

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ

Представлені основні типи імпульсних електромеханічних прискорювачів: електромагнітних, магнітоелектричних, рейкотронних, електродинамічних та індукційних. Дана загальна характеристика цих прискорювачів, показані переваги і недоліки, а також рівень розробок. Проаналізовані основні різновиди індукційних прискорювачів та області застосування в промисловості, науці, аерокосмічній та військовій сферах.

Представлены основные типы импульсных электромеханических ускорителей: электромагнитные, магнитоэлектрические, рельсотронные, электродинамические и индукционные. Дана общая характеристика этих ускорителей, показаны достоинства и недостатки, а также уровень разработок. Проанализированы разновидности индукционных ускорителей и области применения в промышленности, науке, аэрокосмической и военной сферах.

ВСТУП

Одним з перспективних напрямів розвитку сучасної електромеханіки є лінійні двигуни, що забезпечують розгін об'єктів до високої швидкості. У цих електродвигунах відсутня спеціальна механічна передаюча ланка, що спрощує конструкцію, підвищує надійність та ефективність перетворення енергії джерела в кінетичну. Але безпосереднє з'єднання якора з прискорюваним об'єктом позбавляє електромеханічний перетворювач універсальності, оскільки об'єкт через його функціональні особливості визначає величину робочого ходу, габарити, швидкість та ін.

Традиційні лінійні електродвигуни не забезпечуються необхідні прискорення, питомі показники, ударні навантаження та динамічні характеристики. Це обумовило появу спеціальних імпульсних електромеханічних перетворювачів, які безпосередньо взаємодіють з об'єктом, забезпечуючи його прискорення на короткій активній ділянці. Ці електромеханічні прискорювачі, як правило, збуджуються від ємнісного накопичувача та характеризуються:

- імпульсним режимом збудження обмоток;
- переривистим характером перетворення енергії за рахунок наявності зворотного ходу й тривалої паузи між робочими імпульсами;
- відносно великою тривалістю накопичення енергії по відношенню до тривалості робочого циклу;
- ударними електромагнітними навантаженнями, які значно перевищують навантаження пристроїв з тривалим режимом роботи.

За принципом дії виділяються електромагнітні, магнітоелектричні, рейкотронні, електродинамічні та індукційні електромеханічні імпульсні перетворювачі.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Робота електромагнітних імпульсних прискорювачів побудована на взаємодії магнітного поля, яке імпульсно збуджується індуктором від ємнісного накопичувача, з рухомим феромагнітним якорем (рис. 1).

При цьому якорь втягується в обмотку індуктора та, коли він досягає середньої площини індуктора, імпульс струму в останньому припиняється, що дозволяє якору здійснювати подальший вільний рух у тому ж напрямку. Основу цих прискорювачів створюють електромагніти циліндричної форми.

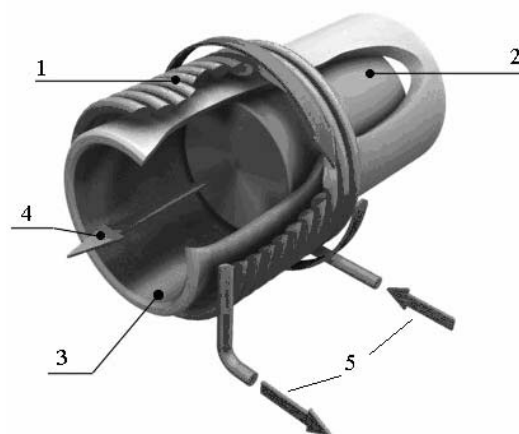


Рис. 1. Схематична будова електромагнітного імпульсного прискорювача: 1 – індуктор; 2 – феромагнітний якорь; 3 – направляюча немагнітна труба; 4 – напрям переміщення якора; 5 – імпульсний струм

Поєднання двох або більше електромагнітів коаксіальної форми, які послідовно вмикаються та мають загальний внутрішній феромагнітний якорь, забезпечує лінійно направлений рух з великим робочим ходом та збільшену кінетичну енергію на виході (рис. 2).

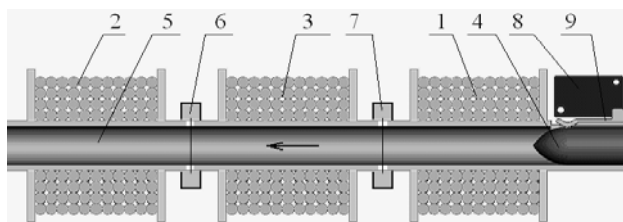


Рис. 2. Схематична будова (а) та зразок (б) трьохсекційного імпульсного прискорювача: 1, 2, 3 – секції обмотки індуктора; 4 – феромагнітний якорь; 5 – направляюча труба; 6, 7 – оптичні датчики; 8 – пускач; 9 – фіксатор

Хоча питома потужність цих електромагнітних імпульсних перетворювачів практично більше ніж у 2 рази перевищує питому потужність пристроїв, створених на базі лінійного асинхронного двигуна промислової частоти, та в півтора рази вище при використанні підвищеної частоти, вони все ж таки мають відносно низькі питомі показники та ККД, обмеження по імпульсним магнітним полям та по швидкості зміни струму.

МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Магнітоелектричні перетворювачі працюють на взаємодії постійного магніту з магнітним полем. Ці перетворювачі можуть містити постійні магніти, встановлені як в індукторі, так і в рухомому якорі. Однак постійні магніти для збереження своїх характеристик не дозволяють імпульсно підвищувати струм в обмотках індуктора вище певного рівня, що обмежує питомі показники такого прискорювача. Крім того, ударні механічні навантаження негативно впливають на характеристики постійних магнітів.

РЕЙКОТРОННІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Рейкотронний імпульсний перетворювач (rail-gun) являє собою пару нерухомих лінійних електродів (рейок) прямокутної, ромбовидної або більш складної форми поперечного перетину, обжатих діелектричними стінками, між якими розташований прискорюваний електропровідний якір (рис. 3) [1].



Рис. 3. Схематична будова рейкотронного імпульсного прискорювача: 1 – електроди-рейки; 2 – якір; 3 – комутатор; 4 – прискорювальний об'єкт; 5 – ємнісний накопичувач

При роботі після замикавання комутатора ємнісний накопичувач збуджує імпульсний струм, який тече по частині рейкових електродів та якорю, що обумовлює прискорення останнього. Проте великий струм, який тече між електродами та якорем, спричиняє ерозійні процеси на контактних ділянках, що потребує регулярної заміни електродів та якоря, обмежуючи параметри та області застосування такого імпульсного перетворювача. Інтенсивний нагрів струмом значної величини скорочує час існування електропровідного якоря у твердому стані. Виникає плавлення, подальше випаровування, а при достатньо високому рівні напруги на міжелектродному проміжку – перехід якоря в плазмовий стан (рис. 4).

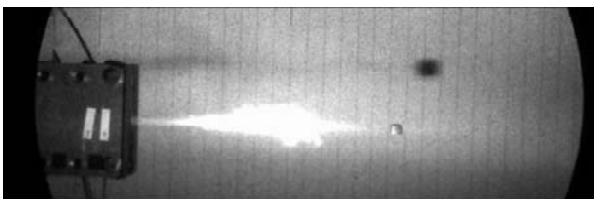


Рис. 4. Високошвидкісна фотозйомка вильоту якоря з плазмовим шлейфом з рейкотронного прискорювача

Вирішити зазначені проблеми певною мірою можна за рахунок вибору форми та конструкції якоря. (рис. 5). Однак і в цьому випадку виникає деформація якоря через значні термомеханічні та електродинамічні імпульсні навантаження.

Подальше збільшення швидкості якоря та ефективності рейкотронних перетворювачів передбачається здійснювати за допомогою використання додаткових магнітів, які охоплюють електроди та підсилюють маг-

нітне поле в активній зоні, або за рахунок комбінації з іншими типами електромеханічних перетворювачів [2].

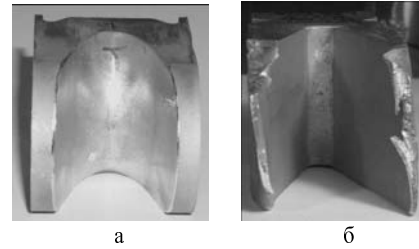


Рис. 5. Загальний вигляд якорів удосконаленої конструкції рейкотронного прискорювача до (а) та після (б) робочого імпульсу 1,2 МА

На рис. 6 показано рейкотронний прискорювач російського федерального ядерного центру – ВНДІ експериментальної фізики (м. Саров), у якому використовуються додаткові магніти, що охоплюють електроди-рейки, підсилюючи магнітне поле в активній зоні [3]. Після робочого циклу при розряді ємнісного накопичувача виникає значна механічна деформація активних елементів прискорювача. Але незважаючи на такі механічні й термічні ударні навантаження, перспективність рейкотронних імпульсних перетворювачів пов'язана з можливістю підводу енергії по всій довжині прискорення за рахунок виконання його багатосекційним, забезпечуючи постійну силову дію на рухомий якір.

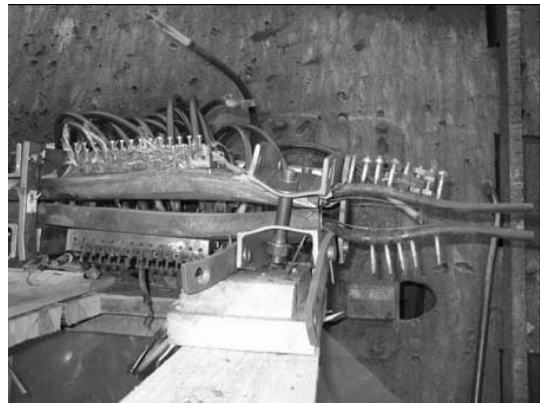


Рис. 6. Загальний вигляд рейкотронного прискорювача із зовнішніми магнітами після розряду ємнісного накопичувача енергією 2 МДж

На рис. 7 показано багатосекційний рейкотронний прискорювач, значний об'єм якого складають батареї конденсаторів, що забезпечують енергію для імпульсу струму та подальшої кінетичної енергії якоря.



Рис. 7. Експериментальний багатосекційний рейкотронний прискорювач на енергію 32 МДж

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Електродинамічні перетворювачі працюють на взаємодії між магнітними полями, які утворюються рухомою якірною та нерухомою індукторною обмотками, що живляться одним і тим же струмом [4]. При роботі, по мірі руху якірної обмотки відносно індукторної, змінюється градієнт взаємної індуктивності між ними, що впливає на величину електродинамічної сили та спричиняє зниження ефективності такого прискорювача. Багато в чому ця проблема усувається в коаксіально-спіральному прискорювачі, у якому статорна та якірні обмотки, що намотані по спіралі, з'єднані за допомогою щітки, нерухокої або переміщуваної разом з якірною обмоткою (рис. 8).

У процесі руху можна забезпечити оптимальне розташування однієї обмотки відносно частини іншої обмотки, яка живиться струмом. Однак щіткова комутація великого імпульсного струму за високою швидкістю переміщення якірної обмотки є серйозною проблемою, що обмежує кінетичну енергію прискорювача. Крім того, електродинамічні перетворювачі можуть забезпечувати значне тягове зусилля на виході тільки при певних розмірах якоря та виконанні обмотки індуктора секційною в напрямку переміщення.

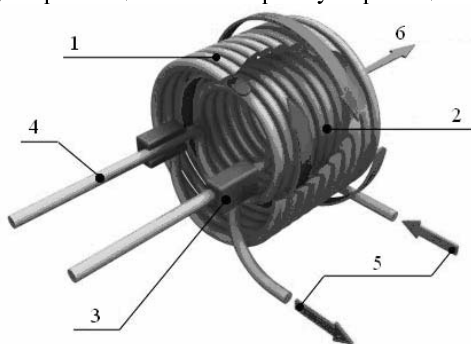


Рис. 8. Схематична будова електродинамічного імпульсного прискорювача: 1 – індукторна обмотка; 2 – якірні обмотки; 3 – щітки; 4 – напрямні контакти струму; 5 – імпульсний струм; 6 – напрям переміщення якірної обмотки

ІНДУКЦІЙНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Принцип дії електромеханічних індукційних прискорювачів заснований на взаємодії магнітного поля, збуджуваного змінним періодичним або імпульсним струмом обмотки індуктора, з індуктованим струмом у короткозамкненій (одно- або багатovitковій) обмотці якоря, що переміщується [5]. При цьому можна виділити основні конструкції індукційних імпульсних прискорювачів як без феромагнітного осердя: коаксіального (рис. 9) та бокового дискового (рис. 10) типу, так і з феромагнітним осердям (рис. 11).

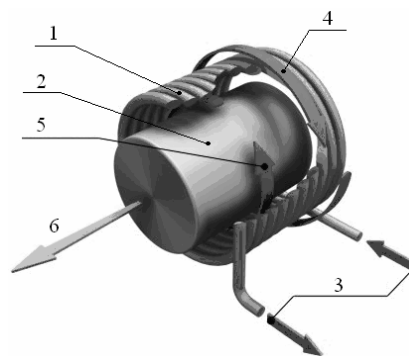


Рис. 9. Схематична будова коаксіального індукційного імпульсного прискорювача: 1 – індуктор; 2 – електропровідний якір; 3 – імпульсний струм; 4 – напрям струму в індукторі; 5 – напрям струму в якорі; 6 – напрям переміщення якоря

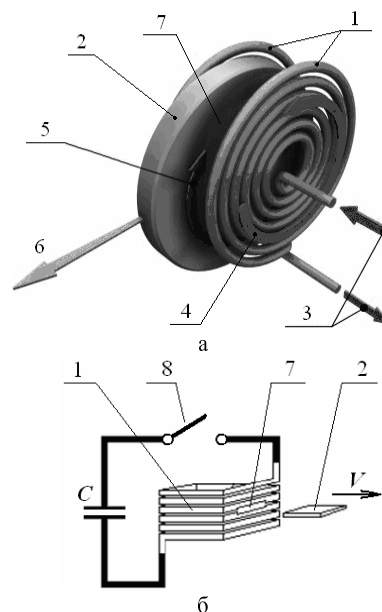


Рис. 10. Схематична будова бокового дискового (а) та соленоїдного (б) індукційного імпульсного прискорювача: 1 – розщеплена обмотка індуктора; 2 – електропровідний якір; 3 – імпульсний струм; 4 – напрям струму в індукторі; 5 – напрям індуктованого струму в якорі; 6 – напрям переміщення якоря; 7 – робочий зазор; 8 – комутатор

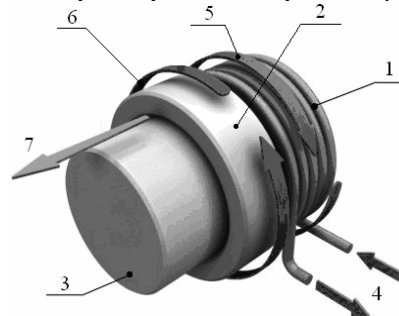


Рис. 11. Схематична будова індукційного імпульсного прискорювача з феромагнітним осердям: 1 – індуктор; 2 – електропровідний кільцевий якір; 3 – феромагнітне осердя; 4 – імпульсний струм; 5 – напрям струму в індукторі; 6 – напрям індуктованого струму в якорі; 7 – напрям переміщення якоря

Для збільшення швидкості індукційні електромеханічні прискорювачі виконуються багатосекційними. На рис. 12 представлено зразок бокового індукційного

прискорювача з послідовною комутацією секцій індуктора, що відбувається синхронно з рухом якоря.

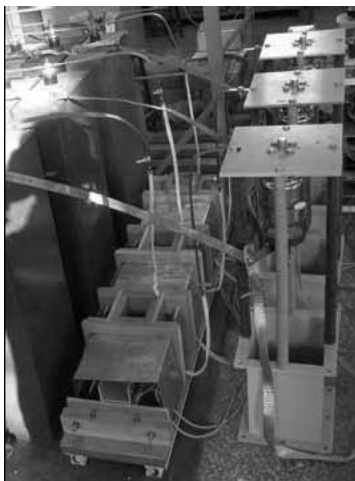


Рис. 12. Експериментальний зразок трисекційного з послідовною комутацією секцій індуктора бокового соленоїдного індукційного імпульсного прискорювача

В основному використовують імпульсні перетворювачі з послідовною комутацією секцій індуктора від ємнісних накопичувачів. Але при цьому проводять дослідження по використанню генераторів змінного струму при одночасному збудженні секцій індуктора.

На рис. 13 показана схема електромеханічного імпульсного прискорювача, для живлення якого використовують два генератори [6].

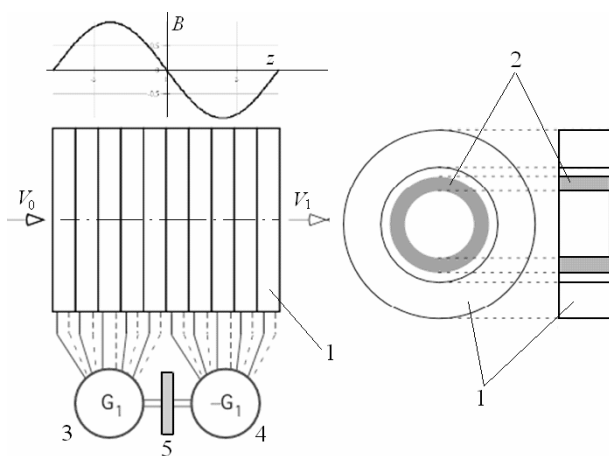


Рис. 13. Схематична будова багатосекційного індукційного імпульсного прискорювача, що збуджується від генераторів змінного струму: 1 – секції індуктора; 2 – електропровідний якір; 3 – генератор напруги позитивної полярності; 4 – генератор струму негативної полярності; 5 – маховик

Генератори змінного струму збуджують відповідні секції індуктора напругою позитивної та негативної полярності, таким чином, що б утворювався синусоїдальний розподіл індукції магнітного поля вздовж індуктора. Зазначені генератори змінного струму працюють в ударному режимі, для чого застосовується маховик – механічний накопичувач енергії. Використання ємнісного або генераторного збудження потребує додаткових досліджень.

В [7] розглянуто індукційний прискорювач, який для алюмінієвого якоря вагою 100 г забезпечує швид-

кість 270 м/с. Це досягається за допомогою високочастотного (5 кГц) генератора, фази якого послідовно включаються в роботу, або ємнісного накопичувача. Показано, що при використанні генератора виникає постійна "паразитна" гальмівна складова електродинамічних зусиль. А при використанні ємнісного накопичувача цього негативного ефекту немає, але тут необхідно використовувати більш високі зарядні напруги, що обумовлює проблеми ізоляції високовольтної апаратури і захисту.

Перевагами індукційного імпульсного прискорювача у порівнянні з іншими є:

- можливість безконтактного руху якоря відносно індуктора;
- відсутність щітково-контактних та ерозійних процесів;
- прискорення якорів практично будь-яких форм та розмірів;
- можливість розподілу електродинамічних сил по всій довжині рухомого якоря;
- можливість послідовного підводу енергії до секцій індуктора, які розподілені в просторі;
- забезпечення високих стартових прискорень, які можуть у 100 й більше разів перевищувати відповідні показники рейкотронного прискорювача при збудженні одним і тим же струмом;
- виконання струмоводів індуктора на відносно низькі струми, а не на мегаамперні, як у рейкотронних перетворювачах;
- наявність аксіально центрувальних електродинамічних зусиль на рухомий якір.

Це ставить електромеханічні прискорювачі індукційного типу в особливе становище по відношенню до решти імпульсних прискорювачів. Так, показник використання активних матеріалів на одиницю зусилля в них у 7-8 разів вище, ніж в електромагнітних, та в 1,6 рази вище, ніж у електродинамічних перетворювачів. Однак ККД цих прискорювачів перебуває на відносно невисокому рівні, що потребує нестандартних схемних та конструктивних рішень щодо підвищення ефективності їх роботи.

Електромеханічні імпульсні прискорювачі індукційного типу виконують, як правило, без магнітопроводу, вони містять нерухому обмотку індуктора, якір у вигляді короткозамкненої багатовиткової обмотки або масивного електропровідного елемента. Виконання якоря у вигляді масивного елемента технічно простіше, він має більш високу механічну надійність та максимальний коефіцієнт заповнення. Але через неоднорідність розподілу струму по поперечному перетину його об'єм використовується нерівномірно.

Багатовитковий короткозамкнений якір має істотні переваги у відношенні до масивного, оскільки за рахунок рівномірного розподілу струму по перетину середнє перевищення температури в ньому може бути знижено більше, ніж на порядок, а ККД – збільшений на 15...40 % [8]. Багатовиткові обмотки якоря, як правило, просочують епоксидним компаундом. Виготовлений таким способом багатовитковий якір надійно проявив себе в індукційному прискорювачі з ємнісним

накопичувачем (енергія $W_0 = 25$ кДж, напруга $U_0 = 20$ кВ) при імпульсу струму вище 100 кА. Цей якір, вагою 96,3 г розганявся до швидкості 165 м/с. При цьому імпульсні магнітні поля сягали 25 Тл, а ККД прискорювача склав 10,2 %.

Існують інші конструкції якоря, направлені на підвищення ефективності прискорювача. Так, в [9] описано конструкцію перетворювача дискової конфігурації, особливість якого полягає в тому, що якір розділений на концентричні ізольовані кільця. У даному перетворювачі початковий проміжок між індуктором та якорем може бути зменшений на величину ізоляційного проміжку. Збільшена міцність ізоляції у відношенні до пробивної напруги, яка виникає між крайніми витками індуктора, забезпечується розділенням якірного диска на декілька кілець з ізольованими проміжками. За рахунок зменшення проміжку збільшується магнітна взаємодія між індуктором та якорем.

В іншому індукційному прискорювачі застосована конструкція якоря, яка складається з пакета електропровідних та феромагнітних дисків, що чергуються між собою [10]. Якщо товщина усіх дисків менша, ніж глибина скін-шару, то основний екрануючий ефект забезпечується провідниковими дисками, а феромагнітні диски забезпечують посилення магнітного поля. Однак в описаних конструкціях прискорювачів [9, 10] відбувається погіршення заповнення об'єму провідником, збільшується маса та ускладнюється конструкція рухомого якоря.

Спеціалістами Массачусетського технологічного інституту та корпорації Electromagnetic Launch Research (США) був розроблений багатосекційний прискорювач, обмотка індуктора якого виконана у вигляді ряду коаксіально встановлених секцій, які послідовно збуджуються при визначеному положенні якоря, коли градієнт взаємної індуктивності між ними максимальний [5]. В якості джерела енергії використовувались конденсатори ємністю 300 мкФ, заряджені до 20 кВ. Комутація секцій здійснювалась за допомогою спеціальної оптоелектронної системи. Якір, проходячи уздовж направляючої структури, діє як заслін на шляху джерел світла, а фототранзистор, який встановлений на іншому кінці волоконно-оптичного екранованого кабелю, реєструє переривання променю і видає сигнал на комутацію відповідної секції обмотки індуктора. При розгоні якоря масою 40...120 г із зовнішнім діаметром до 70 мм була досягнута швидкість 325 м/с, що забезпечило ККД 15%.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ

Електромеханічні прискорювачі імпульсної дії використовуються у багатьох галузях науки і техніки. На основі індукційного прискорювача засноване магнітно-імпульсне зварювання, при якому відбувається зустрічне зштовхування заготовок (рис. 14) [11].

У початковому стані ($t = 0$) індуктори 1 і 2 розташовані на відстані $2h$ вздовж осі x . Якорі 1 і 2 вздовж осі x мають координати X_{01} та X_{02} відповідно. При одночасному підключенні індукторів до джерела

імпульсної напруги якір 1 відштовхується від індуктора 3, а якір 2 – від індуктора 4. Зважаючи на те, що товщина S_1 якоря 1 менше товщини S_2 якоря 2, то швидкість якоря 1 V_1 більша за швидкість якоря 2 V_2 . Тому їх зустрічний удар в момент часу t_c , під час якого і здійснюється зварювання якорів, відбувається ближче до індуктора 4.

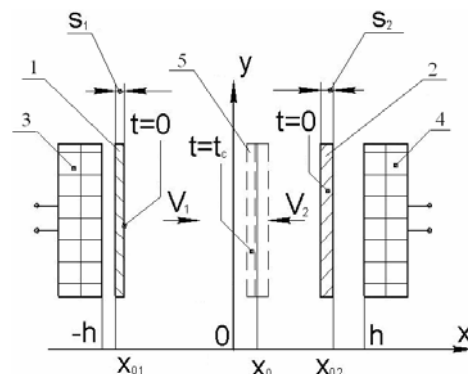


Рис. 14. Схема зустрічного зштовхування заготовок при магнітно-імпульсному зварюванні: 1, 2 – початкове положення зварюваних заготовок; 3, 4 – нерухомі індуктори; 5 – положення зварюваних заготовок в момент удару t_c .

При ударно-конденсаторному зварюванні різномірних металів також використовується індукційний прискорювач, який забезпечує значні контактні напруги при зварюванні деталі у вигляді дроту до плоскої деталі (рис. 15) [12]. Зазначимо, що при зазначених методах зварювання можна з'єднати деталі з матеріалів, які іншим чином практично не зварюються.

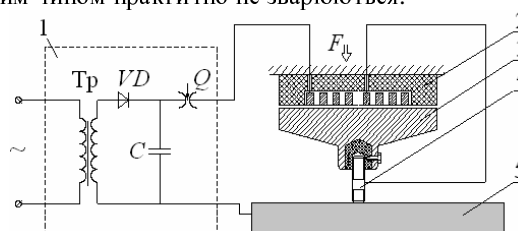


Рис. 15. Принципова схема ударно-конденсаторного зварювання з магнітно-імпульсним приводом: 1 – генератор імпульсних струмів; 2 – дисковий індуктор; 3 – штовхач; 4 – зварювана деталь; 5 – корпусна деталь; F – зусилля притискування деталей

Індукційний імпульсний прискорювач використовується для систем активного захисту об'єктів особливої важливості (рис. 16) [13]. Система містить дисковий індуктор 1, комутаційний пристрій 2, ємнісний накопичувач 3, зарядний пристрій 4. Змінна касета 5 з рухомою стрічкою 6 має електропровідні елементи ураження 7 (якоря) та пристрій 8 для перемотки стрічки 6. Система запускається в дію за допомогою пульта 9 дистанційного керування або за допомогою системи 10 охоронної сигналізації. Датчики 11 виявлення вторгнення розташовані на стіні 12 та закриті декоративними елементами 13.

При попаданні об'єкта 15 в поле ураження 14 спрацьовує індукційний прискорювач, не залишаючи шансів на його подальшу життєдіяльність. Система відеоспостереження CCTV включає відеокамеру 16, що з'єднана через плату 17 відеовводу з персональним

комп'ютером 18, який розташований на автоматизованому робочому місці оператора.

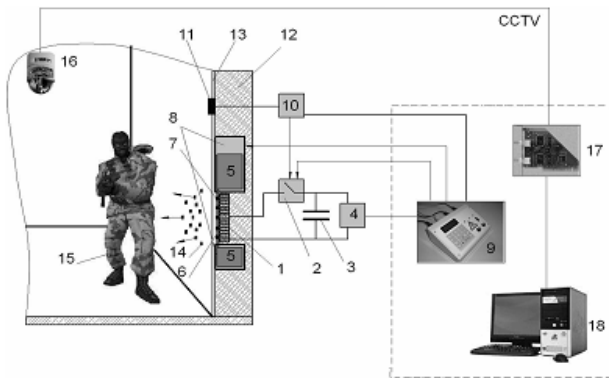


Рис. 16. Система активного захисту об'єктів особливої важливості з індукційним імпульсним прискорювачем

Індукційний прискорювач широко використовується в випробувальних стендах, наприклад для випробувань обладнання на високошвидкісне ударне навантаження при зштовхуванні з крупно габаритними частинками різної форми та природи (рис. 17) [14]. В якості частинок можуть бути елементи природного або штучного подрібнення, кульки, контейнери з різними наповнювачами тощо. В цьому випадку використовується плоский якор, який дозволяє метати групи об'єктів, об'єкти складної форми, об'єкти з непровідного матеріалу. Після прискорення до заданої швидкості якор відсікається спеціальним пристроєм, а частинки продовжують вільний рух до зустрічі з об'єктом випробувань. Така система може бути застосована, наприклад, при випробуваннях елементів бронетанкових конструкцій та засобів індивідуального бронезахисту на ударну міцність в лабораторних умовах при істотному скороченні часу та підвищенні достовірності випробувань.

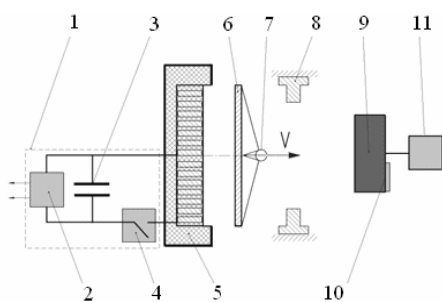


Рис. 17. Функціональна схема електромеханічного імпульсного прискорювача для випробувань обладнання на високошвидкісне ударне навантаження: 1 – генератор імпульсного струму; 2 – зарядний пристрій; 3 – смісний накопичувач енергії; 4 – комутаційний пристрій; 5 – індуктор; 6 – якор; 7 – прискорюване тіло; 8 – відсічний пристрій; 9 – об'єкт випробувань; 10 – система ударних датчиків; 11 – діагностично-вимірювальна апаратура

Для індукційних прискорювачів з інтенсивними імпульсними навантаженнями одними з головних є теплофізичні обмеження. Перспективним шляхом їх подолання представляється використання криогенного охолодження рідким азотом. Незважаючи на те, що криогенне охолодження спричиняє певне ускладнення

конструкції, воно відкриває широкі можливості щодо підвищення ефективності перетворення енергії, зниження втрат, підвищення ізоляційних показників, збільшення струмів, а отже і швидкостей [15].

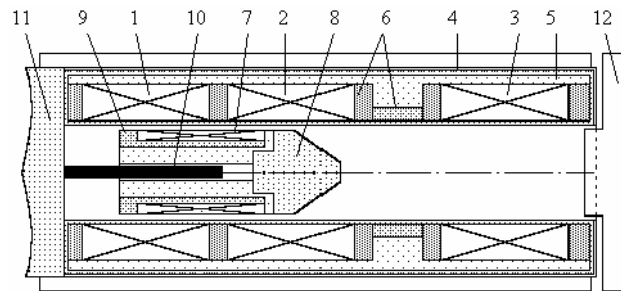


Рис. 18. Конструктивна схема криогенного прискорювача з послідовним збудженням секцій індуктора

На рис.18 показана схема криогенного прискорювача, індуктор і якор якого мають незалежне охолодження. Послідовно збуджувані секції 1, 2, 3 індуктора розташовані в коаксіальному криостаті 4 з рідким азотом 5 і закріплені між собою за допомогою перфорованих опорних елементів 6. Якор 7 з'єднаний з прискорюваним об'єктом 8 і охолоджується азотом, який міститься в опорній перфорованій порожнині 9. Початкове центрування якоря здійснюється за допомогою направляючого елемента 10, прикріпленого до масивного упора 11. Криостат виконаний з тонколистової нержавіючої сталі і склопластику, покритого по зовнішній поверхні теплоізолятором. До початку роботи внутрішній отвір на виході криостата 4 закривається теплоізоляційною вставкою 12.

Розробка електромеханічних імпульсних прискорювачів відкриває нові перспективи й можливості у ряді галузей науки і техніки. На базі електродинамічного прискорювача розробляють випромінювачі гідроакустичних імпульсів, призначені для вивчення морського дна та прибережного шельфу [16]. Розглядаються пропозиції щодо вкидання плазми в термоядерний реактор за допомогою рейкотронних прискорювачів, щодо запуску малих супутників Землі або об'єктів у космічний простір за допомогою кінетичних перетворювачів електродинамічного та індукційного типів. Так, базуючись на швидкості 6 км/с, пропонують прискорювати капсулу з пороховим рушієм у великому каналі (діаметр 0,7 м, довжина 0,5 км): електромагнітний розгін надає їй швидкості 5,5 км/с, після чого спрацьовує пороховий рушій, забезпечуючи додаткове прискорення і вивід об'єкту на космічну орбіту (рис. 19).

У роботі [17] розглядаються два варіанти застосування індукційних перетворювачів у космічній технології. Перший – запуск штучних супутників на низькі навколосемні орбіти (статорна багатосекційна обмотка індуктора розташовується в похилому підземному тунелі довжиною біля 1 км, прискорювана маса сягає 100 кг). Другий – транспортування з поверхні Місяця різних об'єктів. За допомогою електромеханічних прискорювачів передбачається здійснювати викид радіоактивних відходів з Землі за межі Сонячної

системи та запуск міжпланетних зондів. Попередні розрахунки показують, що доставка вантажів у космос за допомогою електромеханічних прискорювачів обійдеться в 300 дол. за 1 кг, тобто в 10 разів дешевше, ніж за допомогою багаторазових шатлів.

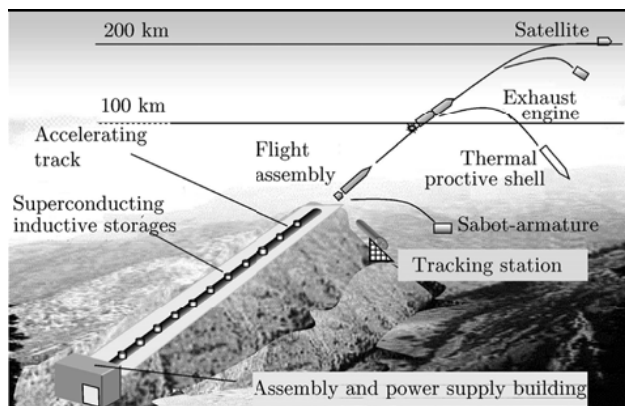


Рис. 19. Схема виводу штучного супутника на навколосезну орбіту Землі

Відбувається інтенсивний розвиток електромеханічних прискорювачів для військових потреб. Так, 31 січня 2008 р. в дослідному центрі озброєнь надводного флоту ВМС США (Naval Surface Warfare Center) в м. Дальгрєн були проведені вогневі випробування електромагнітної рейкотроної пушки, при яких кінетична енергія боєприпасу перевищила 10 МДж, а його прискорення сягало $45 \cdot 10^3$ G. Така пушка дозволяє прискорювати боєприпаси до швидкості 7,5М, після чого вони продовжать політ по балістичній траєкторії, забезпечуючи дальність стрільби до 370-400 км. Більшу частину траєкторії боєприпаси здійснюють в космічному просторі (апогей – близько 200 км). Боєприпаси не будуть мати детонаційної частини – ураження цілі здійснюється за рахунок кінетичної енергії. Передбачається, що електромагнітні пушки поступлять на озброєння ВМС США після 2016 р.

ВИСНОВКИ

В провідних індустріально розвинутих країнах інтенсивно розвиваються основні типи електромеханічних імпульсних прискорювачів: електромагнітні, електродинамічні, рейкотронні, індукційні тощо.

Визначені переваги і недоліки, а також показано сучасний рівень розробок цих електромеханічних пристроїв. У порівнянні з іншими індукційні прискорювачі забезпечують конструктивні, технологічні та інші переваги, працюють в різних режимах з використанням різноманітних джерел живлення, але їх ефективність перетворення електричної енергії джерела в кінетичну енергію прискорювального об'єкта знаходиться на низькому рівні. На базі індукційних прискорювачів розробляються технологічні та випробувальні установки, перспективні методи захисту об'єктів, аерокосмічні та оборонні комплекси. В таких прискорювачах забезпечуються параметри, які практично не можливо реалізувати на базі традиційних лінійних двигунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. I.R.McNab, "Launch to space with an electromagnetic railgun", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 39, № 1, pp. 295-304, 2003.
2. A.Yamori, Y.Ono, H.Kubo et al., "Development of an induction type railgun", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, № 1, pp. 470-472, 2001.
3. G.A.Shvetsov, P.G.Rutberg, V.A.Kolikov, "Electric launch in Russia. A review of recent results", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 35, № 1, pp. 37-43, 1999.
4. W.R.Snow, R.L.Willig, "Design criteria for brush commutation in high speed traveling wave coilgun", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, № 1, pp. 654-659, 1991.
5. A.Balikci, Z.Zabar, L.Birenbaum et al., "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, № 1, pp. 171-175, 2005.
6. D.G.Elliott, "Traveling-wave synchronous coilgun", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, № 1, pp. 647-649, 1991.
7. J.L.He, Z.Zabar, E.Levi et al., "Transient performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, № 1, pp. 585-590, 1991.
8. J.A.Andrews, J.R.Devine, "Armature design for coaxial induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, № 1, pp. 639-643, 1991.
9. А.с.1220067 СССР, МКИ Н02К33/02. Индукционно-динамический привод / А.Б. Лашевич. - №3822407; Заявлено 30.11.84; Опубл. 23.03.86, Бюл. № 11. - 3 с.
10. А.с. 1350777 СССР, МКИ Н02К 33/02. Якорь индукционного-динамического двигателя / В.Т.Чемерис, В.Н.Остейко, Н.В.Клименко и др. - № 4020082; Заявлено 13.02.86; Опубл. 07.11.87, Бюл. № 41. - 3 с.
11. Карпунин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Труды междунар. науч.техн. конф. "Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития". - Самара: Изд. учеб. лит. - С. 99-103. - 2007.
12. Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин Д.С. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки. Автоматическая сварка. - 2004. - № 2. - С. 53-55.
13. Татмьшевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // Современные технологии безопасности. - 2005. № 4. - С. 8-11.
14. Татмьшевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты. // Известия РАРАН. - 2005. №4. - С. 22-31.
15. Болух В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. — Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - 260 с.
16. Гурін А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. - 2001. - № 2. - С. 3-6.
17. R.S.Lipinski, S.Beard, J.Bover, "Space application for contactless coilguns", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 29, № 1, pp. 691-695, 1993.

Поступила 06.02.2009

Болух Володимир Федорович, д.т.н., проф.,
Коритченко Костянтин Володимирович, к.т.н., с.н.с.
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут"
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ",
кафедра "Загальна електротехніка", Науково-дослідна
лабораторія факультету танкових військ
тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua.