

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харків

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ІНДУКТИВНО-ДИНАМІЧНИХ ДВИГУНІВ

Розглянуто технічні рішення по підвищенню ефективності індукційно-динамічних двигунів, які включають імпульсне модулювання струму індуктора, поліпшення теплового стану при роботі в циклічному режимі, розробку конструктивної схеми двигуна з неметалевим якорем та обґрунтування алгоритму вибору основних параметрів.

Рассмотрены технические решения по повышению эффективности индукционно-динамических двигателей, включающие импульсное модулирование тока индуктора, улучшение теплового состояния при работе в циклическом режиме, разработку конструктивной схемы двигателя с неметаллическим якорем и обоснование алгоритма выбора основных параметров.

Вступ. Для створення потужних силових імпульсів в широкому діапазоні енергій застосовуються індуктивно-динамічні двигуни (ІДД), в яких енергія імпульсного джерела – ємнісного накопичувача енергії (СНЕ), переходить в механічну впродовж короткого проміжку часу. Однак при роботі з швидким змінням електромагнітних, механічних та теплових характеристик, які до того ж у значній мірі залежать від навантаження та параметрів виконавчого елемента, їх ефективність є недостатньо високою, що потребує неординарних підходів по підвищенню їх показників.

Аналіз літератури. ІДД використовуються в багатьох галузях техніки для механічної обробки поверхонь, деформації та прискорення об'єктів, в якості швидкохідних приводів в різноманітних системах, тощо [1-5]. Відносно низька ефективність ІДД спричинена, в першу чергу, неузгодженістю електромагнітних, механічних та теплових процесів внаслідок їх імпульсного характеру. В ІДД 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 внаслідок фазового зсуву між струмами і знижує ефективність роботи двигуна. Відомі технічні рішення, які направлені на підвищення ефективно-

сті ІДД (використання криогенного охолодження, феромагнітного осердя, якоря спеціальної конфігурації, багатосекційного індуктора з послідовної комутацією та ін. [6-8]) не вирішують зазначені проблеми і потребують істотного ускладнення конструкції з погіршенням масогабаритних показників.

Мета дослідження. Метою роботи є обґрунтування ряду технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності ІДД при роботі в різних режимах.

Пропоновані технічні рішення. Серед перспективних напрямків підвищення ефективності ІДД можна запропонувати:

- імпульсне модулювання струму індуктора за допомогою електронної схеми кола збудження;
- поліпшення теплового стану та демпфування зворотних ударів при роботі двигуна в циклічному режимі за рахунок циркуляційної системи охолодження рідкого холодоагенту;
- розробка конструктивної схеми ІДД з неметалевим якорем;
- розробка алгоритму вибору основних параметрів.

Імпульсне модулювання струму індуктора. Електрична схема ІДД з імпульсним модулюванням струму індуктора, наведена на рис.1.

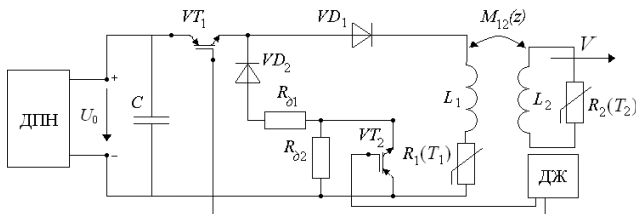


Рис.1.

ЄНЕ C заряджається від джерела постійної напруги ДПН. При подачі сигналу з джерела живлення ДЖ IGBT-транзистор VT_1 відкривається, ЄНЕ 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 взаємоіндуктивності 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 $R_{\delta 1}$ і $R_{\delta 2}$ ($R_{\delta 2} \gg R_{\delta 1}$) та IGBT-транзистором VT_2 , що дозволяють регулювати

швидкість затухання аперіодичного імпульсу [9].

На рис.2 наведені розраховані значення імпульсу електродинамі-

чної сили $FI = \int_0^t f_z(t, z) dt$ для наступ-

них випадків: А – струм в індукторі без імпульсних переривань; В – струм в індукторі з імпульсним перериванням в момент t_{f0} ; С, D, Е – струм в індукторі з серійними імпульсними перериваннями відповідно для $t_c=0,5t_{f0}$, $t_c=0,25t_{f0}$, $t_c=0,125t_{f0}$ (t_{f0} – момент переходу електродинамічної сили f_z через нуль). В усіх випадках ЄНЕ повністю розряджається. Як впливає з рис.2 і

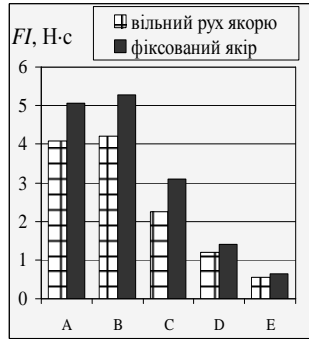


Рис.2.

для рухомого і для фіксованого якорю відсікання паразитної сили у випадку В підвищує імпульс сили порівняно з А. Подальше ж розбиття одного імпульсу на серію імпульсів з меншою тривалістю (С, D, Е) знижує ефективність ІДД.

Поліпшення теплового стану двигуна при роботі в циклічному режимі. Для визначення температур індуктора і якоря ІДД, що змінюються протягом робочого процесу, використовується схемно-польова модель [10]. Польова модель дозволяє на кожному інтервалі часу врахувати просторовий розподіл температур в активних (струмових) і пасивних елементах ІДД:

$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot k_z \cdot \rho_n(T),$$

$$c_m(T) \cdot \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right),$$

де $n = 1, 2$ – індекси індуктора і якоря відповідно; $m = 3, 4$ – індекси ізоляційного каркаса з направляючою втулкою і ударної сталеві пластини відповідно; $c(T)$ – усереднена питома теплоємність; γ – усереднена щільність матеріалу; $j(t)$ – щільність активного елемента; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності; k_z – коефіцієнт заповнення індуктора; $\rho(T)$ – питомий опір активного елемента.

Ця система рівнянь доповнюється граничними умовами на поверхнях f .

На охолоджуваних поверхнях використовуються граничні умови

третього роду, що описують процес тепловіддачі

$$-\frac{\partial T_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_f - T_0),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; n – нормаль до поверхні.

На межі контакту індуктора з каркасом і якоря з ударною пластиною – граничні умови четвертого роду

$$T_n(r_f, z_f, t) = T_m(r_f, z_f, t);$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{mf}}{\partial n}.$$

На осі симетрії ІДД – гранична умова другого роду $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_f = 0$.

Для опису перехідних процесів доцільно використовувати так звану схемну модель [11], побудовану на основі еквівалентних схем заміщення, в якій основні параметри і характеристики елементів схеми заміщення визначаються з польової моделі. В схемній моделі всі параметри вважаються зосередженими і вони є усередненими значеннями, отриманими з польової моделі. Запропонована схемно-польова модель дозволяє забезпечити високу швидкість розрахунку перехідних процесів з урахуванням просторового розподілу температур по активним елементам ІДД.

Для досягання сталої температури активних елементів при тривалій роботі ІДД в циклічному режимі пропонується інтенсивне охолодження тільки нерухомого індуктора.

На рис. 3 представлено перевищення температур індуктора (тонкі лінії) і якоря (жирні лінії) від часу роботи ІДД при охолодженні індуктора з коефіцієнтом тепловіддачі α , Вт/(м² К): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200. З підвищенням інтенсивності охолодження індуктора зменшується нагрів обох активних елементів, але різниця температур між ними зростає. При цьому забезпечується стабілізація температур, що дозволяє не обмежувати час роботи ІДД циклічної дії, що розглядається.

На рис. 4 представлено конструктивна схема ІДД, в якій реалізується як інтенсивне охолодження, так і демпфування зворотних ударів якоря.

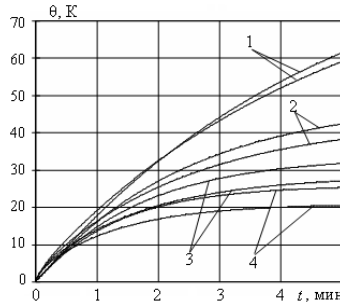


Рис. 3.

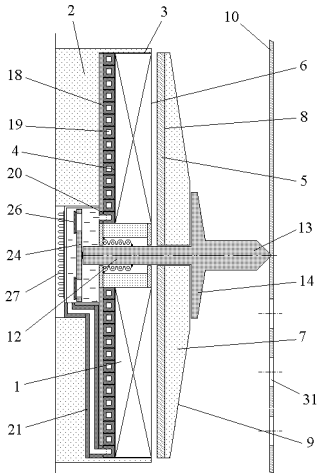


Рис.4.

При підключенні обмотки 1 до ємнісного накопичувача магнітне поле обмотки індукуює струми в електропровідному якорі 5. Внаслідок цього між ними виникає електродинамічна сила відштовхування, яка переміщує якор з ударним елементом 7 у бік об'єкта дії 10. За допомогою упорного диска 14 відбувається переміщення напрямного стрижня 12, і бойок 13 здійснює деформацію об'єкта 10, наприклад пробивання отвору 31. Відбувається аналогічне переміщення плоского поршня 24 всередині охолоджувальної камери 22. При цьому односторонні клапани 26, що розташовані на плоскому поршні 24, вільно пропускають рідкий холодоагент 23.

Після прямого робочого ходу під дією пружини 16 напрямний стрижень 12 здійснює зворотний хід. При цьому односторонні клапани 26 закриваються і поршень 24 штовхає холодоагент 23. Під дією поршня холодоагент видавлюється з камери 22, надходить у вихідний кінець 21 намотаної у формі диска трубки 18, проходить по її внутрішньому каналу 19 і через вхідний кінець 20 надходить у камеру 22. Циркулюючий таким чином в трубці 18 рідкий холодоагент 23 відводить теплову енергію, що виділяється в обмотці 1, забезпечуючи стабілізацію її температури на припустимому рівні. Надлишкове тепло відводиться з охолоджувальної камери 22 у навколишній простір через радіатори 27. При цьому здійснюється безударне контактування якоря 5 з обмоткою 1 зі зменшеним акустичним шумом.

Конструктивна схема ІДД в неметалевим якорем. ІДД може забезпечувати виску швидкість не тільки масивним об'єктам, а і газоподібним системам за допомогою детонаційних труб. При виході хвилі на сталий режим її швидкість визначається кінетикою хімічних реакцій. Тому для кожного типу суміші, з визначеним співвідношенням окислювача та відновника, і яка знаходиться у визначених початкових термодинамічних умовах, характерна практично фіксована швидкість детонації. У випадку відхилення складу суміші від стехіометричного співвідношення, швидкість детонації у суміші може як зростати, так і зменшуватись. Подібного впливу на швидкість детонації завдає введення добавок у суміш. Це спричинено тим, що швидкість детонацій-

ної хвилі D залежить від температури $T_{\text{взр}}$, що досягається у газовому середовищі в результаті детонації, та від середньої молекулярної маси $M_{\text{пр}}$ продуктів детонації:

$$D = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{8310\gamma}{M_{\text{пр}}} \cdot T_{\text{взр}}},$$

де γ – показник адіабати.

За рахунок електродинамічного прискорення газового потоку за фронтом ударної хвилі можна збільшити швидкість виходу хвилі з детонаційної труби. Це дозволить урізноманітнити типи сумішей, а також значно збільшити максимальний поріг швидкостей, яких досягають на теперішній час.

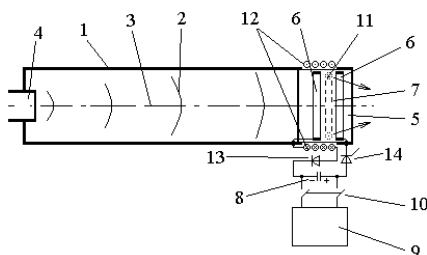


Рис. 5.

Прискорювач ударної хвилі в газоплазмовому середовищі [12] (рис. 5), складається з пристрою для попереднього прискорення газового потоку, виконаного, наприклад, у вигляді детонаційної труби 1, яка направляє ударну хвилю, що виникає у детонаційно-спроможній газовій суміші 2 вздовж осі труби 3, джерела детонації 4, розміщеного із закритого торця труби 1 та секції прискорення 5 ударної хвилі у газовій суміші 2, яка коаксіально розташована з виходом труби 1. Внутрішня частина секції прискорення 5, що утворюється між обмоткою електромагніта та газоплазмовим середовищем, виконана з немагнітного, ізоляційного, ударостійкого та температуростійкого матеріалу, наприклад з кераміки. Всередині секції прискорення 5 розміщені розрядні електроди 6 з розрядними проміжками 7. Імпульсне джерело 8 виконано у вигляді не менш одного СНЕ, який підключається до джерела постійної напруги 9 за допомогою ключа 10. У потоці газу 2 формується область з підвищеною провідністю у вигляді замкнутого контуру 11, площа якого перпендикулярна до осі 3 секції прискорення 5. Розрядні

дні електроди 6 розташовані суміжно з обмоткою електромагніта 12, яка коаксіально розташована з секцією прискорення 5 таким чином, що область з підвищеною провідністю газу у вигляді контуру 11 розташована на відстані максимуму градієнта взаємної індуктивності між контуром і обмоткою електромагніта вздовж осі секції прискорення 3 в напрямку руху газової суміші 2.

Швидкість плазмового кільця (неметалевого якоря), яку необхідно досягнути за рахунок електродинамічного прискорення, залежить від чутливості детонаційно-спроможного середовища. В залежності від цієї швидкості, розраховуються параметри обмотки електромагніта та СНЕ. Напруга, що подається на розрядні електроди, залежить від відстані між електродами та умов газорозрядного середовища.

Розробка алгоритму вибору основних параметрів. Методика вибору параметрів ІДД базується на математичній моделі, що формується на підставі рекурентного алгоритму, у якого на кожному робочому циклі при прямому ході враховується змінюваний магнітний зв'язок між якорем і індуктором, збуджуваним імпульсом струму від СНЕ, нерівномірність розподілу індукованого струму в дисковому якорі, змінення опору індуктора і якоря через нагрів імпульсним струмом, електродинамічних і протидіючих сил, діючих на якор [13]. Для врахування розподіленого струму якор представлено сукупністю елементарних короткозамкнених K контурів, рівномірно розподілених по поверхні диска, а багатовитковий індуктор – первинним контуром, приєднаним до СНЕ.

Процес вибору параметрів ІДД полягає в знаходженні сукупності параметрів, що забезпечують максимальні значення кінетичної енергії, величини та імпульсу сили при мінімальних втратах, функціональних і параметричних обмеженнях.

Цільову функцію можна представити у вигляді

$$\zeta = \sum_{j=1}^N \alpha_j \eta_j, \sum_{j=1}^N \alpha_j = 1,$$

де η_j – функціональні параметри, α_j – ваговий коефіцієнт функціонального параметра.

Стратегія знаходження мінімуму цільової функції ζ в пошуковому просторі полягає у сумісному використанні глобального метода оптимізації, який здійснює випадковий пошук параметрів ІДД в заданому просторі, запобігаючи попаданню в локальний екстремум, і локального метода, який стягує область параметрів з глобальним екстремумом до мінімальних розмірів.

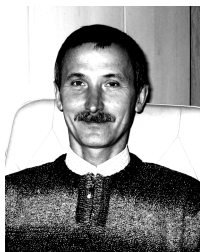
В якості метода глобальної оптимізації пропонуються генетичні алгоритми, які реалізують випадковий пошук з централізованим керуванням, використовуючи відбір і генетичні механізми відтворення. За даним методом, оперуючи сукупністю можливих рішень, опрацьовується набір параметрів, структурований у вигляді ланцюжка кінцевої довжини, а наступні покоління популяції рішень генеруються за допомогою генетичних операторів відбору, кросовера і мутації.

В якості метода локальної оптимізації пропонується метод деформованого багатогранника. За цим методом у просторі параметрів випадковим чином ініціюється популяція точок x_i – вершини багатогранника ($i = 1, \dots, n$), при цьому кожна точка є вектором параметрів $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$. Вони відображаються на простір цільової функції $\zeta(\mathbf{x})$ і на поточному кроці t визначаються вершини з найбільшим і найменшим значенням цільової функції. Нова точка \mathbf{z}' формується через відображення вершини з максимальним значенням цільової функції відносно центра мас всієї решти вершин. У новій точці вчислюється значення цільової функції i , в залежності від порівняння отриманої величини зі значенням цільової функції у вершині з мінімальним значенням цільової функції, багатогранник деформується відносно свого вихідного стану. Оскільки процедура деформації багатократно повторюється, то багатогранник адаптується до локального рельєфу цільової функції і стискається, забезпечуючи збіжність алгоритму.

Висновки. Запропоновані перспективні напрямки підвищення ефективності ІДД, що включають імпульсне модулювання струму індуктора за допомогою електронної схеми кола збудження, поліпшення теплового стану та демпфування зворотних ударів при роботі двигуна в циклічному режимі за рахунок циркуляційної системи охолодження, розробку конструктивної схеми ІДД з неметалевим якорем та алгоритм вибору основних параметрів.

Список джерел інформації: 1. *Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. et al.* Improved performance of linear induction launchers // IEEE Trans. Magnetics. – 2005. – Vol. – 41, № 1. – P. 171-175. 2. *McNab I.R.* Launch to space with an electromagnetic railgun // IEEE Trans. Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 1. – P. 295-304. 3. *Карлукhin В.Ф.* Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Тр. Междун. науч.-техн. конф. "Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития". – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103. 4. *Chemerys V.T., Bolyukh V.F.* Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 3. – С. 44-52. 5. *Чемерис В.Т., Болух В.Ф., Маиталир В.В.* О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // Артиллерийское

и стрелковое вооружение. – 2010. – № 2. – С. 50-58. **6.** Патент України № 56568 Криогенний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу / Болюх В.Ф., Любимова Л.О. № 2002076134; Заявлено 23.07.02; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5. **7.** *Корытченко К.В., Болюх В.Ф., Ломов С.Г.* и др. Влияние емкости в ускоряемой секции линейного электромеханического преобразователя электродинамического типа // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. – Ч. 1. – С. 105-110. **8.** *Болюх В.Ф., Щужин И.С.* Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11. **9.** Пат. України № 50561 Спосіб роботи електромеханічного ударного пристрою індукційного типу / Болюх В.Ф., Рассоха М.О. – Заявлено 11.01.2010. – Надрук. 10.06.2010. Бюл. № 11. **10.** *Птах Г.К.* Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. – № 1. – С. 7-11. **11.** *Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л.* Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с. **12.** Пат. України № 91230 Спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища і пристрій для його здійснення / Болюх В.Ф., Довбня А.М., Стаховський О.В. и др. – Заявлено 04.02.2008. – Надрук. 12.07.2010. Бюл. № 10. **13.** *Болюх В.Ф., Назаренко С.А.* Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С. 28-36.



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 імпульсної дії, криогенних і надпровідникових електромеханічних пристроїв.

*Надійшла до редколегію 28.01.2011
Рецензент д.т.н., проф. Лушніков В.С.*