

М.М. Можаровський, ст. викл.
Житомирський державний технологічний університет

ДО ПИТАННЯ РЕГЕНЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЇ НА АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

(Представлено к.т.н., доц. Льченком А.В.)

Вказується на актуальність питань, пов'язаних з акумулюванням та зберіганням енергії в екологічному аспекті. Проведений аналіз різних варіантів акумулювання енергії, в тому числі і механічної. Як один з варіантів, перспективними розглядаються акумулятори кінетичної енергії (маховики) з композитних матеріалів. Використання композитних матеріалів дозволяє суттєво знизити вагу конструкції акумулятора кінетичної енергії та підвищити безпеку його експлуатації. В свою чергу, конструкції таких маховиків будуть мати свої особливості при експлуатації. При проведенні розгінних випробувань моделей роторів маховиків встановлено реальні значення граничних енергій, що можна акумулювати в різних типорозмірах моделей роторів. На основі проведених випробувань встановлено також недоліки конструктивних рішень в моделях, що пройшли випробування. Розглядається питання використання нових матеріалів для створення перспективних конструкцій роторів маховиків з метою їх практичного використання при створенні конструкцій гібридних двигунів для АТЗ.

Ключові слова: акумулятор кінетичної енергії; композитні матеріали.

Постановка проблеми. Питання, пов'язані з накопиченням енергії, зберіганням та збільшенням її щільності, є досить актуальним з точки зору екології, оскільки акумульована енергія необхідна практично в будь-якій машині і системі, де має місце споживання і перетворення енергії. При цьому необхідно зазначити, що акумульована енергія значно дешевша, а її використання екологічно безпечне.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективність використання акумуляторів кінетичної енергії (маховиків) в екологічному аспекті розглядалась в [1, 2]. В цих роботах було показано, що використання нових конструкційних матеріалів (волокнистих композитів) в конструкціях роторів маховиків суттєво підвищить їх питомі енергетичні характеристики, а це, в свою чергу, зробить їх використання з метою акумулювання та зберігання енергії перспективним.

Деякі розрахунки, що фігурують в технічній літературі, показують, що приблизно 65 % енергії, що споживається міськими транспортними засобами, витрачається на їх прискорення, а потім ця енергія майже повністю розсіюється при гальмуванні. Ці розрахунки ще раз підкреслюють, наскільки актуальним є питання регенерації енергії, що вивільнюється при гальмуванні транспортних засобів.

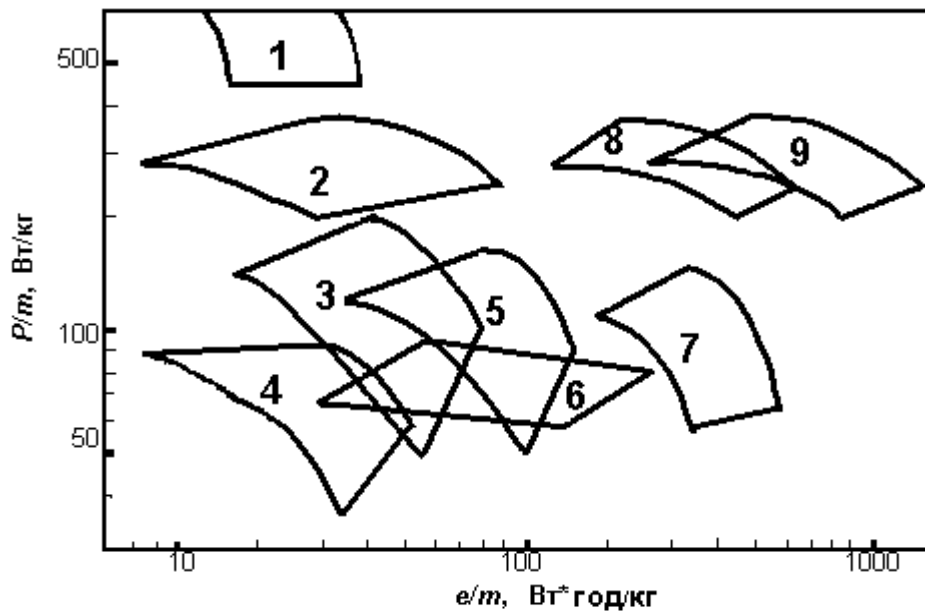
Якщо розглядати конкретно режим рекуперативного гальмування, то слід зазначити, що його можна реалізувати декількома способами, використавши для цього електрохімічні, кінетичні, пружні, гідравлічні та пневматичні акумулятори. Враховуючи той факт, що потужність, необхідна для зупинки транспортного засобу, велика (особливо при екстремому гальмуванні), для поглинання такого згустку енергії електрохімічні батареї будуть неефективними. Іншим негативним показником використання електрохімічних батарей є скорочення строку їх служби при високих рівнях потужностей зарядки-розрядки. У батарей інших типів з високими характеристиками питомої потужності строк служби також скорочується, хоча і меншою мірою, й одночасно зменшується питома енергомісткість. За результатами досліджень питомої потужності та енергомісткості накопичувачів енергії і двигунів внутрішнього згорання різних типів (рис. 1), що розглядалися в [3], можна стверджувати, що акумулятори кінетичної енергії (АКЕ) за даними характеристиками є одним з оптимальних варіантів рекуперативного гальмування. Пневматичні акумулятори є непридатними в більшості випадків через низькі ККД та масову енергомісткість. Більш придатними можуть стати гідроакумулятори та акумулятори пружної енергії.

Але умовам роботи АТЗ здебільшого будуть відповідати маховичні накопичувачі, завдяки їх високій питомій потужності. Враховуючи до цього низький рівень акустичного та хімічного забруднення середовища в поєднанні зі збільшенням терміну служби основного двигуна, високий комфорт і ймовірне зниження експлуатаційних витрат, роблять доцільною розробку АТЗ з гібридним приводом навіть тоді, коли

ККД його буде не більшим, ніж в основного двигуна. Це підтверджується й розрахунковими оцінками потенційних можливостей схем компонування і керування гібридними приводами, а також ефективності таких транспортних засобів, що наводяться в [4, 5].

Досить цікавою областю використання АКЕ в дорожніх транспортних засобах може стати система запуску двигунів. За інформацією деяких літературних джерел, можна економити в міському циклі

приблизно 10 % пального, якщо в період гальмування відключати двигун. Для запуску після гальмування в цьому випадку ефективним буде використання енергії АКЕ.



найбільш ефективно використання різних типів акумуляторів і двигунів внутрішнього згоряння [1]: 1 – маховики з композитних матеріалів; 2 – двигуни внутрішнього згоряння на водневому (гідрид водню MgH_2) паливі; 3 – Ni-Zn-акумулятори; 4 – свинцеві акумулятори; 5 – Li-Al- FeS_2 -акумулятори; 6 – метанольні паливні елементи; 7 – Al-повітряні елементи; 8 – двигуни внутрішнього згоряння на метанолі; 9 – двигуни внутрішнього згоряння на бензині

Проведений короткий аналіз, а також проблеми енергозбереження та екологічні питання сьогодення ставлять питання використання АКЕ особливо актуальними. Перешкодами до широкого впровадження АКЕ є деякі труднощі техніко-економічного характеру. Ефективність АКЕ оцінюється за питомою масовою енергоемністю, яку можна визначити як відношення максимально можливої накопиченої енергії маховиком до маси всієї конструкції АКЕ. Якщо конструкції роторів маховиків виготовляти монолітними, а як конструкційні використовувати ортотропні матеріали (метали та їх сплави), то такі ротори будуть становити велику небезпеку при руйнуванні в полі дії відцентрових сил. В цьому випадку для створення безпеки експлуатації ротора маса захисних конструкцій буде надто значною, що суттєво знизить ефективність використання АКЕ.

Поява нових конструкційних матеріалів на основі високоміцних волокон і полімерних в'язучих речовин (волоконистих композитів) відкриває нові можливості в напрямку створення високоефективних АКЕ. Такі матеріали є анізотропними і питома міцність їх в напрямку волокон в декілька разів може перевищувати міцність високолегованих сталей. Руйнування таких матеріалів є відносно безпечним і не потребує створення захисних пристроїв великої ваги. На шляху переходу до практичного використання волоконистих композитів в конструкціях роторів АКЕ необхідно вирішити низку проблем. Оскільки матеріали анізотропні, то конструкції роторів повинні створюватись таким чином, щоб максимальні напруження, що створюються в роторі відцентровими силами і скрутними моментами, діяли вздовж волокон. Орієнтовні шляхи реалізації високої питомої міцності композитів в конструкціях роторів маховиків наводяться в [7].

Мега роботи. Для оцінки ефективності використання волоконистих композитів в конструкціях роторів маховиків можна навести теоретичні характеристики енергомісткості [6], що представлені в таблиці 1. Ці характеристики відповідають міцності при короточасних випробуваннях і безкінечно тонким кільцям, які при обертанні працюють лише на розтягування в коловому напрямі. Вони являють собою ідеальний випадок використання волоконистих композитів в конструкції роторів.

Але, як з'ясувалося при проведенні експериментальних досліджень в лабораторії ЖДТУ, реалізація високих потенційних можливостей – не лише міцності, але і технологічних – наштовхнулися на ряд труднощів, що притаманні композитам як конструкційним матеріалам.

Прагнення до отримання максимальної міцності в коловому напрямі пов'язане з використанням колової намотки. При цьому збільшення колової міцності супроводжується проявленням традиційних недоліків волоконистих композитів – низькою зсуваючою міцністю і міцністю на поперечний відрив, що,

в свою чергу, стає причиною розшарування енергомісткого обода ротора як в процесі розгону чи гальмування, так і при обертанні з постійною швидкістю.

При конструюванні роторів маховиків з композитних матеріалів на практиці необхідно підходити з погляду ефективного використання матеріалу. При цьому необхідний аналіз таких факторів, які вважаються другорядними чи не розглядаються взагалі при використанні ізотропних матеріалів. До них можна віднести, наприклад: малі радіальні розтягуючі напруження й особливості напруженого стану поблизу кінців арматури, з якої намотується виріб [7–9].

Таблиця 1

Матеріал	Межа міцності при розтягуванні вздовж волокон (Π^+) кг/мм ²	Питома вага г/см ³	Питома масова енергомісткість Вт*год./кг
Склопластик (на E-волокнах)	110	2,1	73
Склопластик (на S ₂ -волокнах)	175	2,0	122
Вуглепластик (на волокнах HS-графіт)	180	1,6	160
Органопластик (на волокнах Kevlar-49)	180	1,35	187

Створення системи початкових напружень при намотці роторів, що пропорційні товщині намотаного шару (виробу) і при певній товщині можуть стати причиною появи тріщин в готовому виробі, розглянуто у [6].

У зв'язку з перспективністю використання композитних матеріалів ведеться активний пошук конструктивних рішень і технологічних прийомів, що дозволяють створювати оптимальні конструкції роторів маховиків з максимальною питомою енергомісткістю.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження в даному напрямку виокремлюють, в основному, чотири способи підвищення питомої енергомісткості при збереженні достатньо високої масової:

- перехід від тонкостінних до товстостінних кілець і дисків;
- профілювання кілець і дисків;

- проектування гібридних роторів, що складаються з декількох матеріалів, і використання різних схем армування одного і того самого композитного матеріалу.

Можна вважати, що до даного часу склалися основні уявлення про шляхи ефективного використання композитних матеріалів в конструкціях роторів маховиків. Але практичний бік цього питання ще далекий від завершення. Заміна композиту однорідним анізотропним матеріалом в розрахунках міцності не відповідає суті явищ втоми і руйнування, що відбуваються в ньому. В той же час, не розглядаються такі явища, як механіка мікроруйнування. В результаті, при розрахунках використовується спрощена модель, що об'єднує реальні властивості матеріалу з певними інженерними припущеннями. До того ж, питання динаміки щодо роторів маховиків з волокнистих композитів практично не розглядалися. Все це робить актуальними питання експериментального дослідження міцності роторів маховиків з композитних матеріалів.

Для реальної оцінки теоретичних розрахунків питомої масової енергомісткості волокнистих композитів (табл. 1) проводились розгінні випробування достатньо тонких кілець за допомогою спеціального пристосування. Результати даних досліджень представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Тип моделі/ Матеріал	Питома вага *10 ³ , кг/м ³	Міцність, *10 ² , МПа	Гранична питома масова енергомісткість, Дж/г		Гранична колова швидкість, м/с
			розрахунок	експеримент	
Тонкий обід Kevlar 49 + епокс. зв'язка	1,36	21,5	790	630	1156
Kevlar 29 + епокс. зв'язка	1,36	17,5	650	560	1093
Скло (на E-волокнах + епокс. зв'язка)	2,07	15,0	370	250	733

Скло (на S-волокнах + епокс. зв'язка)	2,03	18,9	470	460	986
---------------------------------------	------	------	-----	-----	-----

Представлені результати показують, що досягнуті питомі масові енергомісткості близькі до розрахункових граничних значень і суттєво перевищують аналогічні характеристики суцільних дисків рівного опору з ізотропного матеріалу.

Але, на практиці, конструкція роторів повинна бути такою, в якій максимально використовуються як масова, так і об'ємна енергомісткості. Тому реальні конструкції будуть відрізнятися від модельних кілець.

Таблиця 3

Тип ротора	№	Відносний розмір r/R обода	Матеріал	Колова швидкість, м/с	Кінетична енергія, КДж	Питома масова енергомісткість, Дж/г
Г	13	0,8	Склопластик	754	1404	141
	14	0,8	Органопластик	849	1294	218
	15	0,8	Органопластик	967	1728	291
	16	0,8	Органопластик	834	1328	215
	17	0,8	Органопластик	789	1370	188
	18	0,8	Органопластик	847	1312	188
	19	0,8	Вуглепластик + органопластик	742	878	157
Д	20	0,8	Органопластик	713	592,7	205,9
	21	0,76	Вуглепластик	714	890,6	197,5
	22	0,79	Органопластик	725	837	204,7

У лабораторії ЖДТУ проводились експериментальні дослідження реальних моделей і конструкцій роторів маховиків з волокнистих композитів. Для проведення таких досліджень були сконструйовані та виготовлені спеціальні експериментальні стенди.

Результати проведених експериментальних досліджень міцності роторів з композитних матеріалів є малочисельними роботами в даному напрямку й являють собою цінну інформацію, яка необхідна при подальшому вдосконаленні конструкції та технології виготовлення. За великим розсіюванням досягнутих граничних швидкостей на периферії маховиків можна говорити про те, що їх конструкції ще далекі від досконалих.

У таблиці 3 представлено результати проведених досліджень деяких конструкцій декількох типорозмірів роторів з волокнистих композитів. Ротори являли собою ободкові конструкції, в яких енергомістким є обід, скрутний момент від якого до валу передавався безпосередньо одиночними спицями, які виконані хордовою намоткою.

Представлені в таблиці 3 результати показують реалізацію повної та питомої масової енергомісткості волокнистих композитів в конструкціях роторів, що наближаються до вигляду реальних.

Висновки. На основі проведеного теоретичного аналізу і виконаних досліджень можна говорити про те, що використання маховиків в поєднанні з двигуном внутрішнього згоряння на транспортних засобах є на даний час актуальним питанням.

Розвиток та створення виробництва нових матеріалів з високими питомими характеристиками міцності дозволяє виготовити високоефективні ротори для маховиків.

Експериментальні результати, отримані при випробуваннях роторів, більш ніж в два рази, нижчі за гранично можливі на конструкціях тонких кілець (табл. 2). Руйнування відбувається раніше, ніж досягається розрахунковий рівень колових напружень, близький до межі міцності матеріалу. На основі цього можна говорити про те, що в конструкції та технології виготовлення роторів маховиків з композитних матеріалів містяться ще скриті резерви підвищення їх характеристик, а це, в свою чергу,

підтверджує можливість створення на практиці ефективного гібридного двигуна для автотранспортних засобів..

Список використаної літератури:

1. *Можаровський М.М.* Екологічні перспективи та деякі проблеми використання акумуляторів кінетичної енергії / *М.М. Можаровський* // Вісник ДААУ. – 1998. – № 2. – С. 55–65.
2. *Можаровський М.М.* До питання акумулювання та зберігання енергії як одного з варіантів покращання екологічного стану навколишнього середовища / *М.М. Можаровський* // Вісник ДААУ. – 1999. – № 1–2. – С. 105–117.
3. *Johnson D.E.* Maximum Energy Densities for Composites Flywheels / *D.E. Johnson, I.I. Corman* // Flywheel Technology Symposium. – October, 1980. – Pp. 93–100.
4. *Kulkarni S.V.* Composite-Material Flywheels and Containment Systems / *S.V. Kulkarni* // Energy and Tech. Rev., L.L.H. Lab. – March, 1982. – Pp. 18–29.
5. *Genta G.* Utilizzazione degli accumulatori di energia cinetica su veicoli urbani di Superficie / *G.Genta* // ATA. – Apr., 1976. – Pp. 174–180.
6. Minimization of Energy Storage Requirements for Internal Combustion Engine Hybrid Vehicles / *N.H. Beacheley, C.Ascomb et al.* // ASME Paper 82-WA/DSC-20. – 1982.
7. *Портнов Г.Г.* Маховики из композитов / *Г.Г. Портнов, В.Д. Протасов, Ю.М. Тарнопольский.* – М. : ЦНИИ информации, 1982. – 148 с.
8. *Портнов Г.Г.* Влияние низкой сдвиговой прочности полимерного слоя на несущую способность труб из стеклопластиков / *Г.Г. Портнов* // Механика полимеров. – 1967. – № 3. – С. 553–556.
9. *Портнов Г.Г.* Разрушение размоткой маховиков из композитов / *Г.Г. Портнов, В.Л. Кулаков* // Механика композитных материалов. – 1979. – № 4. – С. 656–662.
10. *Можаровський М.М.* Перспективи використання механічних акумуляторів на автотранспортних засобах / *М.М. Можаровський* // Тези Всеукр. науково-практ. Оп -line конф. аспірантів, молодих вчених та студентів, присв. Дню науки (м. Житомир, 10–12 трав. 2016 р.). – Житомир : ЖДТУ, 2016. – С. 49–50.

References:

1. Mozharov's'kiy, M.M. (1998), "Ekologichni perspektyvy ta dejaki problemy vykorystannja akumuljatoriv kinetychnoi' energii", *Visnyk DAAU*, No. 2, pp. 55–65.
2. Mozharov's'kiy, M.M. (1999), "Do pytannja akumuljuvannja ta zberigannja energii' jak odnogo z variantiv pokrashhannja ekologichnogo stanu navkolyshn'ogo sere dov yshha", *Visnyk DAAU*, No. 1–2, pp. 105–117.
3. Johnson, D.E. and Corman, I.I. (1980), "Maximum Energy Densities for Composites Flywheels", *Proceedings of the Flywheel Technology Symposium*, pp. 93–100.
4. Kulkarni, S.V. (1982), "Composite-Material Flywheels and Containment Systems", *Energy and Tech. Rev.*, pp.18–29.
5. Genta, G. (1976), "Utilizzazione degli accumulatori di energia cinetica su veicoli urbani di Superficie", *ATA*, pp. 174–180.
6. Beacheley, N.H. and Ascomb, C. (1982), "Minimization of Energy Storage Requirements for Internal Combustion Engine Hybrid Vehicles", *ASME Paper*, No. 82–WA/DSC–20.
7. Portnov, G.G., Protasov, V.D. and Tarnopol'skiy, Yu.M. (1982), *Makhoviki iz kompozitov*, TsNII informatsii, Moscow, 148 p.
8. Portnov, G.G. (1967), "Vliyanie nizkoy sdvigovoy prochnosti polimernogo sloya na nesushchuyu sposobnost' trub iz stekloplastikov", *Mekhanika polimerov*, No. 3, pp. 553–556.
9. Portnov, G.G. and Kulakov, V.L. (1979), "Razrushenie razmotkoy makhovikov iz kompozitov", *Mekhanika kompozitnykh materialov*, No. 4, pp. 656–662.
10. Mozharov's'kiy, M.M. (2016), "Perspektyvy vykorystannja mehanichnyh akumuljatoriv na avtotransportnyh zasobah", *Proceedings of the Ukrainian scientific-and-practical online conference of graduate students, young scientists and students on the Day of Science*, 10–12 May 2016, Zhytomyr, Ukraine, pp. 49–50.

МОЖАРОВСЬКИЙ Микола Мар'янович – старший викладач кафедри ЗІД Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- прогресивні технології створення нових конструкційних матеріалів;
- енергозберігаючі технології транспортних засобів.

Тел.: 0972613177.

Стаття надійшла до редакції 02.09.2016