максимальний струм збудження впливає на параметри електронного джерела, температура нагрівання – на тривалість роботи перетворювача в циклічному режимі, а сила віддачі – на механічну надійність. Так, для ручних ударних інструментів і різних автономних пускатрів сила віддачі негативно впливає як на сам пристрій, так і на обслуговуючий персонал. Особливо негативно сила віддачі проявляється у вимірювальних пристроях. Так, у балістичному лазерному гравіметрі, призначеному для вимірювання прискорення вільного падіння, використовується електромеханічна катапульта, яка забезпечує вертикальне підкидання кутового оптичного відбивача [21]. Сила віддачі викликає автосейсмічні коливання, що знижують точність вимірювання гравіметру [22].

При роботі ЛІЕПІТ в якості ударно-силового пристрою його ефективність будемо оцінювати най-

більшою величиною імпульсу ЕДС $P_z = \int_0^t f_z(t) dt$ при

мінімальних величинах сили віддачі, струму збудження та температури нагрівання обмотки індуктора.

На рис. 2 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕПІТ за відсутності (суцільні лінії) та наявності (лінії з кружками) обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності.

При використанні ЄНЕ ємністю $C_0=0,5$ мФ максимальна щільність струму в обмотці індуктора становить $j_{1m}=1,03$ кА/мм², а обмотці якоря – $j_{2m}=1,41$ кА/мм² (рис. 2,а). Амплітуда ЕДС $f_{zm}=30,85$ кН.

За відсутності обмеження індукованого струму в короткозамкненій обмотці якоря (без діода VD на рис. 1) до кінця робочого циклу перевищення температури обмотки індуктора становить $\theta_1=1,58^\circ\text{C}$, а перевищення обмотки якоря $\theta_2=2,87^\circ\text{C}$. За рахунок ЕДС тяжіння величина імпульсу цих сил, досягаючи максимального значення $P_{zm}=12,5\text{ Н}\cdot\text{с}$, до кінця робочого циклу знижується до $P_{zf}=12,19\text{ Н}\cdot\text{с}$.

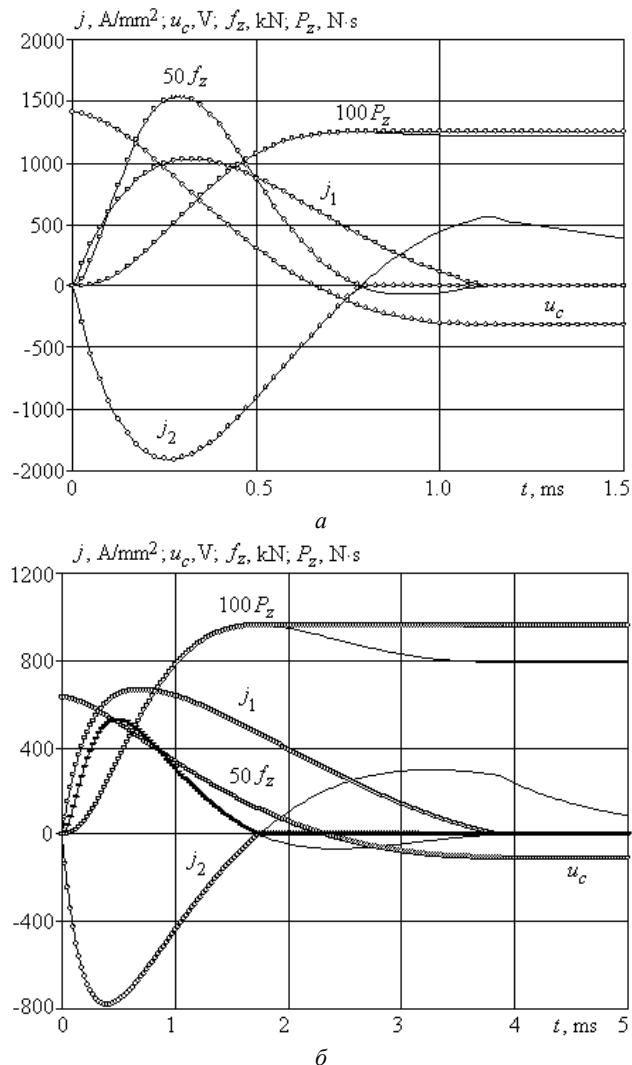


Рис. 2. Електромеханічні характеристики ЛПЕПТ при роботі як ударно-силовий пристрій при C_0 : 0,5 мФ (а) та 2,5 мФ (б)

При використанні ЄНЕ підвищеної ємності ($C_0=2,5\text{ мФ}$), а значить і зниженої напруги U_0 , максимальні значення густин струму в обмотці індуктора знижується до $j_{1m}=0,67\text{ кА/мм}^2$, в обмотці якоря – до $j_{2m}=0,78\text{ кА/мм}^2$, ЕДС – до $f_{zm}=10,58\text{ кН}$ (рис. 2,б). Але до кінця робочого циклу перевищення температури обмотки індуктора збільшується до $\theta_1=2,15^\circ\text{C}$, а перевищення обмотки якоря зменшується до $\theta_2=1,86^\circ\text{C}$. При цьому величина імпульсу ЕДС, досягаючи максимального значення $P_{zm}=9,61\text{ Н}\cdot\text{с}$, до кінця робочого циклу знижується до $P_{zf}=7,94\text{ Н}\cdot\text{с}$.

При збільшенні ємності C_0 ЄНЕ і незмінної енергії $W_0=500\text{ Дж}$ напруга U_0 зменшується, що зумовлює зміну основних робочих показників ЛПЕПТ (рис. 3,а).

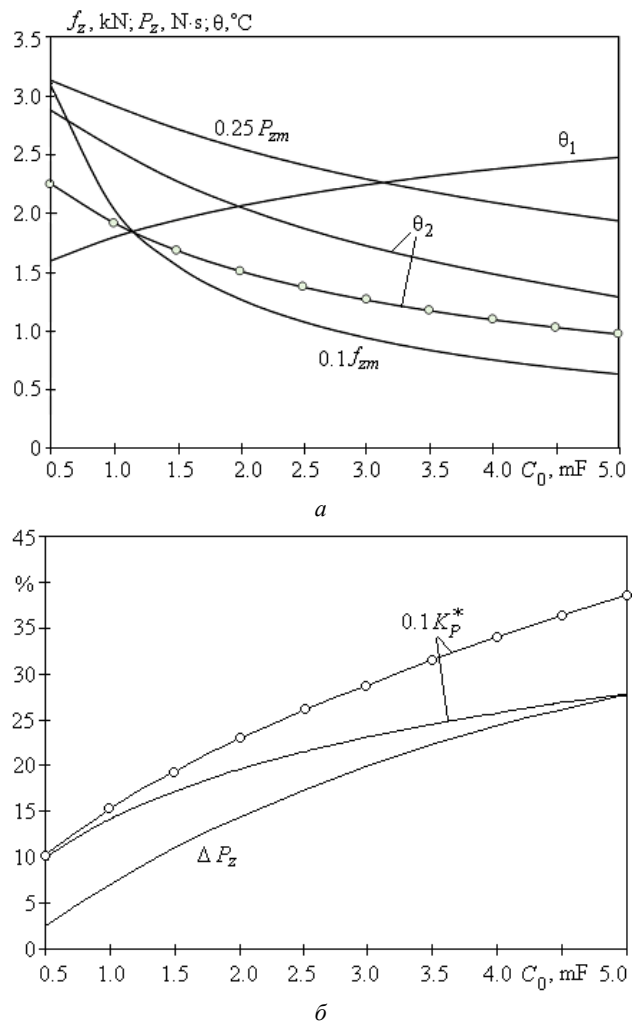


Рис. 3. Залежність робочих показників ЛПЕПТ при роботі як ударно-силовий пристрій від ємності ЄНЕ при $W_0=500\text{ Дж}$

При збільшенні C_0 від 0,5 до 5 мФ амплітуда ЕДС f_{zm} зменшується приблизно в 5 разів (від 30,85 до 6,06 кН), але величина максимального імпульсу ЕДС P_{zm} зменшується приблизно в 1,5 рази (від 12,5 до 7,7 Н·с). За такого збільшення ємності C_0 перевищення температури обмотки індуктора θ_1 збільшується від 1,58 до 2,47 $^\circ\text{C}$. Зазначені показники практично не залежать від наявності або відсутності обмеження тривалості індукваного струму в обмотці якоря до зміни його полярності. Однак обмеження тривалості струму впливає на перевищення температури обмотки якоря θ_2 . У перетворювачі без обмеження струму короткозамкненої обмотки якоря величина θ_2 зменшується від 2,87 до 1,27 $^\circ\text{C}$. За наявності зазначеного обмеження за рахунок підключення діода VD величина θ_2 нижче, ніж за його відсутності, і зменшується від 2,24 до 0,96 $^\circ\text{C}$.

Для того, щоб оцінити ефективність роботи ЛПЕПТ як ударно-силовий пристрій в залежності від величини ємності C_0 ЄНЕ при $W_0=500\text{ Дж}$ використовуємо величину відносного зменшення імпульсу ЕДС $\Delta P_z = 100(P_{zm} - P_{zf})P_{zm}^{-1}, \%$ і відносний критерій ефек-

тивності $K_p^* = 100 \frac{P_{zf}^*}{j_{1m}^* f_{zm}^* \theta_1^*}, \%$. Як базовий варіант для

K_p^* використовуємо перетворювач, що збуджується від ЄНЕ ємністю $C_0=0,5$ мФ без обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря. При збільшенні C_0 від 0,5 до 5 мФ та відсутності обмеження струму в обмотці якоря відносно зменшення імпульсу ЕРС ΔP_z зростає від 2,5 до 27,6 % (рис. 3,б). Однак критерій ефективності ЛІЕПІТ K_p^* при цьому збільшується в 2,78 разів насамперед за рахунок зменшення амплітуди щільності струму в обмотці індуктора j_{1m} і амплітуди ЕРС f_{zm} .

За наявності обмеження тривалості струму в обмотці якоря за рахунок підключення діода VD через відсутність зменшення імпульсу ОДС величина критерію ефективності K_p^* підвищується (на 38,6 % при $C_0=0,5$ мФ) Це показує перспективність даного технічного рішення щодо усунення ЕДС тяжіння при роботі ЛІЕПІТ в якості ударно-силового пристрою.

При роботі ЛІЕПІТ в якості електромеханічного прискорювача його ефективність оцінювати мемо найбільшою величиною ККД

$$\eta = 100 C_0^{-1} (m_2 + m_a) v^2 (U_0^2 - U_1^2)^{-1}, \%,$$

який враховує кінетичну енергію якоря разом із виходним елементом та залишкову напругу ЄНЕ в кінці робочого циклу U_1 . На рис. 4 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕПІТ за відсутності (суцільні лінії) і наявності (лінії з кружками) обмеження індукваного струму в обмотці якоря.

При використанні ЄНЕ ємністю $C_0=0,5$ мФ максимальна щільність струму в обмотці індуктора становить $j_{1m}=0,87$ кА/мм², а в якорі обмотці – $j_{2m}=1,19$ кА/мм² (рис. 4,а), тобто вони нижче, ніж при роботі ЛІЕПІТ як ударно-силовий устрій. Відповідно менше і амплітуда ЕДС $f_{zm}=21,16$ кН.

У перетворювачі без обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря максимальна швидкість $v_m=11,86$ м/с до кінця робочого циклу практично не зменшується, що забезпечує ККД електромеханічного прискорювача $\eta=14,24$ %. Перевищення температури обмотки індуктора становить $\theta_1=1,84$ °С, а перевищення обмотки якоря $\theta_2=2,02$ °С. При використанні ЄНЕ ємністю $C_0=2,5$ мФ максимальне значення щільності струму в обмотці індуктора знижується до $j_{1m}=0,621$ кА/мм², а в обмотці якоря – до $j_{2m}=0,69$ кА/мм², ЕРС – до $f_{zm}=7,62$ кН (рис. 4,б).

До кінця робочого циклу перевищення температури обмотки індуктора збільшується до $\theta_1=2,6$ °С, а в обмотки якоря знижується до $\theta_2=1,12$ °С. Швидкість обмотки якоря, досягаючи максимального значення $v_{zm}=7,97$ м/с, до кінця робочого циклу помітно знижується, складаючи $v_{zf}=6,69$ м/с. В результаті ККД перетворювача, досягаючи максимального значення $\eta_m=5,29$ %, до кінця робочого циклу знижується до $\eta=3,65$ %.

Для того, щоб оцінити ефективність ЛІЕПІТ при роботі в якості електромеханічного прискорювача використовуємо величини відносного зменшення швидкості $\Delta v = 100(v_{zm} - v_{zf})v_f^{-1}, \%$ і ККД

$\Delta \eta = 100(\eta_m - \eta_f)\eta_m^{-1}, \%$, також відносний критерій

ефективності $K_v^* = 100 \frac{v_f^*}{j_{1m} f_{zm} \theta_1^*}, \%$. У якості базового

варіанту використаний ЄНЕ ємністю $C_0=0,5$ мФ при відсутності обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря.

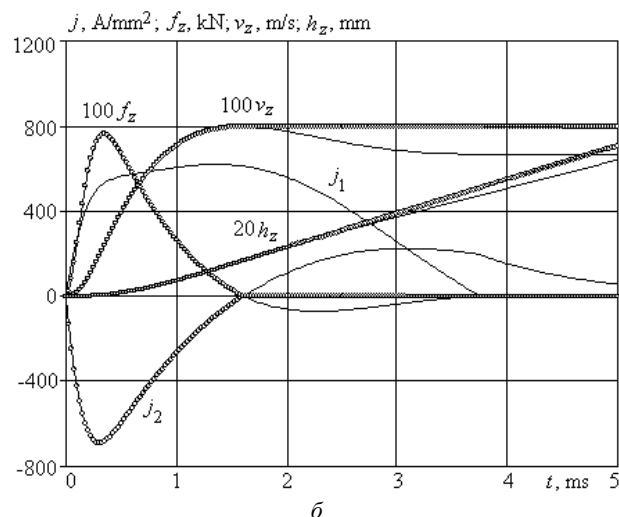
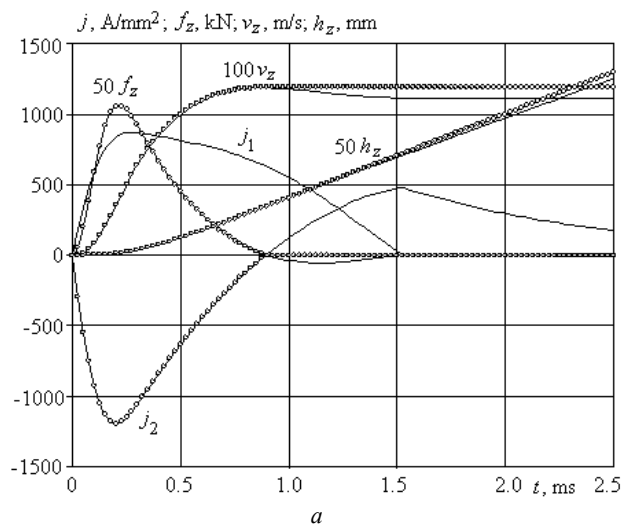


Рис. 4. Електромеханічні характеристики ЛІЕПІТ при роботі як електромеханічний прискорювач при C_0 : 0,5 мФ (а) та 2,5 мФ (б)

При збільшенні ємності C_0 від 0,5 до 5 мФ ($W_0=500$ Дж) та відсутності обмеження струму обмотки якоря (гладкі лінії на рис. 5), максимальна швидкість v_{zm} зменшується від 11,86 до 6,19 м/с, що призводить до зменшення максимального ККД η_m від 14,24 до 4,02 %, збільшення перевищення температури обмотки індуктора θ_1 від 1,84 до 2,87 °С і зменшення аналогічної величини для обмотки якоря θ_2 від 2,02 до 0,78 °С. Величина відносного зменшення швидкості обмотки якоря Δv збільшується від 5,9 до 21,97 %. Величина відносного зменшення ККД $\Delta \eta$ проявляється лише після збільшення ємності C_0 понад 1 мФ. Вона збільшується до $\Delta \eta=57$ % при $C_0=5$ мФ. Відносний критерій ефективності перетворювача K_v^* збільшується практично вдвічі насамперед за рахунок зменшення амплітуди щільності струму в обмотці індуктора j_{1m} від 870,1 до 551,5 А/мм² і амплітуди ЕДС f_{zm} від 21,16 до 4,62 кН.

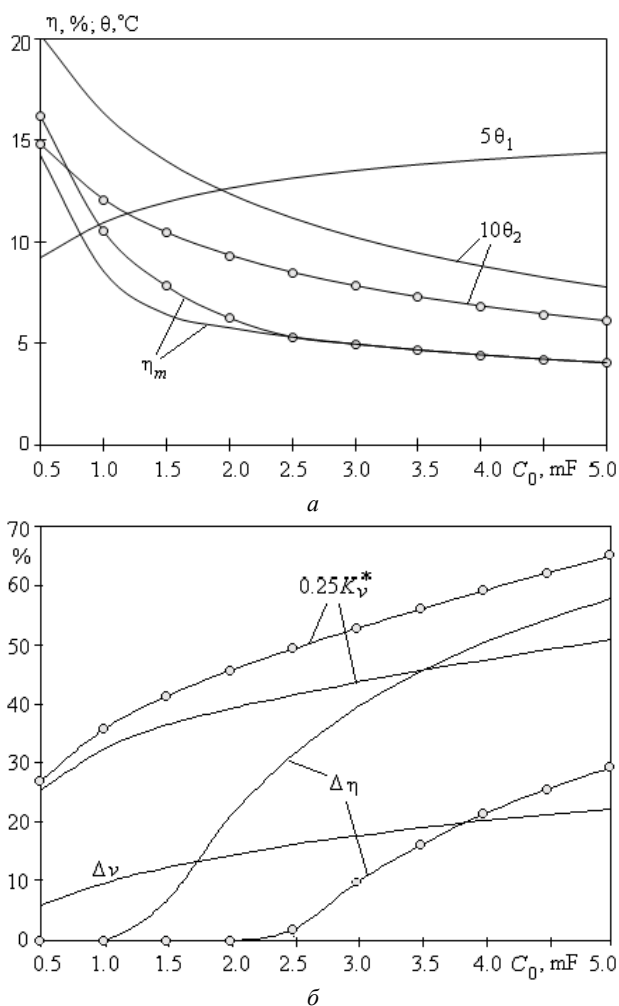


Рис. 5. Залежність робочих показників ЛІЕПІТ при роботі як електромеханічний прискорювач від ємності СНЕ при $W_0=500$ Дж

За наявності обмеження струму в обмотці якоря за рахунок підключення діода VD (лінії з кружками на рис. 5) критерій ефективності K_v^* підвищується, причому більшою мірою при збільшенні ємності накопичувача енергії. Так при $C_0=5$ мФ та відсутності діода $K_v^*=2,01$, а за наявності діода – $K_v^*=2,56$. Величина відносного зменшення ККД $\Delta\eta$ істотно зменшується. Вона виникає лише після збільшення ємності понад $C_0=2,5$ мФ та збільшується до $\Delta\eta=28,86$ % при $C_0=5$ мФ. Максимальний ККД η_m збільшується тільки в діапазоні C_0 від 0,5 до 2,0 мФ, становлячи $\eta_m=16,16$ % при $C_0=0,5$ мФ. Перевищення температури обмотки якоря θ_2 зменшується, змінюючись у вказаному діапазоні від 1,48 до 0,61 °С.

Таким чином, обмеження тривалості індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності шляхом підключення до неї випрямного діода забезпечує підвищення силових показників при роботі ЛІЕПІТ в якості ударно-силового пристрою і збільшення швидкісних показників при роботі перетворювача в якості електромеханічного прискорювача.

Висновки.

1. Для усунення ЕДС тяжіння між обмотками ЛІЕПІТ запропоновано обмежувати тривалість індукованого струму в обмотці якоря до зміни його полярності шляхом підключення до неї випрямного діода.

2. При роботі ЛІЕПІТ як ударно-силовий пристрій через ЕДС тяжіння величина імпульсу цих сил, досягаючи максимального значення, до кінця робочого циклу знижується. При обмеженні тривалості струму в обмотці якоря величина критерію ефективності, що враховує імпульс ЕДС, силу віддачі, струм і температуру нагрівання обмотки індуктора, підвищується (на 38,6 % при $C_0=0,5$ мФ).

3. При роботі ЛІЕПІТ як електромеханічний прискорювач без обмеження струму в короткозамкненій обмотці якоря відбувається зменшення швидкості та ККД, який враховує кінетичну енергію та напругу СНЕ в кінці робочого циклу. При обмеженні індукованого струму в обмотці якоря за рахунок підключення випрямного діода критерій ефективності підвищується, а перевищення температури обмотки якоря зменшується. Максимальний ККД збільшується тільки в діапазоні від 0,5 до 2 мФ, складаючи 16,16 % при $C_0=0,5$ мФ. Відносне зменшення ККД від максимального до кінцевого значення зменшується і виникає тільки після збільшення ємності C_0 понад 2,5 мФ.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 171-175. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>.
2. Go B., Le D., Song M., Park M., Yu I. Design and Electromagnetic Analysis of an Induction-Type Coilgun System With a Pulse Power Module. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 971-976. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2874955>.
3. Vilchis-Rodriguez D.S., Shuttleworth R., Barnes M. Modeling Thomson Coils With Axis-Symmetric Problems: Practical Accuracy Considerations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 629-639. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2651979>.
4. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic Cooling System "KrioBlast" Increased Efficiency and Lowered the Operation Time of Protective Electrical Induction-Induced Devices. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering*. San Diego, California, USA. November 15-21, 2013. V08BT09A003. ASME. doi: <https://doi.org/10.1115/imece2013-62383>.
5. Zhou Y., Huang Y., Wen W., Lu J., Cheng T., Gao S. Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors. *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 4345-4348. doi: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8148>.
6. Liu X., Yu X., Ban R., Li Z. Analysis of the Capacitor-Aided Meat Grinder Circuits for an Inductive Pulsed Power Supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1339-1346. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2705179>.
7. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*, 2017, № 5, С. 83-88. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>.
8. Soda R., Tanaka K., Takagi K., Ozaki K. Simulation-aided development of magnetic-aligned compaction process with pulsed magnetic field. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 364-370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.035>.

9. Городжа К.А., Подольцев О.Д., Трошинский Б.А. Электромагнитні процеси в імпульсному електродинамічному випромінювачі для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 3, С. 23-28. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>.
10. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425-431. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371215070044>.
11. 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>.
12. Bolyukh V.F., Schukin I.S., Lasocki J. Influence of the initial winding displacement on the indicators of the electromechanical induction accelerator of cylindrical configuration. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 5, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.5.01>.
13. Niu X., Li W., Feng J. Nonparametric Modeling and Parameter Optimization of Multistage Synchronous Induction Coilgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 7, pp. 3246-3255. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2019.2918157>.
14. 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>.
15. 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>.
16. Bolyukh V.F., Dan'ko V.G., Oleksenko S.V. The Effect of an External Shield on the Efficiency of an Induction-Type Linear-Pulse Electromechanical Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 4, pp. 275-281. doi: <https://doi.org/10.3103/S106837121804003X>.
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., Shchukin I.S. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type. *Технічна електродинаміка*, 2021, № 3, С. 28-36. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.028>.
19. Ljutenko L.A., Mikhailov V.M. Expansion of cylindrical tubular workpieces on high-voltage magnetic-pulse installation with controlled vacuum discharger. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 42-46. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.07>.
20. Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ силовых и скоростных показателей линейных импульсных электромеханических преобразователей электродинамического и индукционного типов. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 6, С. 35-42. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.035>.
21. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an Induction-Dynamic Catapult for a Ballistic Laser Gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 10, pp. 1098-1104. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0337-z>.
22. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of Self-Seismic Oscillations of the Foundations on the Readout of a Ballistic Gravimeter with an Induction-Dynamic Catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137-142. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0675-5>.

REFERENCES

1. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 171-175. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>.
2. Go B., Le D., Song M., Park M., Yu I. Design and Electromagnetic Analysis of an Induction-Type Coilgun System With a Pulse Power Module. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 971-976. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2874955>.
3. Vilchis-Rodriguez D.S., Shuttleworth R., Barnes M. Modeling Thomson Coils With Axis-Symmetric Problems: Practical Accuracy Considerations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 629-639. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2651979>.
4. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic Cooling System "KrioBlast" Increased Efficiency and Lowered the Operation Time of Protective Electrical Induction-Induced Devices. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering*. San Diego, California, USA. November 15-21, 2013. V08BT09A003. ASME. doi: <https://doi.org/10.1115/imece2013-62383>.
5. Zhou Y., Huang Y., Wen W., Lu J., Cheng T., Gao S. Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors. *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 4345-4348. doi: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8148>.
6. Liu X., Yu X., Ban R., Li Z. Analysis of the Capacitor-Aided Meat Grinder Circuits for an Inductive Pulsed Power Supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1339-1346. doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2705179>.
7. Kondratenko I.P., Zhylytsov A.V., Pashchyn N.A., Vasyuk V.V. Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 5, pp. 83-88. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>.
8. Soda R., Tanaka K., Takagi K., Ozaki K. Simulation-aided development of magnetic-aligned compaction process with pulsed magnetic field. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 364-370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.035>.
9. Gorodzha K.A., Podoltsev A.D., Troshchynskyi B.O. Electromagnetic processes in pulsed electrodynamic emitter to excite elastic vibrations in concrete structures. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 23-28. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>.
10. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425-431. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371215070044>.
11. 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>.
12. Bolyukh V.F., Schukin I.S., Lasocki J. Influence of the initial winding displacement on the indicators of the electromechanical induction accelerator of cylindrical configuration. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 5, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.5.01>.
13. Niu X., Li W., Feng J. Nonparametric Modeling and Parameter Optimization of Multistage Synchronous Induction Coilgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 7, pp. 3246-3255. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2019.2918157>.
14. 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>.

15. 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>.
16. Bolyukh V.F., Dan'ko V.G., Oleksenko S.V. The Effect of an External Shield on the Efficiency of an Induction-Type Linear-Pulse Electromechanical Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 4, pp. 275-281. doi: <https://doi.org/10.3103/S106837121804003X>.
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/imcce2019-10388>.
18. 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/techned2021.03.028>.
19. Ljutenko L.A., Mikhailov V.M. Expansion of cylindrical tubular workpieces on high-voltage magnetic-pulse installation with controlled vacuum discharger. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 42-46. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.07>.
20. Bolyukh V.F., Kashanskyi Y.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of power and speed indicators linear pulse electromechanical converters electrodynamic and induction types. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 6, pp. 35-42. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.035>.
21. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an Induction-Dynamic Catapult for a Ballistic Laser Gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 10, pp. 1098-1104. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0337-z>.
22. Bolyukh V.F., Omel'chenko A.V., Vinnichenko A.I. Effect of Self-Seismic Oscillations of the Foundation on the Readout of a Ballistic Gravimeter with an Induction-Dynamic Catapult. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 137-142. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0675-5>.

Надійшла (Received) 26.10.2021

Прийнята (Accepted) 27.11.2021

Опублікована (Published) 03.12.2021

Болюх Володимир Федорович¹, д.т.н., проф.,

Щукін Ігор Сергійович^{1,2}, к.т.н., доц.,

¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

e-mail: vfbolyukh@gmail.com (Corresponding author)

² ТОВ Фірма «ТЕТРА, Ltd»,

61024, Харків, вул. Гуданова, 18,

e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, I.S. Shchukin^{1,2}

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

² Firm Tetra, LTD,

18, Gudanova Str., Kharkiv, 61024, Ukraine.

Influence of limiting the duration of the armature winding current on the operating indicators of a linear pulse electromechanical induction type converter.

Introduction. Linear pulse electromechanical converters of induction type (LPECIT) are used in many branches of science and technology as shock-power devices and electromechanical accelerators. In them, due to the phase shift between the excitation current in the inductor winding and the induced current in the armature winding, in addition to the initial electrodynamic forces (EDF) of repulsion, subsequent EDF of attraction also arise. As a result, the operating indicators of LPECIT are reduced. **The purpose** of the article is to increase the performance of linear pulse electromechanical induction-type converters when operating as a shock-power device and an electromechanical accelerator by limiting the duration of the induced current in the armature winding until its polarity changes. **Methodology.** To analyze the electromechanical characteristics and indicators of LPECIT, a mathematical model was used, in which the solutions of equations describing interrelated electrical, magnetic, mechanical and thermal processes are presented in a recurrent form. **Results.** To eliminate the EDF of attraction between the LPECIT windings, it is proposed to limit the duration of the induced current in the armature winding before changing its polarity by connecting a rectifier diode to it. It was found that when the converter operates as a shock-power device without limiting the armature winding current, the magnitude of the EDF pulse after reaching the maximum value decreases by the end of the operating cycle. In the presence of a diode in the armature winding, the efficiency criterion, taking into account the EDF impulse, recoil force, current and heating temperature of the inductor winding, increases. When the converter operates as an electromechanical accelerator without limiting the armature winding current, the speed and efficiency decrease, taking into account the kinetic energy and voltage of the capacitive energy storage at the end of the operating cycle. In the presence of a diode in the armature winding, the efficiency criterion increases, the temperature rise of the armature winding decreases, the value of the maximum efficiency increases, reaching 16.16 %. **Originality.** It has been established that due to the limitation of the duration of the armature winding current, the power indicators of the LPECIT increase when operating as a shock-power device and the speed indicators when the LPECIT operates as an electromechanical accelerator. **Practical value.** It was found that with the help of a rectifier diode connected to the multi-turn winding of the armature, unipolarity of the current is ensured, which leads to the elimination of the EDF of attraction and an increase in the performance of the LPECIT. References 22, figures 5.

Key words: linear pulse electromechanical converter of induction type, shock-power device, electromechanical accelerator, performance indicators, limiting the duration of the armature winding current.