

## Фрактали – суперкондензатори – автомобили<sup>1</sup>

Ф. Гасман, Р. Кьотц и К. Кендал

### Автомобили

По земята днес се движат 750 млн. автомобили, които изхвърлят в атмосферата годишно около 4 млрд. тона въглероден диоксид – 15 % от всички антропогенни емисии, представляващи основен фактор за застрашителни промени в глобалния климат. Съдържащите се в изхвърлените газове въглеводороди, азотни оксиди и частици са източници на редица здравословни рискове. Това е първата и основна причина, която принуждава производителите на автомобили да търсят начини за намаляване на вредните емисии. Друга причина е постепенното изчерпване на нефтените запаси и фактът, че по-голямата част от тях се намира в политически нестабилни райони.

Днес най-перспективното решение на тези проблеми е преминаването към електромобили, в които като гориво се използва водород. Към препятствията, които пречат дизеловите и бензиновите двигатели да се заменят още днес с новия тип двигатели, принадлежат високата цена, големите маса и обем, изискванията към безопасността на резервоарите с водород, както и липсващата инфраструктура за производството и търговията с него.

Тези технически и икономически проблеми може да се минимизират по следния начин. Известно е, че за равномерно движение със скорост 120 km/h по хоризонтален път на автомобил с маса 1 тон, както и за изкачване на 6 % наклон със скорост 80 km/h, е достатъчна мощност на двигателя от само 20 kW. Автомобил с такъв двигател обаче би бил твърде трмав – от място до 100 km/h той би се ускорявал цели 30 s – нещо неприемливо за днешния шофьор. Освен това той няма запас от мощност, която да позволява ускоряване и достатъчно бързо задминаване на други участници в движението. Именно поради това мощностите на двигателите на съвременните автомобили са примерно 50 kW и повече. Осигуряването на запас от мощност от повече от 30 kW обаче има две важни последствия. Първо – цената на двигателя се увеличава значително и, второ, при това положение огромната част от времето двигателят работи далеч от оптималните условия, което увеличава както разхода на гориво (оскъпява експлоатацията), така и вредите върху околната среда от емисиите.

Един перспективен изход от ситуацията е основната система, която захранва електродвигателя на автомобила, да осигурява мощност 20 kW, но паралелно с нея да има резервоар на енергия, който за кратки интервали от около 15 s е в състояние да осигури допълнителна мощност от порядъка на 53 kW. При това положение общата мощност от 73 kW (100 конски сили) осигурява достатъчно пългавина за ускоряване от място и при задминаване.

Целият проблем е кой източник може да осигури допълнителна мощност от 53 kW и да я поддържа поне 15 s. Необходимата енергия като количество не е много – около 220 Wh. Запасената в обикновен оловен акумулатор с ЕДН 12 V и капацитет 60 Ah енергия е 720 Wh, т.е. – достатъчно. Токът през акумулаторът обаче е ограничен примерно до 150 A и следователно мощността, която може да се осигури – 1,8 kW, е далеч под желаните 53 kW. Освен това, въпреки че по принцип са обратими, химичните реакции в акумулатора на практика след няколко стотин цикъла на зареждане и разреждане водят до разрушаване на електродите му. Въпреки усилените през последната десетилетие разработки на нови типове акумулатори, все още няма такъв, който удовлетворява изброените по-горе изисквания.

<sup>1</sup> Съкратен и адаптиран превод от статия в *Europhysicsnews*, 34/5, 2003.

## Суперкондензатори

Кондензаторът е уред, в който енергията се натрупва чрез чисто физични процеси (не се извършват химични реакции), поради което броят на циклите на зареждане и разреждане е неограничен. Освен това те имат и едно много съществено преимущество: отношението между тока на зареждане/разреждане и общия запас от енергия в тях е с четири порядъка по-голямо, отколкото в акумулаторите. Това означава, че кондензаторът може много по-бързо както да отдаде запасената енергия, така и да възстанови запаса си. Големият недостатък на довчерашните кондензатори е нищожното количество енергия, което може да се запаси в тях – факт, който лесно може да се потвърди чрез прилагане на формулата:

$$W = \frac{1}{2} CU^2.$$

Така енергията, която може да се натрупа в някои от често използваните типове кондензатори е както следва:

– в използваните в радио-, ТВ-апаратите и в ПК високочестотни хартиени кондензатори с капацитет от порядъка на  $\mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$  и напрежение до 450 V – около  $10^{-6} \text{ Ws}$ ;

– в използваните в общата електротехника (напр. в усилвателите на звукова честота) нискочестотни хартиени кондензатори с капацитет от 51 nF и напрежение до 63 V – около  $10^{-3} \text{ Ws}$ .

През последното десетилетие бяха разработени нов тип кондензатори, чиито капацитет е с няколко порядъка по-голям от този на обикновените електролитни кондензатори. Това са т.нар. *суперкондензатори*, или още *ултракондензатори*, *електрохимични двуслойни кондензатори* (EDLC – Electrochemical Double Layer Capacitor). Така например през 2001 г. бе създаден суперкондензатор с капацитет 1600 F, който при напрежение 2,5 V натрупва енергия  $5000 \text{ J} = 1,4 \text{ Wh}$  в един обем от само 0,3 литра (цилиндър с диаметър 5 cm и височина 14 cm) и маса 320 g. За натрупване на необходимото количество от 220 Wh енергия са достатъчни 160 суперкондензатора, чиято маса от 50 kg е напълно приемлива от гледна точка на автомобилостроителите. Поради малкото им вътрешно последователно съпротивление от само 0,0014  $\Omega$  те могат да отдават или поемат върхови стойности на тока над 300 A. Поради изключително високия ток при ниско напрежение, действието им обикновено е ограничено между 50 % и 100 % от максималното напрежение и следователно се използва само 75 % от натрупаната енергия. (Тъй като зависимостта на енергията от напрежението е квадратична, остатъчната енергия при 50 % от максималното напрежение е само 25 %.) Това ограничение, както и загубите в преобразователите на мощност водят до увеличаване на броя на необходимите суперкондензатори от 160 до 250, които, заедно с необходимите проводници и електроника, имат маса до 100 kg.

За да изпробват възможностите на суперкондензаторите като резервоар на енергия за автомобили, две швейцарски компании монтират две батерии, съдържащи съответно по 140 и 142 суперкондензатора. Уредите се свързват по двойки успоредно, а самите двойки – последователно, което осигурява напрежения от 175 до 350 V, като всеки суперкондензатор действа при напрежение от 1,25 до 2,5 V. При напълно заредени кондензатори с мощност 50 kW се осигурява ток от 150 A, който нараства до 300 A при долната граница на напрежението.

Използването на батерии от суперкондензатори като източник на буферна мощност изисква разработването на устройство, което управлява потока на енергията към електродвигателя от основния източник и от батериите. Директната връзка между педала на газта и подаването на горивото сега се заменя от интелигентно контролиращо устройство, което в зависимост от необходимата мощност (определяна от моментното

положение на педалите на газта и на спирачките) определя колко енергия да постъпва към двигателя от резервоара с гориво и колко – от суперкондензаторите. Обратно – при спиране двигателят работи като генератор, преобразувайки кинетичната енергия на автомобила в електроенергия, която зарежда суперкондензаторите. По този начин се осигурява от 5 до 15 % икономия на гориво. В режим на движение с малка скорост суперкондензаторите се поддържат напълно заредени, за да може при нужда да осигурят необходимата мощност за ускоряване, а при движение с максимална скорост напрежението на суперкондензаторите е ниско, за да има батерията свободен капацитет и да поеме енергията, освободена при задействане на спирачките.

С помощта на тези съвременни технологии на основа на шасито и купето на автомобил Фолксваген–БОРА е монтиран електродвигател, използващ за гориво водород, и батерия от суперкондензатори. Този прототип, наречен *Hu.Power*, в зависимост от условията, изразходва 1,1 kg водород за пробег от 50–100 km. Най-трудното изпитание за прототипа е проведено в началото на 2002 г., когато при изключително трудни условия той успешно се изкачва на високия 2005 m Симплонски проход, свързващ Швейцария и Италия.

### Фрактали и фрактална размерност

Каква е тайната на суперкондензаторите? Как е възможно да се постигне почти хилядократно увеличение на капацитета в сравнение с обикновените електролитни кондензатори?

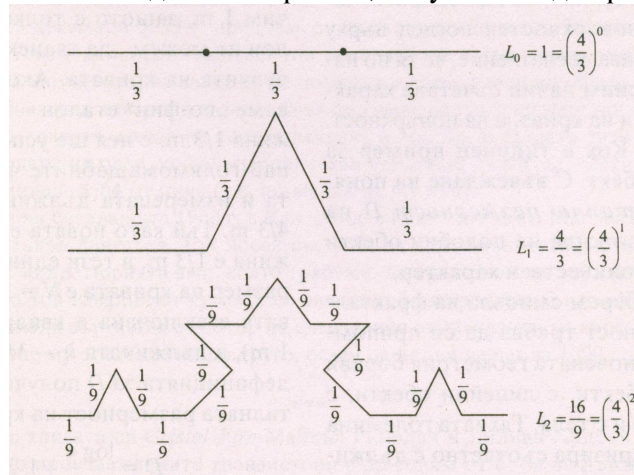
Формулата  $C = \epsilon\epsilon_0 \frac{S}{d}$  за капацитет на плосък кондензатор подсказва в какви

посоки трябва да се търсят решения на проблема. Стойностите на относителното електрична проникваемост  $\epsilon$  са ограничени между няколко единици за повечето диелектрици, 81 – за водата и няколко хиляди за някои керамики. По-големи резерви крие геометрията – или намаляване разстоянието  $d$  между електродите, или увеличаване на тяхната площ  $S$ . Ако кондензаторът се получава чрез навиване на две проводящи ленти, разделени с диелектричен слой, увеличаването на площта е свързано с неприемливо голямо увеличаване на общите размери на устройството. Намаляването на разстоянието между електродите достига своята граница в т.нар. електролитни кондензатори. В тях единият електрод се заменя с електролит (електропроводящ гел), което осигурява непосредствен геометричен контакт в атомни мащаби с металния електрод, върху който е създаден диелектричен оксиден слой с дебелина от порядъка на нанометри. По този начин се достигат капацитети от десетки милифаради, но доколкото допустимите напрежения са около 20–40 V, запасената в такъв кондензатор енергия е също далеч под необходимото за нуждите на леките коли.

Дълго време увеличаването на площта чрез навиване на по-дълги ленти и намаляване дебелината до молекулно равнище изглеждаха като окончателни ограничения за получаване на кондензатори с големи капацитети. Оказа се обаче, че *фракталната геометрия* разкрива нови, удивителни и противоречащи на интуицията възможности, които позволяват например площта на една футболно игрище да се намачка и помести в слой с дебелина 1 mm върху повърхността на страница от книга. По такъв начин едно 100 000-кратно увеличение на повърхността на електродите на електролитен кондензатор позволява капацитетът му да се увеличи до хиляди фаради.

За да стане ясно за какво става дума, ще припомним, че в началото на 20. век бяха измислени “математически чудовища” от следния примерен вид: с помощта на един процес, съдържащ безброй много стъпки, включващи все по-малки дължини, бе създаден линеен обект (“крива”) с безкрайна дължина, който може да се разположи върху крайна площ, без въобще да изпълва площта. Един от най-прочутите подобни

обекти е измислената през 1906 г. от шведския математик Фон Кох крива. Представа за процеса на построяването ѝ дава фиг. 1: начертайте отсечка с дължина 1 и я разделете на 3 равни части. След това заместете средната част на отсечката с с две отсечки с дължина  $1/3$ , така че да получите начупена крива с дължина  $4/3$ . разделете всяка от получените 4 еднакви отсечки на три равни части и всяка от средните заменете с две отсечки с дължина  $1/9$  и т.н. Така получавате нова начупена линия с дължина  $16/9$ , като всяка от четирите ѝ части е подобна на кривата, получена след първата стъпка.



Фиг. 1.

Крива на Кох се нарича обектът, който се получава след като този процес продължи до безкрайност. Очевидно е, че дължината на кривата, получена след всяка стъпка, е равна на дължината на предхождащата я, умножена с  $4/3$ . Така след  $n$ -тата стъпка от построяването на кривата на Кох дължината ѝ ще бъде  $\left(\frac{4}{3}\right)^n = 1,3333^n$ . Ясно

е, че прилагайки достатъчен брой пъти този процес, можем да получим крива, чиято дължина превъзхожда всяко отнапред избрано голямо число. Ясно е също така, че кривата се състои от нарастващ с всяка стъпка брой *себеподобни* части, всяка от които съдържа четири части с еднаква дължина. В същото време обаче нито една точка от тази крива не излиза извън квадрата със страна единица, кота същевременно тя не заема значителна площ от повърхността на квадрата, защото площта на всяка крива, независимо от това колко е дълга, е винаги нула! Освен това все повече и повече точки от кривата се разполагат близо до един нарастващ брой точки от повърхността на квадрата, така че един повърхностен поглед върху кривата създава впечатление, че тя по някакъв необясним начин съчетава характеристиките и на крива, и на повърхност. Кривата на Кох е типичен пример за фрактален обект. С въвеждането на понятието *фрактална размерност*  $D$  на странните свойства на подобни обекти се придава количествен характер.

За да разберем смисъла на фракталната размерност трябва да си припомним, че обикновената геометрия работи с точкови обекти, с линейни обекти, с повърхности и с тела. Тяхната големина  $M$  се характеризира съответно с дължина, площ и обем (площта на кривите е нула, както и обемът на повърхностите). Всяка от тези характеристики може да се представи като степен от линейния размер  $N$  на обекта. Така обемът  $M$  на тяло с линейни размери  $N$  е  $M = N^3$ , площта  $M$  на повърхност с линейни размери  $N$  е  $M = N^2$ , дължината  $M$  на крива с линейни размери  $N$  е  $M = N^1$ , а размерът на една точка е  $M = N^0$ . С други думи във всеки от тези случаи зависимостта между величината, която характеризира големината на обекта и линейния му размер, е от вида  $M = N^D$ . Точно този степенен показател  $D$  се нарича размерност на обекта. Така точката има

размерност 0, кривите – 1, повърхностите – 2, а телата – 3. От последната равенство се вижда, че фактически размерността се дефинира с равенството

$$D = \frac{\log M}{\log N}.$$

Именно тази дефиниция дава възможност понятието размерност да се обобщи и за фрактални обекти.

За да разберем как се определя фракталната размерност на кривата на Кох, може да разгледаме процеса на построяването ѝ. Ако искаме да измерим дължината на кривата с линейка, чиято дължина е единица, очевидно е, че ще получим 1 m, защото с толкова “груб” еталон не можем “да хванем” нито една от чупките на кривата. Ако обаче използваме “по-фин” еталон – линейка с дължина 1/3 m, с нея ще успеем да отчетем най-голямо мащабните чупки на кривата и измерената дължина ще се окаже 4/3 m. Тъй като новата единица за дължина е 1/3 m, в тези единици линейният размер на кривата е  $N = 3$  единици (кривата е включена в квадрат със страна 1 m), а дължината ѝ е  $M = 4$ . Тогава от дефиницията за  $D$  получаваме, че фракталната размерност на кривата на Кох е

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,2618,$$

т.е. тя наистина е обект, който представлява нещо средно между линия (за която  $D = 1$ ) и повърхност (за която  $D = 2$ ).

### Отново суперкондензатори

За да разберем устройството на суперкондензаторите, трябва да увеличим с единица размерностите на обектите, разглеждани в предходната част – вместо за криви ще говорим за повърхности, а вместо за повърхности – за тела. За да се увеличи площта на електродите на кондензатора, гладките метални електроди се правят грапави чрез нанасяне върху тях на сажди. Всеки електрод представлява метална лента, дебела 30  $\mu\text{m}$ , широка 10 cm и дълга 2 m. Върху двете страни на лентата са нанесени сажди, които образуват сложна фрактална структура с огромна площ. Размерите на нанесените частици са от порядъка на  $\mu\text{m}$ . Пространството около електрода е запълнено с електролит – обикновено органичен разтворител, съдържащ йони на о(соли).

Измерванията показват, че фракталната размерност на получения обект е  $D \approx 2,6$ , т.е. с 0,6 превишава размерността на обикновените повърхности. Тъй като стойността на макроскопичния размер на повърхността (0,1 m) превишава с 8 порядъка, т.е.  $10^8$  пъти микроскопичния мащаб на порите в саждите ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), то увеличението на площта е  $10^{(2,6-2) \cdot 8} = 10^{0,6 \cdot 8} = 10^{4,8} \approx 60\,000$  пъти! (Микроскопичният мащаб се ограничава отдолу от атомната структура на веществото – не може да се очакват себеподобни структури, чиито размери са от порядъка на размерите на атомите и по-малки.) Тъй като площта на гладкия електрод е  $0,2 \text{ m}^2$ , това означава, че ефективната площ на електрода е  $12\,000 \text{ m}^2$  – дори по-голяма от площта на футболно игрище! Именно комбинацията от тази площ и изключително тънкия (около 1 nm) електрохимичен двоен слой осигурява огромните стойности на капацитета на суперкондензаторите.