

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків
М.О. РАССОХА, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕРИВАННЯ СТРУМУ ІНДУКТОРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Розглянуто вплив імпульсних переривань струму індуктора електромеханічного імпульсного перетворювача, при яких формуються круті фронти, на ефективність роботи для рухомого та загальмованого якорю. На основі проведених розрахунків надані рекомендації щодо покращення робочих характеристик перетворювача.

Рассмотрено влияние импульсных прерываний тока в индукторе электромеханического преобразователя, при которых формируются крутые фронты, на эффективность работы для подвижного и заторможенного якоря. На основании выполненных расчетов даны рекомендации по улучшению рабочих характеристик преобразователя.

Вступ. Для створення потужних силових імпульсів в широкому діапазоні енергій застосовуються ударні електромеханічні імпульсні перетворювачі (УЕП), в яких енергія електромагнітного поля переходить в механічну впродовж короткого проміжку часу. Подібні перетворювачі використовуються в багатьох галузях техніки для обробки поверхонь, розгону прискорюваних об'єктів, в якості приводів в різноманітних пристроях, тощо [1-3].

Аналіз літератури. Відносно низька ефективність перетворення електричної енергії в механічну в УЕП індукційного типу спричинена неузгодженістю електромагнітних, механічних та теплових процесів внаслідок їх імпульсного характеру [4]. При цьому на прискорюваний якір зі сторони нерухомого індуктора діє як електродинамічна сила відштовхування, яка направлена на здійснення робочого циклу, так і "паразитна" сила притягання, яка виникає через певний проміжок часу і знижує ефективність роботи пристрою. Одним із напрямків поліпшення робочих характеристик УЕП є створення крутих фронтів у струму індуктора, що збуджується від ємнісного накопичувача, наприклад шляхом імпульсних переривань за допомогою електронних схем регулювання [5].

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз можливості підвищення ефективності УЕІП завдяки формуванню крутих фронтів імпульсу струму індуктору з використанням IGBT-транзисторів, які забезпечують імпульсне переривання.

Електрична схема УЕІП. Досліджуваний УЕІП живиться аперіодичним імпульсом, оскільки це дозволяє використовувати в якості ємнісного накопичувача високоенергетичні низьковольтні електролітичні конденсатори. Електрична схема такого УЕІП наведена на рис.1 Ємнісний накопичувач C заряджається від джерела постійної напруги (ДПН), і при досягненні визначеної зарядної напруги U_0 від'єднується від ДПН. При подачі сигналу з джерела живлення ДЖ IGBT-транзистор VT_1 відкривається, ємнісний накопичувач розряджається через діод VD_1 на індуктор з нелінійним активним опором $R_1(T_1)$ та індуктивністю L_1 . При цьому генерується імпульсне магнітне поле, яке, внаслідок наявності між якорем та індуктором взаємодіє з індуктивністю M_{12} , на початку перехідного процесу наводить усереднений струм протилежного напрямку в колі якоря з нелінійним опором $R_2(T_2)$ та індуктивністю L_2 . Між індуктором та якорем виникає електродинамічна сила, під дією якої останній набуває швидкості V . Індуктор шунтований зворотним діодом VD_2 , резисторами $R_{д1}$ і $R_{д2}$ ($R_{д2} \gg R_{д1}$) та IGBT-транзистором VT_2 , що дозволяють регулювати швидкість затухання аперіодичного імпульсу. В табл. 1 подані значення основних параметрів досліджуваного УЕІП.

Таблиця 1 – Основні параметри ударного електромеханічного імпульсно-перетворювача

Показник	Значення
Зовнішній діаметр індуктора D_{ex1} , мм	100
Внутрішній діаметр індуктора D_{in1} , мм	10
Висота індуктора H_1 , мм	10
Зовнішній діаметр якоря D_{ex2} , мм	100
Внутрішній діаметр якоря D_{in2} , мм	6
Висота якоря H_2 , мм	2,5
Початкова відстань між індуктором та якорем ΔZ_0 , мм	1
Кількість витків індуктора $N1$, шт	46
Розмір перерізу одного витка індуктора $a \times b$, мм ²	1,8×4,8
Коефіцієнт пружності пружини K_p , кН/м	7,5
Маса якорю з ударним елементом m_{ank} , кг	0,45
Зарядна напруга накопичувача U_0 , В	400

Математична модель УЕП. Електромагнітні процеси в колі індуктора УЕП залежать від положення наведених на рис. 1 електричних ключів, які вважаємо ідеальними. Вплив нерівномірності розподілу індукovanого в якорі струму на процеси в УЕП враховується шляхом представлення якорю у вигляді сукупності концентрично розташованих елементарних короткозамкнених контурів малого поперечного перетину. Запишемо електромагнітні процеси в УЕП при різних положеннях ключів наступною системою рівнянь [6]:

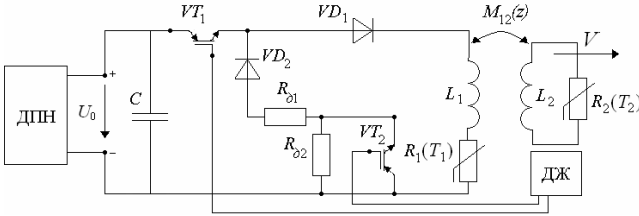


Рис. 1.

$$R_1(T_1)i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_p} i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0; \quad (1)$$

$$R_1(T_1)i_1(t) + R_q i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = 0; \quad (2)$$

$$R_q = \begin{cases} R_{\sigma 1}, q=1 \\ R_{\sigma 1} + R_{\sigma 2}, q=2 \end{cases};$$

$$R_2(T_2)i_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_2}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{2n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0; \quad (3)$$

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{n,1} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{n,n-1}(z) \frac{di_{n-1}}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = 0.$$

де 1 – індекс індуктора; 2, ..., n – індекси елементарних контурів якоря, що рухається зі швидкістю $V(t)$; $R_p(T_p)$, L_p , i_p , T_p – відповідно, опір, індуктивність, струм та температура p -го елементарного контуру; M_{nk} – взаємоддуктивність між n -им і k -им контурами; t_p – тривалість розрядного імпульсу.

Рівняння (1) відповідає електричним процесам розряду ємнісного накопичувача на індуктор через VD_1 при відкритому VT_1 . Рівняння (2) описує замикання струму індуктора через зворотній діод VD_2 , що відбувається після досягнення напругою на ємнісному накопичувачі нуля або після закриття VT_1 . Якщо VT_2 відкрито, струм замикається по шляху з меншим опором – через VT_2 , $R_{л1}$ та VD_2 . Цьому випадку відповідає значення $q = 1$. В разі вимкненого стану VT_2 , струм тече через $R_{л2}$, $R_{л1}$ та VD_2 , що відповідає значенню $q = 2$. В останньому випадку струм в індукторі швидко згасає внаслідок значного сумарного опору кола індуктора. Система рівнянь (3) описує сукупність короткозамкнених контурів якоря.

На якір в напрямку осі z зі сторони індуктора діє імпульс сили:

$$FI = \int_0^t f_z(t, z) dt, \quad (6)$$

де $f_z(t, z)$ - миттєва електродинамічна сила, яка залежить як від струмів індуктора і якоря, так і від їх взаємного положення:

$$f_z(t, z) = i_1(t) \sum_{p=2}^n i_p(t) \frac{dM_{1p}}{dz}(z). \quad (7)$$

Швидкість якоря можна виразити наступним чином:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_{ank}} \left\{ i_1(t_n) \sum_{p=2}^n i_p(t_n) \frac{dM_{1p}}{dz}(z) - K_P \Delta Z(t_n) - \frac{\pi}{8} \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n) \right\}, \quad (8)$$

де $\Delta Z(t_n)$ – переміщення якорю, γ_a – густина повітря; β_a – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Форми імпульсу індуктора. *Струм індуктора без переривань.* До моменту досягнення напругою на ємнісному накопичувачі нульового значення t_{u0} струм в колі індуктора описується рівнянням (1). Після чого струм індуктора замикається через VD_2 і описується рівнянням (2) при $q = 1$. На рис.2 наведені криві щільності струму в індукторі j_1 та якорі j_2 , напруга на ємнісному накопичувачі u_c , масштабовані значення електромагнітної сили f_z та імпульсу цієї сили FI при $U_0 = 400$ В, $C = 2500$ мкФ для випадку рухомого якорю. Як видно на рис. 2, зсув фаз між струмами в якорі та індукторі призводить до виникнення від'ємної електродинамічної сили при набутті цими струмами однакового знаку. Така сила є паразитною і викликає зниження загальної ефективності перетворювача. Позначимо момент переходу f_z через нуль як t_{f0} .

Струм індуктора з імпульсним перериванням в момент t_{f0} . Закнувши струм індуктора через резистор зі значним опором $R_{д2}$ досягаємо швидкого затухання аперіодичного імпульсу, нівелюючи таким чином вплив паразитної(притягальної) сили f_z на роботу УЕІП (рис. 3). При цьому струм в колі індуктора описується рівнянням (1) для $t < t_{u0}$, рівнянням (2) з $q=1$ для $t_{u0} < t < t_{f0}$ і рівнянням (2) з $q=2$ для $t > t_{f0}$. При $t > t_{f0}$, одночасно зі стрімким зменшенням струму індуктора починає зростати струм в якорі, виходячи на значення, що перевищують встановлені у випадку аперіодичного струму без переривань.

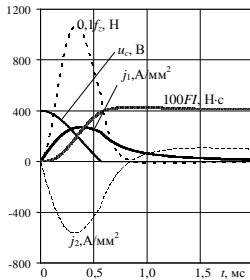


Рис. 2.

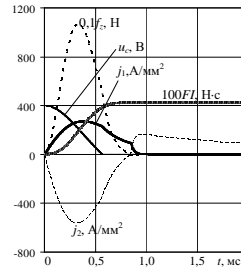


Рис. 3.

Струм індуктора з серійним імпульсним перериванням. Імпульс струму обривається в будь-який момент часу $t_{об}$ вимкненням VT_1 при шунтуванні індуктора зворотнім діодом VD_2 через резистор зі значним опором $R_{д2}$. Вмикаючи VT_1 через певний проміжок часу $t_{п}$ ми поновлюємо процес розряду ємнісного накопичувача на індуктор. Повторюючи цикл вмикання-вимкання з періодом $t_c = t_{об} + t_{п}$ до повного розряду ємнісного накопичувача формуємо серію імпульсів зі стрімко наростаючими фронтами. Для $t < t_{об}$ струм в колі індуктора описується рівнянням (1), для $t_{об} < t < t_{об} + t_{п}$ - рівнянням (2) при $q=2$. Це дозволяє перевірити ідею [5] про можливість форсування робочих характеристик УЕІП при застосуванні крутих фронтів. На рис. 4 наведені електромеханічні характеристики УЕІП для серії імпульсів з $t_c = 0,5t_f$. При обриві струму в індукторі струм індуктивно пов'язаного з ним якорю також прямує до нуля і змінює знак, а накопичена в системі енергія магнітного поля розсіюється на резисторі. Тому, незважаючи на більшу сумарну тривалість загостреного фронту струму в індукторі, загальна ефективність електромеханічного перетворювача знижується, що відображається в менших значеннях імпульсу сили.

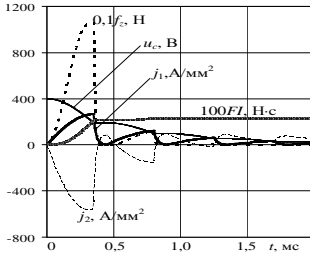


Рис. 4.

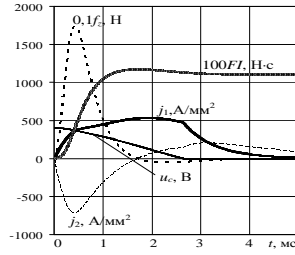


Рис. 5.

Розглянемо особливості електромагнітних процесів в УЕП при $C = 25000$ мкФ. На рис. 5 наведені електромеханічні характеристики такого УЕП для рухомого якорю без переривань струму індуктора. Порівнюючи рис. 5 з рис. 2 бачимо, що при зростанні ємності накопичувача зменшується частота перехідного процесу і збільшується зсув фаз. Внаслідок цього збільшується проміжок часу за який струм індуктора та якоря мають однаковий знак, що призводить до зростання впливу паразитної сили на робочі характеристики УЕП, і більш стрімкого зниження FI з часом. Струм в індукторі збільшується нерівномірно, змінюючи свій характер на більш пологий в момент максимуму струму в якорі.

Як впливає з рис. 5, при $C = 25000$ мкФ для досліджуваного УЕП $t_{j0} < t_{u0}$. Отже, обриваючи імпульс в індукторі в момент t_{j0} (рис. 6) ми не тільки нівелюємо вплив паразитної сили на загальну ефективність УЕП, але і заощаджуємо певну частину енергії, що залишається в ємнісному накопичувачі при u_{cf} , де u_{cf} – напруга на ємнісному накопичувачі в момент t_{j0} . При цьому струм в індукторі для $t < t_{j0}$ описується рівнянням (1), а для $t > t_{j0}$ - рівнянням (2) при $q=2$.

При серійному формуванні крутих фронтів кількість циклів задається таким чином, щоб ємнісний накопичувач розрядився до $u_c = u_{cf}$. На рис. 7 наведені електромеханічні характеристики УЕП для серії імпульсів з $t_c = 0,5t_j$. Як і у випадку з меншою ємністю (рис. 4) розбиття єдиного імпульсу на серію імпульсів знижує ефективність роботи пристрою.

Вплив імпульсних переривань струму індуктора на ефективність УЕП. Порівняємо ефективність УЕП з перериванням і без перериванням струму індуктора для режимів рухомого (розглянути вище на рис. 2 – рис. 7) та фіксованого якорю. Останній характеризується незмінним магнітним зв'язком між якорем та індуктором. Для порівняння використовуватимемо значення імпульсу сили якорю FI_{fin} по завершенню перехідного процесу.

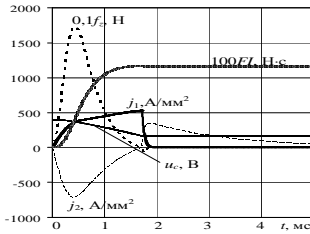


Рис.6.

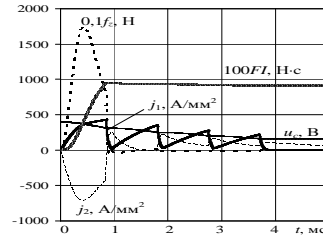
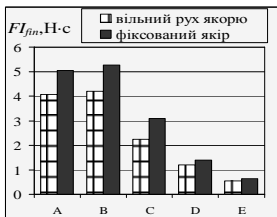
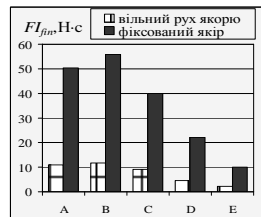


Рис.7.

На рис. 8,а порівнюються значення FI_{fin} при $C = 2500$ мкФ для наступних випадків: А – струм в індукторі без імпульсних переривань; В – струм в індукторі з імпульсним перериванням в момент t_{f0} ; С, D, E – струм в індукторі з серійними імпульсними перериваннями відповідно для $t_c=0,5t_{f0}$, $t_c=0,25t_{f0}$, $t_c=0,125t_{f0}$. В усіх випадках ємнісний накопичувач розряджається до нульової напруги. Як впливає з рис.8,а і для рухомого і для фіксованого якорю відсікання паразитної сили у випадку В підвищує FI_{fin} порівняно з А. Подальше ж розвиття одного імпульсу на серію імпульсів з меншою тривалістю (С, D, E) знижує ефективність УЕІП.



а



б

Рис.8.

На рис. 8,б порівнюються значення FI_{fin} при $C = 25000$ мкФ для режимів, аналогічних наведеним на рис. 8,а. Відмінність від попереднього випадку полягає в розряді ємнісного накопичувача для В, С, D, E до $u_c = u_{cf}$, а не до нуля. Основні тенденції зміни FI_{fin} збігаються з наведеними на рис. 8,а. Значення FI_{fin} для режиму фіксованого якорю більші від FI_{fin} для рухомого якорю. Це пояснюється виходом рухомого якорю із зони ефективної магнітної взаємодії з індуктором. Як впливає з рис. 8,б особливо чітко подібна різниця проявляється у випадку перехідних процесів з низькою частотою (в даному випадку, обумовленою великою ємністю накопичувача). При цьому рухомий якір значно віддаляється від індуктора ще до завершення перехідного процесу в останньому, внаслідок чого його FI_{fin} суттєво менший від FI_{fin}

фіксованого якорю за тих же умов.

Висновки. Імпульсне переривання струму індуктора дозволяє як підвищити так і знизити ефективність УЕІП в залежності від моменту дії. Доцільно застосовувати переривання струму індуктора в момент переходу струму в якорі через нуль, що усуває паразитну силу, генеровану в УЕІП при однаправленому протіканню індукovanого та збуджувального струмів. Для УЕІП зі значним зсувом фаз між струмами якоря та індуктора подібне переривання заощаджує частину енергії ємнісного накопичувача. Водночас, серійне імпульсне переривання струму індуктора з утворенням послідовності імпульсів меншої тривалості та "загостреними" фронтами знижує загальну ефективність перетворення електричної енергії в механічну.

Список джерел інформації: 1. *Татмышевский К.В., Козлов С.А.* Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2005. №12. – С. 52-57. 2. *Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А.* Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авиационно – космическая техника и технология.* – 2007. – №11 (47). – С. 109-117. 3. *Chemerys V.T., Bolyukh V.F.* Prospectives of new coilgun design development // *Артиллерийское и стрелковое вооружение.* – 2008. – № 3. – С. 44-52. 4. *Тюткин В.А.* Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // *Электротехника.* – 2002. – № 11. – С. 24-28. 5. Пат. 011246 ЕП, МПК H01F 7/06. Электродинамический привод /В.И. Кулыгин, И.О. Кирилук, В.А. Когородский, С.Г. Ломов – № 200701722. – Заявлено 19.07.2006. – Опубл. 27.02.2009. 6. *Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукун И.С.* Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // *Технічна електродинаміка.* Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.



Болюх Володимир Федорович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера за фахом "Кріогенна техніка" в 1979 р., дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1987 і 2003 рр. Професор кафедри "Загальна електротехніка" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2004 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами лінійних електромеханічних перетворювачів, кріогенних і надпровідникових електромеханічних пристроїв.



Рассоха Максим Олександрович. Захистив диплом інженера в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" у 2008 р. Аспірант кафедри "Загальна електротехніка" з 2008 р. Наукові інтереси пов'язані з індукційно-динамічними двигунами.

Надійшла до редколегії 16.11.2009