


SORIN BUCURENCIU

---

**VEHICULE ELECTRICE  
NECONVENTIONALE**

EDITURA  ICPE

ISBN 973-98801-9-3

„Vehicule electrice neconvenționale”

Sorin Bucurenciu

© EDITURA ICPE, 1999

Toate drepturile asupra acestei ediții  
sunt rezervate editurii.

#### REFERENȚI:

dr. ing. Dragoș Ovidiu KISCH

dr. ing. Ioan STRĂINESCU

#### EDITURA ICPE

Spl. Unirii 313, sector 3, București 74204

Tel.: 321.72.30\* /1055

**Consilier editorial:** Doina RUCINSCHI

**Redactor:** George Sebastian LĂZĂRESCU

**Tehnoredactare computerizată**

Tiparul: SAECULUM TRADING SRL

Bun de tipar: august 1999. Apărut 1999

Tiraj: 300 exemplare

Editat cu sprijinul A.N.Ș.T.I.

#### Cuprins

PREFAȚĂ.....	1
<b>Capitolul 1. INTRODUCERE.....</b>	<b>3</b>
1.1. Definiții și clasificări ale vehiculelor electrice.....	3
1.2. Realizarea forței de tracțiune.....	11
1.3. Realizarea forței de frânare.....	21
<b>Capitolul 2. VEHICULE ELECTRICE NECONVENȚIONALE CU ROȚI PNEUMATICE.....</b>	<b>30</b>
2.1. Automobile și autobuze electrice.....	30
2.1.1. Probleme generale.....	30
2.1.2. Motoare electrice de tracțiune și sisteme de comandă.....	35
2.1.2.1. Motoare electrice de curent continuu.....	36
2.1.2.2. Motoare electrice de curent alternativ.....	60
2.1.2.3. Motoare electrice hibride.....	88
2.1.2.4. Concluzii.....	93
2.1.3. Transmiterea cuplului motor la roți.....	94
2.1.4. Surse electrochimice.....	108
2.1.5. Automobile și autobuze hibrid-electrice.....	125
2.1.5.1. Sisteme hibride termic+electric.....	126
2.1.5.2. Sisteme hibride electric+electric.....	134
2.2. Metrouri cu roți pneumatice.....	140
2.3. Vehicule monoșină.....	145

<b>Capitolul 3. VEHICULE ELECTRICE DE MARE VITEZĂ, CU ADERENȚĂ LA CALE.....</b>	<b>152</b>
3.1. Probleme generale.....	152
3.1.1. Puterea instalată.....	152
3.1.2. Captarea curentului.....	154
3.1.3. Construcția mecanică a vehiculului și a căii de rulare.....	155
3.1.4. Frânarea.....	156
3.1.5. Sistemul de semnalizare.....	157
3.2. Realizări în domeniul vehiculelor de mare viteză, cu aderență la cale.....	157
3.2.1. Trenul de mare viteză japonez <i>Shinkansen</i> .....	161
3.2.2. Trenul de mare viteză francez <i>TGV</i> .....	166
3.2.2.1. Trenul de mare viteză TGV - Paris Sud-Est (TGV - PSE).....	167
3.2.2.2. Trenul de mare viteză TGV - Atlantique (TGV - A).....	176
3.2.2.3. Trenul de mare viteză TGV - Eurostar.....	190
<b>Capitolul 4. VEHICULE ELECTRICE FĂRĂ ADERENȚĂ     LA CALE.....</b>	<b>197</b>
4.1. Propulsia cu motoare electrice liniare.....	197
4.1.1. Motorul asincron liniar.....	198
4.1.1.1. Principiu de funcționare. Variante constructive.....	198
4.1.1.2. Fenomene specifice. Caracteristici de funcționare.....	204
4.1.2. Motorul sincron liniar.....	209
4.1.2.1. Principiu de funcționare. Variante constructive.....	209
4.1.2.2. Fenomene specifice. Caracteristici de funcționare.....	214
4.1.3. Concluzii.....	216
4.2. Sustentația și ghidarea.....	218
4.2.1. Sustentația și ghidarea cu roți.....	218
4.2.2. Sustentația și ghidarea cu pernă de aer.....	221

4.2.3. Sustentația și ghidarea cu pernă magnetică.....	223
4.3. Aspecte tehnico-economice privind trenurile de mare viteză pe pernă magnetică.....	233
<b>Capitolul 5. SISTEME DE TRANSPORT URBAN RAPID     DE TIP "LIFT ORIZONTAL".....</b>	<b>242</b>
5.1. Probleme generale ale transportului urban.....	242
5.2. Necesitatea și structura sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal".....	243
5.3. Posibilități de realizare a vehiculelor sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal".....	246
5.4. Implicații ale utilizării sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal".....	248
5.4.1. Comanda automată a vehiculelor.....	248
5.4.2. Siguranța circulației și fiabilitatea.....	249
5.4.3. Impactul vizual.....	251
5.4.4. Implicații pentru comunitatea urbană.....	251
5.4.5. Aspecte economice.....	252
5.5. Realizări în domeniul sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal".....	253
5.5.1. Sistemul de transport personal rapid <i>Cabintaxi</i> .....	255
5.5.2. Sistemul de transport personal rapid <i>PRT2000</i> .....	255
5.5.3. Sistemul de transport rapid în grup din Morgantown.....	257
ABSTRACT.....	260
BIBLIOGRAFIE.....	262

## Prefață

În anii din urmă, încercările de a dezvolta noi mijloace de transport, eficiente și nepoluante, au condus la creșterea interesului, în toată lumea, pentru unele vehicule electrice a căror istorie este mai mult sau mai puțin veche, dar nivelul tehnologic de până acum nu a permis intrarea lor în exploatare curentă.

Cartea de față își propune să prezinte stadiul actual al dezvoltării unora dintre vehiculele electrice terestre neconvenționale, care au început să prolifereze sau au șanse mari de a prolifera în viitorul apropiat. Ea se bazează pe o vastă documentație științifică, dar și pe rezultatele unor cercetări proprii, desfășurate la Facultatea de Electrotehnică a Universității "Politehnica" din București.

În capitolul 1, sunt prezentate câteva probleme generale ale vehiculelor electrice, referitoare la terminologia de bază utilizată în tracțiunea electrică, precum și la unele fenomene, mărimi și relații specifice tipurilor esențiale de vehicule electrice terestre. De asemenea, se dau justificări pentru adoptarea unor soluții în construcția vehiculelor electrice actuale și de viitor.

Capitolul 2 abordează principalele vehicule electrice neconvenționale cu roți pneumatice care prezintă interes: autovehiculele electrice rutiere (în esență, automobile și autobuze electrice), metroul cu roți pneumatice și vehiculele monoșină.

În cazul automobilelor/autobuzelor electrice, sunt prezentate detalii privind motoarele electrice de tracțiune și schemele de comandă a acestora - atât cele utilizate până în prezent (în principal, motoare de curent continuu), cât și cele de perspectivă (motoare asincrone, motoare sincrone cu magneți permanenți și motoare cu reluctanță dublu variabilă, autopilotate) -, soluții pentru transmiterea cuplului motor la roți (insistându-se și asupra acelor în care motorul este înglobat în roată, precum și asupra diverselor variante de diferențial electric) și, obligatoriu - viabilitatea autovehiculelor rutiere "pur" electrice depinzând de acestea -, sursele electrochimice, actuale și de viitor (baterii de acumulare și pile de combustie). Sunt analizate și principalele soluții de automobile/autobuze hibrid-electrice; s-a menționat doar tangențial și soluția cu acumulare de energie cinetică în volanți, această soluție neavând șanse mari de răspândire, o dată cu evoluția altor soluții de autovehicule hibrid-electrice și a autovehiculelor "pur" electrice.

În cazul metrourilor cu roți pneumatice și al vehiculelor monoșină, sunt prezentate doar elementele funcționale și constructive specifice (inclusiv, exemple de realizare), fără a detalia schemele electrice de acționare, acestea din urmă neavând, în esență, particularități deosebite față de schemele cunoscute pentru alte vehicule electrice.

Capitolul 3 tratează vehiculele (trenurile) electrice de mare viteză, cu aderență la cale. Sunt prezentate principalele probleme pe care le pun construcția și exploatarea acestor trenuri, care circulă cu viteze peste 200 km/h, fiind apoi analizate - mai ales din punctul de vedere al schemelor electrice de putere și al performanțelor obținute - cele mai importante realizări în domeniu: trenul japonez *Shinkansen* și trenul francez *TGV* (în diversele sale variante).

În capitolul 4, sunt abordate vehiculele electrice fără aderență la cale, și anume: vehiculele propulsate cu motoare electrice liniare. Celelalte tipuri de vehicule fără aderență la cale fie sunt deja vehicule uzuale - de exemplu, vehiculele acționate prin cablu (telecabine, telescaune, funiculare; excepție face celebrul tramvai cu cablu din San Francisco, care este - sub anumite aspecte - un vehicul neconvențional, dar șansele sale de proliferare sunt reduse) -, fie prezintă un interes restrâns, cum sunt vehiculele cu elice sau cu cremalieră.

Sunt prezentate diversele tipuri de motoare electrice liniare, cu particularitățile lor constructive și funcționale, precum și posibilitățile de sustentație și ghidare ale vehiculelor echipate cu astfel de motoare, dându-se exemple de vehicule având sustentația și ghidarea cu roți, cu pernă de aer sau cu pernă magnetică. Pentru trenurile de mare viteză pe pernă magnetică, este făcută o analiză a principalelor aspecte tehnico-economice, într-o comparație a acestor trenuri cu alte tipuri de mijloace de transport.

Capitolul 5 este consacrat unor sisteme speciale de transport urban rapid, și anume: sistemelor de tip "lift orizontal". Se prezintă necesitatea și structura acestor sisteme, în contextul problemelor actuale ale transportului urban. De asemenea, sunt analizate posibilitățile de realizare a vehiculelor unor astfel de sisteme și diversele implicații pe care le are utilizarea acestor sisteme. Se dau și exemple (cu datele tehnice aferente) de sisteme de transport de tip "lift orizontal" care au fost sau urmează a fi realizate.

Cartea se adresează tuturor celor interesați de problemele vehiculelor electrice ale viitorului, dar, în mod deosebit, cercetătorilor și inginerilor, cadrelor didactice universitare, precum și studenților din anii terminali ai facultăților de profil.

Doresc să adresez vii mulțumiri domnilor prof. dr. ing. Dumitru STANCIU, de la Universitatea "Politehnica" București, dr. ing. Ioan STRĂINESCU, de la ICPE-SAERP București, și ing. Mihai JUNCU, de la Electroputere Craiova, pentru sprijinul acordat în documentarea necesară elaborării acestei lucrări.

Sorin BUCURENCIU

București, Septembrie 1999

## Capitolul 1

### INTRODUCERE

În acest capitol vor fi prezentate câteva probleme generale ale vehiculelor electrice, servind la fixarea terminologiei utilizate în tracțiunea electrică, la reamintirea unor mărimi și relații specifice diverselor tipuri de vehicule, precum și la justificarea adoptării unor soluții în construcția vehiculelor actuale și de viitor.

#### 1.1. DEFINIȚII ȘI CLASIFICĂRI ALE VEHICULELOR ELECTRICE

Pentru deplasarea unui vehicul, este necesar ca asupra sa să acționeze o forță îndreptată în sensul de mișcare - **forța de tracțiune** (denumită și **forță de propulsie**). Dacă această forță se realizează ca urmare a unor acțiuni ponderomotoare în câmpuri electromagnetice, se spune că avem de-a face cu un **vehicul electric**.

Vehiculul electric poate fi:

- **activ**: forța de tracțiune se obține cu mijloace aflate pe vehicul;
- **pasiv**: forța de tracțiune se obține cu mijloace aflate, în esență, în afara vehiculului.

În cazul **vehiculelor electrice active**, forța de tracțiune se realizează într-unul din următoarele moduri:

- a) prin interacțiunea vehiculului cu mediul înconjurător;
- b) direct, fără a fi necesară prezența mediului înconjurător.

La vehiculele care utilizează primul mod, interacțiunea vehiculului cu mediul înconjurător poate avea loc prin contact sau fără contact mecanic între acestea. Astfel, interacțiunea prin contact este folosită la propulsia vehiculelor electrice:

- cu elice (vehicule terestre, aeriene, acvatice);
- cu aderență între roți și calea de rulare (vehicule terestre);
- cu cremalieră (vehicule terestre).

În acest caz, vehiculele sunt echipate cu motoare electrice rotative. Înzestrând vehiculele (terestre) cu motoare electrice liniare, forța de tracțiune va fi determinată de forțele electromagnetice ce se exercită direct între vehicul și calea de rulare (echipată corespunzător), fără a mai fi necesar contactul mecanic între acestea din urmă.

Cel de al doilea mod este utilizat la vehiculele denumite (în limbajul comun) *cu reacție*, din această categorie făcând parte vehiculele electrice echipate cu motoare ionice sau cu motoare cu plasmă. În cazul motoarelor ionice, particule de gaz încărcate electric (ioni), accelerate în câmp electric, sunt expulzate cu viteză foarte mare în afara vehiculului, deplasarea acestuia din urmă datorându-se forțelor de reacție exercitate de gaz asupra sa. În cazul motoarelor cu plasmă, propulsia se face într-un mod asemănător, cu deosebirea că, în locul ionilor, este accelerată plasmă prin acțiunea conjugată a unor câmpuri electrice și magnetice. Motoarele ionice și cele cu plasmă sunt folosite, deocamdată, doar în tehnica spațială.

Tracțiunea **vehiculelor electrice pasive** se realizează, practic, într-unul din cele două moduri de mai jos:

- a) prin acțiunea unor forțe dezvoltate de motoare electrice (uzual, rotative) staționare și transmise vehiculului printr-o legătură mecanică (de regulă, prin cablu);
- b) prin acțiunea directă a unor forțe dezvoltate de motoare electrice liniare care au o armătură activă staționară (pe calea de rulare), iar cealaltă armătură, pasivă, solidară cu vehiculul.

O problemă la fel de importantă ca realizarea propulsiei vehiculelor este aceea a frânării lor. Pentru aceasta, trebuie să se realizeze o forță opusă sensului de mișcare a vehiculului.

**Forța de frânare** a vehiculelor electrice se poate obține atât prin mijloace electrice, cât și prin mijloace mecanice. Datorită unor motive ce vor fi expuse în §1.3, frânarea de bază (de serviciu) a vehiculelor electrice se impune a fi electrică, fiind, însă, obligatorie - din rațiuni de siguranță - echiparea vehiculelor și cu mijloace de frânare mecanică.

În afara propulsiei și frânării, la toate tipurile de vehicule mai trebuie rezolvate două probleme importante, și anume: **sustențația și ghidarea**. Soluțiile acestor probleme variază în funcție de tipul vehiculului considerat.

În lucrarea de față, ne-am propus să prezentăm doar vehiculele electrice neconvenționale care au deja (sau vor avea într-un viitor apropiat) o aplicare relativ largă. Acestea sunt vehicule electrice terestre, fie cu aderență între roți și calea de rulare, propulsate cu motoare rotative, fie fără aderență la cale, propulsate cu motoare liniare.

La **vehiculele cu aderență la cale**, susțințația este asigurată, în esență, de roți (roți motoare - care contribuie la propulsie - și roți libere, numite și purtătoare - care nu contribuie la propulsie), iar ghidarea se realizează astfel:

- a) în cazul *căilor de rulare ghidate*: folosind fie chiar roțile de susțințație și șinele de rulare, ambele metalice, cu profiluri adecvate, fie dispozitive speciale de ghidare, dacă roțile de susțințație sunt pneumatice;
- b) în cazul *căilor de rulare neghidate*: folosind o parte din roțile de susțințație, asociate cu mecanisme de conducere pe cale (*mecanisme de direcție*).

La **vehiculele fără aderență la cale** (cele propulsate cu motoare electrice liniare funcționează numai pe căi ghidate), susțințația și ghidarea se pot realiza într-unul din următoarele moduri:

- a) cu roți, similar vehiculelor cu aderență la cale;
- b) pneumatic (cu *pernă de aer*);
- c) electromagnetic (cu *pernă magnetică*).

Vehiculele terestre, cu sau fără aderență la cale, pot fi - în funcție de poziția cutiei lor față de calea de rulare - de tipul:

- sprijinit (cutia deasupra căii);
- suspendat (cutia sub cale).

Marea majoritate a vehiculelor sunt de tip sprijinit; însă, se construiesc și vehicule neconvenționale de tip suspendat.

Vehiculul motor, format din una sau mai multe subunități - care constituie un ansamblu autonom, dar indivizibil în exploatare - , este denumit **unitate motoare**.

Una sau mai multe unități motoare, cuplate între ele și/sau cu vehicule-remorcă, formează un **convoi (tren)**.

În tracțiunea feroviară, unitatea motoare destinată să remorcheze vagoane și care conține numai echipamente energetice - deci, fără posibilitatea de a transporta și o încărcătură utilă - se numește **locomotivă**.

În afară de aceasta, mai există vehicule motoare care conțin echipament energetic, dar pot primi și sarcină utilă, fiind destinate - în principal - transportului de călători. Ele nu au căpătat, până în prezent, o denumire unitară și generalizată. Realizarea acestora se poate face în diverse variante constructive:

- **vagon motor** (Fig. 1.1.a): vagon echipat cu motoare de tracțiune, care are și spații pentru călători;
- **secție de tracțiune** (Fig. 1.1.b): unitate motoare formată dintr-un vagon motor+un vagon remorcă (acesta din urmă conține și o parte din echipament; eventual, poate fi și vagon motor), având o singură cabină de conducere, la un capăt; pentru circulația în sens invers, unitatea trebuie întoarsă;
- **ramă** (Fig. 1.1.c, d, e): ansamblu de vagoane-motor sau secții de tracțiune, în compunere fixă și reversibilă din punctul de vedere al circulației, având cabine de conducere la ambele capete;
- **tren automotor**: ansamblu format prin gruparea mai multor rame, prin intercalarea unei secții de tracțiune la mijlocul unei rame, sau prin alte grupări, după necesități momentane, însă, obligatoriu, reversibile.

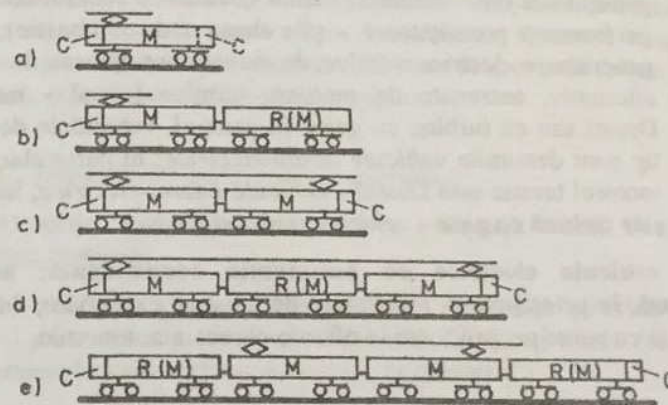


Fig.1.1. Variante constructive de vagon motor (a), secție de tracțiune (b) și ramă (c,d,e).

M - vagon motor; R - remorcă; C - cabină de conducere.

Vehiculele electrice se pot clasifica după mai multe criterii. În cele de mai jos, vom prezenta clasificarea acestor vehicule după criteriile cele mai importante.

#### A. După modul de alimentare cu energie electrică:

a) **vehicule electrice neautonome**, alimentate de la surse electrice exterioare (uzual, prin intermediul unor linii de contact; există și încercări de alimentare fără contact - în esență, alimentare inductivă); acestea pot fi:

- vehicule electrice de curent continuu;
- vehicule electrice de curent alternativ;
- vehicule electrice policurent (cu posibilitatea de a fi alimentate la diverse tipuri de tensiuni și frecvențe);

b) **vehicule electrice autonome**, alimentate de la surse electrice proprii; aceste surse pot fi:

- generatoare electrochimice (uzual - baterii de acumuloare; cu performanțe promițătoare - pile electrice de combustie);
- generatoare electrice rotative, de curent continuu sau de curent alternativ, antrenate de motoare termice (uzual - motoare Diesel sau cu turbine cu gaze; în general, vehiculele de acest tip sunt denumite *vehicule termo-electrice*; în particular, dacă motorul termic este Diesel - *vehicule Diesel-electrice*, iar dacă este turbină cu gaze - *vehicule turbo-electrice*);

c) **vehicule electrice cu autonomie condiționată**; acestea funcționează, în principal, cu alimentare de la surse exterioare, dar sunt înzestrate și cu surse proprii, care le oferă o oarecare autonomie.

#### B. După tipul căii de rulare:

a) **vehicule electrice pentru căi de rulare ghidate** (trenuri electrice, metrouri, tramvaie, vehicule monoșină); acestea au, în marea lor majoritate, roți metalice - fixate rigid pe osii -, care rulează pe șine metalice (Fig. 1.2); unele metrouri (§2.2) și vehicule monoșină (§2.3) au roți cu pneuri, iar vehiculele pe pernă de aer sau pe pernă magnetică (§4.2), evident, nu au roți;

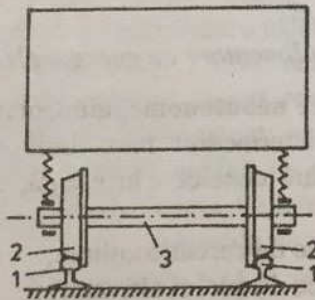


Fig. 1.2. Sustentația și ghidarea unui vehicul cu roți metalice:  
1 - șină; 2 - roată; 3 - osie.

b) **vehicule electrice pentru căi de rulare neghidate** (troleibuze; automobile, autobuze și camioane electrice; electrocare); acestea au roți

pneumatice și, pentru a evita uzura pneurilor - mai ales în curbe -, este necesar ca roțile să se poată mișca independent; în acest scop, roțile motoare sunt acționate prin intermediul unor diferențiale (mecanice sau electrice), iar celelalte roți sunt libere pe ax.

#### C. După modul de utilizare a aderenței:

a) **vehicule electrice (pe roți) cu aderență totală**, la care toate roțile sunt motoare;

b) **vehicule electrice (pe roți) cu aderență parțială**, la care numai o parte din roți sunt motoare, restul fiind roți libere (purtătoare), care servesc la sustentație și, eventual, la ghidare;

c) **vehicule electrice (pe roți, pe pernă de aer sau pe pernă magnetică) fără aderență**, la care tracțiunea nu este condiționată de prezența aderenței, ele fiind propulsate cu motoare electrice liniare.

#### D. După modul de acționare a roților/osiilor vehiculelor cu aderență la cale:

a) **vehicule electrice cu acționare individuală** a roților/ osiilor, la care un motor antrenează o singură roată/osie motoare;

b) **vehicule electrice cu acționare colectivă (în grup)** a roților/osiilor, la care un motor antrenează un grup de roți/osii.

De menționat că, pentru încadrarea într-o categorie sau alta (acționare individuală sau colectivă), se consideră ca element antrenat de motorul de tracțiune o osie, împreună cu roțile montate rigid pe ea (soluție uzuală pentru vehiculele cu roți metalice), și, respectiv, o roată, atunci când roțile vehiculului sunt independente unele de celelalte (cazul vehiculelor cu roți pneumatice).

Din punctul de vedere al soluției constructive a părții mecanice, vehiculele pe roți pot fi realizate în două variante de bază:

- a) construcția cu șasiu unic rigid;
- b) construcția cu boghiuri.

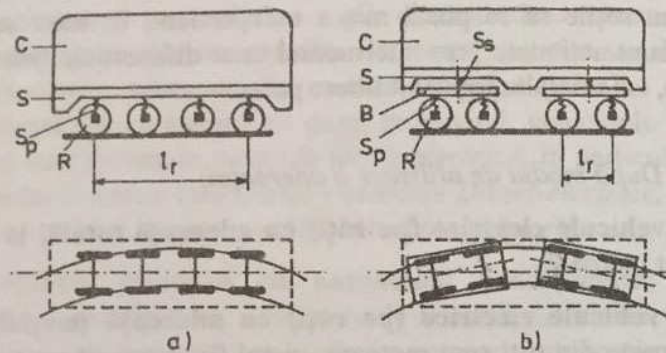


Fig. 1.3. Soluții constructive pentru partea mecanică a vehiculelor pe roți :

a) cu șasiu unic rigid; b) cu boghiuri.

C - cutie; S - șasiu; R - aparat de rulare; B - boghiu; Sp - suspensie principală; Ss - suspensie secundară.

Soluția cea mai simplă este aceea cu **șasiu unic rigid** S (Fig. 1.3.a), care susține cutia (caroseria) C și se sprijină, prin intermediul unor suspensii elastice Sp, pe două sau mai multe osii.

Osiile, împreună cu roțile (inclusiv organele aferente: cutii de osii, angrenaje etc), alcătuiesc aparatul de rulare R și constituie partea nesuspendată a vehiculului. Această soluție a fost larg utilizată la vehicule de mică putere; actualmente, se mai folosește, în esență, la vehicule pentru căi de rulare neghidate.

Soluția generalizată, practic, la vehiculele actuale pentru căi de rulare ghidate este construcția cu **boghiuri** (Fig. 1.3.b). Ea implică un șasiu S, care susține cutia C și se sprijină, prin intermediul unei suspensii secundare elastice Ss sau al unor dispozitive rigide, pe două sau mai multe cadre (șasiuri) rigide independente B, denumite boghiuri. Acestea, la rândul lor, se sprijină pe aparatele de rulare R, prin intermediul suspensiei primare elastice Sp (uzual, un boghiu are 2-4 osii). Legătura dintre cadrul boghiului și șasiul cutiei se realizează în diverse moduri (de exemplu, printr-un sistem cu pivot central - așa-numita *crapodină*), astfel încât să existe posibilitatea de rotire a

boghiului în plan orizontal față de cutie, aceasta permițând înscrierea în bune condiții a vehiculului în curbe.

Distanța  $l_r$  dintre axele osiilor extreme ale vehiculului, în cazul construcției cu șasiu unic rigid (Fig. 1.3.a) sau ale unui boghiu, în cazul construcției cu boghiuri (Fig. 1.3.b), se numește **bază rigidă** sau **ampatament**.

## 1.2. REALIZAREA FORȚEI DE TRACȚIUNE

Forța de tracțiune este produsă de motoarele de tracțiune ale unităților motoare care intră în componența unui convoi. Dacă  $N_M$  reprezintă numărul total al acestor motoare, iar  $F_{Tk}$  - forța de tracțiune produsă de motorul  $k$ , atunci forța de tracțiune care acționează asupra convoiului este:

$$F_T = \sum_{k=1}^{N_M} F_{Tk} \quad (1.1)$$

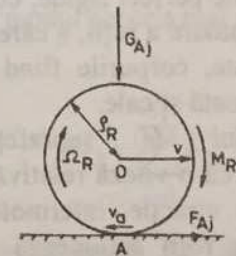


Fig. 1.4. Formarea forței de tracțiune la o roată motoare, prin aderența între roată și cale.

În cazul vehiculelor electrice terestre de care ne ocupăm, forța de tracțiune se formează ca urmare a interacțiunii vehiculului cu calea de rulare. Astfel, la vehiculele acționate cu motoare electrice liniare, forța de tracțiune  $F_{Tk}$  este chiar forța electromagnetică, în sensul de mișcare a

vehiculului, exercitată între armătura primară și cea secundară a motorului  $k$ , una dintre armături fiind solidară cu vehiculul, iar cealaltă - cu calea de rulare (§4.1)

La vehiculele acționate cu motoare electrice rotative, procesul de formare a forței de tracțiune - pe baza aderenței dintre roți și calea de rulare - este ceva mai complicat.

Să considerăm o roată cilindrică  $j$ , de rază  $\rho_R$  și masă  $m_R$  (sprijinită pe o cale de rulare plană), care aparține unui vehicul ce se deplasează cu viteza  $v$  (Fig. 1.4). Motorul de tracțiune îi transmite roții, printr-un mijloc oarecare, un cuplu de valoare  $M_{Rj}$ . Asupra roții acționează și o forță normală  $G_{Aj}$  (denumită **greutate aderentă**):

$$G_{Aj} = G_{Rj} + G_{Vj} \quad (1.2)$$

unde:

$$G_{Rj} = m_R g \quad (1.3)$$

este greutatea proprie a roții, iar  $G_{Vj}$  este forța verticală, determinată, în principal, de partea din greutatea vehiculului (inclusiv a conținutului acestuia) care revine roții  $j$ .

Considerând corpurile perfect rigide, contactul dintre roată și cale se realizează după o generatoare a roții, a cărei proiecție în planul figurii este punctul A. În realitate, corpurile fiind deformabile, există niște suprafețe de contact între roată și cale.

Sub acțiunea cuplului  $M_{Rj}$ , suprafețele în contact tind să se deplaseze una față de alta, cu o viteză relativă (de alunecare)  $v_a$ . Însă, asperitățile și forțele de atracție intermoleculară se opun acestei deplasări, astfel că asupra roții acționează o forță tangențială  $F_{Aj}$  (denumită **forță de aderență**), opusă vitezei de alunecare  $v_a$  a roții față de cale.

Forța  $F_{Aj}$  acționează în sensul de mișcare a vehiculului, contribuind, deci, la propulsia sa.

Din ecuația mișcării de rotație a roții în jurul axului O, rezultă:

$$F_{Aj} = \frac{M_{Rj}}{\rho_R} - \frac{J_R}{\rho_R} \frac{d\Omega_R}{dt} \quad (1.4)$$

unde:  $J_R$  este momentul de inerție al roții în raport cu axul acesteia, iar  $\Omega_R$  - viteza unghiulară a roții în raport cu același ax:

$$\Omega_R = \frac{v + v_a}{\rho_R} \quad (1.5)$$

Se numește **forță de tracțiune dezvoltată** de roata  $j$  partea din (1.4) care corespunde cuplului  $M_{Rj}$ , și anume:

$$F_{Tj} = \frac{M_{Rj}}{\rho_R} \quad (1.6)$$

ea fiind egală cu forța de propulsie a vehiculului dezvoltată de roata  $j$  în regim stabilizat ( $d\Omega_R/dt = 0$  în ecuația (1.4)).

Dacă un motor  $k$  acționează  $N_k$  roți, atunci forța de tracțiune realizată de acest motor, în modul descris mai sus, va fi:

$$F_{Tk} = \sum_{j=1}^{N_k} F_{Tj} \quad (1.7)$$

Dependența forței de aderență  $F_A$  de viteza de alunecare  $v_a$ , pentru o viteză  $v$  dată a vehiculului, are alura din Fig. 1.5. Porțiunea corespunzătoare unor viteze de alunecare  $0 \leq v_a \leq v_{a\text{cr}}$  reprezintă zona de aderență propriu-zisă, numită și aderență **statică**. Întrucât:

$$v_{a\text{cr}} / v \leq 0,25 - 0,5\% \quad (1.8)$$

se poate considera că, pe această porțiune, practic,  $v_a \approx 0$ .

Maximul acestei dependențe,  $F_{A \max}$  - care are loc pentru viteza critică de alunecare  $v_{a \text{ cr}}$ , se numește **forță de aderență maximă**. Depășirea vitezei critice  $v_{a \text{ cr}}$  duce la o alunecare efectivă a roții față de cale (patinarea roții), iar forța  $F_A$  - care capătă caracterul unei forțe de frecare dinamică - scade.

Raportul dintre forța de aderență maximă  $F_{A \max j}$ , la o roată  $j$ , și greutatea aderență  $G_{Aj}$ , la aceeași roată, definește **coeficientul de aderență** la roata  $j$ :

$$\psi_j = \frac{F_{A \max j}}{G_{Aj}} \quad (1.9)$$

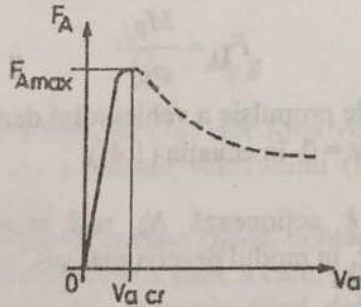


Fig. 1.5. Dependența forței de aderență  $F_A$  de viteza de alunecare  $v_a$  între roată și cale, pentru  $v = \text{const}$ .

Din rezultatele obținute pe cale experimentală, rezultă că, o dată cu creșterea vitezei vehiculului, crește și viteza critică de alunecare, dar scade forța de aderență maximă și, implicit, coeficientul de aderență (Fig. 1.6). Aceste rezultate trebuie avute în vedere, mai ales, la vehiculele de mare viteză, cu aderență la cale.

Valoarea concretă a coeficientului de aderență depinde de foarte mulți factori: materialele din care sunt realizate roțile și calea, starea roților și a căii (uzură, umezeală, murdărie etc). Rezultatele încercărilor pe un același vehicul au condus la o zonă de dispersie foarte mare, cuprinsă între două curbe limitatoare (Fig. 1.7); zona superioară

corespunde căii de rulare uscate și curate, iar zona inferioară - căii umede și murdare.

Ca valori medii generale ale coeficientului de aderență, în diverse condiții, pot fi luate cele indicate în Tab. 1.1. Se remarcă faptul că, în cazul roților pneumatice, se pot obține coeficienți de aderență sensibil superiori celor din cazul roților metalice. Trebuie, însă, avut în vedere că influența stării căii de rulare este mult mai puternică (plaja de variație a coeficientului de aderență este mult mai largă) în primul caz decât în cel de al doilea.

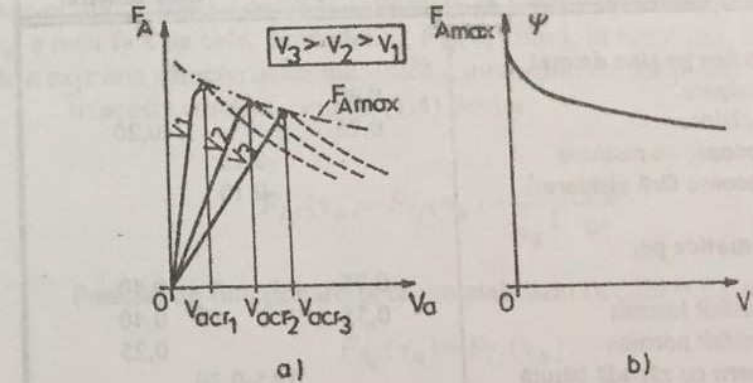


Fig. 1.6. Influența vitezei de deplasare  $v$  a unui vehicul asupra aderenței: a)  $F_A(v_a)$ , pentru diverse valori  $v$ ; b)  $F_{A \max}(v)$  și  $\psi(v)$ .

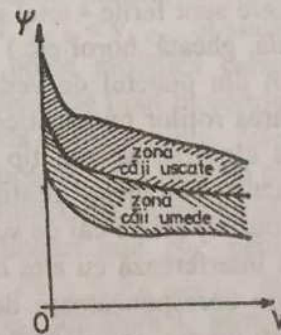


Fig. 1.7. Alura diagramei experimentale  $\psi(v)$ .

Aceste rezultate trebuie luate în considerație, în mod deosebit, la stabilirea criteriilor de alegere a tipului de roți, pentru vehiculele care se pretează a utiliza fie roți metalice, fie roți pneumatice. Astfel, la vehiculele uzuale pe căi ghidate, se folosesc roți metalice, dar, dacă

Tabelul 1.1. Valori medii ale coeficientului de aderență.

Tipul roților și căii de rulare	$\psi_{med}$	
	Cale uscată	Cale umedă
<b>Roți metalice pe șine de oțel</b>		
Șine cu nisipare	0,30	
Șine fără nisipare	0,25	0,20
Șine alunecoase cu nisipare		0,15
Șine alunecoase fără nisipare		0,10
<b>Roți pneumatice pe:</b>		
Beton	0,75	0,40
Beton sau asfalt lustruit	0,55	0,40
Beton sau asfalt noroios		0,25
Beton acoperit cu zăpadă bătută		0,15-0,30
Lemn	0,60	0,35
Polei		0,10-0,15

vehiculele circulă pe căi care sunt ferite - total sau parțial - de influența factorilor externi (umezeală, gheață, noroi etc.) ce înrăutățesc aderența, ar fi preferabilă, cel puțin din punctul de vedere al coeficienților de aderență realizabili, utilizarea roților pneumatice (desigur, trebuie avuți în vedere și alți factori la alegerea acestui tip de roți, prezentați mai detaliat în §2.2). Este cazul vehiculelor destinate să circule pe căi subterane (în general, metrourele) ori pe căi de suprafață sau pe estacade (deasupra solului), care nu interferează cu alte mijloace de transport și pot fi menținute într-o stare corespunzătoare de curățenie și uscare - folosind, de exemplu, pentru uscare, instalații de încălzire pe timpul sezonului ploios sau geros -, cum sunt unele trenuri urbane sau

suburbane, vehiculele monoșină sau vehiculele din sistemele de transport urban rapid de tip "lift orizontal".

Evident, forța de tracțiune dezvoltată de un vehicul cu aderență la cale este limitată de condițiile de aderență la fiecare dintre roțile motoare ale vehiculului. În relația (1.6), cuplul  $M_{Rj}$  transmis roții  $j$  de către motorul de tracțiune este dependent de viteza unghiulară  $\Omega_R$  a roții, această dependență fiind determinată - în esență - de caracteristica mecanică a motorului. Dar, pentru o viteză dată a vehiculului ( $v = \text{const.}$ ), având în vedere (1.5) și (1.6), rezultă că forța de tracțiune  $F_{Tj}$  dezvoltată de roata  $j$  poate fi exprimată în funcție de viteza de alunecare  $v_a$  a roții față de cale, dependența  $F_{Tj}(v_a)$  fiind, în acest caz, un alt mod de a exprima caracteristica mecanică a motorului de tracțiune.

În aceste condiții, ecuația (1.4) devine:

$$F_{Aj}(v_a) = F_{Tj}(v_a) - \frac{J_R}{\rho_R} \frac{dv_a}{dt} \quad (1.10)$$

Punctul de funcționare în regim stabilizat ( $dv_a/dt = 0$ ), în care:

$$F_{Aj}(v_a) = F_{Tj}(v_a) \quad (1.11)$$

va fi determinat de intersecția caracteristicilor  $F_{Aj}(v_a)$  și  $F_{Tj}(v_a)$ .

Dacă motorul de tracțiune are o caracteristică mecanică  $F_{Tj}(v_a)$  cu alura 1 din Fig. 1.8, atunci punctul de funcționare este  $N_1$ , pentru care  $F_{Tj1} < F_{A \max j}$  și  $v_{a1} < v_{a \text{ cr}}$ , el situându-se în zona aderenței statice. Motorului  $i$  se poate modifica caracteristica mecanică, prin diverse mijloace, dependente de tipul motorului, obținându-se o familie de caracteristici. Concluzia de mai înainte, referitoare la zona în care se situează punctul de funcționare, este valabilă pentru toate caracteristicile mecanice de tipul 1. La limită, dacă caracteristica mecanică  $F_{Tj}(v_a)$  are alura 2, punctul de funcționare este  $N_2$ , pentru care se obține forța de tracțiune cea mai mare,  $F_{Tj2} = F_{A \max j}$ , iar viteza de alunecare este  $v_{a2} = v_{a \text{ cr}}$ . Dacă  $F_{Tj}(v_a)$  are alura 3, punctul de funcționare este  $N_3$ , unde  $F_{Tj3} < F_{A \max j}$ , dar  $v_{a3} > v_{a \text{ cr}}$ ; deci, se produce patinarea roții față de calea de rulare.

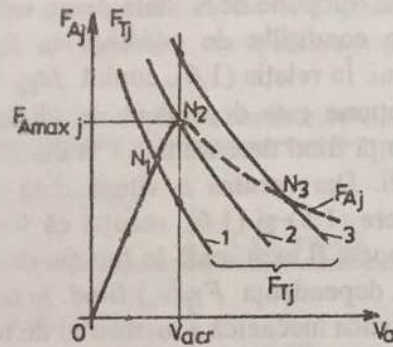


Fig. 1.8. Explicativă pentru limitarea forței de tracțiune de condițiile de aderență.

Desigur, este de dorit funcționarea în zona aderenței statice, unde - așa cum s-a arătat (1.8) -  $v_a \approx 0$ , viteza unghiulară a roții devenind:

$$\Omega_R \approx \frac{v}{\rho_R} \quad (1.12)$$

Deci, această viteză și, implicit, vitezele motorului de tracțiune și ale elementelor mecanismelor de transmisie sunt minime, încât solicitările mecanice ale acestora sunt minime. În plus, față de cazul patinării, uzura roții și a căii de rulare este și ea minimă.

Conform celor rezultate din Fig. 1.8, funcționarea în zona aderenței statice se realizează în toate cazurile în care:

$$F_{Tj}(v_{acr}) \leq F_{Amax j} \quad (1.13)$$

Cum  $v_{acr} \approx 0$ , relația (1.13) se scrie adesea sub forma:

$$F_{Tj} \leq F_{Amax j} \quad (1.14)$$

în care prin  $F_{Tj}$  se înțelege valoarea forței de tracțiune a roții  $j$ , obținută din caracteristica  $M_R(\Omega_R)$  pentru  $\Omega_R = v/\rho_R$ .

Forța de aderență maximă  $F_{Amax j}$  la roata  $j$  (pentru o viteză  $v$  a vehiculului) poate fi exprimată în funcție de coeficientul de aderență  $\psi_j$  (1.9) și de greutatea aderență  $G_{Aj}$  (1.1), încât relația (1.14) se poate scrie și sub forma duală:

$$F_{Tj} \leq \psi_j G_{Aj} \quad (1.15)$$

Relația (1.14) - sau echivalenta sa (1.15) - este esențială în tracțiunea bazată pe aderență. Ea evidențiază faptul că valoarea forței de tracțiune dezvoltată de o roată motoare - fără patinarea acesteia din urmă - nu poate depăși valoarea forței de aderență maxime dintre roată și calea de rulare. Deci, pentru obținerea unor forțe de tracțiune cât mai mari, este necesar să se realizeze, în primul rând, valori cât mai mari pentru  $F_{Amax}$ . Aceasta implică valori mari pentru coeficientul de aderență  $\psi$  și pentru greutatea aderență  $G_A$ .

Posibilitățile de a obține coeficienți mari de aderență au fost discutate mai sus. În ceea ce privește greutatea aderență - care este forța normală de apăsare a roții pe cale -, aceasta este determinată, în principal, de partea din greutatea vehiculului care revine roții considerate. De aceea, încercările de a realiza vehicule ușoare - din dorința de a reduce solicitările roților/osiilor și ale căii de rulare, precum și energia necesară pentru accelerare și pentru învingerea rezistențelor la înaintare ale vehiculelor - sunt limitate, în cazul tracțiunii bazate pe aderență, de necesitatea obținerii unor forțe de tracțiune mari. La vehiculele fără aderență la cale, această constrângere dispăre, dorința de realizare a unor greutăți cât mai mici ale vehiculelor fiind limitată numai de posibilitățile constructive și tehnologice.

De observat că greutatea aderență pe planuri înclinate (rampe, pante) este mai scăzută decât pe plan orizontal (palier), întrucât ea este determinată de componenta normală la planul căii a greutății vehiculului. Această componentă este proporțională cu  $\cos\alpha$ , unde  $\alpha$  este unghiul planului căii față de orizontală. De aceea, rampele pe care le

pot urca vehiculele cu aderență la cale sunt limitate, declivitatea acestora:

$$i [\text{‰}] = 1000 \operatorname{tg} \alpha \quad (1.16)$$

neputând depăși 70-100 ‰, la vehiculele cu roți metalice, și cca 120 ‰, la vehiculele cu roți pneumatice. Și această constrângere dispare la vehiculele fără aderență la cale, ele putând urca, la limită, chiar și rampe verticale.

O mare importanță în utilizarea aderenței o are alura caracteristicilor mecanice ale motoarelor de tracțiune. Pentru ilustrare, vom compara fenomenele care apar la acționarea unei roți cu motoare având caracteristici mecanice cu rigidități diferite.

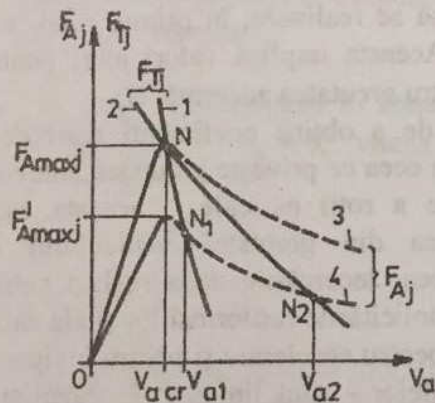


Fig. 1.9. Explicativ pentru influența caracteristicii mecanice a motorului de tracțiune asupra utilizării aderenței.

- 1 -  $F_{Tj}(v_a)$  pentru un motor cu caracteristică mecanică rigidă;
- 2 -  $F_{Tj}(v_a)$  pentru un motor cu caracteristică mecanică elastică;
- 3 -  $F_{Aj}(v_a)$  pentru aderență normală; 4 -  $F_{Aj}(v_a)$  pentru aderență scăzută.

După cum am arătat, la viteză dată a vehiculului, caracteristica mecanică a motorului determină caracteristica forței de tracțiune  $F_{Tj}$  dezvoltate de roata  $j$  în funcție de viteza de alunecare  $v_a$  a roții față de calea de rulare. În Fig. 1.9, curba 1 reprezintă dependența  $F_{Tj}(v_a)$  în

cazul unui motor cu caracteristică mecanică rigidă, iar curba 2 - în cazul unui motor cu caracteristică mecanică elastică. Presupunând că, inițial, în ambele cazuri, funcționarea are loc la limita aderenței, aceste curbe intersectează curba 3 a forței de aderență  $F_{Aj}(v_a)$  în punctul N, unde  $v_a = v_{acr} \approx 0$ . Dacă, la un moment dat, dintr-o cauză oarecare (de exemplu, roata trece peste o pată de ulei), aderența dintre roată și calea de rulare se înrăutățește, curba  $F_{Aj}(v_a)$  devine 4. În această situație, roata începe să patineze, regimul stabilizat obținându-se în  $N_1$ , pentru curba 1, și în  $N_2$ , pentru curba 2 (în ambele puncte  $v_a > v_{acr}$ ).

Se remarcă faptul că patinarea are efecte mult mai grave în cazul motorului cu caracteristică mecanică elastică decât în cel al motorului cu caracteristică rigidă. Pe de o parte, forța de tracțiune dezvoltată în regim de patinare, în primul caz, este mult inferioară forței de aderență maxime  $F'_{Amaj}$ , corespunzătoare noilor condiții de aderență. Pe de altă parte, viteza de alunecare a roții față de cale este mult mai mare în primul caz decât în cel de al doilea; aceasta - pe lângă consecințele intrinseci pe care le are (solicitări mai mari ale roții și ale elementelor cuplate cu roata, uzuri mai mari ale roții și căii) - face ca, la restabilirea aderenței, când curba  $F_{Aj}(v_a)$  devine din nou 3, revenirea din patinare a roții în punctul N să se facă într-un timp mai lung în cazul motorului cu caracteristică elastică decât în cel al motorului cu caracteristică rigidă. În consecință, sub acest aspect, este preferabilă utilizarea unui motor cu caracteristică mecanică cât mai rigidă sau - cel puțin - rigidizarea caracteristicii mecanice în perioada patinării.

### 1.3. REALIZAREA FORȚEI DE FRÂNARE

În principiu, pentru frânarea unui vehicul electric terestru, din categoria celor de care ne ocupăm, se folosesc două grupe de metode:

- a) realizând forțe de frânare direct între vehicul și calea de rulare;
- b) realizând forțe sau cupluri de frânare interne - asupra roților sau asupra unor elemente cuplate cu roțile - și obținând forța de frânare a vehiculului pe baza aderenței dintre roți și calea de rulare.

Metodele din prima grupă se pot aplica atât vehiculelor cu roți, cât și celor fără roți. În aplicațiile curente, forțele  $F_F$  - opuse sensului de mișcare a vehiculului -, dezvoltate prin aceste metode, reprezintă:

- forțe electromagnetice între armăturile motoarelor electrice liniare, în cazul vehiculelor care folosesc pentru propulsie astfel de motoare, una dintre armături fiind solidară cu vehiculul, iar cealaltă - cu calea de rulare (frânarea electrică a motoarelor liniare);
- forțe electromagnetice între armături inductoare, solidare cu vehiculul, și șine metalice, care constituie, de regulă, chiar calea de rulare (frâne electromagnetice cu curenți turbionari);
- forțe de frecare între saboți (patine), solidari cu vehiculul, și șine dispuse în lungul căii (frâne cu patină pe șină); la vehiculele cu roți metalice, aceste șine pot fi chiar cele care reprezintă calea de rulare.

Evident, realizarea acestor forțe - chiar dacă vehiculul este cu roți - nu este legată de aderența dintre roți și calea de rulare.

Metodele din cea de a doua grupă, însă, se pot aplica numai vehiculelor cu roți, aderența jucând un rol esențial.

Obținerea unei forțe mari de frânare a unui convoi este ușurată de faptul că aceasta - spre deosebire de forța de tracțiune - se poate realiza (și este chiar obligatoriu a se realiza) nu numai pe unitățile motoare, ci și pe remorcile din convoi. Dacă  $N_F$  reprezintă numărul total al elementelor de frânare (de diverse tipuri) din convoi, iar  $F_{Fk}$  - forța de frânare produsă de elementul  $k$ , atunci forța de frânare care acționează asupra convoiului este:

$$F_F = \sum_{k=1}^{N_F} F_{Fk} \quad (1.17)$$

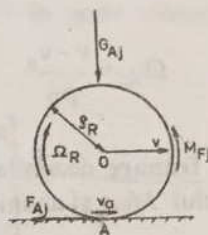


Fig. 1.10. Formarea forței de frânare la o roată, prin aderența între roată și cale.

Procesul de formare a forței de frânare pe baza aderenței între roți și cale este analog celui de formare a forței de tracțiune, descris în §1.2. Considerăm și în acest caz o roată  $j$ , care aparține unui vehicul ce se deplasează cu viteza  $v$ , căruia i se aplică - printr-un mijloc oarecare (frânarea electrică a motorului, cuplat cu roata, sau frânarea mecanică a roții ori a unor elemente cuplate cu ea, folosind saboți direct pe bandajul roții - dacă roata este metalică - sau saboți pe un tambur ori pe un disc, montat pe axul roții sau pe alt element cuplat cu roata) - un cuplu de valoare  $M_{Fj}$ , având sens opus sensului de rotație a roții (Fig. 1.10).

Sub acțiunea cuplului  $M_{Fj}$ , suprafețele în contact - ale roții și ale căii - tind să se deplaseze una față de cealaltă, cu o viteză relativă (de alunecare)  $v_a$ . Printr-un mecanism similar celui descris în §1.2, rezultă că asupra roții acționează o forță tangențială  $F_{Aj}$  (forță de aderență) opusă vitezei de alunecare  $v_a$  a roții față de cale. În acest caz, forța  $F_{Aj}$  acționează în sens opus sensului de mișcare a vehiculului, contribuind, deci, la frânarea sa. Pentru simplitate, vom considera ca sens pozitiv al forței de frânare sensul opus mișcării.

Din ecuația mișcării de rotație a roții în jurul axului O, rezultă:

$$F_{Aj} = \frac{M_{Fj}}{\rho_R} + \frac{J_R}{\rho_R} \frac{d\Omega_R}{dt} \quad (1.18)$$

unde viteza unghiulară  $\Omega_R$  a roții se poate exprima, acum, sub forma:

$$\Omega_R = \frac{v - v_a}{\rho_R} \quad (1.19)$$

Se numește **forță de frânare** dezvoltată de roata  $j$  partea din (1.18) care corespunde cuplului  $M_{Fj}$ , și anume:

$$F_{Fj} = \frac{M_{Fj}}{\rho_R} \quad (1.20)$$

ea fiind egală cu forța opusă mișcării vehiculului - care apare, datorită aderenței, la periferia roții  $j$  - în regim stabilizat ( $d\Omega_R/dt = 0$  în ecuația (1.18)).

Urmărind o cale asemănătoare celei din §1.2, se obține și aici o relație prin care este limitată forța de frânare dezvoltată de o roată, încât funcționarea să aibă loc în zona aderenței statice ( $v_a \leq v_{a\text{ cr}}$ , când se poate considera  $v_a \approx 0$ ):

$$F_{Fj} \leq F_{A\text{ max } j} \quad (1.21)$$

sau:

$$F_{Fj} \leq \psi_j G_{Aj} \quad (1.22)$$

unde  $F_{Fj}$  reprezintă forța de frânare a roții  $j$ , determinată cu (1.20) din caracteristica mecanică a frânei,  $M_{Fj}(\Omega_R)$ , pentru  $\Omega_R = v/\rho_R$ .

De remarcat că sistemele de frânare mecanică au caracteristici  $M_F(\Omega_R)$  care pot conduce la o mai slabă utilizare a aderenței decât cele bazate pe frânarea electrică a motoarelor de tracțiune. Justificarea acestei afirmații este dată în cele ce urmează.

În Fig. 1.11 și Fig. 1.12, este prezentată alura de principiu a caracteristicilor mecanice  $M_F(\Omega_R)$ , în cazul unui sistem de frânare

mecanică și, respectiv, al unui sistem de frânare electrică. În ultimul caz, evoluția caracteristicii în zona vitezelor mici depinde de tipul frânării electrice.

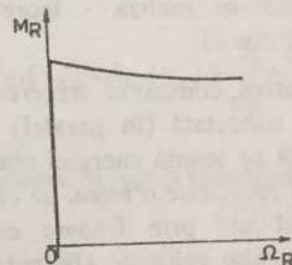


Fig. 1.11. Alura caracteristicii mecanice  $M_F(\Omega_R)$  a unui sistem de frânare mecanică.

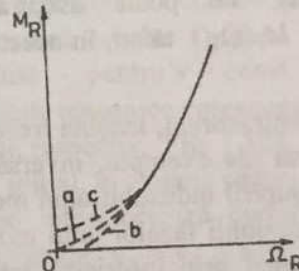


Fig. 1.12. Alura caracteristicii mecanice  $M_F(\Omega_R)$  a unui sistem de frânare electrică dinamică (a), recuperativă (b) și contracurent (c).

Principalele tipuri de frânare electrică realizabile sunt:

- frânarea dinamică (reostatică);
- frânarea recuperativă;
- frânarea contracurent.

În toate acestea, mașina trece în regim de generator, cuplul electromagnetic al unui generator având sens opus mișcării rotorului.

În cazul frânării dinamice, mașina este deconectată de la sursa care o alimentă în regim de tracțiune și conectată pe o rezistență, pe care debitează energia electrică rezultată pe seama energiei cinetice a vehiculului. Caracteristica mecanică  $M_F(\Omega_R)$  trece, în acest caz, prin origine, frânarea putându-se realiza - teoretic - până la oprirea vehiculului (Fig. 1.12 - curba a).

Frânarea recuperativă constă în trecerea mașinii în regim de generator, menținând-o conectată (în paralel) la sursă. În acest fel, energia electrică rezultată pe seama energiei cinetice a vehiculului este debitată spre sursă. Dacă sursa este o rețea, pe care sunt conectați și alți consumatori, energia debitată prin frânare este utilizată de acești consumatori (de exemplu, alte vehicule alimentate de la aceeași rețea, aflate în regim de tracțiune). Dacă sursa este o baterie de acumulare, energia debitată prin frânare poate fi utilizată pentru încărcarea bateriei. Frânarea recuperativă se poate realiza numai peste o anumită viteză a rotorului mașinii. Deci, nu poate asigura oprirea vehiculului, caracteristica mecanică  $M_F(\Omega_R)$  tăind, în acest caz, axa vitezelor (Fig. 1.12 - curba b).

În cazul frânării contracurent, mașina trece în regim de generator conectat în serie cu sursa (de exemplu, inversând în timpul mersului legăturile la bornele înfășurării indusului unui motor de curent continuu sau inversând sensul succesiunii fazelor unui motor asincron), debitând împreună pe circuitul format prin inserierea lor. Întrucât impedanțele interne - a mașinii și a sursei - sunt mici, pentru limitarea curenților rezultați este necesară și inserierea unei impedanțe (rezistență, în c.c.). Frânarea contracurent se poate realiza până la oprirea vehiculului, mașina dezvoltând cuplu chiar pentru  $\Omega_R = 0$ , caracteristica mecanică  $M_F(\Omega_R)$  tăind, în acest caz, axa cuplurilor (Fig. 1.12 - curba c). Dacă mașina nu se deconectează de la sursă în momentul opririi, ea trece în regim de motor, inversându-și sensul de rotație, ceea ce, în cazul vehiculelor, nu este de dorit.

Pentru o viteză dată a vehiculului ( $v = \text{const.}$ ), având în vedere (1.19) și (1.20), rezultă că forța de frânare  $F_{Fj}$ , dezvoltată de o roată  $j$ , poate fi exprimată în funcție de viteza de alunecare  $v_a$  a roții față de

cale, dependența  $F_{Fj}(v_a)$  fiind, în acest caz, un alt mod de a exprima caracteristica mecanică a unei frâne bazate pe aderența dintre roată și cale.

În aceste condiții, ecuația (1.18) devine:

$$F_{Aj}(v_a) = F_{Fj}(v_a) + \frac{J_R}{\rho_R^2} \frac{dv_a}{dt} \quad (1.23)$$

Punctul de funcționare în regim stabilizat ( $dv_a/dt = 0$ ), în care:

$$F_{Aj}(v_a) = F_{Fj}(v_a) \quad (1.24)$$

va fi determinat de intersecția caracteristicilor  $F_{Aj}(v_a)$  și  $F_{Fj}(v_a)$ .

În Fig. 1.13, s-au reprezentat dependențele  $F_{Fj}(v_a)$  în cazul unui sistem de frânare mecanică (curba 1) și al unui sistem de frânare electrică (curba 2), deduse - pentru  $v = \text{const.}$  -, pe baza celor expuse mai sus, din caracteristicile mecanice corespunzătoare  $M_{Fj}(\Omega_R)$ , în cele două cazuri (Fig. 1.11 și, respectiv, Fig. 1.12).

Presupunând că, inițial, în ambele cazuri, frânarea are loc la limita aderenței, aceste curbe interesează curba 3 a forței de aderență  $F_{Aj}(v_a)$  în punctul N, unde  $v_a = v_{a \text{ cr}} \approx 0$ . Dacă, la un moment dat, dintr-o cauză oarecare, aderența dintre roată și calea de rulare se înrăutățește, curba  $F_{Aj}(v_a)$  devine 4. În această situație, roata începe să alunecă pe cale, regimul stabilizat obținându-se în  $N_1$ , pentru curba 1, și în  $N_2$ , pentru curba 2 (în ambele puncte  $v_a > v_{a \text{ cr}}$ ).

Se observă că, în cazul frânării mecanice, roata se blochează ( $v_{a1} = v$  și, deci,  $\Omega_R = 0$ ), ea având doar o mișcare de translație (alunecare pură), pe când, în cazul frânării electrice, roata continuă să se învârtă, având și o alunecare față de cale, însă, cu  $v_{a2} < v$ . În plus, forța de frânare, în primul caz, este mult inferioară forței de aderență maxime  $F'_{A \text{ max } j}$ , corespunzătoare noilor condiții de aderență.

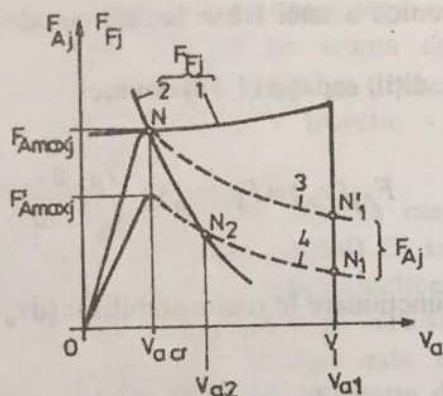


Fig. 1.13. Explicativă pentru influența caracteristicilor sistemelor de frânare asupra utilizării aderenței.

1 -  $F_{Fj}(v_a)$  pentru un sistem de frânare mecanică; 2 -  $F_{Fj}(v_a)$  pentru un sistem de frânare electrică; 3 -  $F_{Aj}(v_a)$  pentru aderență normală; 4 -  $F_{Aj}(v_a)$  pentru aderență scăzută.

La restabilirea aderenței, când curba  $F_{Aj}(v_a)$  redevine 3, punctul de funcționare al frânării mecanice ajunge în  $N_1'$ , unde se menține  $v_{a1} = v$  (deci, roată blocată), pe când cel corespunzător frânării electrice revine în N.

Pentru a face ca frânarea mecanică să-și recapete eficacitatea, este necesară, mai întâi, deblocarea roții (coborârea curbei 1 sub  $N_1'$ ) și, abia apoi, acționarea din nou a frânei.

De remarcat că observațiile de mai sus, referitoare la frânarea electrică, sunt general valabile doar în cazul frânării dinamice și al frânării recuperative. În cazul frânării contracurent, a cărei caracteristică mecanică  $M_F(\Omega_R)$  taie axa cuplurilor (Fig. 1.12 - curba c), este posibilă blocarea roților, ca și în cazul frânării mecanice. Acesta este un inconvenient suplimentar celor menționate la prezentarea frânării contracurent, ceea ce face ca, la vehiculele cu aderență la cale, să nu fie folosit acest tip de frânare electrică. Frânarea contracurent este, însă,

utilizată - cu precauțiile necesare - la unele vehicule acționate cu motoare liniare.

Frânarea electrică, pe lângă avantajul pe care îl poate oferi în utilizarea aderenței, mai are o serie de alte avantaje notabile față de frânarea mecanică, și anume:

- posibilități comode și sigure de reglare și control ale forței de frânare;
- uzură scăzută a elementelor implicate în procesul de frânare (aceasta determină și o întreținere mult mai puțin costisitoare a echipamentului de frânare);
- frânarea electrică nu este, practic, însoțită de degajarea de praf metalic, așa cum rezultă din frecarea componentelor implicate în frânarea mecanică (acest praf, pe lângă faptul că este poluant, poate dăuna echipamentelor electrice ale vehiculului);
- posibilitatea recuperării unei părți din energia de frânare, ceea ce permite reducerea consumului global de energie electrică (aceasta este evidentă, în cazul utilizării frânării recuperative; dar, chiar și frânarea reostatică poate contribui la reducerea consumului de energie electrică, utilizând energia disipată pe rezistențele de frânare - în sezonul rece - pentru încălzirea vehiculului).

Toate aceste avantaje sunt determinante în impunerea frânării electrice ca frânare de serviciu a vehiculelor electrice. Chiar dacă optează, în esență, pentru frânarea recuperativă, mulți constructori de vehicule electrice preferă ca aceasta să fie secundată ("în tampon") și de o frânare dinamică, care să intre în funcțiune atunci când sursa de alimentare a vehiculului nu poate primi (total sau parțial) energia rezultată prin frânare recuperativă.

## Capitolul 2

# VEHICULE ELECTRICE NECONVENȚIONALE CU ROȚI PNEUMATICE

## 2.1. AUTOMOBILE ȘI AUTOBUZE ELECTRICE

### 2.1.1. Probleme generale

În principiu, orice automobil care are motor de tracțiune electric este considerat automobil electric. Sursa de alimentare, aflată pe vehicul, poate fi de diverse tipuri, însă, pentru majoritatea covârșitoare a automobilelor electrice realizate până în prezent, sursa este o baterie de acumulatori electrice. De aceea, dacă nu se fac alte precizări, în cele ce urmează, vom avea în vedere automobilele alimentate de la baterii de acumulatori.

Istoria automobilului electric, ca mijloc practic de transport, începe, în esență, în ultima decadă a secolului XIX. În 1895, în SUA, erau aproape de două ori mai multe automobile electrice decât cele cu motoare termice. Abia din 1901, când începe exploatarea primelor puțuri petroliere, se impune benzina ca sursă de energie, care asigură automobilelor cu motoare termice (cu ardere internă) performanțe superioare automobilelor electrice, determinând un declin puternic al acestora din urmă.

Doar în jurul anului 1942 reîncepe folosirea automobilului electric, fiind util pentru diverse servicii publice ca: poștă, presă, transport pe aeroporturi, distribuirea la domiciliu a unor produse (lapte, pâine etc.), taxiuri în unele stațiuni de odihnă (unde, pentru diminuarea poluării, este interzisă circulația altor tipuri de autovehicule). Până în anii '70 - când apare spectrul penuriei de petrol - nu s-au înregistrat progrese semnificative în domeniul automobilelor electrice; anii '80 aduc un nou argument în favoarea acestor automobile: problemele ecologice. Ca urmare a poluării aerului, a efectului de seră și, mai ales, a diminuării rezervelor de petrol, factorii importanți de decizie economică au relansat cercetările în domeniul transportului electric, pentru a se realiza intrarea în traficul uzual a automobilelor/autobuzelor electrice.

Astfel, marile companii constructoare de automobile clasice (cu motoare termice), cum sunt Mercedes, Volkswagen, Renault, Fiat, BMW - ca să amintim doar câteva dintre companiile europene -, s-au implicat și au făcut cunoscute realizările lor în domeniul automobilelor electrice, care meritau să fie luate în considerație. Trebuie menționate și succesele unor firme din SUA și Canada (Ford, Chrysler, General Motors, Unique Mobility Company), precum și din Japonia (Nissan, Suzuki, Nippon Steel).

Interesul și importanța pe care le prezintă, actualmente, vehiculele electrice rutiere (atât pur electrice, cât și hibride) se află într-o fază foarte promițătoare. Astfel, statul California (SUA) a legiferat un program - în principal, pentru reducerea poluării - prin care se impune ca, până în anul 2003, 10% din totalul vânzărilor de autovehicule să fie vehicule electrice, iar 25% - vehicule hibride, ceea ce reprezintă cca 300.000 vehicule electrice și 750.000 vehicule hibride. Și alte state din SUA urmează să introducă reglementări similare.

În Europa, țări ca Franța, Elveția, Suedia, Belgia ș.a. arată un mare interes pentru vehiculele menționate, prin programe de cercetare-dezvoltare și de introducere pe piață a acestor vehicule.

Producătorii japonezi de automobile sunt și ei angajați în această competiție, dusă, îndeosebi, cu marii producători americani.

Vehiculele electrice au, față de vehiculele cu motoare termice, o serie de avantaje notabile, și anume:

- reducerea drastică a poluării chimice și fonice;
- posibilitatea de utilizare a unor sisteme de acționare sofisticate, oferite de cele mai moderne realizări în domeniul acționărilor electrice;
- posibilitatea realizării comode a sistemelor de frânare antiblocante, prin utilizarea frânării electrice; dacă frânarea este recuperativă, se face și o importantă economie de energie;
- posibilitatea de acționare individuală a roților (eventual, prin înglobarea motoarelor de tracțiune în roți, realizând așa-numitele *motoroți*); aceasta conduce la simplificarea sistemelor de transmisie, cea mai importantă fiind eliminarea diferențialului mecanic.

Tabelul 2.1. Densități masice de energie (teoretic recuperabile) pentru diverși combustibili.

Combustibil	Densitate de energie [Wh/kg]
Hidrogen (H <sub>2</sub> ) singur	32800
Hidrogen îmbuteliat	420
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	6100
Amoniac (NH <sub>3</sub> )	5700
Benzină	10500

Principalele probleme pe care le pun automobilele electrice și care îngreunează, deocamdată, proliferarea acestora sunt următoarele:

- densitatea de energie și de putere a acumulatorilor electrice actuale este semnificativ mai scăzută decât a combustibililor (a se compara densitățile de energie ale combustibililor, din Tab. 2.1, cu valoarea teoretică de 161 Wh/kg a densității de energie la un acumulator cu plumb-acid; practic, la cele mai bune acumulatori de acest tip se obțin 35-40 Wh/kg); aceasta face ca, pe de o parte, autonomia automobilelor electrice să fie inferioară celei din cazul automobilelor clasice: 150-250 km (uzual, 100-120 km), față de 400-800 km; pe de altă parte,

viteza maximă a automobilelor electrice (100-130 km/h) este mai scăzută decât a automobilelor clasice (cca 200 km/h); de asemenea, accelerațiile realizate cu automobilele electrice sunt inferioare celor din cazul automobilelor clasice;

- sunt necesare stații de încărcare a bateriilor de acumulatori; acestea pot fi dotate fie cu acumulatori preîncărcate, care să le schimbe pe cele descărcate de pe automobile - ceea ce pune probleme de depozitare și de asigurare a unei diversități de baterii, în funcție de tipurile de automobile existente -, fie cu instalații de încărcare a bateriilor direct pe automobil; în ultimul caz, se pune problema timpului de încărcare, acesta fiind de ordinul orelor pentru o încărcare completă normală (doar pentru încărcări parțiale, el poate fi redus la ordinul minutelor-zecilor de minute);
- sunt necesare investiții inițiale mari, dacă producția automobilelor este de serie mică.

Bateriile de acumulatori cu energii mari și, mai ales, pilele electrice de combustie oferă, însă, noi posibilități, justificând o reevaluare promițătoare a fezabilității vehiculelor electrice rutiere (automobile, autobuze, microbuze etc.).

În Fig. 2.1, este prezentată schema bloc a unui automobil electric.

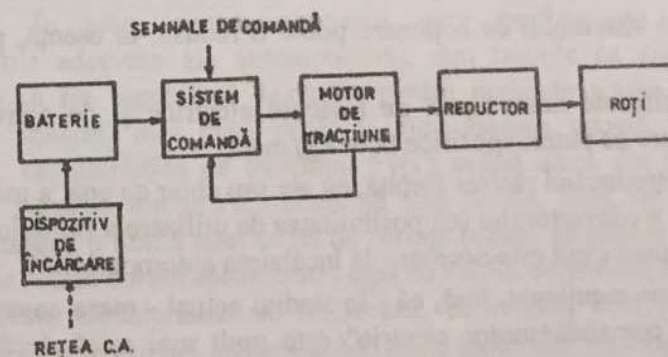


Fig. 2.1. Schema bloc a unui automobil electric, având ca sursă o baterie de acumulatori.

Sistemul de acționare a unui automobil electric trebuie să satisfacă o serie de cerințe, cele mai importante fiind prezentate mai jos.

a) Pentru o baterie dată, autonomia automobilului crește dacă, pe de o parte, pierderile în sistemul de acționare sunt mai scăzute, iar, pe de altă parte, masa acestui sistem este mai scăzută (contribuind, astfel, la scăderea masei totale a automobilului și, implicit, la scăderea energiei necesare accelerării și învingerii rezistenței la înaintare a automobilului).

Reducerea pierderilor din sistemul de acționare implică utilizarea unor sisteme de comandă și motoare electrice de tracțiune cu randamente ridicate. Se consideră că randamente de peste 80% ale ansamblului "sistem de comandă+ motor electric" sunt satisfăcătoare. Având în vedere că sistemele de comandă actuale folosesc convertoare statice cu randamente de cca 95%, pe un domeniu larg de funcționare, rezultă că trebuie utilizate motoare electrice de tracțiune care să atingă randamente de peste 90%, pe o plajă largă de viteze. Pentru motoarele de puteri relativ mici (zeci de kW) cerute de automobilele electrice, realizarea acestor randamente se face prin adoptarea unor solicitări electromagnetice (densități de curent în conductoare și inducții magnetice în fier) mai mici decât cele uzuale. Ca urmare, scad pierderile în motor, dar crește masa acestuia. Va trebui găsită o soluție de compromis care să conducă la randament și masă rezonabile.

Masa sistemului de acționare poate fi redusă, în esență, pe două căi:

- utilizând acele tipuri de motoare electrice și de convertoare care au puteri specifice (kW/kg) mari;
- introducând răcirea forțată, cu aer sau chiar cu apă, a motorului și a convertorului (cu posibilitatea de utilizare a fluidului cald - atunci când este necesar - la încălzirea automobilului).

Trebuie menționat, însă, că - în stadiul actual - masa ansamblului "sistem de comandă+motor electric" este mult mai mică decât masa bateriei de acumulare. De aceea, numai o reducere importantă a masei bateriei, pentru o aceeași energie înmagazinată, și o îmbunătățire a

randamentului bateriei ar putea contribui la creșterea semnificativă a autonomiei automobilului.

b) Sistemul de acționare trebuie să fie cât mai ieftin posibil, ținând seama că bateriile de tracțiune sunt, încă, foarte scumpe.

c) Componentele sistemului de acționare trebuie să nu necesite - pe cât posibil - întreținere, pe durata de viață a automobilului (150.000-200.000 km).

d) Sistemul de acționare trebuie să fie fiabil, foarte rezistent la șocuri și la vibrații.

În cele ce urmează, vor fi prezentate cele mai importante aspecte privind sistemele de acționare (motoare electrice de tracțiune și sisteme de comandă a acestora, precum și elemente de transmitere a cuplului de la motoare la roți) și sursele de alimentare ale automobilelor/autobuzelor electrice, atât în varianta lor pur electrică, cu alimentare de la surse electrochimice, cât și în variantele hibrid-electrice.

### 2.1.2. Motoare electrice de tracțiune și sisteme de comandă

Sistemul de acționare a automobilului electric trebuie să asigure, în regim continuu, o caracteristică de tracțiune  $F_T(v)$  ca în Fig. 2.2 - curba 1. În plus, pentru obținerea unor performanțe dinamice (acelerații) adecvate ale automobilului, mai trebuie ca sistemul de acționare să fie capabil să dezvolte, pentru perioade scurte, forțe de tracțiune sensibil mai mari decât la funcționarea uzuală, în regim continuu, caracteristica de tracțiune  $F_T(v)$  având alura din Fig. 2.2 - curba 2. Aceasta din urmă trebuie să țină seama, însă, de faptul că bateria impune o limită unei astfel de cerințe (uzual, se admite un curent maxim de scurtă durată aproximativ egal cu dublul curentului nominal).

Aceste caracteristici se realizează, de regulă, prin puncte ale familiei de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului electric, obținute cu ajutorul sistemului de comandă. În cazul automobilelor electrice este, practic, exclusă folosirea rezistențelor de pornire și reglaj.

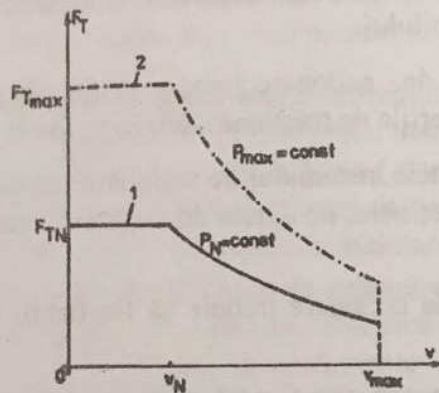


Fig. 2.2. Caracteristicile de tracțiune  $F_T(v)$  ale unui automobil electric, în regim continuu (1) și în regim de scurtă durată (2).

În cele ce urmează, vom prezenta tipurile de motoare electrice utilizate pentru acționarea automobilelor electrice. Ne vom referi la unele particularități constructive mai importante ale acestora, la caracteristicile esențiale legate de utilizarea lor pentru tracțiune, precum și la schemele de comandă corespunzătoare, pentru a putea oferi o imagine generală a performanțelor motoarelor, care să permită compararea diverselor tipuri de motoare.

Motoarele electrice utilizate pentru acționarea automobilelor electrice sunt, în general, de următoarele tipuri:

- motoare de curent continuu (cu excitație serie, cu excitație separată și cu magneți permanenți);
- motoare de curent alternativ (asincrone și sincrone);
- motoare hibride (cel mai promițător fiind motorul cu reluctanță dublu variabilă autopilotat - "switched reluctance motor").

### 2.1.2.1. Motoare electrice de curent continuu

Aceste motoare sunt bine cunoscute, iar tehnologia lor este bine pusă la punct. Ele - și în mod deosebit motorul serie - au fost, până relativ recent, principalele motoare folosite în tracțiunea electrică.

Indiferent de tipul excitației utilizate, schema echivalentă a unui motor de curent continuu este, în esență, cea din Fig. 2.3.

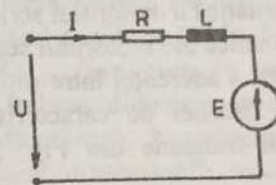


Fig. 2.3. Schema echivalentă a unui motor de c.c.

Ecuția corespunzătoare acestei scheme, în regim permanent, este:

$$U = E + RI \quad (2.1)$$

în care  $R$ ,  $L$  sunt rezistența și, respectiv, inductanța circuitului indusului, iar  $E$  - tensiunea electromotoare indusă în acest circuit. Se poate scrie:

$$E = k_M \Phi \Omega \quad (2.2)$$

unde  $k_M$  este o constantă constructivă a mașinii,  $\Phi$  - fluxul pe un pol al mașinii, iar  $\Omega$  - viteza unghiulară a rotorului.

Cuplul electromagnetic dezvoltat de motor este:

$$M = k_M \Phi I \quad (2.3)$$

Din (2.1), (2.2) și (2.3), rezultă ecuația:

$$\Omega = \frac{U}{k_M \Phi} - \frac{R}{(k_M \Phi)^2} M \quad (2.4)$$

care poate servi la construirea caracteristicilor mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului.

A. Motorul cu excitație serie

Reprezentarea schematică a motorului serie este dată în Fig. 2.4. Caracteristicile mecanice ale motorului serie sunt elastice, ceea ce conduce la o utilizare slabă a aderenței între roțile automobilului și cale (§1.2). Pentru obținerea familiei de caracteristici mecanice care să asigure caracteristicile de tracțiune din Fig. 2.2 pot fi folosite, în principiu, două metode:

- modificarea tensiunii  $U$  aplicate circuitului indusului;
- slăbirea câmpului de excitație (scăderea fluxului  $\Phi$ ).

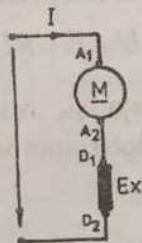


Fig. 2.4. Reprezentarea schematică a motorului de c.c. cu excitație serie.

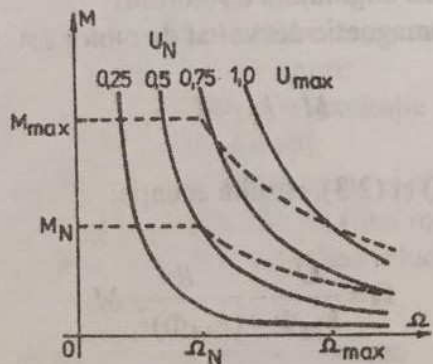


Fig. 2.5. Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului de c.c. cu excitație serie, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric.

Cea de a doua metodă conduce, însă, la creșterea elasticității caracteristicilor mecanice și, implicit, la o utilizare și mai slabă a aderenței. De aceea, singura metodă de realizare a caracteristicilor de tracțiune pe întreg domeniul de viteze  $\Omega \in [0, \Omega_{max}]$  rămâne modificarea tensiunii între 0 și  $U_{max}$ , așa cum se arată în Fig. 2.5. Ca atare, sistemul de acționare trebuie dimensionat având în vedere această supratensionare. Ea influențează, în principal, asupra dimensiunilor convertorului static utilizat, dimensiunile motorului fiind determinate - în esență - de cuplul său nominal.

Porțiunile de putere constantă ( $P = M\Omega = const.$ ) ale caracteristicilor de tracțiune trebuie acoperite prin puncte, ele neputând fi realizate direct prin caracteristici mecanice ale motorului, întrucât acestea din urmă sunt - pentru  $U$  dat - de tipul  $M\Omega^2 \approx const.$ , așa cum rezultă din cele ce urmează.

Dacă se consideră mașina nesaturată ( $I \approx k_1\Phi$ ), cuplul electromagnetic al motorului (2.3) devine:

$$M \approx k'\Phi^2 \quad (2.5)$$

Neglijând  $R$  și înmulțind  $\Omega^2$  din (2.4) cu  $M$  din (2.5), se obține, pentru  $U$  dat:

$$M\Omega^2 \approx kU^2 = const. \quad (2.6)$$

S-au notat:  $k_1$ ,  $k' = k_M k_1$ ,  $k = k'/k_M^2$  - constante constructive ale mașinii.

Un dezavantaj suplimentar celui legat de utilizarea slabă a aderenței de către motorul serie îl constituie complicarea schemelor de frânare electrică, determinată de necesitatea menținerii neschimbate a sensului câmpului de excitație la schimbarea sensului curentului prin indus; aceasta se realizează fie cu ajutorul unor contactoare, fie prin construirea motorului cu două înfășurări de excitație cu sensuri de bobinare opuse (numai una dintre ele fiind activă la un moment dat). În plus, pentru accelerarea autoexcitării mașinii în regim de frânare, sunt necesare măsuri suplimentare care complică și ele schema.

Toate acestea fac ca motorul serie să necesite a fi luat în considerație cu multă precauție pentru acționarea actuală a unui automobil electric. De remarcat, însă, că motorul serie dezvoltă un cuplu mai mare - pentru același supracurent - decât motorul cu excitație separată sau cu magneți permanenți. Ca urmare, el poate asigura o accelerație de pornire superioară, pentru un supracurent dat.

**B. Motorul cu excitație separată**

Reprezentarea schematică a motorului cu excitație separată este dată în Fig. 2.6.

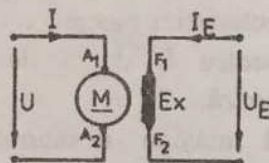


Fig. 2.6. Reprezentarea schematică a motorului de c.c. cu excitație separată.

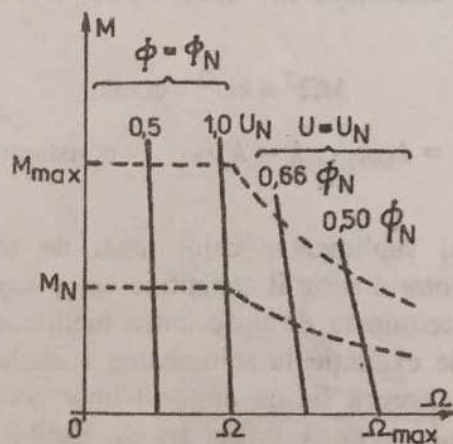


Fig. 2.7. Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului de c.c. cu excitație separată, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric.

Deși acest motor are dezavantajul că necesită alimentarea și comanda a două înfășurări (indus și excitație), caracteristicile sale mecanice, fiind rigide, asigură o utilizare bună a aderenței. Aceasta permite ca, pentru realizarea familiei de caracteristici mecanice care să conducă la obținerea caracteristicilor de tracțiune din Fig. 2.2, să poată fi utilizată atât modificarea tensiunii aplicate indusului, cât și slăbirea de câmp. Astfel, pentru acoperirea domeniului de viteze  $\Omega \in [0, \Omega_N]$ , se modifică tensiunea între 0 și  $U_N$ , menținându-se fluxul de excitație  $\Phi = \Phi_N = \text{const.}$ , iar pentru acoperirea domeniului de viteze  $\Omega \in [\Omega_N, \Omega_{\text{max}}]$ , se micșorează fluxul de excitație  $\Phi$ , menținându-se tensiunea  $U = U_N = \text{const.}$  (Fig. 2.7). În acest fel, motorul și convertorul sunt solicitate la tensiuni care nu depășesc valoarea nominală.

Avantajul de mai sus - la care se adaugă și simplitatea trecerii în regim de frână electrică (inclusiv frânare recuperativă) a mașinii, precum și eficiența frânării electrice la viteze mai mici decât în cazul motorului serie - face ca motorul cu excitație separată să fie atractiv pentru acționarea automobilelor electrice.

**C. Motorul cu magneți permanenți**

Reprezentarea schematică a motorului cu magneți permanenți este dată în Fig. 2.8.

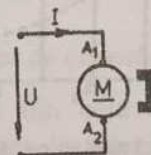


Fig. 2.8. Reprezentarea schematică a motorului de c.c. cu magneți permanenți.

Motoarele cu magneți permanenți pot fi de diverse construcții - cu rotor cilindric (întrefier radial) sau cu rotor disc (întrefier axial).

Există tipuri variate de magneți pentru realizarea statorului. Una dintre soluții, care asigură energii specifice mari, este aceea de utilizare a magneților cu pământuri rare - de exemplu, samariu-cobalt ( $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) sau neodim-fier-bor ( $\text{NdFeB}$ ). Se pot realiza, astfel, motoare

cu puteri de ordinul zecilor de kilowați și chiar peste 100 kW, încât utilizarea lor pentru automobilele electrice nu constituie o problemă.

În prezent, un dezavantaj al utilizării magneților cu pământuri rare îl constituie prețul relativ ridicat, dar, o dată cu dezvoltarea noilor tehnologii, prețul este în continuă scădere. Mai mult, este de așteptat o îmbunătățire a caracteristicilor magneților cu NdFeB (în prezent, pot fi probleme determinate de scăderea intensității câmpului magnetic cu temperatura)

Motoarele cu rotor disc au tensiuni de alimentare de cca 30-60 V, iar puterile la care se construiesc sunt de ordinul kilowaților. Ele au raport mic între dimensiunile de gabarit lungime/diametru (motoare plate), ocupând astfel un spațiu mic în lungul axului. Toate aceste caracteristici au făcut ca motoarele cu rotor disc să fie preferate la acționarea bicicletelor și a scuterelor electrice. Este posibilă utilizarea lor și pentru acționarea unor automobile electrice, mai ales a celor cu mai multe roți motoare cu acționare individuală.

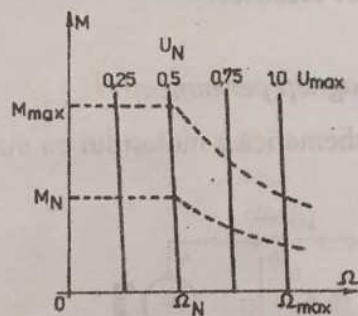


Fig. 2.9. Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului de c.c. cu magneți permanenți, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric.

Motoarele de c.c. cu magneți permanenți, indiferent de tipul lor, au caracteristici similare motoarelor cu excitație separată, dar nu li se poate aplica slăbirea de câmp. Ca urmare, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune din Fig. 2.2 pe întreg domeniul de viteze  $\Omega \in [0, \Omega_{\max}]$ , este necesară modificarea tensiunii aplicate

indusului între 0 și  $U_{\max}$  (Fig. 2.9). Rezultă necesitatea supratensionării convertorului și motorului, cu aceleași consecințe ca și în cazul motorului serie.

Avantajele motoarelor cu magneți permanenți sunt determinate de dispariția înfășurării de excitație, cu tot ce implică aceasta: dispariția sursei de excitație (inclusiv echipamentul de comandă aferent), precum și a pierderilor de excitație. Ca urmare, randamentul este mai ridicat, iar răcirea este mai bună, conducând la reducerea dimensiunilor și greutatea motorului - deci, la creșterea puterii sale specifice. Pentru plaja de puteri necesare automobilelor electrice, randamentul este de 90-92%, comparativ cu 85-90% în cazul motoarelor cu excitație serie sau separată. În plus, rămân valabile avantajele legate de rigiditatea caracteristicilor mecanice, de simplitatea trecerii în regim de frână electrică și de eficiența frânării electrice la viteze mici, menționate în cazul motorului cu excitație separată.

Este de remarcat, însă, costul mai ridicat al motorului cu magneți permanenți datorat - așa cum s-a menționat - costului actual încă ridicat al magneților cu energii specifice mari. Dacă se are în vedere, însă, costul total - de construcție și exploatare ale unui automobil electric -, acest cost poate deveni favorabil utilizării motorului cu magneți permanenți (ținând seama și de celelalte avantaje ale acestui motor) pentru acționarea automobilelor electrice.

#### D. Comanda motoarelor de curent continuu

După cum a rezultat din cele de mai sus, pentru comanda motoarelor de c.c. sunt folosite, în principiu, două metode: modificarea tensiunii aplicate indusului (la toate tipurile de motoare) și slăbirea de câmp (la motorul cu excitație separată). Având în vedere că motoarele de c.c. au fost utilizate pentru acționarea majorității automobilelor electrice construite până în prezent, vom da, în continuare, mai multe detalii privind schemele de acționare care folosesc aceste metode de comandă.

În acționarea clasică a automobilelor electrice, modificarea tensiunii aplicate indusului s-a bazat pe faptul că bateriile de

acumuloare sunt realizate din mai multe elemente, care pot fi conectate în diverse moduri (în serie, în paralel etc.).

Pentru exemplificare, în Fig. 2.10, se ilustrează acest procedeu în cazul unei baterii formate din patru elemente, care, prin modificarea conexiunilor între ele, permit obținerea a patru trepte de tensiune. Pornirea se face cu tensiune scăzută, dar curenții necesari în timpul pornirii pot impune conectarea inițială în paralel a elementelor (Fig. 2.10.a) și apoi în serie-paralel (Fig. 2.10.b). Pentru treptele următoare de tensiune, se presupune că a fost depășită etapa de pornire și se conectează, progresiv, elementele în serie (Fig. 2.10.c și Fig. 2.10.d).

Modificarea conexiunilor se face cu ajutorul unor contactoare, ca în Fig. 2.11. În această schemă, s-a considerat că, la mersul înainte al automobilului, echipat cu un motor cu excitație serie, se utilizează toate cele patru trepte de tensiune (implicit, de viteză), iar la mersul înapoi este suficientă o singură treaptă - cea corespunzătoare conectării în paralel a elementelor bateriei. În Tab. 2.2, este prezentată diagrama controlerului care realizează comenzile corespunzătoare. Pentru reducerea vârfurilor de curent în timpul pornirii, poate fi folosită - pentru scurte perioade - rezistența R, scurtcircuitată apoi de contactul K.

Procedeeul are dezavantajul modificării numai în trepte a tensiunii, dar are avantajul că utilizează un aparat de comandă foarte simplu. Numărul de trepte (care determină și finețea reglajului) este limitat de numărul disponibil de elemente ale bateriei, dar și de creșterea complexității și a volumului schemei de comandă.

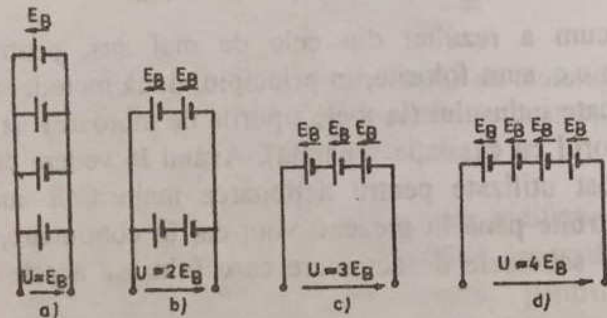


Fig. 2.10. Principiul modificării tensiunii aplicate unui motor de c.c. prin modificarea conexiunilor între elementele bateriei.

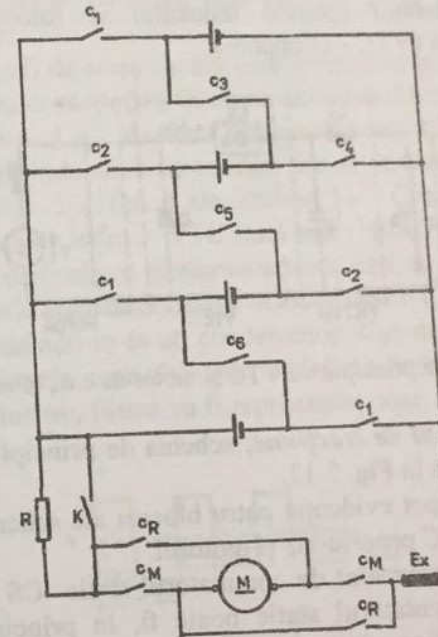


Fig. 2.11. Schemă utilizând principiul din Fig. 2.10, pentru modificarea tensiunii aplicate motorului de c.c. al unui automobil electric.

Tabelul 2.2. Diagrama controlerului, corespunzătoare schemei din Fig. 2.11.

	Contact	$c_M$	$c_R$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
	Treapta								
MERS ÎNAINTE	I M	X		X	X		X		
	II M	X			X	X			X
	III M	X					X	X	X
	IV M	X				X		X	X
MERS ÎNAPOI	R		X	X	X		X		

În acționarea modernă a automobilelor electrice, pentru modificarea tensiunii aplicate indusului se folosesc variatoare de tensiune continuă (VTC - choppers).

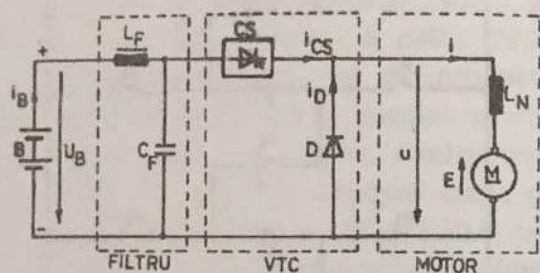


Fig. 2.12. Schemă de principiu cu VTC și motor de c.c., în regim de tracțiune.

Pentru **regimul de tracțiune**, schema de principiu care utilizează VTC este prezentată în Fig. 2.12.

În esență, se pot evidenția patru blocuri ale schemei: bateria (B), filtrul ( $L_F$ ,  $C_F$ ), VTC propriu-zis și motorul.

VTC este reprezentat de comutatorul static CS și de dioda de regim liber D. Comutatorul static poate fi, în principiu, realizat cu diverse tipuri de dispozitive semiconductoare comandabile: tiristor convențional rapid (cu circuitul de stingere forțată aferent), tiristor cu stingere pe poartă (GTO), tranzistor de putere bipolar (Darlington), tranzistor bipolar cu poartă izolată (IGBT), tranzistor cu efect de câmp în tehnologie MOS (MOSFET) etc. Actualmente, pentru automobilele electrice, cel mai indicat este să se realizeze comutatorul static cu IGBT, acesta construindu-se, curent, până la 1800 V, 800A și putând funcționa la frecvențe de până la 20 kHz (uzual, 5-15 kHz). Având în vedere că, de regulă, bateriile au tensiuni de cca 100-500 V, rezultă că se pot acționa astfel, fără probleme, vehicule electrice cu puteri maxime de până la cca 200 kW (considerând coeficienții de siguranță corespunzători, în tensiune și în curent). Dacă se lucrează la tensiuni mai scăzute, pot fi utilizate MOSFET, care nu pun nici o problemă la conectarea în paralel - pentru a face față unor curenți mari - și au

avantajul unor frecvențe de lucru mai ridicate și al unor puteri de comandă neglijabile.

Motorul poate fi de orice tip din cele prezentate mai sus (de aceea nu a mai fost precizată excitația), în circuitul indusului său fiind inclusă și bobina de netezire  $L_N$ . Aceasta din urmă poate să lipsească dacă circuitul propriu al indusului motorului are o inductanță suficientă. Dimensiunile bobinei  $L_N$  (ca și ale filtrului  $L_F$ ,  $C_F$ ) sunt cu atât mai mici cu cât frecvența de lucru a VTC este mai ridicată, ceea ce justifică dorința de a folosi dispozitive semiconductoare de frecvențe ridicate. De regulă, la frecvențele admise de IGBT și de MOSFET, se poate renunța la  $L_F$ , filtrul reducându-se la un condensator  $C_F$  de mici dimensiuni. De aceea, în schemele care folosesc astfel de tranzistoare și vor fi prezentate în continuare, filtrul va fi reprezentat doar prin condensatorul  $C_F$ .

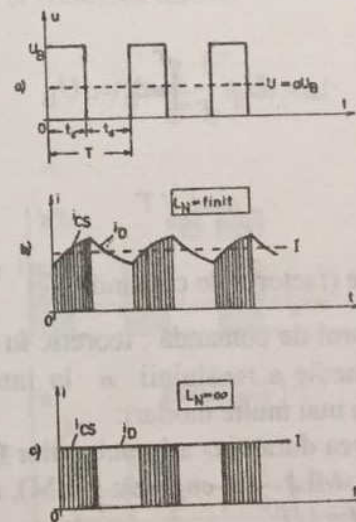


Fig. 2.13. Forme de undă, în cazul schemei din Fig. 2.12: a tensiunii la bornele motorului (a) și a curentului prin motor, acesta din urmă - pentru  $L_N = \text{finit}$  (b) și pentru  $L_N \approx \infty$  (c).

Cu ajutorul VTC, se aplică circuitului indusului motorului o tensiune  $u$  de forma unor pulsuri, ca în Fig. 2.13.a, prin închiderea

(conectarea) și deschiderea (deconectarea) periodică a lui CS. La conectare (pe intervalele de durată  $t_c$ ), neglijând căderile de tensiune între baterie și motor, se obține  $u = U_B$ ; curentul prin motor  $i = i_{CS}$  (dioda D blocată) crește cuasiexponențial, iar în inductanțele circuitului indusului se acumulează energie magnetică. La deconectarea lui CS (pe intervalele de durată  $t_d$ ), energia magnetică acumulată anterior nu se poate anula brusc, ci se descarcă prin dioda D, obligând-o să intre în conducție, astfel încât curentul prin motor este  $i = i_D$ . Acesta scade cuasiexponențial și se consideră că inductanța totală a circuitului indusului este suficient de mare pentru ca  $i$  să nu se anuleze (funcționare cu curent neîntrerupt). Pe aceste intervale, tensiunea  $u$  este egală cu căderea de tensiune pe dioda D aflată în conducție, deci neglijabilă ( $u \approx 0$ ). Valoarea medie pe o perioadă  $T = t_c + t_d$  a tensiunii  $u$  este:

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = a U_B \quad (2.7)$$

unde:

$$a = t_c / T \quad (2.8)$$

este factorul de umplere (factorul de comandă).

Modificând factorul de comandă, teoretic în intervalul  $a \in [0, 1]$ , se modifică valoarea medie a tensiunii  $u$  în intervalul  $U \in [0, U_B]$ . Aceasta se poate face în mai multe moduri:

- prin modificarea duratei  $t_c$  a impulsurilor (modularea în lățime a impulsurilor, MLI - în engleză: PWM), menținând constantă frecvența lor  $f = 1/T$ ;
- prin modificarea frecvenței  $f = 1/T$  a impulsurilor (modularea în frecvență a impulsurilor, MFI - în engleză: PFM), menținând constant  $t_c$  sau  $t_d$ ;
- prin modificarea combinată a lățimii și a frecvenței impulsurilor.

Cel mai des este folosită modularea în lățime a impulsurilor, ea permițând o dimensionare mai ușoară a filtrului de intrare și a bobinei de netezire.

Curentul  $i$  prin motor are forma din Fig. 2.13.b, cu valoarea medie:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (2.9)$$

În cazul unei inductanțe de netezire foarte mari ( $L_N \approx \infty$ ), curentul prin motor este, practic, continuu  $i = I$  (Fig. 2.13.c).

În cazul în care nu ar exista filtrul de intrare, curentul prin baterie ar fi identic cu curentul prin CS ( $i_B = i_{CS}$ ), având, pentru  $L_N \approx \infty$ , forma din Fig. 2.14.a și valoarea medie:

$$I_B = \frac{1}{T} \int_0^T i_B dt = a I \quad (2.10)$$

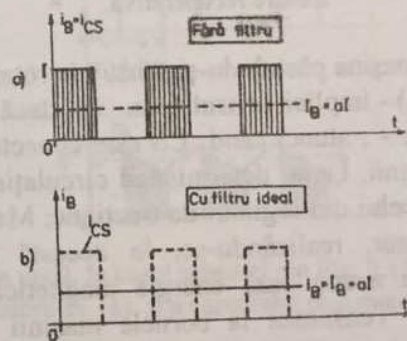


Fig. 2.14. Forma de undă a curentului prin baterie, în lipsa filtrului de intrare (a) și în cazul unui filtru de intrare ideal (b), pentru  $L_N \approx \infty$ .

La pornirea motorului, se aplică tensiuni  $U$  scăzute (deci,  $a$  este mic), dar curentul  $I$  este relativ mare, astfel că prin baterie circulă

pulsuri de curent de lățime mică dar de amplitudine ridicată. Aceasta face ca randamentul intern al bateriei să fie scăzut în perioada pornirii, ceea ce - în final - are efecte negative asupra autonomiei automobilului.

Pentru a crește autonomia, este necesară o reducere a undulațiilor curentului prin baterie, ceea ce se justifică utilizarea filtrului de intrare. În cazul ideal, când  $C_F = \infty$ , curentul prin baterie este perfect continuu (pentru  $L_N = \infty$ ,  $i_B = I_B = aI$  - Fig. 2.14.b).

Pentru **regimul de frânare recuperativă**, schema de principiu cu VTC trebuie modificată ca în Fig. 2.15.

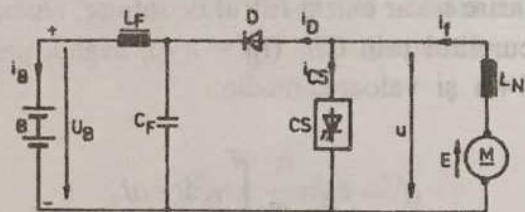


Fig. 2.15. Schemă de principiu cu VTC și motor de c.c., în regim de frânare recuperativă.

În acest caz, mașina păstrându-și sensul de rotație avut în regim anterior (de tracțiune) - implicit sensul t.e.m.  $E$ , dacă se menține sensul câmpului de excitație -, atunci când CS este conectat, se realizează o scurtcircuitare a mașinii, t.e.m. determinând circulația curentului  $i_f = i_{CS}$  de sens contrar celui din regimul de tracțiune. Mașina funcționează în regim de generator, realizându-se, în această etapă, o frânare dinamică, în care se acumulează energie magnetică în inductanțele circuitului indusului. Tensiunea la bornele mașinii pe durata  $t_c$  a conectării lui CS este egală cu căderea de tensiune pe CS - deci, neglijabilă ( $u \approx 0$  - Fig. 2.16.a), dioda D nepermițând scurtcircuitarea bateriei. Considerând fluxul de excitație constant și inerția rotorului suficient de mare ( $\Omega \approx \text{const.}$ ), curentul  $i_f$  va crește exponențial pe durata  $t_c$  (Fig. 2.16.b). La deconectarea lui CS, pe durata  $t_d$ , energia

magnetică acumulată anterior nu se poate anula brusc și obligă dioda D să intre în conducție, curentul  $i_f = i_D$  circulând spre baterie, realizându-se astfel frânarea recuperativă propriu-zisă. Neglijând căderile de tensiune între mașină și baterie, tensiunea la bornele mașinii este  $u \approx U_B$  (Fig. 2.16.a), iar curentul - cu ipotezele menționate, de flux și viteză constante - scade exponențial (Fig. 2.16.b). În aceste condiții, valoarea medie a curentului de frânare al mașinii:

$$I_f = \frac{1}{T} \int_0^T i_f dt \quad (2.11)$$

rămâne, practic, constantă. În realitate, datorită scăderii vitezei, ca urmare a frânării,  $I_f$  scade și el - implicit, forța de frânare a automobilului -, dacă nu se iau alte măsuri (de exemplu, creșterea fluxului de excitație sau/și modificarea factorului de comandă).

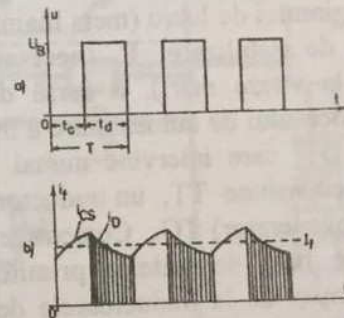


Fig. 2.16. Forme de undă, în cazul schemei din Fig. 2.15: a tensiunii la bornele motorului (a) și a curentului prin motor (b).

Filtrul de intrare are și în regimul de frânare un efect pozitiv, făcând ca undulațiile curentului prin baterie să fie reduse și factorul de recuperare a energiei de frânare să fie îmbunătățit.

În principiu, se pot realiza scheme cu VTC care să permită funcționarea în patru cadrane: tracțiune și frânare recuperativă la mersul

înainte și înapoi. De regulă, însă, înapoi se merge cu viteză scăzută, la care frânarea electrică nu este eficientă; la această viteză, se utilizează frâna mecanică, ea fiind oricum obligatorie să existe pe automobil. De aceea, pentru automobilele electrice este suficientă funcționarea schemelor cu VTC doar în trei cadrane: tracțiune și frânare electrică la mersul înainte, precum și tracțiune la mersul înapoi. În plus, aceste scheme trebuie ca, în cazul în care bateria este încărcată la maximum, să asigure comutarea automată de pe frânarea recuperativă pe o frânare dinamică (reostatică).

În Fig. 2.17, este prezentată schema electrică structurală pentru acționarea unui automobil electric cu motor serie și VTC cu tranzistoare IGBT.

VTC propriu-zis este format din tranzistorul  $T_1$  și dioda  $D_1$ ; tranzistorul  $T_f$  și rezistența  $R_f$  sunt folosite pentru frânarea reostatică.

Schema este prevăzută cu un contactor de linie  $c_1$ , șuntat de o rezistență de valoare relativ ridicată  $R_{pi}$  (rezistență de preîncărcare a condensatorului de filtrare  $C_F$ ), și o serie de contactoare  $c_2 - c_7$ , care intervin în stabilirea regimului de lucru (mers înainte sau înapoi, frânare electrică), o rezistență de stabilizare  $R_s$  (necesară în timpul frânării electrice recuperative la viteze mari), o sursă de preexcitare SPE (necesară accelerării procesului de autoexcitare a mașinii serie în regim de frânare), o diodă  $D_2$  care intervine numai în timpul frânărilor electrice, un traductor de tensiune TT, un traductor de curent TC și un traductor de viteză (tahogenerator) TG. Comenzile sunt date de blocul de comandă BC, pe baza semnalelor primite, în esență, de la controlerul CT, precum și de la traductoarele de tensiune TT, de curent TC și de viteză TG.

Semnalele furnizate de controler sunt funcție de poziția pedalei de accelerație și a pedalei de frână, automobilul putându-se deplasa fie înainte, fie înapoi - în funcție de poziția comutatorului de bord, care impune blocului de comandă sensul de mers. Funcționarea schemei are loc după cum urmează:

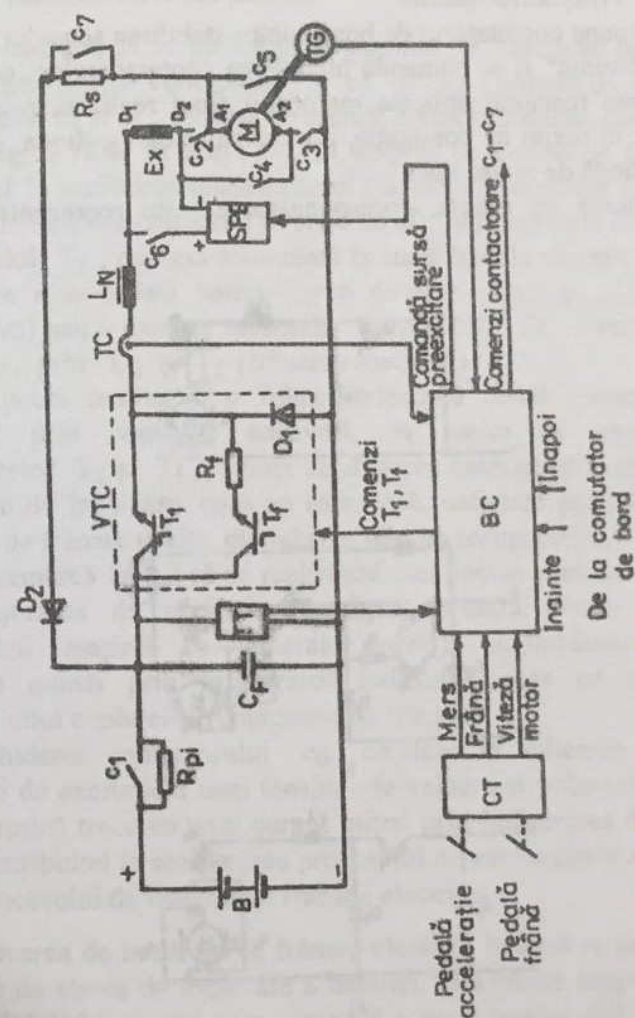


Fig. 2.17. Schemă electrică structurală pentru acționarea unui automobil electric cu motor serie de c.c., folosind VTC (cu tranzistoare IGBT) și contactoare.

◆ **Tracțiunea înainte**

Se pune comutatorul de bord pentru stabilirea sensului de mers pe poziția "Înainte" și se comandă închiderea contactoarelor  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , modificarea tensiunii aplicate motorului fiind realizată prin comanda adecvată, în regim de comutație, a tranzistorului  $T_1$ , dioda  $D_1$  jucând rolul de diodă de regim liber.

Schema de esență, corespunzătoare, este reprezentată în Fig. 2.18.a.

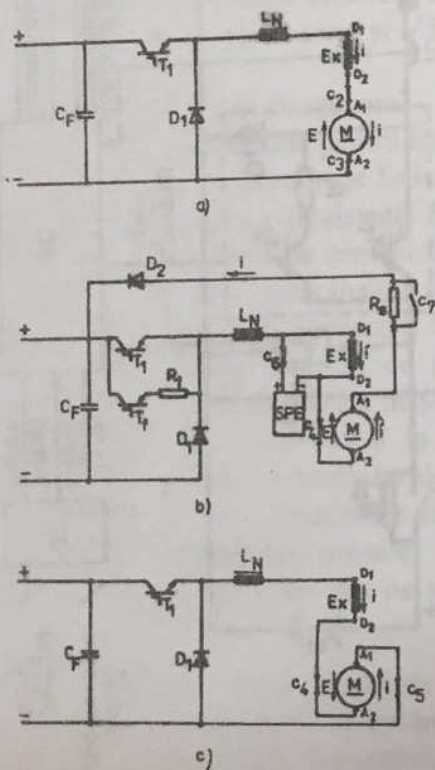


Fig. 2.18. Schemele de esență, corespunzătoare schemei din Fig. 2.17, pentru regimurile de: a) tracțiune (mers înainte); b) frânare electrică (mers înainte); c) tracțiune (mers înapoi).

◆ **Frânarea electrică înainte**

Considerând că se pleacă de la regimul de "tracțiune înainte", se comandă deschiderea contactoarelor  $c_2$  și  $c_3$ , urmată de închiderea contactoarelor  $c_4$  și  $c_6$ ; schema de esență, corespunzătoare, devine acum cea din Fig. 2.18.b. În acest fel, în etapele de conducție (saturație), tranzistorul  $T_1$  scurtcircuitează motorul (inclusiv înfășurarea de excitație și bobina de netezire conectate în serie cu el). În intervalele de blocare a tranzistorului  $T_1$ , energia acumulată în inductanțele mașinii și bobinei de netezire este cedată bateriei prin diodele  $D_1$  și  $D_2$  (frânare recuperativă) sau - dacă se comandă tranzistorul  $T_f$  - rezistenței de frânare  $R_f$ , prin  $D_2$  și  $T_f$  (frânare reostatică).

Se poate realiza și o frânare electrică mixtă (recuperativă + reostatică, prin comanda adecvată, în regim de comutație, a tranzistoarelor  $T_1$  și  $T_f$ ), atunci când starea bateriei impune un curent relativ mic de încărcare, care nu este, însă, suficient pentru realizarea unei forțe de frânare dorite, numai prin frânare recuperativă.

Se remarcă faptul că se realizează menținerea sensului curentului prin înfășurarea de excitație (condiție necesară pentru asigurarea autoexcitării mașinii ca generator serie), schimbându-se sensul curentului numai prin înfășurarea indusului, ceea ce conduce la realizarea unui cuplu electromagnetic de frânare.

Închiderea contactorului  $c_6$  conduce la aplicarea la bornele înfășurării de excitație a unei tensiuni de valoare și polaritate adecvate, care determină trecerea unui curent inițial prin înfășurarea de excitație, acesta contribuind la accelerarea procesului de autoexcitare a mașinii și, deci, a procesului de realizare a frânării electrice.

Trecerea de la un tip de frânare electrică la altul se face automat, în funcție de starea de încărcare a bateriei, fără efecte asupra dinamicii automobilului. Elementul care comandă această trecere este - în schema din Fig. 2.17 - valoarea tensiunii la bornele bateriei, informație furnizată de traductorul de tensiune TT și prelucrată de blocul de comandă BC. Se pot folosi și alte mijloace de determinare a stării de încărcare a

bateriei, pentru a comanda trecerea de la un tip de frânare electrică la altul.

Pentru exploatarea la maximum a capacității de frânare a automobilului de către motorul de tracțiune, se utilizează rezistența  $R_s$ , care asigură stabilitatea frânării recuperative la viteze mari și care este scurtcircuitată de contactorul  $c_7$  (eventual, în mai multe trepte, folosind mai multe contactoare) atunci când viteza scade sub valoarea la care frânarea devine stabilă. Comanda contactorului  $c_7$  (sau a contactoarelor similare, în cazul existenței mai multor trepte de rezistență) se face de către blocul de comandă BC, în funcție de valoarea vitezei motorului. Condiția de stabilitate a frânării recuperative este:

$$E = k_M \Phi \Omega < U_B - RI_f \quad (2.12)$$

unde  $R$  este valoarea totală a rezistenței circuitului indusului (inclusiv  $R_s$ ).

Frânarea electrică este eficientă pentru viteze ale automobilului mai mari de cca 10 km/h.

#### ◆ Tracțiunea înapoi

Cu automobilul în repaus, se trece comutatorul de bord pentru stabilirea sensului de mers pe poziția "Înapoi" și se comandă închiderea contactoarelor  $c_1$ ,  $c_4$  și  $c_5$ . În acest fel, este schimbat sensul curentului prin circuitul rotoric al motorului față de cazul "tracțiunii înainte". Modificarea tensiunii aplicate motorului se realizează la fel ca la "tracțiunea înainte". Schema de esență, corespunzătoare, este reprezentată în Fig. 2.18.c.

Schema din Fig. 2.17 poate fi realizată - parțial sau integral - și cu contactoare statice, acestea asigurând un număr mai mare de cicluri conectare-deconectare, greutate mai redusă și confort sporit (prin reducerea zgomotului) față de contactoarele electromecanice - avantaje de luat în considerare, în mod deosebit, în cazul automobilelor electrice.

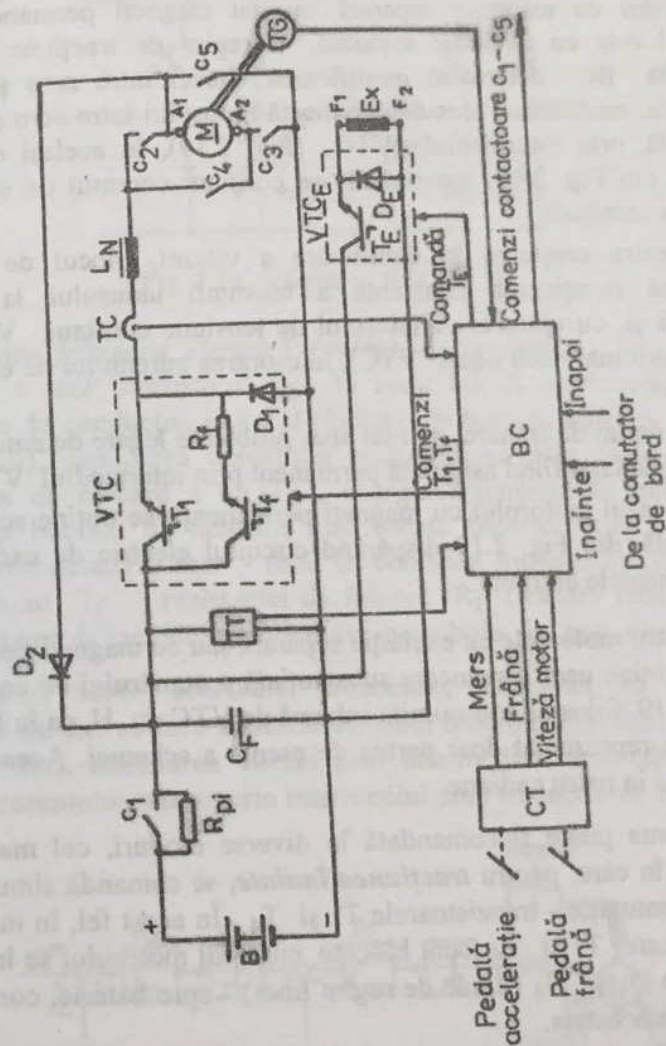


Fig. 2.19. Schemă electrică structurală pentru acționarea unui automobil electric cu motor de c.c. cu excitație separată, folosind VTC (cu tranzistoare IGBT) și contactoare.

Scheme similare celei din Fig. 2.17 pot fi utilizate și în cazul motoarelor cu excitație separată sau cu magneți permanenți. Dacă motorul este cu excitație separată, în regim de tracțiune blocul de comandă BC determină modificarea vitezei între zero și valoarea nominală, modificând tensiunea aplicată indusului între zero și valoarea nominală, prin intermediul VTC (Fig. 2.19), în același mod ca la schema din Fig. 2.17, menținându-se constant curentul de excitație la valoarea nominală.

Pentru creșterea în continuare a vitezei, blocul de comandă determină menținerea constantă a tensiunii indusului la valoarea nominală și, cu ajutorul variatorului de tensiune continuă  $VTC_E$  (de putere mult mai mică decât VTC), micșorarea curentului de excitație al motorului.

În regim de frânare, nu mai apar probleme legate de autoexcitarea mașinii, excitația fiind asigurată permanent prin intermediul  $VTC_E$ .

În cazul motorului cu magneți permanenți, se obține schema cea mai simplă, din Fig. 2.19 dispărând circuitul electric de excitație, cu toate elementele aferente.

Pentru motoarele cu excitație separată sau cu magneți permanenți, se poate obține ușor o reducere substanțială a numărului de contactoare din Fig. 2.19, folosind așa-numita schemă de VTC în H, ca în Fig. 2.20, în care s-a reprezentat doar partea de esență a schemei. Aceasta poate funcționa și în patru cadrane.

Schema poate fi comandată în diverse moduri, cel mai indicat fiind acela în care, pentru *tracțiunea înainte*, se comandă simultan - în regim de comutație - tranzistoarele  $T_1$  și  $T_4$ . În acest fel, în intervalele de timp în care  $T_1$  și  $T_4$  sunt blocate, curentul motorului se închide - prin diodele  $D_1$  și  $D_4$  (diode de regim liber) - spre baterie, contribuind la încărcarea acesteia.

Similar se produc fenomenele și pentru *tracțiunea înapoi*, dacă se comandă simultan - în regim de comutație - tranzistoarele  $T_2$  și  $T_3$ , diodele de regim liber fiind acum  $D_2$  și  $D_3$ .

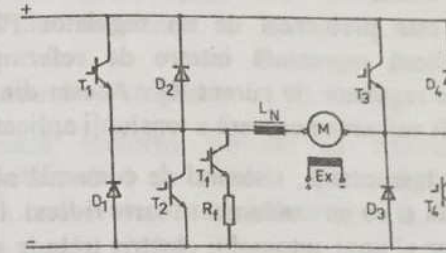


Fig. 2.20. Schemă cu VTC în H.

Pentru *frânarea electrică înainte*, se comandă - în regim de comutație - doar tranzistorul  $T_2$ . În acest fel, el scurtcircuitază, în intervalele de conducție, motorul (inclusiv bobina de netezire înseriată cu motorul), închiderea curentului realizându-se prin dioda  $D_3$ . În intervalele de blocare a lui  $T_2$ , energia acumulată în inductanțele mașinii și bobinei de netezire este cedată bateriei prin dioda  $D_2$  (frânare recuperativă) sau - dacă se comandă intrarea în conducție a tranzistorului  $T_f$  - rezistenței de frânare  $R_f$  (frânare reostatică); în ambele cazuri, la închiderea curentului contribuie, din nou, dioda  $D_3$ .

Pentru toate schemele prezentate, comanda în viteză a motorului de c.c. se face conform schemei bloc din Fig. 2.21. Sistemul necesită, deci, măsurarea vitezei prin intermediul unui tahogenerator TG și a curentului rotoric prin intermediul unui traductor de curent TC.

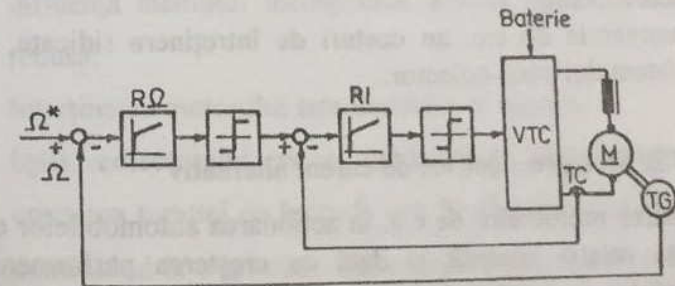


Fig. 2.21. Schemă bloc pentru comanda unui motor de c.c.

Referința de viteză  $\Omega^*$  este comparată cu viteza reală  $\Omega$ , iar eroarea de viteză este prelucrată de un regulator PI ( $R\Omega$ ). Ieșirea regulatorului de viteză reprezintă intrare de referință (cu limitare bilaterală) pentru un regulator de curent RI. Acesta din urmă comandă VTC, pentru a stabili valoarea necesară a tensiunii aplicate motorului.

De remarcat că, în esență, sistemul de comandă al unui motor de c.c. este simplu, ieftin și cu un randament foarte ridicat. Însă, la alegerea motorului de tracțiune al unui automobil electric trebuie să se țină seama și de unele dezavantaje generale ale motoarelor de c.c.:

- capacitatea de supraîncărcare (în curent, respectiv în cuplu) a motorului este limitată de comutație, mai ales la viteze ridicate; în cazuri speciale, însă, pot fi proiectate motoare cu supracurenți de scurtă durată de (5-10)  $I_N$ ;
- rotorul motorului de c.c. reprezintă principala sursă de căldură, iar colectorul este, de regulă, componenta cea mai solicitată termic; ca urmare, s-ar putea ca acestea să nu fie suficient de bine răcite;
- capacitatea de supraturare a motorului este relativ limitată, datorită comutației și faptului că rotorul (bobinat) și colectorul sunt părți constructive nu foarte rezistente, din punct de vedere mecanic, la viteze ridicate; cu toate acestea, pot fi atinse turații maxime de cca 6000 rot/min;
- motoarele de c.c. (mai ales cele cu magneți permanenți) sunt sensibil mai scumpe decât motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit;
- motoarele de c.c. au costuri de întreținere ridicate, datorită sistemului perii-colector.

### 2.1.2.2. Motoare electrice de curent alternativ

Utilizarea motoarelor de c.a. în acționarea automobilelor electrice este de dată relativ recentă, o dată cu creșterea performanțelor și scăderea prețului convertoarelor statice de frecvență. Motoarele de c.a. folosite sunt:

- motorul asincron trifazat;
- motorul sincron trifazat.

#### A. Motorul asincron trifazat

Se utilizează motorul trifazat cu rotorul în scurtcircuit. Reprezentarea schematică a acestuia este dată în Fig. 2.22. La alimentarea de la convertoare statice de frecvență, înfășurarea statorică se conectează, de regulă, în stea.

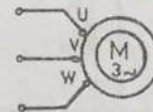


Fig. 2.22. Reprezentarea schematică a motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit.

Motorul are o serie de avantaje care îl fac atractiv pentru acționarea automobilelor electrice:

- este un motor relativ simplu din punct de vedere constructiv și tehnologic;
- este robust și ieftin (prețul lui poate ajunge la cca 50% din prețul unui motor echivalent de c.c.);
- influența mediului înconjurător asupra motorului este foarte redusă;
- întreținerea motorului este deosebit de ușoară;
- lipsa colectorului și a contactelor alunecătoare permite creșterea turației de lucru la cca 8000-10000 rot/min, aceasta conducând la o greutate mai redusă a motorului (cca 85% din greutatea unui motor de c.c. echivalent).

Motorul asincron pune, însă, aceleași probleme de încălzire ca și motorul de c.c., rotorul său fiind o importantă sursă de căldură și dificil de răcit, ceea ce împiedică scăderea mai spectaculoasă a greutateii.

Variabilele de comandă ale motorului asincron sunt: tensiunea statorică  $U_1$  și frecvența statorică  $f_1$ . Există mai multe strategii de comandă și, pentru explicarea acestora (a celor mai importante), sunt necesare câteva precizări.

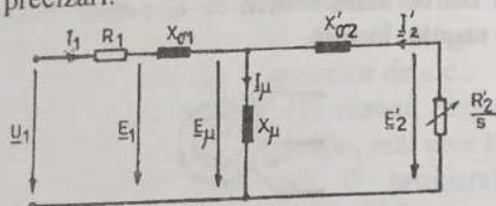


Fig. 2.23. Schema echivalentă pe o fază a motorului asincron.

În Fig. 2.23, este prezentată schema echivalentă pe o fază a motorului. S-au folosit notațiile cunoscute:  $R_1$ ,  $X_{\sigma 1}$  - rezistența și reactanța de dispersie a înfășurării statorice;  $R_2'$ ,  $X_{\sigma 2}'$  - rezistența și reactanța de dispersie a înfășurării rotorice, raportate la înfășurarea statorică;  $X_\mu$  - reactanța de magnetizare;  $s$  - alunecarea, definită ca:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \quad (2.13)$$

unde:

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} \quad (2.14)$$

este viteza unghiulară de sincronism (a câmpului învârtitor),

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.15)$$

este pulsația statorică,  $p$  - numărul perechilor de poli ai mașinii, iar  $\Omega$  - viteza unghiulară a rotorului.

Se mai au în vedere și următoarele relații:

$$\begin{aligned} X_{\sigma 1} &= \omega_1 L_{\sigma 1} \\ X_\mu &= \omega_1 L_\mu \\ X_{\sigma 2}' &= \omega_1 L_{\sigma 2}' \end{aligned} \quad (2.16)$$

și

$$\begin{aligned} \underline{E}_1 &= j\omega_1 \underline{\Psi}_1 \\ \underline{E}_\mu &= jX_\mu \underline{I}_\mu = j\omega_1 \underline{\Psi}_\mu \\ \underline{E}'_2 &= -\frac{R_2'}{s} \underline{I}'_2 = j\omega_1 \underline{\Psi}'_2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

în care  $\underline{\Psi}_1$ ,  $\underline{\Psi}_\mu$  și  $\underline{\Psi}'_2$  sunt fazorii fluxurilor totale statoric, util (din întrefier) și, respectiv, rotoric.

Pornind de la definiția alunecării (2.13), se obține de asemenea:

$$s = f_2 / f_1 \quad (2.18)$$

unde  $f_2$  este frecvența rotorică, încât, cu (2.13), (2.14), (2.15) și (2.18), rezultă:

$$f_2 = f_1 - \frac{p}{2\pi} \Omega = f_1 - f \quad (2.19)$$

unde:

$$f = \frac{p}{2\pi} \Omega \quad (2.20)$$

este o frecvență echivalentă vitezei rotorului.

Cuplul electromagnetic dezvoltat de motor este:

$$M = \frac{3R_2' I_2'^2}{s\Omega_1} = \frac{3pR_2' I_2'^2}{s\omega_1} \quad (2.21)$$

Folosind schema echivalentă din Fig. 2.23 și ținând seama că  $L_{\sigma 1} \ll L_{\mu}$ , se poate stabili pentru  $I_2'$  expresia:

$$I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}} \quad (2.22)$$

încât, cu (2.21) și (2.22), se obține:

$$M \approx \frac{3pR_2' U_1^2}{s\omega_1 [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2]} \quad (2.23)$$

Cuplul electromagnetic (2.23) are un maxim (cuplu de răsturnare):

$$M_m = \frac{3pU_1^2}{2\omega_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}]} \quad (2.24)$$

pentru alunecarea critică:

$$s_{cr} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}} \quad (2.25)$$

Din (2.14) rezultă că, prin modificarea frecvenței statorice  $f_1$ , se modifică viteza de sincronism  $\Omega_1$  și, o dată cu aceasta, viteza rotorică  $\Omega$ .

O strategie de modificare a frecvenței  $f_1$  între zero și o frecvență de bază  $f_{1b}$  este aceea la **flux statoric constant**, care constă în a menține

constantă valoarea maximă a fluxului statoric  $\Psi_{1m} = \sqrt{2}\Psi_1 = \text{const.}$  (deci,  $\Psi_1 = \text{const.}$ ). Aceasta echivalează, ținând seama de prima ecuație din (2.17) și de (2.15), cu a menține  $E_1/f_1 = \text{const.}$  sau - neglijând rezistența statorică ( $R_1 \approx 0$ ) - a opera la  $U_1/f_1 \approx \text{const.}$  Deci, o dată cu creșterea lui  $f_1$  trebuie crescută  $U_1$ , astfel încât, atunci când se atinge frecvența de bază  $f_{1b}$ , tensiunea să atingă valoarea nominală  $U_{1N}$ . La depășirea lui  $f_{1b}$ , dacă nu se dorește a avea o supratensionare, aceasta afectând - în mod deosebit - convertorul static de frecvență, trebuie să se mențină  $U_1 = U_{1N} = \text{const.}$

Cu  $R_1 \approx 0$  și având în vedere (2.15), (2.16) și (2.18), expresia (2.23) a cuplului electromagnetic se poate scrie:

$$M = \frac{3pR_2' f_2}{2\pi [R_2'^2 + 4\pi^2 f_2^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')^2]} \left( \frac{E_1}{f_1} \right)^2 \quad (2.26)$$

iar expresia (2.24) a cuplului de răsturnare devine:

$$M_m = \frac{3p}{8\pi^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')^2} \left( \frac{E_1}{f_1} \right)^2 \quad (2.27)$$

Rezultă că, pentru  $E_1/f_1 = \text{const.}$ , cuplul  $M$  nu depinde decât de frecvența rotorică  $f_2$ , iar cuplul de răsturnare  $M_m$  rămâne constant.

După depășirea frecvenței de bază  $f_{1b}$ , așa cum s-a spus, se menține  $U_1 = U_{1N} = \text{const.}$ , deci,  $E_1 \approx \text{const.}$ , ceea ce face ca fluxul  $\Psi_1$  să scadă (slăbire de câmp), practic, invers proporțional cu  $f_1$ , iar cuplul de răsturnare - invers proporțional cu  $f_1^2$ .

În consecință, familia caracteristicilor mecanice ale motorului, în cazul adoptării strategiei menționate, arată ca în Fig. 2.24.a (se operează pe porțiunile cuasiliniare ale caracteristicilor, ele asigurând stabilitatea funcționării). Aceasta permite asigurarea punctelor caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric (Fig.2.2) atât timp cât aceste puncte au ordonatele inferioare cuplurilor de răsturnare de pe caracteristicile mecanice ale motorului. Se observă că, peste anumite viteze, nu mai pot fi asigurate porțiunile de putere constantă ale caracteristicilor de tracțiune (mai întâi - cele de putere maximă și apoi - nici măcar cele de putere nominală), ceea ce nu se întâmplă în cazul motoarelor de c.c. Ca urmare, la motorul asincron comandat după această strategie, există constrângeri care nu sunt întâlnite la alte tipuri de motoare și trebuie luate în considerare la alegerea și dimensionarea motorului asincron pentru acționarea automobilelor electrice.

Dacă se are în vedere faptul că rezistența statorică  $R_1$  nu este nulă, rezultă că, în domeniul de frecvențe în care se menține  $\Psi_1 = \text{const.}$ , tensiunea  $U_1$  nu trebuie modificată proporțional cu frecvența  $f_1$ , ci trebuie să aibă o dependență cu alura prezentată în Fig. 2.24.b.

Reglajul poate fi făcut scalar sau vectorial. În reglajul scalar se asigură modificarea modului mărimilor de comandă - de exemplu, valoarea efectivă a tensiunii  $U_1$  se reglează după legea dată de curba din Fig. 2.24.b.

În reglajul vectorial, se urmăresc, în esență, valorile instantanee ale mărimilor de comandă, ceea ce - pentru o frecvență dată  $f_1$  - se reduce la a urmări modulul și faza mărimilor de comandă, deci a urmări fazorii (vectorii) reprezentativi ai acestor mărimi. Prin aceasta, se obțin performanțe dinamice și energetice superioare celor din cazul reglajului scalar. Deși implică scheme mai complexe, aceste avantaje fac ca reglajul vectorial să prezinte interes și pentru automobilele electrice.

De exemplu, în cazul reglajului vectorial cu orientare după câmpul statoric, luând ca origine de fază fluxul statoric  $\underline{\Psi}_1 = \Psi_1$ , din schema echivalentă a motorului (Fig. 2.23) - utilizând și relațiile (2.15)...(2.18) -, rezultă pentru fazorul curentului statoric expresia:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z} - R_1} = \Psi_1 \frac{R_2' + j \cdot 2\pi f_2 (L_{\sigma 2}' + L_{\mu})}{R_2' (L_{\sigma 1} + L_{\mu}) + j \cdot 2\pi f_2 [L_{\sigma 1} L_{\mu} + L_{\sigma 2}' (L_{\sigma 1} + L_{\mu})]} \quad (2.28)$$

unde:

$$\underline{Z} = R_1 + jX_{\sigma 1} + \frac{jX_{\mu} [(R_2' / s) + jX_{\sigma 2}']}{(R_2' / s) + j(X_{\sigma 2}' + X_{\mu})} \quad (2.29)$$

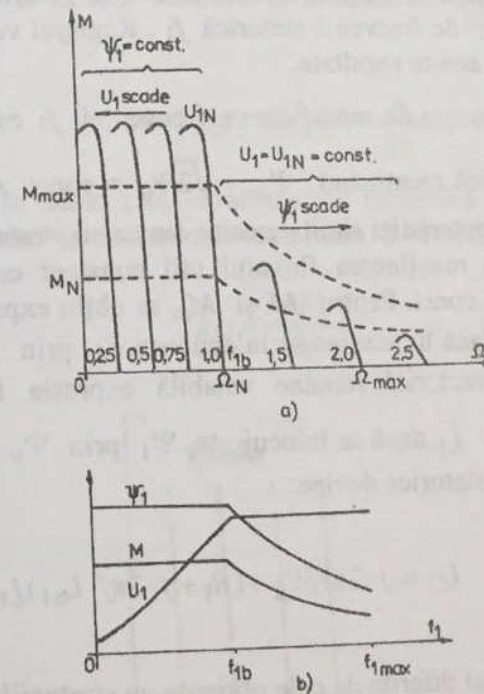


Fig. 2.24. a) Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului asincron, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric; b) Dependențele de frecvența statorică  $f_1$  ale fluxului statoric  $\Psi_1$ , cuplului dezvoltat de motor  $M$  și tensiunii statorice  $U_1$ , în cazul strategiei adoptate.

Deci, la flux statoric  $\Psi_1 = \text{const.}$ , curentul statoric  $\underline{I}_1$  este o funcție complexă numai de frecvența rotorică  $f_2$ , adică - având în vedere (2.26) - numai de cuplul  $M$ . Partea reală a lui  $\underline{I}_1$  determină fluxul  $\Psi_1$ , iar partea imaginară determină cuplul  $M$ .

Tensiunea statorică

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 = j \cdot 2\pi f_1 \Psi_1 + R_1 \underline{I}_1 \quad (2.30)$$

este, însă, o funcție complexă atât de frecvența rotorică  $f_2$  (decu, de cuplul  $M$ ), cât și de frecvența statorică  $f_1$ . Reglajul vectorial va trebui să țină seama de aceste rezultate.

O altă strategie de modificare a frecvenței  $f_1$  este aceea la *flux util constant*, adică menținând  $\Psi_{\mu m} = \sqrt{2} \Psi_{\mu} = \text{const.}$  Aceasta conduce la rezultate și caracteristici similare celor din cazul strategiei precedente, cu observația că menținerea fluxului util constant echivalează cu a menține  $E_{\mu} / f_1 = \text{const.}$  Pentru  $M$  și  $M_m$  se obțin expresii similare cu (2.26) și (2.27), dacă în acestea se înlocuiește  $E_1$  prin  $E_{\mu}$  și  $L_{\sigma 1} = 0$ . Pentru reglajul vectorial rămâne valabilă expresia finală (2.28) a curentului statoric  $\underline{I}_1$  dacă se înlocuiește  $\Psi_1$  prin  $\Psi_{\mu}$  și  $L_{\sigma 1} = 0$ , iar expresia tensiunii statorice devine:

$$\underline{U}_1 = j \cdot 2\pi f_1 \Psi_{\mu} + (R_1 + j \cdot 2\pi f_1 L_{\sigma 1}) \underline{I}_1 \quad (2.31)$$

Rezultate total diferite de cele obținute cu strategiile de mai sus se obțin dacă modificarea frecvenței  $f_1$  se face la *flux rotoric constant* ( $\Psi_{2m} = \sqrt{2} \Psi_2 = \text{const.}$ ). În acest caz, ultima ecuație din (2.17) conduce la:

$$\underline{I}'_2 = -j \frac{2\pi \Psi'_2}{R'_2} f_2 = -j k f_2 \quad (2.32)$$

unde:

$$k = \frac{2\pi \Psi'_2}{R'_2} \quad (2.33)$$

Valoarea efectivă  $I'_2 = k f_2$ , introdusă în (2.21), cu considerarea relațiilor (2.18) și (2.19), conduce la următoarea expresie a cuplului motorului:

$$M = k_M f_2 = k_M \left( f_1 - \frac{p}{2\pi} \Omega \right) \quad (2.34)$$

care arată că, în acest caz, caracteristica mecanică a motorului este liniară, nemaexistând un cuplu de răsturnare. S--a notat:

$$k_M = \frac{3pR'_2}{2\pi} k^2 \quad (2.35)$$

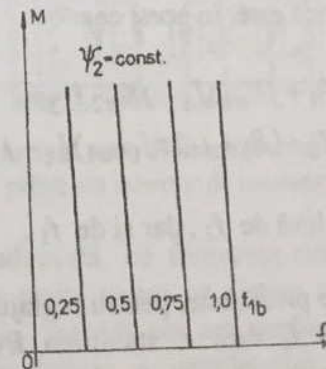


Fig. 2.25. Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului asincron, pentru comanda în frecvență statorică, la flux rotoric  $\Psi_2$  constant.

Familia caracteristicilor mecanice ale motorului la modificarea frecvenței statorice după această strategie, în domeniul  $f_1 \in [0, f_{1b}]$ , este prezentată în Fig. 2.25. Ea are o alură asemănătoare cu a motorului de c.c. cu excitație separată la modificarea tensiunii aplicate indusului. După atingerea tensiunii statorice nominale  $U_{1N}$ , se adoptă, însă, același procedeu ca și în cazul celorlalte strategii, adică: la creșterea frecvenței peste  $f_{1b}$  se menține  $U_1 = U_{1N} = \text{const.}$ , obținându-se, în acest domeniu de frecvențe, caracteristici identice cu cele prezentate anterior.

Pentru reglajul vectorial, este utilă cunoașterea curentului  $\underline{I}_1$ , care - având în vedere schema echivalentă (Fig. 2.23) și relația (2.32) - are expresia:

$$\underline{I}_1 = -\frac{1}{jX_\mu} \left[ \frac{R'_2}{s} + j(X'_{\sigma 2} + X_\mu) \right] \underline{I}'_2 = \frac{\Psi'_2}{L_\mu} \left( 1 + j \cdot 2\pi f_2 \frac{L'_{\sigma 2} + L_\mu}{R'_2} \right) \quad (2.36)$$

care, ca și în cazurile precedente, este o funcție complexă doar de frecvența rotorică  $f_2$ , deci de cuplul  $M$ . Se remarcă, în acest caz, separarea componentei lui  $\underline{I}_1$  (partea reală) care determină fluxul  $\Psi_1$ , de componenta (partea imaginară) care determină cuplul  $M$ .

Tensiunea statorică este, în acest caz:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{E}'_2 + (R_1 + jX_{\sigma 1})\underline{I}_1 - jX'_{\sigma 2}\underline{I}'_2 = \\ &= j \cdot 2\pi f_1 \Psi'_2 + (R_1 + j \cdot 2\pi f_1 L_{\sigma 1})\underline{I}_1 - j \cdot 2\pi f_1 L'_{\sigma 2}\underline{I}'_2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

deci, tot o funcție complexă de  $f_2$ , dar și de  $f_1$ .

În toate strategiile prezentate, pentru reglajul la un cuplu  $M$  dat - deci, frecvență rotorică  $f_2$  dată -, stabilirea frecvenței statorice  $f_1$  necesită cunoașterea vitezei  $\Omega$  a motorului, conform cu (2.19). Pentru aceasta, se poate folosi un traductor de viteză, dar el poate reduce fiabilitatea sistemului. Actualmente, există metode de estimare a vitezei

fără traductor, care necesită un echipament de calcul mai complex, ce poate fi, însă, justificat prin creșterea fiabilității.

De asemenea, pentru reglaj este necesară măsurarea fluxului ( $\Psi_1$ ,  $\Psi_\mu$  sau  $\Psi_2$ ), ceea ce se poate face cu ajutorul unor senzori Hall sau al unor bobine-sondă; însă și acestea scad fiabilitatea sistemului. De aceea, se preferă calculul acestora pe baza măsurării mărimilor de circuit (tensiuni, curenți) și a utilizării ecuațiilor prezentate mai sus.

Modificarea frecvenței statorice a motorului asincron se realizează cu ajutorul unor invertoare cu frecvență de ieșire reglabilă. Acestea pot fi invertoare de tensiune sau invertoare de curent.

În Fig. 2.26, este prezentată schema de principiu pentru alimentarea motorului printr-un inverter de tensiune. Comutatoarele statice CS pot fi realizate cu aceleași tipuri de elemente semiconductoare comandabile ca și în cazul VTC; pentru automobilele electrice actuale, cele mai indicate sunt tranzistoarele IGBT și MOSFET. Diodele D sunt diode de regim liber (numite și diode de recuperare).

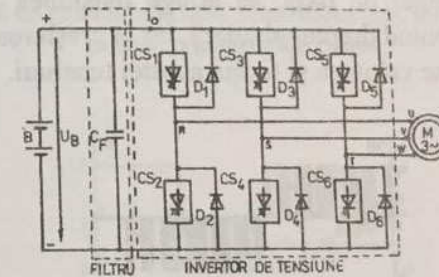


Fig. 2.26. Schemă de principiu pentru alimentarea unui motor asincron trifazat printr-un inverter de tensiune.

Prin comanda adecvată, cu frecvență ridicată, a comutatoarelor statice, motorului i se poate aplica un sistem trifazat de tensiuni între faze de amplitudine  $U_B$ , metoda cea mai performantă de comandă fiind aceea a modulării în lățime a impulsurilor (PWM), după o lege sinusoidală. În acest caz, tensiunea între faze - de exemplu,  $u_{RS}$  - are forma unor impulsuri a căror lățime este variabilă, în cadrul fiecărei

semiperioade  $T/2$  a tensiunii, după o lege sinusoidală (Fig. 2.27.a). Unda de tensiune are o fundamentală (reprezentată cu linie întreruptă) - de frecvență  $f_1 = 1/T$  - și o serie de armonice superioare. Față de cazul mai simplu, al unei unde dreptunghiulare (Fig. 2.27.b), conținutul de armonice este mult mai redus și se poate face astfel încât să nu apară decât armonice superioare de un ordin mai mare. Eliminarea, în acest fel, a armonicelor de ordin scăzut conduce la performanțe mult mai bune ale motorului (cupluri parazite neglijabile, randament mai bun), aceste performanțe fiind acum determinate, practic, numai de fundamentală tensiunii. În plus, prin modificarea factorului de umplere  $a = t_1/(t_1 + t_2)$  al impulsurilor, se obține și o modificare a amplitudinii fundamentalei tensiunii. În plus, prin modificarea frecvenței  $f_1$  a tensiunii realizându-se prin modificarea perioadei  $T$  (în cazul din Fig. 2.27.b, inverterul poate modifica numai  $f_1$ , pentru modificarea amplitudinii tensiunii fiind necesar un VTC, dispus înaintea inverterului). De regulă, modularea în lățime a impulsurilor se aplică pentru domeniul de frecvențe  $f_1 \in [0, f_{1b}]$ . La atingerea frecvenței de bază, se atinge tensiunea nominală, unda acestei tensiuni devenind dreptunghiulară, iar la creșterea în continuare a frecvenței, se menține valoarea și forma acestei tensiuni.

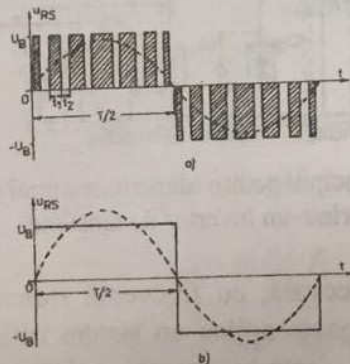


Fig. 2.27. Formele de undă ale tensiunii între două faze, la ieșirea inverterului din Fig. 2.26: a) cu modularea în lățime a impulsurilor (PWM), după o lege sinusoidală; b) fără modulare.

Inverterul de tensiune permite inversarea sensului curentului pe partea de c.c. În consecință, este posibilă realizarea, fără dificultăți, a frânării recuperative a motorului. Pentru aceasta, se comandă comutatoarele statice CS din Fig. 2.26 astfel încât frecvența  $f_1$  a tensiunii statorice să conducă la o viteză de sincronism  $\Omega_1$  inferioară vitezei  $\Omega$  a rotorului, mașina trecând astfel în regim de generator. Energia furnizată de aceasta este transferată bateriei, prin intermediul redresorului format de diodele de recuperare D.

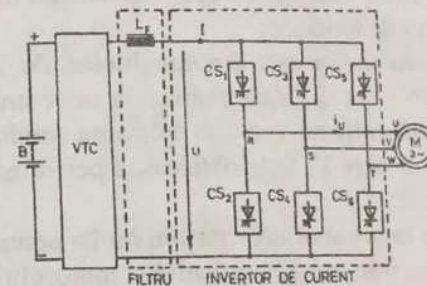


Fig. 2.28. Schemă de principiu pentru alimentarea unui motor asincron trifazat printr-un inverter de curent.

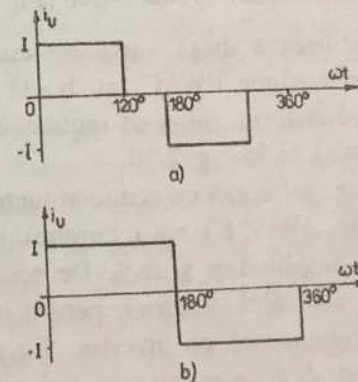


Fig. 2.29. Forme de undă ale curentului pe o fază a motorului asincron, ce pot fi obținute cu schema din Fig. 2.28: a) curent dreptunghiular de  $120^\circ$ ; b) curent dreptunghiular de  $180^\circ$ .

Anumite avantaje ale funcționării motorului asincron alimentat de la o sursă de curent (printre cele mai importante fiind acela al unui răspuns dinamic foarte bun) pot să impună utilizarea unui invertor de curent pentru comanda motorului. În Fig. 2.28, este prezentată schema de principiu în cazul folosirii unui invertor clasic de curent. Aceasta are o serie de dezavantaje, care o fac inadecvată în cazul automobilelor electrice:

- are drept filtru de intrare în invertor o bobină cu miez de fier, care este mult mai grea decât condensatorul-filtru din cazul invertorului de tensiune;
- curentul prin motor este dreptunghiular, de  $120^\circ$  (Fig. 2.29.a) sau de  $180^\circ$  (Fig. 2.29.b), realizarea unor impulsuri de curent de frecvență ridicată (pentru aplicarea modulației în lățime a impulsurilor, care să îmbunătățească performanțele motorului) fiind dificilă;
- curentul de la intrarea invertorului nu își poate schimba sensul, încât, pentru frânarea recuperativă a motorului, este necesar ca între VTC și bobina-filtru să se prevadă un sistem de inversare (inversor cu contacte electromecanice sau statice); o dată cu inversarea, trebuie ca și schema VTC să fie adusă la cea corespunzătoare frânării recuperative (Fig. 2.15).

De aceea, se utilizează drept sursă de curent o schemă care conține un invertor de tensiune PWM, cu buclă de reglare a valorii instantanee a curentului statoric, folosind regulatoare cu histerezis RH (regulatoare bipoziționale), ca în Fig. 2.30.

Dacă invertorul se realizează cu semiconductoare cu frecvență de comutație ridicată (IGBT, MOSFET etc.), curentul statoric al motorului poate fi ajustat rapid în amplitudine și fază. De aceea, o astfel de sursă de curent este ideală la controlul vectorial, pentru realizarea sistemelor performante cu un singur motor pe invertor. Ea asigură o formă de curent aproape sinusoidală (conținutul de armonice fiind legat de frecvența de comutație) și elimină dezavantajele menționate ale invertorului clasic de curent, având, în plus, următoarele avantaje:

- ripple mic de curent și de cuplu, pe toată gama de reglare a vitezei;
- controlul riguros al amplitudinii curentului;
- compensează efectul modificării rezistenței statorice  $R_1$  și a inductanței de dispersie statorice  $L_{\sigma 1}$  asupra cuplului și fluxului motorului asincron.

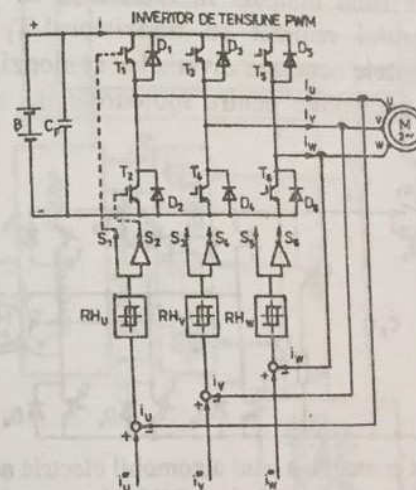


Fig. 2.30. Schemă de alimentare a unui motor asincron trifazat printr-un invertor de tensiune PWM (cu tranzistoare IGBT), controlat în curent.

În toate schemele cu invertoare, pentru realizarea schimbării sensului de rotație a motorului nu este necesară inversarea legăturilor la două faze ale motorului - deci, prevederea unor contacte de inversare pe partea de forță a schemei, așa cum se întâmplă în cazul alimentării motorului de la o rețea de c.a. clasică -, fiind suficient ca, din blocul de comandă a comutatoarelor statice ale invertoarelor, să se modifice succesiunea comenzilor acestora, încât sistemul trifazat de tensiuni aplicate motorului să se schimbe dintr-unul direct în unul invers.

În Fig. 2.31, este prezentată schema de principiu a unui automobil electric acționat cu motor asincron trifazat și invertor de tensiune, cu tranzistoare IGBT, cu modulare în lățime a impulsurilor (PWM).

Contactorul de linie  $c_1$  este șuntat de o rezistență de valoare relativ ridicată  $R_{pi}$  - rezistență de preîncărcare a condensatorului de filtrare  $C_F$ . Schema permite realizarea regimurilor de tracțiune (înainte și înapoi) și de frânare electrică (înainte și înapoi). Se poate asigura frânarea recuperativă, comandând inverterul astfel încât  $\Omega > \Omega_1$ , dar și frânarea reostatică - atunci când bateria este complet încărcată -, energia furnizată de mașină fiind disipată în rezistența de frânare  $R_f$  prin intermediul chopperului realizat cu tranzistorul  $T_f$ . Schema poate fi completată cu elementele necesare diverselor comenzi, folosind modelul oferit de schemele prezentate pentru motoarele de c.c. (Fig. 2.17 și 2.19).

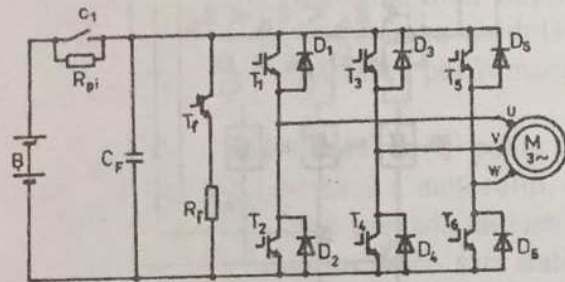


Fig. 2.31. Schema de principiu a unui automobil electric acționat cu motor asincron trifazat și inverter de tensiune PWM (cu tranzistoare IGBT).

În Fig. 2.32, este prezentată schema bloc a unui sistem de comandă posibil a fi utilizat în acționarea unui automobil electric, în care sunt folosite bucle de cuplu și de flux, modificarea frecvenței statorice realizându-se la flux statoric constant. Măsurarea directă a curenților și tensiunilor statorice ale motorului este posibilă și folosită pentru a calcula fluxul statoric și cuplul. Eroarea de cuplu, rezultată din compararea valorii calculate cu valoarea impusă a cuplului, este folosită pentru a specifica valoarea impusă a frecvenței rotorice  $f_2^*$ . Aceasta din urmă se adună cu valoarea  $f$  dată de tahogeneratorul TG [conform relațiilor (2.19) și (2.20)], pentru a determina frecvența statorică necesară  $f_1$ . Fluxul este comparat cu valoarea impusă; eroarea, împreună cu  $f_2^*$  - prin intermediul blocului EX [în care se efectuează calcule pe baza expresiei (2.28)] - determină valoarea impusă a amplitudinii

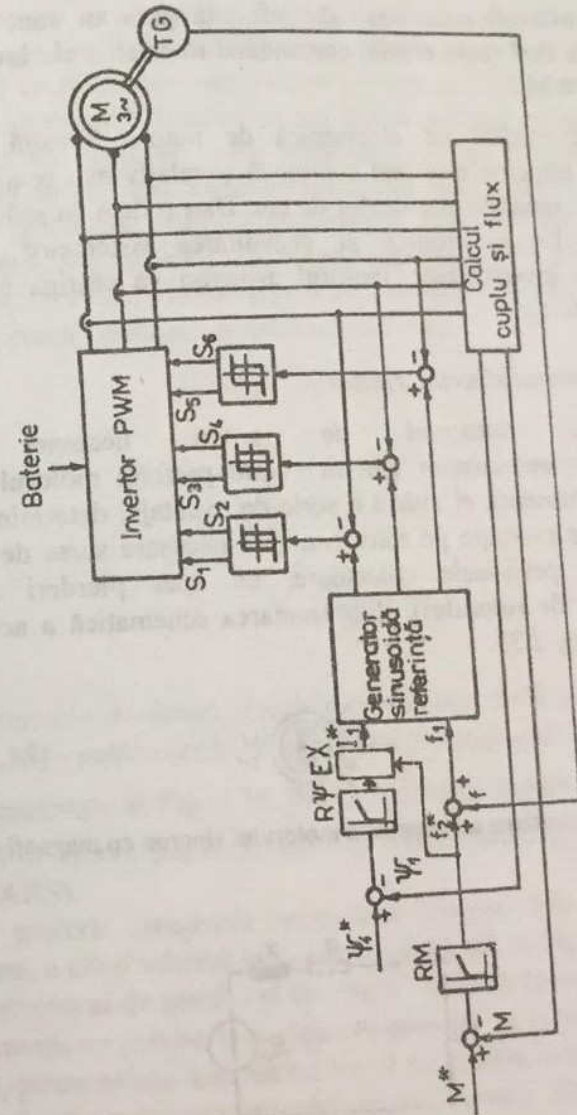


Fig. 2.32. Schemă bloc pentru comanda unui motor asincron trifazat.

curentului  $I_1^*$ , ca referință pentru un generator de undă sinusoidală. Curenții trifazați sinusoidali de referință generați sunt comparați cu curenții de fază reali, erorile comandând tranzistoarele inverterului prin tehnica PWM.

Este evident că electronica de putere folosită în comanda motorului asincron este mai complexă și relativ mai scumpă decât cea folosită în comanda motoarelor de c.c. Dar, o dată cu scăderea prețului componentelor electronice și dezvoltarea sistemelor integrate de comandă a inverteoarelor, motorul asincron va câștiga competiția cu motoarele de c.c.

### B. Motorul sincron trifazat

Pentru domeniul de puteri necesare acționării automobilelor/autobuzelor electrice, este preferat motorul sincron cu magneți permanenți, el având o serie de avantaje, determinate de lipsa înfășurării de excitație pe rotor (nu sunt necesare sursa de excitație și sistemul de perii-inele colectoare, nu apar pierderi și încălziri suplimentare ale rotorului). Reprezentarea schematică a acestui motor este dată în Fig. 2.33.

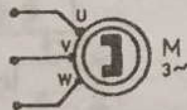


Fig. 2.33. Reprezentarea schematică a motorului sincron cu magneți permanenți.

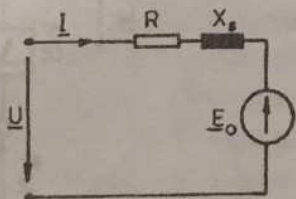


Fig. 2.34. Schema echivalentă pe o fază a motorului sincron cu magneți permanenți (fără anizotropie magnetică).

Statorul motorului este asemănător cu al motorului asincron trifazat, iar rotorul nu are nici o înfășurare, fiind prevăzut cu magneți permanenți (ca și în cazul motorului de c.c., performanțele cele mai bune le au magneții cu pământuri rare); există diverse posibilități tehnologice de realizare a unui astfel de rotor, cu sau fără anizotropie magnetică.

În cele ce urmează, vom considera, pentru simplitate, cazul motorului fără anizotropie magnetică. Schema echivalentă pe o fază a acestuia este prezentată în Fig. 2.34, notațiile fiind cele cunoscute:  $R$  - rezistența înfășurării statorice;  $X_s$  - reactanța sincronă a mașinii;  $E_o$  - tensiunea electromotoare indusă pe o fază statorică de fluxul de excitație  $\Psi_o$ . Ecuația corespunzătoare acestei scheme este:

$$\underline{U} = \underline{E}_o + R\underline{I} + jX_s\underline{I} \quad (2.38)$$

unde:

$$\underline{E}_o = j\omega\underline{\Psi}_o \quad (2.39)$$

și:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.40)$$

Diagramele de fazori simplificate (pentru  $R=0$ ) corespunzătoare ecuației (2.38) - pentru două valori diferite ale unghiului  $\gamma$  al curentului  $\underline{I}$  - sunt prezentate în Fig. 2.35. Poziția rotorului față de stator este dată de unghiul  $\theta$  dintre axa de referință rotorică (ARR) și axa de referință statorică (ARS).

Se preferă integrarea motorului sincron într-un sistem de autopilotare, a cărui schemă bloc este reprezentată în Fig. 2.36.

Traductorul de poziție și de viteză TPV dă blocului de comandă BC informații cu privire la poziția rotorului  $\theta$  și la viteza acestuia  $\Omega$  (eventual, poate exista doar un traductor de poziție, urmând ca viteza să fie obținută prin monitorizarea poziției, sau invers). Ca urmare, BC dă semnale de comandă inverterului INV, dependente de poziția și viteza rotorului, stabilind astfel momentele de închidere și deschidere ale



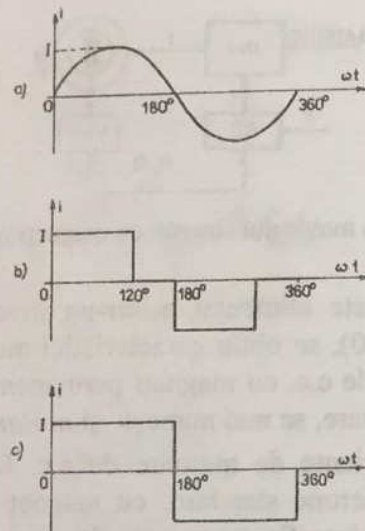


Fig. 2.37. Forme de undă ale curentului de fază al motorului de c.c. fără perii:  
a) curent sinusoidal; b) curent dreptunghiular de 120°; c) curent dreptunghiular de 180°.

În cazul unui automobil electric, problema se pune astfel: pentru a crește autonomia sa, trebuie solicitată bateria cât mai puțin pentru a obține o aceeași forță de tracțiune - deci, un același cuplu dezvoltat de motor. Aceasta înseamnă că trebuie aleasă soluția care, la o aceeași solicitare  $I$  a bateriei, asigură cea mai mare valoare medie  $I_{med}$  a curentului statoric al motorului:

Comparând valorile medii din Fig. 2.37.a:

$$I_{med} = \frac{2}{\pi} I \quad (2.44)$$

din Fig. 2.37.b:

$$I_{med} = \frac{2}{3} I \quad (2.45)$$

și din Fig. 2.37.c:

$$I_{med} = I \quad (2.46)$$

rezultă că aceasta din urmă constituie cea mai bună soluție pentru un automobil electric.

La valori date pentru  $\Psi_0$  și  $I_{med}$ , cuplul electromagnetic variază, în funcție de unghiul  $\gamma$  al curentului, ca în Fig. 2.38, domeniul  $\gamma \in [0, 180^\circ]$  corespunzând funcționării mașinii ca motor, iar domeniul  $\gamma \in [0, -180^\circ]$  - funcționării ca generator (frână electrică). Trecerea dintr-un domeniu în altul se face simplu, prin schimbarea semnului unghiului  $\gamma$  impus blocului de comandă BC din Fig. 2.36.

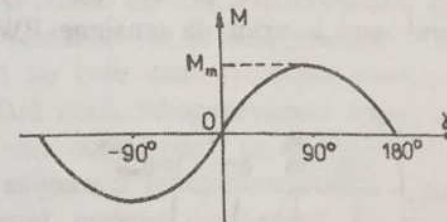


Fig. 2.38. Dependența  $M(\gamma)$  a cuplului motorului sincron de unghiul curentului.

Motorul dezvoltă un cuplu maxim pentru  $\gamma = 90^\circ$ . Dar, în acest caz, se pot obține numai factori de putere  $\cos\varphi$  inductivi (Fig. 2.35.a), ceea ce face ca indicatorii energetici ai motorului să nu fie foarte buni. Dacă  $\gamma > 90^\circ$ , se poate obține  $\cos\varphi = 1$  sau chiar  $\cos\varphi$  capacitiv (Fig. 2.35.b). De aceea, pentru îmbunătățirea indicatorilor energetici, se recomandă să se opereze la  $\gamma > 90^\circ$  [de regulă,  $\gamma \in (90^\circ, 110^\circ)$ ].

Traductorul de poziție rotorică poate fi realizat în diverse variante, cele mai utilizate fiind: traductoare cu efect Hall, traductoare optoelectrice, rezolvare, encodere numerice. Traductoarele simple, cu efect Hall sau optoelectrice, sunt adecvate pentru motorul cu curent dreptunghiular, care are comutări bruște de curent dintr-o fază statorică în alta. Într-un motor cu curent sinusoidal, însă, curentul de fază este o funcție sinusoidală de poziția rotorului, fiind necesar un encoder absolut sau un rezolver (sau alt traductor cu rezoluție ridicată) pentru a obține informația de poziție cu rezoluția necesară. În acest caz, traductorul cu

rezoluție ridicată determină o creștere însemnată a costului unui sistem cu curent sinusoidal.

Motorul cu curent dreptunghiular - având un traductor de poziție robust și ieftin, o logică de comandă simplă și performanțe ridicate - este, și din acest punct de vedere, motorul de c.c. fără perii preferat pentru acționarea unui automobil electric.

În Fig. 2.39, este prezentată familia caracteristicilor mecanice ale motorului de c.c. fără perii, având ca parametru tensiunea statorică de fază  $U$  - unica variabilă de comandă. După cum se remarcă, aceste caracteristici sunt similare celor realizate de motorul uzual de c.c. cu magneți permanenți (Fig. 2.9). Se preferă ca tensiunea  $U$  să fie modificată cu ajutorul unui invertor de tensiune PWM, controlat în curent (Fig. 2.30).

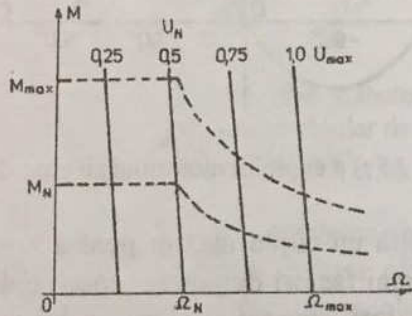


Fig. 2.39. Familia de caracteristici mecanice  $M(\Omega)$  ale motorului de c.c. fără perii, pentru realizarea caracteristicilor de tracțiune ale unui automobil electric.

Pentru un cuplu (curent) dat, viteza este determinată de tensiunea aplicată. Dacă tensiunea crește, viteza crește și ea, până când tensiunea atinge valoarea maximă  $U_{max}$  (în exemplul considerat:  $U_{max} \approx 2U_N$ ). Pentru  $U = U_{max}$ , este posibilă o ușoară creștere în continuare a vitezei, prin modificarea electronică a fazei curenților statorici, dar cuplul va avea o scădere rapidă. Această viteză maximă posibilă depinde de inductanța statorică, care - de obicei - are o valoare scăzută, datorită întrefierului mare și permeabilității magnetice mici a magneților permanenți; pe de altă parte, o astfel de inductanță scăzută este

favorabilă comutației curentului. Necesitatea supratensionării convertorului și motorului are aceleași consecințe ca și în cazul motorului uzual de c.c. cu magneți permanenți.

Schema bloc a sistemului de comandă a motorului de c.c. fără perii poate fi de tipul celei prezentate în Fig. 2.40. Motorul este alimentat printr-un invertor de tensiune PWM, controlat în curent. Comanda precisă a vitezei motorului se realizează printr-o schemă clasică de comandă cu dublă buclă - o buclă exterioară de viteză, cu factor mare de amplificare, și o buclă interioară de curent. Ca de obicei, valoarea și polaritatea mărimii de comandă impuse - viteza  $\Omega^*$  - reprezintă viteza și sensul de rotație dorite pentru motor. Acest semnal este comparat cu semnalul dat de tahogeneratorul TG pentru a furniza eroarea de viteză cu care sunt alimentate buclele de curent. Desigur, într-o acționare fără perii, tahogeneratorul folosit este și el fără perii. Bucla de curent este compensată, ca de obicei, printr-un regulator de viteză, pentru a asigura o funcționare stabilă. Ca și în acționarea cu motor de c.c. uzual, eroarea compensată reprezintă valoarea impusă pentru curentul - și, deci, cuplul - motorului. În Fig. 2.40, curenții impuși și curenții reali sunt comparați în buclele curenților de fază prin multiplexare, folosind dispozitivele MX. Informația de poziție necesară este obținută de la traductorul de poziție TP, montat pe arborele motorului. Eroarea de curent este folosită pentru a genera semnale de comandă pe porțile tranzistoarelor invertorului, care să determine micșorarea erorii de curent.

Sistemul de comandă asigură funcționarea în patru cadrane a motorului de c.c. fără perii.

Trecerea mașinii din regimul de motor în regimul de frânare recuperativă, pentru un sens de rotație dat, se face foarte simplu: atunci când se cere o scădere rapidă a vitezei, erorii negative de viteză îi va corespunde un cuplu de frânare - și, deci, o decelerare a motorului -, în timp ce energia furnizată de mașină pe durata frânării este cedată bateriei prin intermediul invertorului.

Schimbarea sensului de rotație a motorului se realizează prin comanda adecvată a tranzistoarelor invertorului (încât să se inverseze

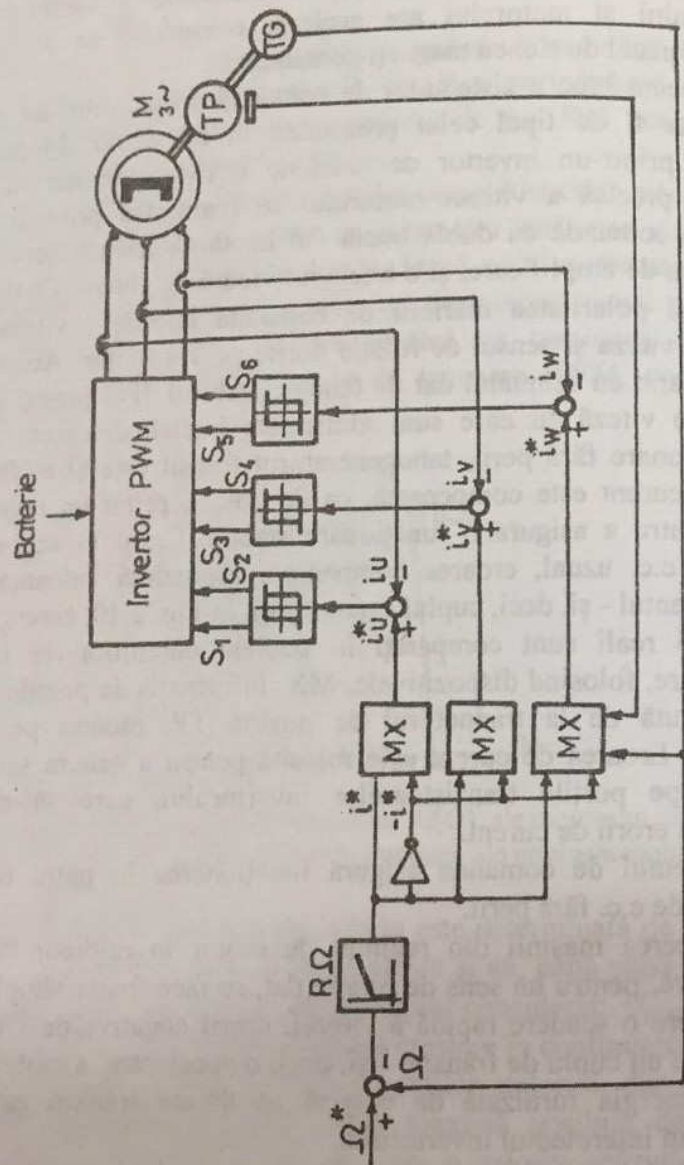


Fig. 2.40. Schemă bloc pentru comanda unui motor de c.c. fără perii.

sensul succesiunii fazelor statorice), ca urmare a schimbării polarității mărării de comandă impuse  $\Omega^*$ .

Comparând acest motor cu motoarele de c.c. și asincron, pot fi evidențiate următoarele:

- motorul de c.c. fără perii nu are nici o sursă de căldură pe rotor, spre deosebire de motorul de c.c. uzual și de motorul asincron, la care are loc o încălzire importantă a rotorului; evacuarea căldurii rotorice făcându-se dificil, la aceste din urmă motoare se impune o limitare severă a curenților rotorici; motorul de c.c. fără perii, având o construcție inversă față de a motorului de c.c. uzual, permite o creștere a căldurii disipate, deoarece înfășurările generatoare de căldură sunt apropiate de suprafața statorului, fiind astfel facilitată răcirea exterioară; ca urmare, motorul de c.c. fără perii are un curent nominal și un cuplu nominal mai mari (cu până la 30%) față de un motor de c.c. uzual de același gabarit;
- într-un motor de c.c. fără perii, sunt eliminate limitările de viteză și de putere, precum și cerințele de întreținere, impuse de prezența colectorului; în consecință, este posibilă atingerea unor viteze foarte mari și a unor vârfuri de cuplu mai ridicate;
- condițiile de răcire mai bune și lipsa colectorului fac ca, la aceeași putere, motorul de c.c. fără perii să aibă dimensiuni mai mici - deci, putere specifică mai mare - decât ale unui motor de c.c. uzual sau motor asincron; de exemplu, greutatea motorului de c.c. fără perii poate ajunge până la 70% din greutatea unui motor echivalent de c.c. uzual cu magneți permanenți;
- randamentul motorului de c.c. fără perii este superior celui din cazul motorului de c.c. uzual și al motorului asincron; pentru domeniul de puteri necesare acționării automobilelor electrice, el poate atinge 90-94% , pe o plajă largă de viteze; prețul motorului de c.c. fără perii este, însă, și el mai ridicat;
- la motorul de c.c. fără perii, spre deosebire de motorul asincron, variabilele de comandă sunt ușor accesibile, iar controlul acționării nu este afectat de variațiile parametrilor

motorului (rezistențe și inductanțe); în plus, pentru un cuplu dat, valoarea de vârf a curentului necesar este mai scăzută în cazul unui sistem cu curent dreptunghiular decât într-unul cu curent sinusoidal; ca urmare, solicitarea în curent a bateriei și a tranzistoarelor invertorului este mai scăzută.

### 2.1.2.3. Motoare electrice hibride

În categoria motoarelor electrice hibride, intră motoarele care pot funcționa cu curenți a căror variație în timp nu se încadrează nici în cea de tip "curent continuu", nici în cea de tip "curent alternativ". Cel mai promițător pentru acționarea automobilelor electrice îl constituie motorul cu reluctanță dublu variabilă, autopilotat (în engleză: Switched Reluctance Motor - SRM).

SRM are o construcție cu poli aparenti atât pe stator, cât și pe rotor (numere diferite de poli), statorul având înfășurări alimentate cu pulsuri de curent unipolare, iar rotorul fiind lipsit de surse de magnetizare. El nu trebuie, deci, confundat cu motorul sincron cu reluctanță variabilă (motorul sincron reactiv), acesta din urmă având statorul cilindric, alimentat cu curenți alternativi polifazați, și rotorul cu poli aparenti (lipsit de surse de magnetizare).

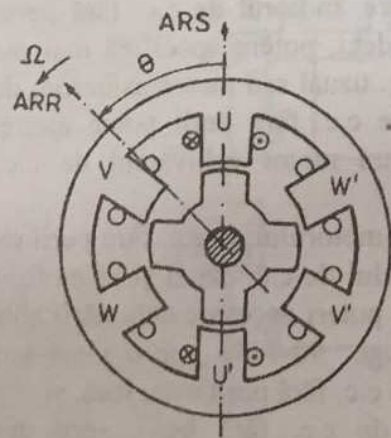


Fig. 2.41. Secțiune transversală a unui SRM, având 6 poli statorici și 4 poli rotorici.

Întrucât SRM prezintă unele particularități interesante, în cele ce urmează vom prezenta unele detalii privind construcția și funcționarea sa. Cel mai des întâlnită este mașina tetrafazată cu 8 poli statorici și 6 poli rotorici, dar este folosită și mașina trifazată cu 6 și, respectiv, 4 poli (Fig. 2.41). Pe polii statorici sunt dispuse înfășurări simple, concentrate, iar înfășurările diametral opuse sunt conectate între ele pentru a forma o fază statorică. Excitarea unei faze statorice face ca perechea de poli rotorici cea mai apropiată să fie atrasă, pentru a se alinia (a fi adusă în poziția de reluctanță minimă) cu polii statorici magnetizați. Prin autopilotare, curenții de fază statorici sunt comutați - dintr-o fază în alta - în sincronism cu poziția rotorului, pe baza semnalelor date de un traductor de poziție solidar cu rotorul, ca și la motorul de c.c. fără perii.

Cuplul mașinii este produs numai datorită variației reluctanței și, ca urmare, este independent de sensul curentului; în consecință, este suficient ca alimentarea fazelor statorice să se facă cu curenți unidirecționali (unipolari). Expresia cuplului corespunzător unei faze este:

$$M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.47)$$

unde  $i$  este curentul statoric de fază,  $L$  - inductanța fazei statorice, iar  $\theta$  - unghiul de poziție al rotorului (unghiul dintre axa de referință rotorică ARR și axa de referință statorică ARS); s-a presupus că inductanța este independentă de valoarea curentului. În Fig. 2.42.a, este prezentată dependența  $L(\theta)$  pentru faza U. Rezultă că se va produce un cuplu pozitiv atunci când  $dL/d\theta$  este pozitiv și un cuplu negativ atunci când  $dL/d\theta$  este negativ. Pentru a produce un cuplu motor (activ) în sensul direct, trebuie ca fazele statorice să fie alimentate secvențial cu pulsuri unipolare de curent care să coincidă cu perioadele unghiulare în care  $dL/d\theta$  este pozitiv (Fig. 2.42). În mod similar, un cuplu invers - pentru frânare sau rotire în sens invers - se obține atunci când pulsurile de curent coincid cu perioadele unghiulare în care  $dL/d\theta$  este negativ. Traductorul de poziție asigură inițializarea și finalizarea conducerii în fiecare fază la momentele adecvate obținerii unui cuplu maxim.

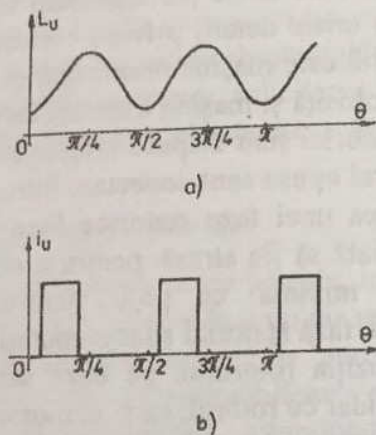


Fig. 2.42. a) Variatia inductanței  $L_U$  (a fazei U) cu unghiul de poziție  $\theta$  al rotorului unui SRM; b) Variatia idealizată a curentului  $i_U$  (din faza U) al unui SRM, funcționând în regim de tracțiune.

Forma de undă idealizată a curentului, pentru producerea cuplului motor, este aceea de puls cu înălțime constantă pe durata intervalului în care are loc creșterea inductanței (Fig. 2.42.b). În practică, pulsurile de curent sunt comutate de la sursa de alimentare, iar inductanța înfășurării statorice întârzie creșterea curentului prin această înfășurare. Pentru a ține seama de întârzierea menționată, trebuie ca blocul de comandă a motorului să devanseze inițierea conducerii în fiecare fază, devansul fiind mai mare la viteze ridicate și, respectiv, mai mic la viteze scăzute - ceea ce complică, întrucâtva, sistemul de comandă.

Se demonstrează că - la tensiune de alimentare și unghiuri de comutare constante, independente de viteză - caracteristica mecanică a motorului este similară cu a unui motor serie de c.c. Modificarea vitezei între zero și  $\Omega_N$  poate fi realizată prin modificarea tensiunii aplicate între zero și  $U_N$ . Aceasta poate fi obținută cu un VTC, ca la un motor de c.c., dar - cel mai adesea - se folosește o modulare în lățime a pulsurilor (PWM), realizată cu elementele convertorului specific motorului pe care îl prezentăm. Dacă peste  $\Omega_N$  se menține  $U = U_N = \text{const.}$ , cuplul scade, practic, invers proporțional cu pătratul vitezei. Prin

creșterea intervalului de conducerie în funcție de viteză, poate fi compensată scăderea cuplului, astfel încât să se obțină o caracteristică de putere constantă - cerută de acționarea unui automobil electric (Fig.2.2).

În Fig. 2.43, este prezentată schema de principiu pentru comanda unui motor trifazat de tipul analizat. Pe fiecare fază, comutatoarele statice CS (IGBT, MOSFET etc.), superior și inferior, sunt comandate simultan pentru a intra în sau a ieși din conducerie. La blocarea lor, cele două diode adiacente conduc, permițând returnarea energiei acumulate în inductanța înfășurării de fază spre baterie.

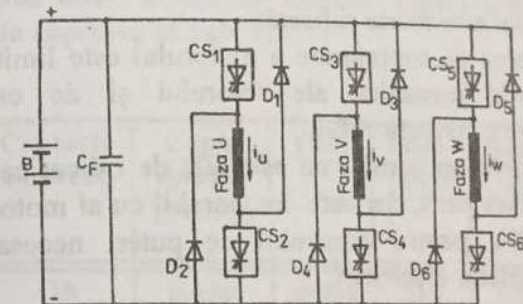


Fig. 2.43. Schemă de principiu pentru comanda unui SRM trifazat.

De remarcat că, pe fiecare braț al schemei de comandă a motorului, comutatoarele statice sunt conectate în serie cu o înfășurare de fază statorică, spre deosebire de schemele cu invertoare (folosite la motorul asincron sau motorul de c.c. fără perii), la care conectarea este, practic, în paralel. Ca urmare, în cazul acestora din urmă, hazardul - o defecțiune în blocarea unui comutator static dintr-un braț, atunci când celălalt comutator static din același braț se află în conducerie - are efecte nefaste, determinând apariția unor curenți foarte mari, de scurtcircuit la bornele bateriei. Pentru protecția împotriva acestora, trebuie prevăzute circuite foarte rapide de detecție și deconectare. În cazul motorului analizat, însă, circuitele de protecție sunt mult mai simple, datorită limitării curentului din braț de către înfășurarea de fază corespunzătoare.

La acest avantaj al motorului se mai adaugă și următoarele:

- la pierderea unei faze a motorului sau a convertorului, motorul poate funcționa în continuare, cu celelalte faze, la o putere mai scăzută;
- trecerea mașinii din regimul de motor în regimul de frânare recuperativă se face prin simpla deplasare a pulsurilor de curent, în corelare cu variația inductanței în funcție de unghiul de poziție;
- rotorul motorului nu are nici înfășurări, nici magneți permanenți; trebuie avut în vedere, însă, că el este o sursă importantă de pierderi în fier - mai ales la viteze mari;
- capacitatea de supraîncărcare în curent (respectiv, în cuplu) a motorului este foarte ridicată;
- capacitatea de supraturare a motorului este limitată numai de solicitările mecanice ale rotorului și de capacitatea de comutare a convertorului;
- randamentul motorului nu este atât de ridicat ca al motorului de c.c. fără perii, dar este comparabil cu al motoarelor clasice (cca 87%, pentru domeniul de puteri necesare acționării automobilelor electrice);
- costul motorului este mai scăzut decât al tuturor celorlalte tipuri de motoare;
- motorul nu necesită, practic, întreținere.

Dezavantajele esențiale ale motorului sunt determinate de faptul

că:

- natura pulsatorie a forțelor electromagnetice din motor conduce la apariția unor probleme de zgomot acustic și vibrații, care pot fi deranjante;
- riplul de cuplu este important la viteze scăzute, necesitând proiectarea adecvată a sistemului de acționare, pentru a atenua acest riplu;
- la viteze ridicate, frecvența de comutație a curenților de fază influențează semnificativ pierderile în fierul motorului și pierderile de comutație în convertor;

- comutatoarele statice ale convertorului trebuie să reziste la tensiuni mai ridicate, datorită conectării lor în serie cu înfășurările de fază ale motorului;
- pentru realizarea schemei de acționare, nu pot fi adoptate convertoarele - existente actualmente în producție de serie - utilizate la celelalte tipuri de motoare.

#### 2.1.2.4. Concluzii

Din considerațiile prezentate mai sus, se poate conchide care ar fi cel mai adecvat motor de tracțiune (și schema de comandă aferentă) pentru acționarea unui automobil electric. Pentru a trage concluziile, sunt utile și cele cuprinse în Tab. 2.3.

Tabelul 2.3.

Tip motor	Contacte alunecăt.	Cuplu specific [Nm/kg]	Cost	Întreținere	Randament	Complexitate schemă comandă
c.c. excit. serie	DA	scăzut	mediu	DA	scăzut	scăzută
c.c. excit. separată	DA	scăzut	mediu	DA	scăzut	scăzută
c.c. magn. permanenți	DA	mediu	ridicat	DA	mediu	scăzută
asincron	NU	mediu	scăzut	NU	scăzut	ridicată
c.c. fără perii	NU	ridicat	ridicat	NU	ridicat	scăzută
SRM	NU	mediu	scăzut	NU	mediu	medie

Dintre toate tipurile de motoare electrice, cea mai promițătoare soluție pentru acționarea considerată se arată a fi motorul de c.c. fără perii. Într-adevăr, acest motor nu are rival în privința a două caracteristici importante: randamentul și dimensiunile (masa). În plus, nu are contacte alunecătoare, implicând, deci, o întreținere foarte simplă.

De asemenea, el permite un reglaj foarte simplu al vitezei; inverterul său PWM este actualmente binecunoscut și în continuu progres din punctul de vedere al prețului, fiabilității și compactizării.

Este adevărat că, deocamdată, prețul acestui motor este ridicat, datorită costului magnetilor permanenți, dar el trebuie considerat în corelație cu celelalte costuri: al energiei consumate de automobil - mai scăzută datorită randamentului mai ridicat și greutateii mai mici; al schemei de comandă - relativ simplă; al întreținerii foarte puțin pretențioase. În plus, se întrevide o scădere în timp a costului magnetilor permanenți, ceea ce va determina și o scădere a prețului motorului.

### 2.1.3. Transmiterea cuplului motor la roți

Una dintre cele mai importante probleme ale tracțiunii bazate pe aderență o constituie modul de amplasare a motorului de tracțiune pe vehicul și de acționare a roților motoare, acesta trebuind să asigure atât transmiterea cuplului motor, cât și protejarea motorului de tracțiune față de șocurile primite de la calea de rulare. În plus, la vehiculele cu roți pneumatice, transmiterea cuplului motor trebuie să se facă astfel încât să se asigure independența roților motoare, pentru a reduce uzura pneurilor.

Deseori, parametrii sistemului de transmisie și parametrii electrici și mecanici ai motorului de tracțiune se condiționează reciproc. La aceasta contribuie și faptul că, spre deosebire de acționările staționare, gabaritele care stau la dispoziție pe vehiculele electrice sunt restrânse.

Acționarea roților motoare ale unui automobil electric poate fi:

- **individuală**, la care fiecare roată motoare este acționată de câte un motor;
- **colectivă** (în grup), la care un motor acționează un grup de roți.

În ambele cazuri, în funcție de modul cum sunt așezate motoarele de tracțiune pe vehicul în raport cu suspensia principală, sunt posibile următoarele soluții:

- **motor nesuspendat**, când motorul se sprijină cu toată greutatea sa pe partea nesuspendată a vehiculului, adică pe roți;
- **motor semisuspendat**, când o parte din greutatea motorului revine roților, iar restul din greutate revine părții suspendate a vehiculului; la vehiculele cu roți pneumatice, având în vedere că pneurile constituie o suspensie secundară, denumirea de "motor semisuspendat" este dată uneori motorului nesuspendat (în raport cu suspensia principală);
- **motor (complet) suspendat**, când motorul de tracțiune se sprijină integral pe partea suspendată a vehiculului.

Soluțiile cu motor nesuspendat sau semisuspendat sunt mai simple, însă au ca principale dezavantaje următoarele:

- **trepidațiile și șocurile** provenind de la calea de rulare se transmit direct părților motorului solidare cu roțile și conduc, în cazul unor viteze de circulație ridicate, la o oboseală rapidă a acestora;
- **greutatea nesuspendată a motorului** încarcă direct roțile și conduce la o creștere a solicitărilor reciproce dintre motor plus aparatul de rulare, pe de o parte, și calea de rulare, pe de altă parte; acestea pot provoca, în timp, distrugerea căii și a aparatului de rulare, precum și - suplimentar - a motorului.

Ca atare, utilizarea acestor soluții este limitată de viteza de circulație a vehiculului.

Dezavantajele de mai sus dispar dacă se recurge la soluția suspendării complete a motorului, care conduce, însă, la unele complicații constructive, determinate de necesitatea ca transmiterea cuplului de la motor la roți să se facă astfel încât să permită deplasarea relativă, pe verticală, - între anumite limite - a roților față de cadrul vehiculului.

Soluția clasică de acționare a automobilelor electrice (utilizată și la automobilele cu motoare termice) este aceea a **acționării colective**. Pentru ca, o dată cu transmiterea cuplului de la motor la roți, să se asigure și independența roților, în acest caz, este necesară utilizarea unui

*diferențial mecanic*, existând diverse soluții pentru realizarea acestuia. În Fig. 2.44, este prezentată una dintre soluțiile cele mai simple. Diferențialul propriu-zis este format din "carcasa" CD, roțile dințate-planetare P și roțile dințate-sateți S. Cuplul se transmite de la motorul M la carcasa diferențialului, prin intermediul unui reductor format din pinionul PN - fixat pe arborele lui M - și roata dințată RD - fixată pe CD (pentru simplitate, s-a considerat că reductorul are o singură treaptă, cu roți dințate cilindrice). În continuare, cuplul este transmis planetarelor (și, implicit, roților automobilului, rigidizate pe axele corespunzătoare ale planetarelor) prin intermediul sateților, aceștia din urmă putându-se, eventual, roti în jurul axelor proprii. În acest fel, se asigură independența relativă a celor două roți motoare  $RM_1$  și  $RM_2$ , pentru soluția prezentată fiind valabilă următoarea relație între vitezele unghiulare  $\Omega_{R1}$  și  $\Omega_{R2}$  ale roților, pe de o parte, și viteza unghiulară  $\Omega_{CD}$  a carcasei diferențialului, pe de altă parte:

$$\Omega_{R1} + \Omega_{R2} = 2\Omega_{CD} \quad (2.48)$$

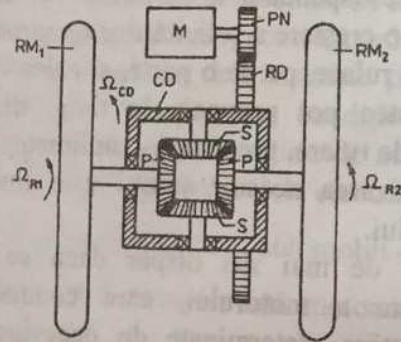


Fig. 2.44. Principiul constructiv al unui diferențial mecanic.

M - motor de tracțiune; PN - pinion; RD - roată dințată;  
CD - "carcasa" diferențialului; P - planetare; S - sateți; RM - roți motoare.

În acest fel, de exemplu, dacă roțile sunt identice și se circulă în aliniament, se obține  $\Omega_{R1} = \Omega_{R2} = \Omega_{CD}$ , sateții învârtindu-se o dată cu CD și transmițând cuplul către planetare, fără a se roti, însă, în jurul

axelor proprii. Într-o curbă în care roata  $RM_1$  se află mai aproape de centrul curbei decât roata  $RM_2$ , și, deci, are de parcurs un drum mai scurt, se obține  $\Omega_{R1} < \Omega_{R2}$  - adică, viteza planetarei solidare cu  $RM_1$  este mai mică decât cea a planetarei solidare cu  $RM_2$ , sateții continuând să se învârtă o dată cu CD și să transmită cuplul către planetare, executând, însă, și o mișcare de rotație în jurul axelor lor. În acest fel, diferențele dintre drumurile parcurse în curbă de cele două roți sunt acoperite prin diferențe corespunzătoare ale vitezelor unghiulare ale roților, fără a fi necesară o alunecare a vreunei roți față de calea de rulare, ceea ce asigură o uzură minimă a pneurilor.

Se demonstrează că diferențialul asigură egalitatea cuplurilor transmise celor două roți:

$$M_{R1} = M_{R2} \quad (2.49)$$

Sistemul are o serie de dezavantaje:

- randamentul acționării este micșorat de frecările introduse de diferențial;
- diferențialul contribuie la creșterea greutății automobilului;
- diferențialul are un cost relativ ridicat și necesită o întreținere suplimentară.

Pentru înlăturarea acestor dezavantaje, la automobilele electrice moderne se utilizează **acționarea individuală**, fiecare roată motoare având motorul său. În Fig. 2.45, este prezentată schematic acționarea individuală a unei roți cu motor nesuspendat, iar în Fig. 2.46 - acționarea individuală a unei roți cu motor suspendat. În toate aceste cazuri, între motor și roți se poate, eventual, dispune un reductor. În Fig. 2.46.a, este folosită, între motor și roți, o transmisie cardanică, care permite deplasarea relativă pe verticală - între anumite limite - a roților față de cadrul automobilului. Întrucât, în acest caz, dispunerea "în serie" - pe lățimea automobilului - a motorului, a transmisiei cardanice și a eventualului reductor poate conduce la limitări ale lungimilor motorului și arborelui cardanic (lungimi mici ale acestuia din urmă determină uzuri însemnate ale cuplajelor cardanice), se poate folosi o soluție ca în Fig. 2.46.b, în care motorul și transmisia cardanică sunt dispuse "în paralel"

pe lățimea automobilului. Aceasta permite o creștere a lungimii motorului și a arborelui cardanic, singurul inconvenient fiind acela al necesității realizării motorului cu arbore tubular.

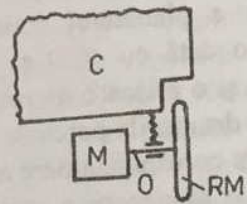


Fig. 2.45. Acționarea individuală a unei roți cu motor nesuspendat.  
C - cadrul vehiculului; M - motor; O - osie; RM - roată motoare.

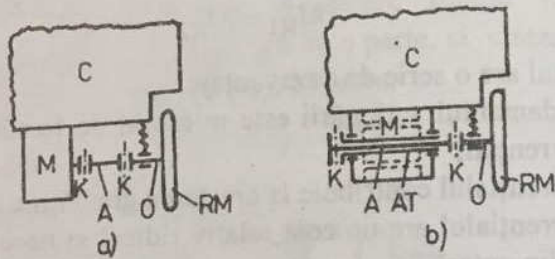


Fig. 2.46. Acționarea individuală a unei roți cu motor suspendat.  
C - cadrul vehiculului; M - motor; A - arbore cardanic; K - articulație cardanică;  
AT - arbore tubular; O - osie; RM - roată motoare.

În cazul acționării individuale, cuplul poate fi transmis roților motoare în două moduri:

- direct;
- prin angrenaje.

La transmiterea directă (Fig. 2.47.a), rotorul motorului este solidar (eventual, prin intermediul unei transmisii cardanice) cu roata motoare, turația roții fiind, deci, egală cu turația motorului.

La transmiterea prin angrenaj (Fig. 2.47.b), între motor și roata motoare se dispune un angrenaj reductor, care face ca turația roții să fie inferioară turației motorului (raportul de transmisie  $i_t > 1$ ).

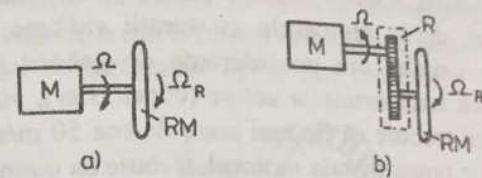


Fig. 2.47. Transmiterea cuplului de la motorul de tracțiune la roți:  
a) directă; b) prin angrenaj.  
M - motor; RM - roată motoare; R - reductor.

De regulă, angrenajul este realizat cu roți dințate - cilindrice sau conice - și, dacă are o singură treaptă de reducere, poate fi exprimat sub forma:

$$i_t = \frac{Z_R}{Z} \quad (2.50)$$

în care  $Z$ ,  $Z_R$  reprezintă numărul de dinți ai roții dințate solidare cu arborele motorului (pinion) și, respectiv, ai roții dințate solidare cu roata motoare. Pentru un angrenaj cu mai multe trepte,  $N_R$ , raportul total de transmisie este:

$$i_t = \prod_{k=1}^{N_R} i_{tk} \quad (2.51)$$

unde  $i_{tk}$  este raportul de transmisie al treptei  $k$ .

Cu toate că transmiterea directă a cuplului este mai simplă, ea nu este folosită decât în cazuri foarte rare - când simplitatea construcției este hotărâtoare -, având următoarele dezavantaje esențiale:

- demontarea motorului pentru revizii necesită scoaterea roții motoare;

- vitezele uzuale, relativ reduse, de circulație implică motoare cu turații reduse; acestea au, la o putere dată, gabarite și greutatea mai mari decât motoarele cu turații ridicate; la motoarele electrice uzuale, din considerente de gabarit și de utilizare economică a materialelor active (cupru, fier), viteza periferică a rotorului trebuie să fie mai mare de cca 50 m/s ; constructiv, pentru a se putea instala motorul, trebuie ca diametrul rotorului să fie cel mult 70% din diametrul roții; admitând viteza periferică a rotorului 50 m/s , rezultă că viteza vehiculului trebuie să fie egală cu cel puțin  $(50/0,7) \text{ m/s} = 71 \text{ m/s} = 266 \text{ km/h}$ , pentru ca motorul să fie bine utilizat.

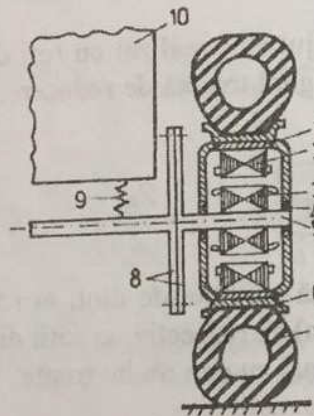


Fig. 2.48. Schema unei motoroți cu acționare directă.

- 1 - carcasa motorului; 2 - rotorul motorului; 3 - statorul motorului;  
4 - lagăr; 5 - osie; 6 - jantă; 7 - pneu; 8 - flanșe de prindere;  
9 - suspensie principală; 10 - cadrul vehiculului.

Atât în cazul transmiterii directe, cât și în cazul transmiterii prin angrenaj, pentru motoarele nesuspendate se poate aplica soluția constructivă de tip *motoroată* (motor înglobat în roată).

În Fig. 2.48, este prezentată soluția tip motoroată cu transmitere directă a cuplului. Fiecare roată este acționată de câte un motor, având rotorul (exterior) solidar cu roata și statorul (interior) solidar cu osia (fixă față de cadrul vehiculului). Roata are janta fixată pe carcasa motorului printr-un sistem care permite montarea și demontarea fără

dificultăți, iar carcasa se sprijină pe osie prin intermediul unor lagăre. Întregul ansamblu se montează pe vehicul cu ajutorul unor flanșe de prindere. În principiu, poate fi folosit orice tip de motor electric (cu rotor exterior), dar este de preferat un motor fără colector.

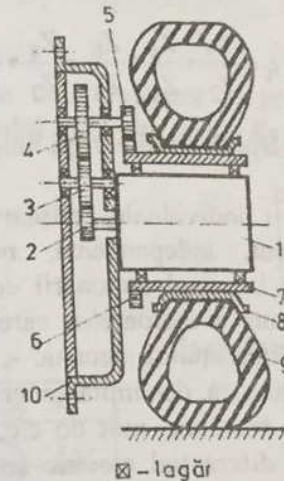


Fig. 2.49. Schema unei motoroți cu acționare prin angrenaj.

- 1 - motor; 2 și 5 - pinioane; 3 și 4 - roți dințate; 6 - coroană dințată; 7 - butuc;  
8 - jantă; 9 - pneu; 10 - flanșă de prindere.

În Fig. 2.49, este prezentată una dintre soluțiile posibile de tip motoroată cu transmitere prin angrenaj a cuplului. Motorul 1 are fixat pe arbore pinionul 2, care angrenează cu roata dințată intermediară 3. Aceasta angrenează cu roata dințată 4, fixată pe un același arbore cu pinionul 5, care, la rândul său, angrenează cu roata (coroana) dințată 6. Aceasta din urmă, fiind solidară cu butucul 7, pe care este fixată janta 8 (ce susține pneul 9) a roții motoare, transmite roții cuplul motor. Butucul se sprijină pe carcasa motorului prin niște lagăre și se poate învârti, împreună cu roata, în jurul axului central. Carcasa motorului este solidară cu carcasa reductorului, aceasta din urmă având o flanșă 10, cu ajutorul căreia întregul ansamblu se montează pe vehicul, într-un mod similar celui schițat în Fig. 2.48. Motorul utilizat, în acest caz - spre deosebire de cel precedent -, este de construcție uzuală, cu rotor interior.

Roata dințată intermediară 3 servește la obținerea unei distanțe convenabile între axa motorului și axa pinionului 5. Ea nu influențează însă asupra raportului total de transmisie dintre motor și roata motoare; într-adevăr, acest raport este:

$$i_t = \frac{Z_3}{Z_2} * \frac{Z_4}{Z_3} * \frac{Z_6}{Z_5} = \frac{Z_4}{Z_2} * \frac{Z_6}{Z_5} \quad (2.52)$$

unde  $Z_k$  reprezintă numărul de dinți ai roții dințate  $k$  ( $k = 2...6$ , conform Fig. 2.49).

În cazul acționării individuale, mișcarea roților motoare ale vehiculului este, evident, independentă, nemaifiind necesar un diferențial mecanic - ca în cazul acționării colective. Însă, pentru a asigura încărcarea uniformă a motoarelor care acționează roțile unei punți - așa cum realiza diferențialul mecanic -, aceste motoare trebuie integrate într-o schemă adecvată, denumită generic *diferențial electric*.

Dacă motoarele de tracțiune sunt de c.c. cu excitație serie sau separată, cel mai simplu diferențial electric se obține prin înserierea motoarelor care acționează roțile aflate de o parte și de alta a unei punți a automobilului.

În Fig. 2.50.a, este prezentată partea esențială a schemei electrice corespunzătoare unei punți a automobilului, având două motoare cu excitație serie conectate în serie. Considerând că motoarele sunt perfect identice și având în vedere că, datorită conectării lor în serie, curenții sunt identici ( $I_1 = I_2 = I$ ), rezultă că fluxurile lor de excitație sunt identice:

$$\Phi_1(I_1) = \Phi_2(I_2) = \Phi \quad (2.53)$$

Dacă roata antrenată de motorul  $M_1$  are viteza unghiulară  $\Omega_{R1}$ , iar roata antrenată de motorul  $M_2$  are viteza unghiulară  $\Omega_{R2}$ , tensiunile electromotoare ale celor două motoare se pot scrie:

$$\begin{aligned} E_1 &= k_M \Phi \Omega_{R1} \\ E_2 &= k_M \Phi \Omega_{R2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

iar tensiunile la bornele motoarelor sunt:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 + R_1 I_1 = k_M \Phi \Omega_{R1} + RI \\ U_2 &= E_2 + R_2 I_2 = k_M \Phi \Omega_{R2} + RI \end{aligned} \quad (2.55)$$

având în vedere că cele două motoare se presupun a avea aceeași rezistență totală a circuitului indusului ( $R_1 = R_2 = R$ ).

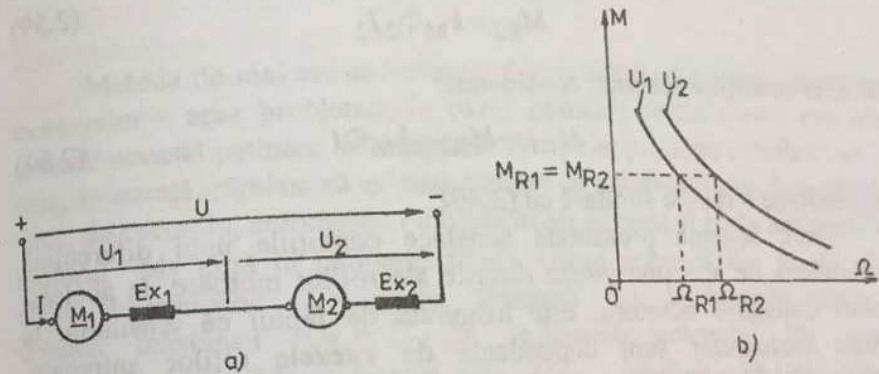


Fig. 2.50. Realizarea diferențialului electric prin înserierea a două motoare de c.c. cu excitație serie ale unei punți: a) schema de principiu; b) alura caracteristicilor mecanice ale motoarelor.

Sistemul de comandă al automobilului impune tensiunea:

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.56)$$

încât, din (2.55) și (2.56), rezultă:

$$\Omega_{R1} + \Omega_{R2} = \frac{U - 2RI}{k_M \Phi} \quad (2.57)$$

Deci, pentru o tensiune  $U$  dată și o încărcare dată a automobilului ( $I$  și  $\Phi$  date), se obține:

$$\Omega_{R1} + \Omega_{R2} = \text{dat} \quad (2.58)$$

adică o relație similară relației (2.48).

În plus, cuplurile electromagnetice dezvoltate de motoare și transmise roților sunt:

$$\begin{aligned} M_{R1} &= k_M \Phi_1 I_1 \\ M_{R2} &= k_M \Phi_2 I_2 \end{aligned} \quad (2.59)$$

adică, în condițiile schemei considerate:

$$M_{R1} = M_{R2} = k_M \Phi I \quad (2.60)$$

obținându-se o relație similară cu (2.49).

Deci, schema prezentată satisface condițiile unui diferențial. Posibilitatea de a obține viteze diferite ale roților motoare, la aceleași cupluri transmise acestora, este asigurată de faptul că tensiunile la bornele motoarelor sunt dependente de vitezele roților antrenate, conform relațiilor (2.55), și - ca urmare - cele două motoare, deși sunt identice, funcționează pe caracteristici mecanice diferite. Aceasta este ilustrată, pentru exemplificare, în Fig. 2.50.b, considerând  $\Omega_{R1} < \Omega_{R2}$  și, deci,  $U_1 < U_2$ .

În cazul motoarelor cu excitație separată, pentru asigurarea identității curenților de excitație, se înscriază separat înfășurările de excitație (Fig. 2.51). La motoarele cu magneți permanenți, realizarea diferențialului electric prin înscrierea motoarelor este posibilă, în măsura în care se poate garanta identitatea fluxurilor de excitație, această identitate stând la baza metodei prezentate.

În principiu, realizarea diferențialului electric prin metoda prezentată se poate face pentru orice tip de motoare la care egalitatea curenților absorbiți asigură și egalitatea cuplurilor dezvoltate, înscriind circuitele de c.c. ale convertoarelor care alimentează aceste motoare.

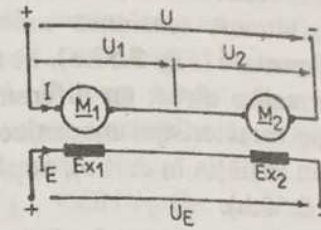


Fig. 2.51. Realizarea diferențialului electric prin înscrierea a două motoare de c.c. cu excitație separată ale unei punți.

Metoda de mai sus are avantajul simplității, dar - prin înscrierea motoarelor - apar probleme, în cazul patinării unuia dintre motoare, întrucât această patinare influențează direct comportarea celuilalt motor, care, în esență, rămâne să asigure tracțiunea automobilului. Într-adevăr, dacă, de exemplu, automobilul circulă în aliniament și roata antrenată de motorul  $M_1$  intră în patinare, atunci viteza acestuia din urmă  $\Omega_{R1}$  crește, determinând și creșterea tensiunii  $U_1$  la bornele sale; ca urmare, tensiunea  $U_2 = U - U_1$  la bornele motorului  $M_2$  scade, determinând și scăderea vitezei sale  $\Omega_{R2}$  - implicit, scăderea vitezei automobilului.

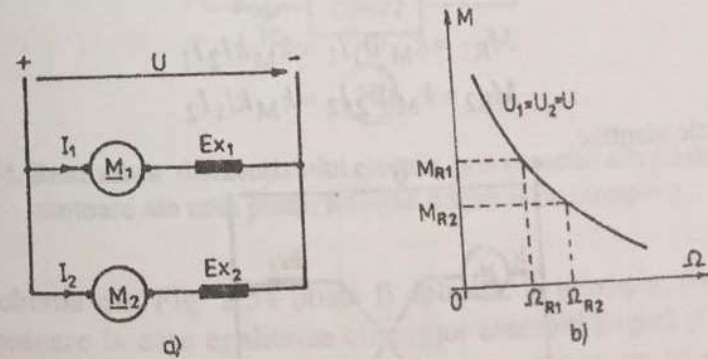


Fig. 2.52. Explicativă pentru imposibilitatea de realizare a unui diferențial electric prin conectarea directă în paralel a două motoare serie de c.c. ale unei punți: a) schema de principiu; b) alura caracteristicilor mecanice ale motoarelor.

Dacă motoarele ar fi conectate în paralel, această influență directă nu s-ar mai manifesta, întrucât tensiunea motoarelor este comună, impusă de sistemul de alimentare (Fig. 2.52.a). În schimb, cu schema din Fig. 2.52.a nu se poate realiza direct un diferențial electric, deoarece motoarele funcționează pe caracteristici mecanice identice și, la viteze diferite ale roților (așa cum se obțin în curbe), cuplurile transmise roților nu mai sunt identice (Fig. 2.52.b).

În cazul motoarelor de c.c. cu excitație serie, schema din Fig. 2.52.a poate fi transformată, printr-un artificiu simplu, (ca în Fig. 2.53, în care fluxul de excitație al motorului  $M_1$  este determinat de curentul motorului  $M_2$ , iar fluxul de excitație al motorului  $M_2$  este determinat de curentul motorului  $M_1$ ), într-un diferențial electric. Într-adevăr, în acest caz, vitezele roților pot fi diferite - așa cum le impune traseul - dar cuplurile transmise roților sunt practic egale, dacă se consideră cele două motoare identice funcționând pe porțiunile liniare ale caracteristicilor de magnetizare, unde:

$$\begin{aligned} \Phi_1(I_2) &\approx kI_2 \\ \Phi_2(I_1) &\approx kI_1 \end{aligned} \quad (2.61)$$

Cu (2.61), expresiile (2.59) ale cuplurilor electromagnetice devin:

$$\begin{aligned} M_{R1} &= k_M \Phi_1 I_1 \approx k_M k I_2 I_1 \\ M_{R2} &= k_M \Phi_2 I_2 \approx k_M k I_1 I_2 \end{aligned} \quad (2.62)$$

deci, practic, identice.

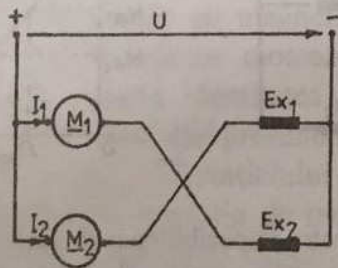


Fig. 2.53. Artificiu pentru realizarea diferențialului electric, prin conectarea în paralel a două motoare serie de c.c. ale unei punți.

În cazul motoarelor de c.c. cu excitație separată, un astfel de artificiu nu este posibil, pentru realizarea diferențialului electric fiind necesară o schemă mai complexă. Un exemplu în acest sens este prezentat în Fig. 2.54, în care blocul de comandă diferențial BCD primește informații asupra curenților  $I_1$ ,  $I_2$  absorbiți de cele două motoare, prin traductoarele  $TC_1$ ,  $TC_2$ , și dă comenzi adecvate convertoarelor  $CONV_1$ ,  $CONV_2$  (în acest caz, variatoare de tensiune continuă) prin care se alimentează motoarele, pentru egalizarea celor doi curenți. Dacă se înseriază înfășurările de excitație, se realizează și egalitatea curenților de excitație - implicit, egalitatea cuplurilor dezvoltate de cele două motoare.

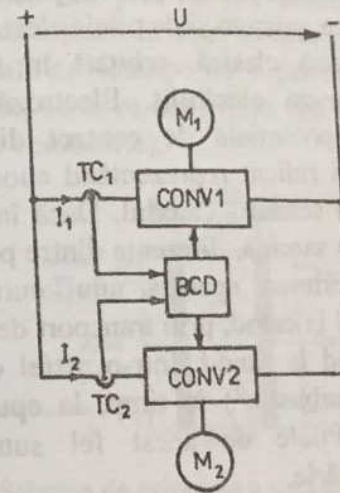


Fig. 2.54. Realizarea diferențialului electric, prin conectarea în paralel a două motoare ale unei punți, folosind o schemă mai complexă.

Schema din Fig. 2.54 poate fi aplicată, în principiu, pentru orice tip de motoare la care egalitatea curenților absorbiți asigură și egalitatea cuplurilor dezvoltate. La motoarele la care aceasta nu se realizează, schema se complică și mai mult, întrucât traductoarele de curent trebuie înlocuite prin traductoare de cuplu.

2.1.4. Surse electrochimice

Dupa cum se știe, alimentarea motoarelor de tracțiune ale automobilelor electrice se face, uzual, de la baterii electrice, care - în esență - sunt formate prin gruparea, în diverse conexiuni, a mai multor elemente-surse electrochimice.

Sursele electrochimice convertesc energia chimică în energie electrică. Ele pot fi împărțite în două mari categorii:

- surse ireversibile;
- surse reversibile.

**Sursele ireversibile** (denumite și **surse primare**) sunt reprezentate de pilele electrice clasice, precum și de pilele electrice de combustie.

Într-o pilă electrică clasică, schițată în Fig. 2.55, există doi electrozi cufundați într-un electrolit. Electrozii, fiind realizați din materiale diferite, au potențiale de contact diferite, electrodul cu potențial de contact mai ridicat reprezentând anodul, iar electrodul cu potențial de contact mai scăzut - catodul. Dacă între bornele celor doi electrozi se conectează o sarcină, diferența dintre potențialele de contact ale electrozilor va determina apariția unui curent, care circulă în interiorul pilei de la anod la catod, prin transport de ioni în electrolit, iar prin sarcină - de la catod la anod. Într-o astfel de pilă, electrozii se consumă (are loc o "combustie") în timp, la epuizarea acestora pila nemaifiind utilizabilă. Pilele de acest fel sunt folosite doar în automobilele electrice-jucărie.

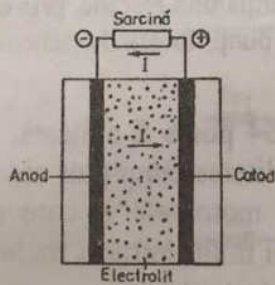


Fig. 2.55. Schema de principiu a unei pile electrice.

Pentru automobilele/autobuzele electrice destinate transportului de persoane și mărfuri, o soluție de viitor o reprezintă pilele electrice de combustie. La acestea, există o alimentare continuă din afară cu materiale de combustie, care să asigure continuu procesele descrise mai sus, fără consumarea electrozilor. În Fig. 2.56, este schițată, în esență, o pilă de combustie. La anodul pilei este introdus combustibilul (hidrogen, alcool - metanol sau etanol -, gaz natural ori chiar benzină), iar pe la catod intră oxidantul (oxigen sau aer). Electrozii sunt inerti (nu participă la reacțiile ce au loc), dar, pentru creșterea performanțelor pilei (putere, randament), ei trebuie să fie poroși - mărindu-li-se astfel suprafața activă - și realizați din materiale catalitice, care să determine viteze mari ale reacțiilor electrochimice din pilă (uzual, platină sau un aliaj al ei - Pt/Ru, Pt/Sn - care se depune în strat subțire pe un suport de carbon activ; materialele catalitice scumpe au o pondere însemnată în costul unei pile de combustie, ceea ce constituie una din piedicile actuale în proliferarea pilelor de combustie).

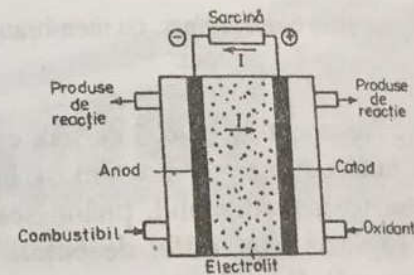


Fig. 2.56. Schema de principiu a unei pile de combustie.

Au fost studiate mai multe tipuri de pile de combustie. Deocamdată, doar două dintre ele sunt considerate a avea caracteristici promițătoare pentru vehiculele electrice:

- pila de combustie hidrogen/aer, cu membrană schimbătoare de protoni;
- pila de combustie cu metanol, cu combustie directă.

La pila de combustie hidrogen/aer, cu membrană schimbătoare de protoni (Fig. 2.57), electrolitul este constituit dintr-un conductor protonic solid (membrană), cel mai bun fiind un polimer similar

Teflonului. Interesul esențial pentru această pilă este determinat de construcția sa simplă și compactă, ca urmare a asamblării solide a celor doi electrozi catalitici pe membrană (grosimea unei celule este de ordinul a 3-5 mm), precum și de densitatea de putere ridicată ( $> 200$  W/kg). La anod, hidrogenul se disociază catalitic în electroni și protoni (ioni pozitivi  $H^+$ ). Electronii liberi determină curentul prin circuitul exterior (sarcină), iar protonii migrează prin membrana-electrolit spre catod, unde se combină cu oxigenul din aer și cu electronii din circuitul exterior, rezultând apă și căldură.

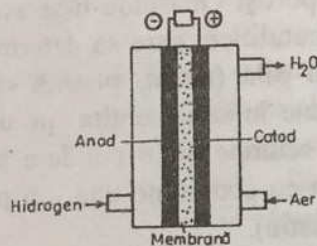


Fig. 2.57. Pila de combustie hidrogen/aer, cu membrană schimbătoare de protoni.

Hidrogenul este fie stocat în butelii de gaz comprimat - ceea ce conduce la densități mici de energie, precum și la probleme privind realimentarea și dispunerea pe automobil, ținând seama și de pericolul pe care îl reprezintă explozia unor astfel de butelii -, fie produs prin reformare catalitică (cu apă) din diferiți compuși hidrogenerați: metanol, amoniac, hidrocarburi.

Compușii hidrogenerați constituie cel mai bun mijloc de stocare a hidrogenului; ei asigură densități superioare de energie (Tab. 2.1) și -majoritatea lor fiind lichizi la temperatură ambiantă și presiune atmosferică - permit umplerea rezervorului cu combustibil de la pompă. Dificultatea esențială constă în producerea, prin reformare, de gaz bogat în hidrogen și lipsit de impurități care ar putea "otrăvi" catalizatorii electrozilor (sulfur din hidrocarburi, CO rezultat din reformare,...). Este preferat metanolul, datorită și reformării mai ușoare (la  $200^{\circ}C$  cu un catalizator  $Cu/ZnO$ , față de  $600^{\circ}C$  pentru amoniac și  $700-800^{\circ}C$  pentru

hidrocarburi) și densității de energie relativ ridicate; în plus, el are un preț de producție scăzut. De notat că reformarea determină o scădere a randamentului energetic cu un factor de ordinul 0,8-0,9 (randamentul reformării cu apă), precum și a densității masice/volumice de energie și putere din cauza masei/volumului sistemului de reformare.

Progresele realizate cu acest tip de pilă de firma canadiană Ballard au determinat utilizarea sa - după 1989 - de către companii renumite, ca Daimler Benz, General Motors, Honda, Nissan, Chrysler, Volkswagen, Volvo ș.a., pentru construirea de vehicule electrice. Ballard a dat în funcțiune în 1993, ca primă aplicație în domeniu a pililor sale, un autobuz urban de 21 pasageri, având motorul de tracțiune (90 kW) și auxiliarele (20 kW) alimentate de la 24 pile de 5 kW. Acestea foloseau drept combustibil 22 kg hidrogen pur, comprimat la 250 bari în butelii din materiale compozite (fibră de sticlă/Al), care asigurau o autonomie de 150 km, la o viteză maximă de 70 km/h.



Fig. 2.58. Autobuz electric de 205 kW, construit de firma Ballard, cu pile de combustie hidrogen/aer, cu membrană schimbătoare de protoni.

Ulterior, a livrat unor societăți de transport urban din SUA și Canada autobuze electrice (Fig. 2.58) având performanțe comparabile cu ale autobuzelor Diesel similare (205 kW tracțiune, 400 km autonomie). Daimler-Benz a realizat un prim automobil electric cu pile Ballard în 1994, urmat de alte prototipuri tot mai performante. Astfel, la cel din 1997 (NECAR 3 - New Electric Car) - bazat pe o construcție de Mercedes-Benz A -, hidrogenul este obținut prin reformarea metanolului stocat într-un rezervor de 40 l, care îi asigură o autonomie de 400 km.

Evident, utilizarea metanolului simplifică operarea curentă a automobilului, metanolul putând fi livrat la pompă. Tot în 1997, Chrysler a anunțat construirea unui model de vehicul electric cu pile Ballard, în care era realizată reformarea eficientă a benzinei; se speră în comercializarea de către grupul Daimler-Chrysler, până în anul 2015, a unor automobile de acest fel (*automobile electrice cu benzină*), ceea ce va face posibilă utilizarea pompelor de benzină care alimentează și automobilele cu motoare termice.

Pentru a depăși constrângerile determinate de stocarea combustibilului și de sistemele de reformare, o soluție constă în realizarea unor pile în care să se facă combustia electrochimică directă a unui combustibil lichid. Și în acest caz, este preferat metanolul, care are și o reactivitate electrochimică relativ ridicată (la hidrocarburi - benzină ș.a. -, această reactivitate este foarte scăzută). Metanolul este introdus la anod, iar la catod - aer (Fig. 2.59). La anod, metanolul ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) se disociază catalitic în electroni și protoni (ioni pozitivi  $\text{H}^+$ ), rezultând și bioxid de carbon ( $\text{CO}_2$ ). Ca și în cazul pilei hidrogen/aer, electronii liberi determină curentul prin circuitul exterior (sarcină), iar protonii migrează prin electrolit spre catod unde se combină cu oxigenul din aer și cu electronii din circuitul exterior, rezultând apă și căldură.

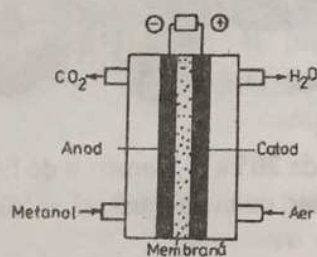


Fig. 2.59. Pila de combustie cu metanol, cu combustie directă.

Performanțele actuale ale pilelor cu metanol, cu combustie directă, sunt încă nesatisfăcătoare - randament și densități de putere scăzute, cantități relativ ridicate de metal prețios pentru catalizatorii electrozilor. Cercetările din ultimii ani au determinat, însă, o ameliorare

continuă a acestor performanțe, ceea ce face ca astfel de pile să fie promițătoare pentru utilizarea în viitor ca surse pe vehiculele electrice.

Avantajele esențiale ale unei pile de combustie, comparativ cu motoarele termice (cu combustie internă) folosite la vehiculele clasice, sunt:

- funcționare silențioasă (există puține organe mobile - în esență, doar cele ale pompelor de circulație);
- poluare chimică redusă (nulă pentru pila hidrogen/aer - se elimină doar apă; în cazul metanolului, folosit fie pentru reformarea hidrogenului, fie pentru pila cu combustie directă, în afara apei se mai elimină și  $\text{CO}_2$ , dar mult mai puțin ca la motoarele termice);
- randament energetic ridicat, care poate atinge, actualmente, 60% (el nu este limitat de randamentul teoretic al ciclului Carnot, care, adesea, nu depășește 20% la motoarele cu ardere internă);
- suplețe mare în utilizare, datorată, pe de o parte, realizării modulare de elemente având dimensiuni și forme variate și, pe de altă parte, posibilității de pornire și oprire cuasi-instantanee, pentru pilele de joasă temperatură (sub  $200^\circ\text{C}$ );
- densitate masică a energiei ridicată.

Motivele care au împiedicat utilizarea pe scară largă a pilelor de combustie rezultă din cele prezentate mai sus, cu ocazia descrierii acestor pile.

**Sursele reversibile** (denumite și *surse secundare*) sunt reprezentate de acumulatorii electrice. Acestea au, în mare, o construcție similară pilelor electrice clasice, cu deosebirea că procesele (reacțiile) care au loc sunt reversibile:

- la conectarea unei sarcini la bornele electrozilor (descărcarea acumulatorului), electrozii se descompun în electrolit;
- la conectarea electrozilor la o sursă de c.c., cu polaritatea adecvată (încărcarea acumulatorului), are loc un proces de refacere a electrozilor.

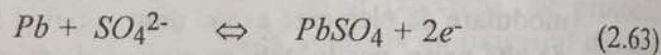
În esență, așa cum o arată chiar denumirea lor, acumulatorii nu produc prin ele însele energie, ci doar stochează energia produsă de alte surse. Ele reprezintă, însă, singura sursă electrochimică - realizată în producție de serie și la prețuri acceptabile - utilizată până în prezent pe automobilele electrice.

Acumulatorii folosiți, actualmente, pentru tracțiune pot fi împărțiți în două mari categorii:

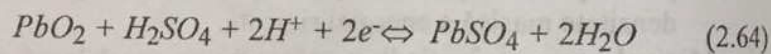
- acumulatorii cu plumb-acid, care reprezintă cca 95% din acumulatorii de tracțiune actuali;
- acumulatorii alcalini și de alte tipuri, care reprezintă cca 5% din acumulatorii de tracțiune actuali.

La acumulatorii cu plumb-acid, anodul este realizat din plumb (Pb), catodul - din bioxid de plumb (PbO<sub>2</sub>), iar electrolitul este o soluție din acid sulfuric (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) și apă (H<sub>2</sub>O). Reacțiile care au loc la electrozi sunt:

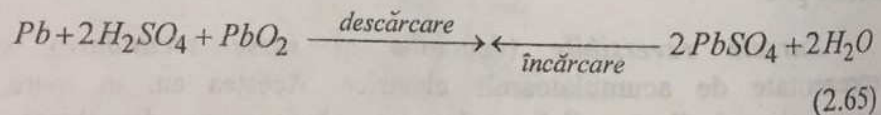
- la anod:



- la catod:



reacția globală fiind:



La descărcare, densitatea electrolitului scade - datorită participării acidului sulfuric la reacții, rezultând apă și sulfat de plumb, acesta din urmă depunându-se pe electrozi. Reacția (2.65) nu este integral reversibilă și, după un anumit număr de cicluri de încărcare-descărcare, cantitatea de sulfat de plumb care rămâne pe electrozi devine atât de mare, încât nu mai permite buna desfășurare a proceselor din acumulator, acesta trebuind să fie abandonat.

Caracteristicile fundamentale teoretice ale acumulatorilor cu plumb-acid sunt:

- tensiunea unei celule: 2,1 V;
- densitatea de energie: masică 161 Wh/kg; volumică 686 Wh/l.

Valorile practice ale densității de energie sunt însă mult mai scăzute (Tab. 2.4).

În cazul acumulatorilor cu plumb-acid uzuale, apa din electrolit se pierde în timp (prin evaporare, precum și prin descompunerea ei în H<sub>2</sub> și O<sub>2</sub> care se degajă la electrozi); de aceea, ea trebuie completată periodic. Pentru evitarea sulfatării electrozilor, acumulatorii trebuie reîncărcate imediat după descărcarea lor. De asemenea, are loc o autodescărcare (descărcare fără a avea conectată o sarcină) a acumulatorilor, ceea ce impune reîncărcarea lor după perioade mari de neutilizare. Rezultă necesitatea unei întrețineri pretențioase a acestor acumulatori.

Tehnologiile moderne permit realizarea acumulatorilor cu plumb-acid în așa numita variantă "fără întreținere". În acest caz, acumulatorii sunt capsulați (utilizează valve de siguranță, în locul dopurilor uzuale de închidere a orificiilor de umplere cu acid/apă), au o construcție adecvată a electrozilor, iar electrolitul este "solidificat", fie fixat într-un gel, fie adsorbit în materiale poroase de tip "vată". La aceste acumulatori, pierderile de apă sunt neglijabile (oxigenul, format pe durata încărcării bateriei, este recombinat în apă, în interiorul bateriei), autodescărcarea este foarte redusă (ea poate fi sub cca 35% din capacitatea normală, după 12 luni), iar sensibilitatea lor la descărcări ocazionale puternice, la vibrații și la temperaturi joase este mult scăzută. De asemenea, ele sunt sigure și curate (electrolitul nu poate ieși din baterie și nu se degajă gaze, la funcționarea normală), necontribuind la poluare și nepunând probleme de protecție pentru instalațiile din vecinătatea lor. Deși folosesc electrolit solidificat, densitatea de energie a acestor acumulatori - mai ales la descărcări rapide și temperaturi scăzute - este mai mare decât a acumulatorilor uzuale. Desigur, toate acestea se obțin cu prețul unui cost mai ridicat.

Principalul tip de acumulator alcalin utilizat este acela cu nichel-cadmium (Ni-Cd), la care anodul este Cd, catodul este Ni (mai exact, NiOOH), iar electrolitul este hidroxid de sodiu (KOH). Performanțele acestor acumuloare sunt, în general, superioare acumuloarelor cu plumb-acid, dar anumite dezavantaje - principalele fiind costul mult mai ridicat, determinat de costul mare al cadmiului, precum și toxicitatea cadmiului - au făcut ca ele să aibă o răspândire mai scăzută în tracțiunea electrică. S-au făcut încercări de a înlătura aceste dezavantaje, înlocuind Cd prin Fe, Zn sau hidruri metalice, dar performanțele tehnice obținute până în prezent sunt mai scăzute decât în cazul Ni-Cd.

Caracteristicile fundamentale teoretice ale acumuloarelor cu Ni-Cd sunt:

- tensiunea unei celule: 1,3 V;
- densitatea de energie: masică 209 Wh/kg; volumică 693 Wh/l.

Dintre celelalte tipuri de acumuloare, perspectiva de a fi utilizate în tracțiune, datorită energiilor lor specifice ridicate, o au cele cu sodiu-sulf (Na-S), precum și cele bazate pe litiu (Li).

La acumuloarele cu Na-S anodul este Na, catodul - S, iar electrolitul - beta alumină ( $\beta\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ceramică, un conductor solid de ioni  $\text{Na}^+$ . Pentru a obține o conductivitate suficientă a electrolitului solid, este necesară o temperatură ridicată (între 300°C și 400°C; uzual: 330°C). Funcționarea la o astfel de temperatură necesită o izolare termică compactă și eficientă, precum și un management termic adecvat. De regulă, se folosește o izolație termică vacuumată, care acoperă complet celulele acumulatorului, lăsându-se doar locuri pentru realizarea conexiunilor electrice. În incinta termică, se instalează un încălzitor electric (pentru încălzirea inițială și compensarea pierderilor de căldură), precum și un schimbător de căldură lichid (pentru răcirea celulelor în cazul unor descărcări puternice).

Caracteristicile fundamentale teoretice ale acumuloarelor cu Na-S sunt:

- tensiunea unei celule: 2,1 V;
- densitatea de energie: masică 792 Wh/kg; volumică 1196 Wh/l.

Perspectiva obținerii unor densități foarte mari de energie a făcut ca cercetările privind aceste acumuloare să fie foarte intense, încă din 1964, în mai multe țări. Notabile, pentru aplicații la automobilele electrice, sunt rezultatele obținute după 1990, în Germania, de către compania ABB, care produce baterii multicelulare de acumuloare cu Na-S, la prețuri comparabile cu ale bateriilor cu Ni-Cd.

Speranța obținerii unor densități mari de energie, dar la temperatura ambiantă, este dată de rezultatele cercetărilor în domeniul acumuloarelor cu litiu. În mod deosebit, pentru tracțiunea electrică, prezintă interes acumuloarele cu electrolit solid polimer; la acestea anodul este Li, iar catodul -  $\text{V}_6\text{O}_{13}$  sau  $\text{TiS}_2$  (se preferă  $\text{V}_6\text{O}_{13}$ , tensiunea unei celule depășind în acest caz 3 V). Principalele obstacole actuale în utilizarea acestor baterii pe automobile electrice sunt: numărul redus de cicluri încărcare-descărcare și puterea specifică scăzută la funcționare continuă.

Tabelul 2.4.

Sistem	Densitate de energie		Putere specifică W/kg	Nr. de cicluri încărcare-descărcare	Disponibilitate industrială
	Wh/kg	Wh/l			
Pb-acid	31-40	75-90	90-125	600-1000	DA
Ni-Cd	45-58	80-95	≈190	2000	DA
Ni-hidrură metalică	55-60	100-130	≈175	*	NU
Ni-Fe	50-60	80-95	≈110	1000-1500	NU
Na-S	80-100	110-135	100-120	500	NU
Li (electrolit polimer solid)	80-120	100-120	≈70	>200	NU

În Tab. 2.4, sunt prezentate principalele caracteristici ale acumuloarelor avute în vedere pentru tracțiune. Energiile specifice (densitățile masice și volumice de energie) indicate sunt valabile pentru o descărcare a acumuloarelor în timp de 5 ore, iar puterea specifică

(densitatea masică de putere) corespunde stării acumulatorului descărcat la jumătatea capacității sale. După cum se observă, pentru acumuloarele de la punctele 3-8 din tabel, se obțin densități de energie superioare celor din cazul acumuloarelor de tracțiune uzuale, dintre ele cel mai bun - din acest punct de vedere - și mai intens studiat, actualmente, fiind acumulatorul cu Na-S.

Pentru *acumuloarele cu plumb-acid* pot fi evidențiate următoarele avantaje și dezavantaje.

**Avantaje:**

- sunt relativ ieftine;
- au un număr relativ mare de cicluri de încărcare-descărcare;
- folosesc pentru electrozi plumbul, care este disponibil în cantități mari;
- se pot realiza în varianta "fără întreținere";
- există producție în serie;
- după ieșirea lor din funcțiune, plumbul din electrozi poate fi ușor reciclat.

**Dezavantaje:**

- au densitate redusă a energiei, ceea ce implică greutate și volume mari;
- puterea lor scade o dată cu descărcarea;
- capacitatea și energia lor scad, la temperaturi scăzute;
- oferă posibilități limitate de încărcare rapidă (încărcarea lor completă se face pe timp de câteva ore);
- sunt sensibile la supracurenți (de încărcare sau descărcare).

*Acumuloarele alcaline cu Ni-Cd* au următoarele avantaje și dezavantaje:

**Avantaje:**

- au un număr foarte mare de cicluri de încărcare-descărcare;
- puterea lor se menține relativ constantă după o descărcare parțială;
- au o comportare foarte bună la temperaturi scăzute;

- oferă posibilitatea încărcării rapide (se pot realiza încărcări cu curenți de până la  $10 I_N$ );
- nu necesită întreținere (acumuloare capsulate);
- există producție în serie.

**Dezavantaje:**

- sunt scumpe (datorită costului ridicat al cadmiului);
- pun probleme ecologice, cadmiul fiind toxic;
- încărcarea lor pune probleme la temperaturi ridicate.

Pentru ilustrarea performanțelor tehnice obținute de un același vehicul electric, care utilizează acumuloare cu plumb-acid sau cu Ni-Cd, în Tab. 2.5 sunt indicate caracteristicile esențiale ale unui automobil electric *Cinquecento Elettra* (sarcină utilă: 2 persoane + 150 kg), realizat de firma Fiat (Fig. 2.60), menținând cutia de viteze (5 trepte + mers înapoi) de la un automobil cu motor termic și folosind pentru tracțiune un motor electric de c.c. cu excitație serie de 9,2 kW, 72 V, 2500 rot/min, alimentat printr-un variator de tensiune continuă (cu MOSFET, 18 kHz) de la un ansamblu de 12 baterii de 6 V, conectate în serie, care pot fi cu plumb-acid (gel) sau Ni-Cd.



Fig. 2.60. Automobilul electric *Cinquecento Elettra*, de 9,2 kW, construit de firma Fiat.

Tabelul 2.5.

Caracteristica	Sursa	Baterie Pb-acid(gel)	Baterie Ni-Cd
Masă proprie automobil		1110 kg	1020 kg
Masă baterie		360 kg	270 kg
Viteză maximă		80 km/h	85 km/h
Timp de accelerare 0-40 km/h		12,5 s	9 s
Autonomie:			
- în ciclu urban mediu		70 km	100 km
- la 50 km/h		100 km	150 km
Nr. cicluri încărcare-descărcare		600	2000

Avantajul determinant al *acumuloarelor cu Na-S* este acela că posedă densități mari ale energiei, atât masice cât și volumice, ceea ce este foarte atractiv, întrucât conduce la greutate și volume scăzute. Ele nu necesită întreținere, însă au niște **dezavantaje** importante:

- funcționează numai la temperatură ridicată (peste 300°C), necesitând un management termic;
- au un număr relativ scăzut de cicluri de încărcare-descărcare.

Tabelul 2.6.

An	1990	1997	2000	2005	2010
Sistem					
Pb-acid	→				
Ni-Cd	→				
Ni-hidruță metalică	→				
Na-S	→				
Li	→				

Costurile actuale ale acumuloarelor cu plumb-acid și cu Ni-Cd sunt de cca 177 \$/kWh și, respectiv, 700 \$/kWh; însă, în viitor - la o producție de cel puțin 50.000 vehicule pe an -, se întrevede o scădere semnificativă a acestor costuri la cca 122 \$/kWh și, respectiv, 390 \$/kWh.

În tabelul 2.6, se dă o estimare a disponibilității în timp, la nivel industrial, a diverselor tipuri de acumuloare electrice de tracțiune.

Pentru buna utilizare și creșterea performanțelor bateriilor de acumuloare, actualmente se adoptă următoarele măsuri:

#### a) Controlul termic

După cum s-a arătat mai sus, acumuloarele cu plumb-acid au probleme la temperaturi scăzute, cele cu Ni-Cd - la temperaturi ridicate, iar cele cu Na-S funcționează optim la o anumită temperatură (cca 330°C). Dacă se iau măsuri corespunzătoare de încălzire/ventilație, încât să se opereze la temperaturi adecvate, se pot obține performanțe optime ale bateriilor.

#### b) Monitorizarea electronică

Prin aceasta, se poate cunoaște în orice moment starea bateriei (mai ales starea de încărcare, dar și din alte puncte de vedere), permițând adoptarea măsurilor celor mai adecvate pentru utilizarea optimă a bateriei.

#### c) Utilizarea ultracondensatoarelor

Conectând în paralel cu bateria de acumuloare condensatoare cu capacități foarte ridicate (actualmente se realizează condensatoare, cu dimensiuni rezonabile, având capacități de ordinul a 600 F, la 3 V), acestea din urmă pot asigura energiile necesare în cazul pornirilor vehiculului sau al unor suprasarcini, menajând, astfel, bateria de acumuloare și asigurând o autonomie mai ridicată a vehiculului.

În raport cu pilele de combustie, acumuloarele utilizate ca surse pe vehiculele electrice au câteva dezavantaje esențiale:

- densități de energie mai scăzute, care - pentru greutate/volume date - determină o autonomie mai scăzută a vehiculelor;
- durată de viață mai scăzută, limitată de numărul de cicluri încărcare-descărcare;
- timpi mari de încărcare, în stații specializate - complet diferite de cele pentru alimentarea autovehiculelor clasice (cu motoare termice).

Încărcarea bateriilor de acumuloare pentru vehicule electrice poate fi făcută, în principiu, în două moduri:

- a) bateria este scoasă de pe vehicul și încărcată pe o platformă specializată;
- b) bateria este încărcată direct pe vehicul.

În primul caz, dispunerea bateriei pe vehicul trebuie făcută astfel încât scoaterea și repunerea ei pe vehicul să fie făcute cu ușurință. Stațiile de încărcare pot fi, în acest caz, înzestrate cu baterii de tip corespunzător, care au fost încărcate în prealabil și care pot fi montate imediat pe vehicul. Astfel, timpul necesar vehiculului pentru a avea o baterie încărcată este foarte scurt. În schimb, stația de încărcare trebuie să aibă un spațiu mare de depozitare, în care să intre suficient de multe baterii, de diverse tipuri, pentru a satisface cererile diverselor tipuri de vehicule care pot solicita baterii încărcate. De aceea, soluția este aplicabilă doar în cazul unor comunități, întreprinderi etc. care au un număr și o varietate reduse de vehicule.

Soluția generalizabilă este aceea în care bateria se încarcă direct pe vehicul. În acest caz, cel mai simplu este ca stația de încărcare să ofere o sursă de tensiune alternativă monofazată standardizată (de exemplu, 220 V, 50 Hz), iar vehiculul să fie înzestrat cu o instalație proprie de încărcare, care cuprinde, în esență, un transformator - a cărui tensiune secundară este corelată cu tensiunea bateriei -, un redresor, precum și un sistem de comandă și control al tensiunii/curentului de încărcare. Legătura între sursa din stație și instalația de pe vehicul poate fi făcută conductiv - cu ajutorul unor conductoare și mufe (*încărcare conductivă*) - sau inductiv, în stație aflându-se primarul

transformatorului instalației de încărcare, iar pe vehicul - secundarul acestuia (*încărcare inductivă*).

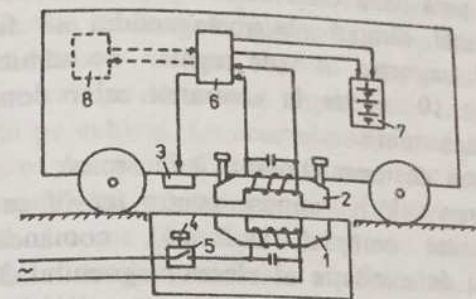


Fig. 2.61. Sistem de încărcare inductivă a bateriei de acumuloare de pe un automobil electric.

- 1 - primarul transformatorului; 2 - secundarul transformatorului; 3 - electromagnet;
- 4 - senzor magnetic; 5 - contactor; 6 - bloc de redresare și comandă;
- 7 - baterie de acumuloare; 8 - unitate centrală de procesare.

O soluție posibilă de încărcare inductivă este prezentată în Fig. 2.61. Primarul transformatorului 1 este încorporat în calea de rulare, iar secundarul transformatorului 2 este montat în partea inferioară a caroseriei vehiculului. Montarea acestuia din urmă poate fi făcută pe niște resorturi care să permită deplasarea sa - prin atracție de către primar -, încât să se micșoreze distanța dintre cele două armături; în acest fel, sunt posibile creșterea randamentului transformatorului și, totodată, menținerea unui spațiu suficient între calea de rulare și partea inferioară a caroseriei vehiculului, în timpul deplasării acestuia. Când vehiculul se apropie suficient de primarul 1, de la bordul vehiculului se dă comandă de activare a unui mic electromagnet 3. Câmpul său magnetic este sesizat de un senzor magnetic 4 (montat în cale), care basculează și comandă închiderea contactorului 5. Acesta permite alimentarea primarului 1 de la rețeaua de c.a., iar tensiunea indusă în secundarul 2 este aplicată redresorului aflat în blocul 6 (care cuprinde și dispozitivele de comandă necesare) și, apoi, folosită pentru încărcarea bateriei 7. Pe vehicul, se află și o unitate centrală de procesare (cu microprocesoare) 8, care are mai multe funcțiuni:

- la comanda primită, de începere a încărcării, determină activarea electromagnetului 3; încărcarea propriu-zisă nu este, însă, inițiată până când vehiculul nu este corect poziționat, astfel încât câmpul electromagnetului să fie sesizat de senzorul magnetic 4 (de regulă, se admite o abatere de ordinul a 10 cm de la centrarea celor două armături ale transformatorului);
- controlează tensiunea/curentul de încărcare;
- la atingerea valorii impuse pentru tensiunea bateriei (când aceasta este complet încărcată), comandă întreruperea curentului de excitație al electromagnetului 3, determinând, astfel, deconectarea de la rețea a primarului transformatorului și, implicit, încheierea procesului de încărcare (aceasta poate fi semnalizată la bordul vehiculului).

O variantă a soluției prezentate constă în montarea primarului transformatorului pe un panou vertical. În acest caz, secundarul se montează tot vertical, pe partea din față a vehiculului. Încărcarea poate începe când vehiculul se apropie suficient de panoul vertical.

Evident, încărcarea conductivă este mai ieftină și, teoretic, are randament mai ridicat (transformatorul neavând întrefier) decât cea inductivă. Practic, însă, în ambele cazuri, randamentul global al încărcării este aproximativ același. Încărcarea inductivă are, în schimb, câteva avantaje notabile:

- siguranța mare în utilizare (utilizatorul este izolat de orice contact direct cu sistemul de încărcare); aceasta este deosebit de importantă, mai ales când încărcarea se face în locuri neacoperite, pe timp de ploaie și ninsoare;
- confortul sporit (sistemul de încărcare intră în funcțiune automat, la o simplă apăsare de buton la bordul vehiculului, atunci când acesta parchează în stația de încărcare; implicit, este redus și timpul total necesar operației de încărcare); singura cerință specială este parcare corespunzătoare a vehiculului, pentru a asigura o aliniere cât mai bună a celor două armături ale transformatorului - toleranța admisă, de cca 10 cm, este, însă, suficientă, astfel încât poziționarea corectă

este ușor de realizat de către orice șofer; o simplificare a acestei probleme poate fi obținută dacă se utilizează sisteme simple de ghidare sau marcaje pe suprafața de deplasare.

Trebuie avut în vedere că încărcarea completă normală a unei baterii de acumuloare se face într-un timp relativ lung, acesta constituind, în general, un dezavantaj important în cazul stațiilor pentru încărcarea directă pe vehicul. La acumuloarele cu plumb-acid timpul de încărcare este de ordinul a 6-10 ore; el este mai redus la acumuloarele cu Ni-Cd, acestea permițând încărcarea cu curenți mai mari. De aceea, încărcarea directă pe vehicul este folosită, în mod uzual, în perioadele mai mari de neutilizare a vehiculului (de exemplu, pe durata parcărilor îndelungate, în timpul nopții etc.). Pentru a asigura o deplasare "de urgență" a unui vehicul căruia i s-au descărcat bateriile, se poate face o încărcare parțială "rapidă", adoptând forme și valori adecvate pentru curenții de încărcare (de exemplu, pentru o încărcare de 40%, timpul necesar poate fi de cca 5-30 minute, în funcție de tipul acumulatorului și de procedura de încărcare utilizată).

### 2.1.5. Automobile și autobuze hibrid-electrice

În stadiul actual al tehnicii, vehiculele electrice - în mod deosebit, autobuzele electrice, - cu alimentare numai de la baterii de acumuloare, nu pot constitui, încă, o alternativă nepoluantă acceptabilă (în principal, din cauza autonomiei lor reduse și a duratei mari de încărcare a bateriilor). De aceea, un interes deosebit îl prezintă așa-numitele vehicule hibrid-electrice.

Vehicul hibrid este vehiculul în care - pe durata anumitor etape ale funcționării sale - energia de propulsie este disponibilă de la două sau mai multe tipuri sau feluri de surse, cel puțin una din aceste surse trebuind să se afle pe vehicul. Dacă cel puțin una din surse poate furniza energie electrică (de regulă, dacă nu se fac alte precizări, se subînțelege că o astfel de sursă este o baterie de acumuloare), avem de-a face cu un vehicul hibrid-electric. Există diverse sisteme hibrid-electrice, în cele ce urmează prezentându-se cele mai importante dintre aceste sisteme.

2.1.5.1. Sisteme hibride termic+electric

Într-un sistem hibrid termic+electric, vehiculul este echipat cu un motor termic (cu ardere internă sau turbină cu gaze) și un motor electric. Pe vehicul se află, obligatoriu, sursa de energie pentru motorul termic - combustibilul (benzină, motorină, metanol etc.). În cazul automobilelor și autobuzelor hibrid-electrice din această categorie, pe ele se mai află și o sursă electrochimică - uzual, o baterie de acumulare.

Există două variante de realizare a unui sistem hibrid termic+electric de tipul menționat: varianta "serie" și varianta "paralel".

A. Varianta "serie"

Un sistem hibrid termic+electric "serie" are schema bloc prezentată în Fig. 2.62.

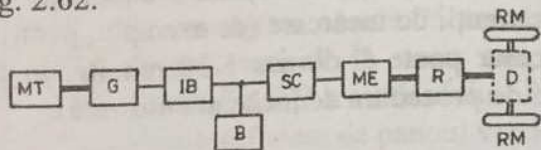


Fig. 2.62. Schema bloc a unui vehicul hibrid termic + electric "serie".

MT - motor termic; G - generator electric; ME - motor electric de tracțiune; B - baterie de acumulare; IB - instalație de încărcare a bateriei; SC - sistem de comandă a motorului electric; R - reductor; D - diferențial; RM - roți motoare.

Motorul termic MT antrenează un generator electric (mai precis, electromecanic) G, care constituie o sursă adițională bateriei B pentru alimentarea motorului electric de tracțiune ME. Generatorul poate asigura, la nevoie, și încărcarea bateriei prin intermediul instalației de încărcare IB. Motorul electric este comandat prin sistemul de comandă SC, care include convertorul și blocul de comandă corespunzător.

Cuplul dezvoltat de ME este transmis roților motoare RM, prin intermediul reductorului R și al eventualului diferențial mecanic D. Acesta din urmă lipsește în cazul acționării individuale a roților.

În această variantă, motorul electric asigură toată puterea de propulsie a vehiculului, motorul termic servind doar pentru creșterea energiei, a puterii sau a ambelor - disponibile pentru motorul electric.

În locul lui MT, poate fi folosit un volant - eventual, într-o

construcție compactă cu rotorul lui G. Atunci când vehiculul staționează, se trece G în regim de motor, prin alimentarea sa de la o rețea electrică exterioară, și se aduce volantul la o turație ridicată (până la cca 200.000 rot/min), ceea ce conduce la acumularea în volant a unei energii cinetice importante. Această energie este apoi (în timpul deplasării vehiculului) folosită pentru antrenarea lui G de către volant, funcționarea în continuare fiind similară celei în care G era antrenat de MT. Pentru creșterea autonomiei, este necesară minimizarea frecărilor volantului și rotorului lui G, impunându-se dispunerea acestora într-o încălțată și, eventual, pe lagăre magnetice. Există sisteme în care volantul poate fi cuplat și cu un motor termic (aflat pe vehicul) pentru a reîncărca volantul cu energie cinetică în timpul deplasării vehiculului, atunci când turația volantului scade sub o anumită valoare. O astfel de soluție poate conduce la economii importante de combustibil, față de soluția în care este folosit pentru antrenarea lui G numai MT, fără volant. Trebuie avute, însă, în vedere complicațiile constructive introduse de prezența volantului.

B. Varianta "paralel"

Schema bloc uzuală a unui sistem hibrid termic+electric "paralel" este prezentată în Fig. 2.63.

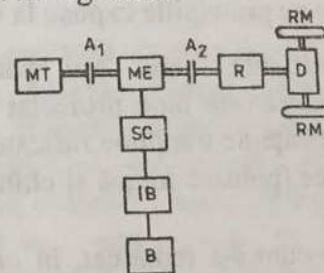


Fig. 2.63. Schema bloc uzuală a unui vehicul hibrid termic + electric "paralel".

MT - motor termic; ME - motor electric; B - baterie de acumulare; IB - instalație de încărcare a bateriei; SC - sistem de comandă a motorului electric; A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> - ambreiaje; R - reductor; D - diferențial; RM - roți motoare.

Caracteristic variantei "paralel" este faptul că vehiculul poate fi acționat fie de motorul termic MT, fie de motorul electric ME, fie de ambele motoare (în această ultimă situație cuplurile motoarelor acționează în paralel, de unde și denumirea variantei). În cazul schemei

din Fig. 2.63, în care MT și ME folosesc un arbore de tracțiune comun, aceste posibilități sunt realizabile astfel:

- dacă ambreiajele  $A_1$  și  $A_2$  sunt cuplate, iar ME este alimentat de la bateria B prin intermediul sistemului de comandă SC, propulsia este asigurată atât de MT, cât și de ME;
- dacă  $A_1$  și  $A_2$  sunt cuplate, iar ME nu este conectat la bateria B, propulsia este asigurată numai de MT; la nevoie, trecând ME în regim de generator, acesta poate fi utilizat pentru încărcarea bateriei B prin intermediul instalației IB;
- dacă  $A_1$  este decuplat, iar  $A_2$  este cuplat, propulsia este asigurată numai de ME; la frânarea recuperativă a vehiculului, ME devine generator și poate încărca bateria B.

Există și alte soluții de realizare a variantei "paralel": MT și ME pot avea arbori separați care, prin ambreiajele aferente, se pot cupla fie la aceeași pereche de roți motoare (folosind roți dințate sau curele, care transmit cuplurile de la motoare la un același reductor R și diferențial D), fie la perechi diferite de roți motoare (fiecare motor transmitând cuplul perechii de roți aferente, prin reductoare și diferențiale proprii).

Și în cazul acestei variante, pot fi concepute sisteme care să folosească volanți, bazate pe principiile expuse la varianta "serie".

În oricare dintre variante, "serie" sau "paralel", sistemul hibrid termic+electric - atunci când este bine proiectat - combină avantajele motorului termic (performanțe de tracțiune ridicate, autonomie mare) cu cele ale propulsiei electrice (poluare fonică și chimică redusă, economie de carburanți etc.).

De asemenea, după cum s-a remarcat, în oricare dintre variante, motorul termic poate fi folosit pentru încărcarea bateriei. Dacă un scop important al proiectării vehiculului îl reprezintă maximizarea economiei de combustibil, utilizarea motorului termic pentru încărcarea bateriei trebuie minimizată, deoarece - în mod inevitabil - o anumită cantitate de energie se pierde la încărcarea sau la descărcarea unei baterii. Astfel, pentru a obține consumul cel mai bun posibil de combustibil, vehiculul trebuie acționat, folosind motorul electric sau motorul termic sau ambele, până când bateria ajunge la o stare de încărcare minimum

acceptabilă, de cca 20-40%, stare în care trebuie, apoi, menținută. Bateria urmează a fi încărcată complet - atunci când se ivește ocazia convenabilă - de la o rețea exterioară vehiculului. Acest mod de operare este cunoscut sub numele de "mod de extindere a autonomiei".

Principalul avantaj al variantei "serie" este determinat de faptul că nu există o legătură mecanică între motorul termic și sistemul de propulsie a vehiculului. Aceasta, pe de o parte, permite ca motorul termic să funcționeze în acele puncte ale caracteristicilor sale mecanice în care se obțin randamente maxime și poluare minimă, iar pe de altă parte asigură o mare flexibilitate în dispunerea pe vehicul a componentelor lanțului de acționare (motorul termic și generatorul electric pot fi dispuse într-un loc, independent de motorul electric). Un alt avantaj al variantei "serie" îl constituie relativa simplitate a acționării/conducerii vehiculului, aceasta realizându-se, în esență, numai cu motorul electric și sistemul său de comandă - ceea ce permite reglajul vitezei și forței de tracțiune, precum și inversarea sensului de mers numai pe cale electrică, implicând un reductor (dacă este utilizat) foarte simplu. Eventual, poate fi folosită acționarea individuală a roților, ceea ce conduce la dispariția diferențialului mecanic din lanțul de acționare.

Varianta "serie" are, însă, dezavantajul inerent al utilizării a trei mașini: motorul termic, generatorul electric și motorul electric. În plus, motorul electric trebuie dimensionat pentru puterea maximă de durată  $P$  pe care o poate cere vehiculul - de exemplu, atunci când urcă o rampă lungă sau când merge pe o distanță mare, cu viteză ridicată. Majoritatea timpului, însă, motorul va funcționa sub  $P$ . În cazul deplasării pe o distanță mare, bateria se va descărca într-un timp relativ scurt de la începutul călătoriei, rămânând ca întreaga putere să fie furnizată de ansamblul "motor termic + generator electric", ceea ce impune ca și aceste două mașini să fie dimensionate fiecare la  $P$ , încât puterea totală necesară a fi instalată pe vehicul este  $3P$ . Totuși, varianta "serie" este foarte adecvată pentru vehiculele utilizate în aplicații ce reclamă deplasări relativ scurte, sub 50 km pe zi (pentru navetă la locul de muncă, pentru cumpărături etc.), în care motorul termic și generatorul electric au dimensiuni mici (puterea lor de dimensionare este inferioară

lui  $P$ ) față de motorul electric.

Utilitatea variantei "serie" pentru extinderea autonomiei unui vehicul electric, prin folosirea unui mic grup "motor termic + generator electric", este foarte bine ilustrată prin curbele din Fig. 2.64. Acestea exemplifică situația pentru un microbuz electric având masa de 3500 kg și un motor electric de 40 kW, alimentat - inițial - numai de la o baterie Pb-acid cu 36 module de 6 V, având energia totală de 34 kWh. Convertindu-l într-un vehicul hibrid, variantă "serie", prin adăugarea unui mic grup "motor termic + generator electric" de 3 kW - care funcționa continuu în timpul utilizării microbuzului -, s-a obținut, practic, o dublare a autonomiei inițiale de 104 km. De remarcat că varianta permite obținerea aceleiași autonomii de 104 km, dar cu un număr mai mic de module (între 18 și 24) ale bateriei. În acest ultim caz, cu generatoarele (și motoarele) de mare randament disponibile la ora actuală, greutatea grupului "motor termic + generator electric" reprezintă doar o mică parte din greutatea modulelor eliminate ale bateriei, ceea ce face ca greutatea totală a microbuzului să scadă semnificativ.

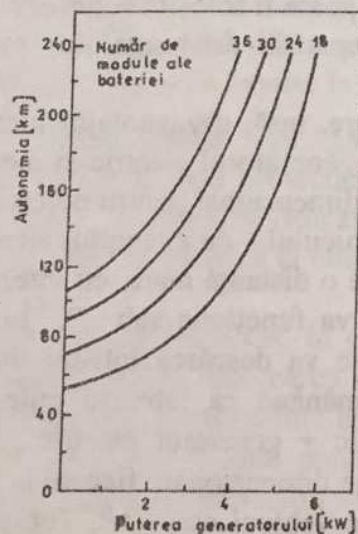


Fig. 2.64. Ilustrativă pentru extinderea autonomiei unui microbuz electric, folosind un mic grup "motor termic + generator electric".

Avantajul fundamental al variantei "paralel" față de cea "serie" îl

constituie faptul că necesită doar două mașini - motorul termic și motorul electric -, care pot fi de dimensiuni mai mici pentru obținerea acelorași performanțe. De exemplu, dacă puterea necesară într-o aplicație este  $P$ , fiecare din cele două motoare poate fi dimensionat la  $P/2$ , cu condiția ca bateria să nu se descarce în timpul acelei aplicații. Pentru deplasări pe distanțe mari, numai motorul termic trebuie dimensionat la  $P$ , în timp ce motorul electric (care poate fi utilizat și ca generator pentru încărcarea bateriei, prin frânare recuperativă sau prin antrenarea sa de către motorul termic) se dimensionează în continuare la  $P/2$ . În acest caz, puterea totală instalată pe vehicul este doar  $1,5P$  în comparație cu  $3P$  pentru varianta "serie". (Observație: componentele vehiculului în varianta "paralel" pot fi dimensionate în diverse moduri, exemplul de mai sus fiind doar unul dintre ele). Partea mecanică și conducerea vehiculului sunt, însă, mult mai complicate decât în varianta "serie", datorită necesității ambreiajelor (și a sistemelor aferente de cuplare-decuplare), a reductorului cu mai multe trepte (inclusiv pentru inversarea sensului de mers), a diferențialului etc. Soluția se pretează, însă, la transformarea relativ simplă a unui automobil sau autobuz clasic, echipat cu motor termic, într-unul hibrid-electric. De regulă, acesta urmează să fie propulsat numai de motorul electric în zonele în care restricțiile de poluare sunt mari, dar performanțele cerute vehiculului (acelerații, viteze) nu sunt ridicate - de exemplu, în zonele aglomerate ale orașelor -, urmând ca propulsia hibridă sau numai cu motorul termic (atunci când bateria este descărcată) să se facă în afara acestor zone. Motorul electric este utilizat și pentru pornirea motorului termic.

Cercetarea și dezvoltarea vehiculelor hibride termic+electric se află în plină desfășurare în întreaga lume, acestea fiind considerate drept singurul sistem actual performant, capabil să reducă într-o măsură semnificativă și într-un timp relativ scurt poluarea produsă de vehiculele rutiere și consumul de combustibil al acestora.

Un exemplu în acest sens îl constituie autobuzul hibrid pentru serviciu urban, construit de Bus Industries of America și General Electric (GE), în anul 1994. El are șase roți - două roți libere în față și patru roți motoare în spate - și este realizat în varianta "serie", schema bloc de acționare a roților motoare fiind cea reprezentată în Fig. 2.65.

Se remarcă faptul că fiecare roată motoare este acționată individual de câte un motor; motorul (asincron) este integrat împreună cu reductorul într-un bloc compact de acționare. Întrucât reductorul este realizat cu raport unic de transmisie, iar blocurile de acționare integrate se află chiar la nivelul roților motoare, cuplul este transmis celor patru roți motoare foarte eficient, fiind eliminată necesitatea unei transmisii greoaie și scumpe cu mai multe trepte de viteză, precum și a unui ansamblu punte-diferențial, voluminos și scump la rândul său. Aceasta permite realizarea unei podele joase, de la un capăt la altul al autobuzului, pe toată lungimea sa de 12,2 m, fără a mai fi necesară nici o denivelare a podelei pentru a trece peste punțile vehiculului - așa cum este nevoie în cazul autobuzelor clasice. Existența podelei joase permite urcarea și coborârea foarte comodă și în deplină siguranța a călătorilor prin cele trei uși duble ale autobuzului. De asemenea, la ușa din față este prevăzută o rampă de acces a călătorilor în scaune cu roțile, nemaifiind necesar un mecanism de ridicare a acestora - scump, greoi și adesea

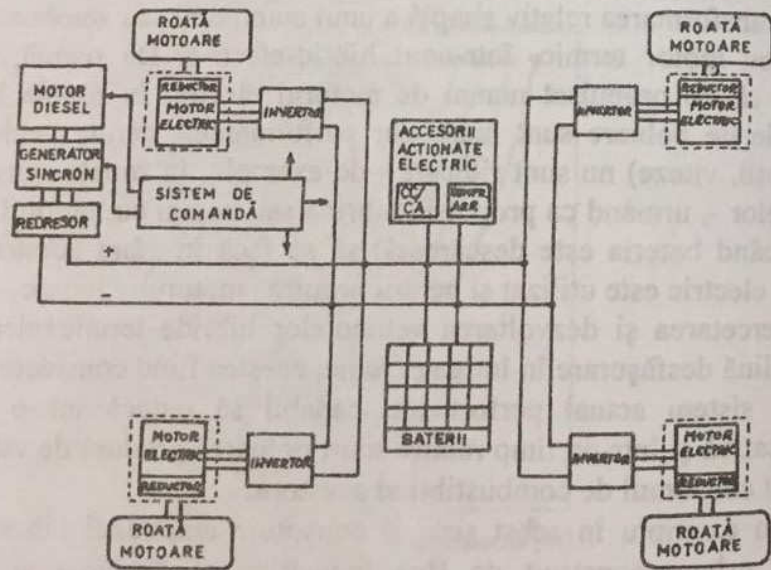


Fig. 2.65. Schema bloc de acționare a roților motoare ale unui autobuz hibrid termic + electric "serie", construit de Bus Industries of America și GE.

nefiabil. În plus, configurația prezentată rezolvă și problema greutateii limită pe punte din cazul autobuzelor clasice.

Motoarele de tracțiune - de 75 kW fiecare - sunt alimentate, prin intermediul unor invertoare, de la o baterie asistată de sursa adițională de energie formată dintr-un motor Diesel și un alternator + redresor.

Cuplul dezvoltat de fiecare motor este controlat printr-un bloc electronic, care conține atât inverterul, cât și circuitele de comandă propriu-zise, bazate pe sisteme microprocesoare.

Bateria de tracțiune, cu Ni-Cd, formată din 270 celule, are o capacitate de 80 Ah și o energie totală de 25 kWh. A fost ales acest tip de baterie datorită raportului său bun performanță/greutate și duratei sale mari de viață preconizată pentru autobuzul hibrid proiectat.

Sursa adițională de energie alimentează motoarele de tracțiune și, în plus, asigură încărcarea bateriei de tracțiune și alimentează serviciile auxiliare consumatoare de energie electrică ale autobuzului. În esență, sursa adițională de energie asigură puterea medie cerută de acționările electrice ale autobuzului, în timp ce bateria de tracțiune acoperă vârfurile de sarcină din perioadele de accelerare a vehiculului, dar primește energie în perioadele de frânare recuperativă.

Tabelul 2.7.

Parametru	Condiții	Valoare
Viteza maximă	Funcționare continuă, în palier	93,6 km/h
Viteza pe rampă	Rampă 16%	11,3 km/h
	Rampă 2,5%	71,0 km/h
Rampă maximă la pornire		17%
	Încărcare maximă	13%
Accelerația și decelerația maximă	În palier	1,47 m/s <sup>2</sup> [0,15 g]
	În palier; încărcare maximă	1,27 m/s <sup>2</sup> [0,13 g]

Un sistem automat de comandă - în buclă închisă - cu microprocesoare face ca motorul Diesel și alternatorul să funcționeze la sarcini optime pentru a avea, în primul rând, o emisie minimă de gaze

poluante și, în al doilea rând, pentru a menține la o valoare cât mai scăzută consumul de combustibil. Sursa adițională de energie are 100 kW, fiind controlată să funcționeze pe o plajă a tensiunii continue între 250 și 400 V.

Principalii parametri ai autobuzului sunt prezentați în Tab. 2.7. Dacă nu se specifică altceva, aceștia corespund încărcării complete a vehiculului, cu călători doar pe scaune. La încărcarea maximă, se ține seama și de toți călătorii admiși în picioare. Decelerațiile indicate sunt realizate numai cu sistemul de frânare recuperativă, fără a face uz de frânele mecanice.

### 2.1.5.2. Sisteme hibride electric+electric

De regulă, această denumire este folosită pentru sistemele în care vehiculul are acționare pur electrică, motorul de tracțiune putând fi alimentat de la două sau mai multe tipuri de surse de energie electrică (exceptând generatoarele electromecanice). Pe vehicul se află cel puțin una dintre aceste surse - uzual, o baterie de acumuloare. În continuare, vom ilustra câteva dintre soluțiile de sisteme hibride electric+electric care prezintă interes.

#### A. Sistem hibrid "linie de contact+baterie de acumuloare"

Într-un sistem de acest fel, motorul de tracțiune poate fi alimentat de la o linie de contact exterioară vehiculului, prin intermediul unui captator, și, adițional, de la o baterie de acumuloare, aflată pe vehicul. Schema bloc a unui astfel de sistem este prezentată în Fig. 2.66, semnificația componentelor - în afara liniei de contact LC (uzual, de c.c.; dacă ea este de c.a., trebuie să se facă redresarea curentului pe vehicul) - fiind aceeași cu cea din Fig. 2.62. De fapt și structura sa este - în mare - similară cu a unui sistem hibrid termic+electric, varianta "serie", deosebirea esențială constând în aceea că, în locul grupului "motor termic+generator electric", este folosită linia de contact.

Sistemele hibride de acest fel au fost concepute, în principal, pentru vehicule electrice rutiere de transport în comun urban, care să nu

fie deloc poluante, dar care să înlăture o parte din inconveniente pe care le prezintă alimentarea numai de la linia de contact (cazul

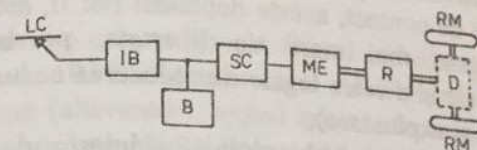


Fig. 2..66. Schema bloc a unui vehicul hibrid "linie de contact+baterie de acumuloare".

LC - linie de contact; ME - motor electric de tracțiune; B - baterie de acumuloare; IB - instalație de încărcare a bateriei; SC - sistem de comandă a motorului electric; R - reductor; D - diferențial; RM - roți motoare.

troleibuzelor), putând funcționa și ca autobuze electrice. Avantajele unor astfel de vehicule, față de troleibuzele obișnuite, sunt determinate de următoarele considerente:

- deplasarea în zonele aglomerate ale unui oraș este mult mai flexibilă fără alimentare de la linia de contact, contribuția la congestionarea traficului în aceste zone fiind, astfel, redusă;
- este posibilă reducerea numărului de "secțiuni speciale" ale liniei de contact (derivații, intersecții etc.), care reprezintă o cauză importantă a scăderii vitezei comerciale a troleibuzelor pe un traseu dat;
- pot fi eliminate buclele de întoarcere la cap de linie;
- este posibilă acoperirea oricăror trasee, în particular: realizarea unor trasee de extindere a celor existente pentru troleibuze, fără a mai fi necesară construirea liniilor de contact pe aceste trasee;
- situațiile determinate de perturbările temporare sau ocazionale ale traficului pe liniile de troleibuz, cum sunt: lucrări la calea de rulare, întreruperi ale alimentării cu energie a liniei de contact, modificări ale traseelor din rațiuni manageriale sau impuse de manifestații publice, pot fi rezolvate la fel de versatil ca în cazul utilizării autobuzelor clasice;

- deplasarea vehiculului de la depou (eventual, de la fabrica producătoare) până la intrarea în traseul de troleibuz sau deplasarea între depouri se poate face fără a necesita instalarea unor linii de contact; aceste deplasări pot fi, astfel, planificate cu un grad mai mare de libertate, pe baza cerințelor manageriale și a celor legate de reducerea costurilor totale (de investiție și exploatare);
- similar, deplasarea vehiculului în interiorul depourilor, în atelierele de reparații și în diversele clădiri în care se asigură service, precum și în locurile de parcare din aceste depouri și din exteriorul lor, poate fi făcută fără folosirea liniei de contact.

Principala complicație este determinată de necesitatea cuplării/decuplării captatorului la/de la linia de contact atunci când se trece de la funcționarea ca autobuz la cea de troleibuz și invers, operația putându-se face manual sau automat.

În timpul funcționării ca troleibuz, bateria de tracțiune a vehiculului se încarcă de la linia de contact, mărind astfel autonomia pentru funcționarea ca autobuz electric. Pentru creșterea acestei autonomii sau reducerea greutateii bateriei, pe vehicul poate fi instalat și un grup "motor termic+generator electric", obținându-se astfel un vehicul hibrid cu trei moduri de funcționare (vehicul "tri-mod"): alimentare de la linia de contact, de la bateria de acumuloare sau de la grupul "motor termic+generator electric".

Astfel de vehicule "tri-mod" au fost construite pentru transportul în comun din Bologna (Italia), încă din 1990 existând în circulație 20 de vehicule al căror motor electric de tracțiune are posibilitatea să asigure putere suficientă, dacă este alimentat de la linia de contact de 600 V sau de la un grup "motor termic+generator electric". Pentru deplasări pe distanțe scurte (pentru situații "de urgență") cu viteze de cca 5 km/h, care reclamă putere redusă, motorul poate fi alimentat la 48 V de la patru baterii Pb-acid de 12 V conectate în serie.

Motorul electric, de c.c. cu excitație separată, are o putere unioară de 130 kW. Comanda acestuia se face printr-un VTC, care

permite modificarea continuă a tensiunii aplicate rotorului între zero și tensiunea nominală și apoi, automat, asigură slăbirea de câmp, jucând astfel rolul dublu de regulator al curentului rotoric și al curentului de excitație.

Motorul termic este un motor Diesel turbo, supraîncărcat, având puterea maximă de 103 kW. Generatorul electric antrenat de acesta este o mașină sincronă (alternator), având puterea în regim continuu de 80 kVA și tensiunea nominală la borne 560 V, 50 Hz; desigur, el este asociat cu un redresor.

Posibilitatea de alimentare a motorului de tracțiune și de la baterie are avantajul suplimentar că elimină problemele de poluare produse de pornirea și menținerea în funcțiune a motoarelor termice în spații închise (ateliere, stații de alimentare cu combustibil etc.).

Cuplarea și decuplarea captatoarelor vehiculului la/de la linia de contact se fac prin comanda dată de la bord de către conducătorul vehiculului.

### B. Sistem hibrid "baterie solară+baterie de acumuloare"

Într-un astfel de sistem, cunoscut și sub numele de sistem hibrid "solar+electric", motorul de tracțiune poate fi alimentat de la o baterie de acumuloare și de la o baterie solară (BS), formată dintr-un panou cu celule fotovoltaice care convertesc direct energia solară în energie electrică, toate acestea aflându-se pe vehicul.

Schema bloc a unui sistem hibrid "solar+electric" este prezentată în Fig. 2.67, semnificația majorității componentelor fiind aceeași cu cea din Fig. 2.66. În afara bateriei solare BS, aici mai apare blocul SPM - sistem de urmărire a punctului de putere maximă. El este necesar pentru creșterea eficienței bateriei solare, astfel încât, la o valoare dată a puterii solare incidente pe celulele fotovoltaice, acestea să funcționeze pe caracteristicile lor curent-tensiune în punctul care conduce la putere maximă la ieșire.

În esență, bateria solară contribuie la creșterea autonomiei vehiculului față de situația în care ea nu ar fi utilizată. Un vehicul

electric cu alimentare exclusivă de la bateria solară este, pe de o parte, greu de construit și, pe de altă parte, inutilizabil în circulația curentă. Dificultatea de construire este determinată de suprafața mare necesară a panourilor solare pentru obținerea - chiar în condițiile cele mai bune de captare a energiei solare - a unei puteri rezonabile pentru un vehicul.

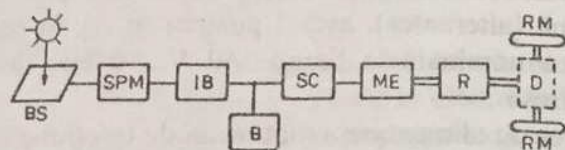


Fig. 2.67. Schema bloc a unui vehicul hibrid "solar+electric".

BS - baterie solară; SPM - sistem de urmărire a punctului de putere maximă; ME - motor electric de tracțiune; B - baterie de acumulare; IB - instalație de încărcare a bateriei; SC - sistem de comandă a motorului electric; R - reductor; D - diferențial; RM - roți motoare.

Astfel, ținând seama că randamentul uzual al celulelor solare actuale este de cca 10-20% și că, într-o zi senină de vară, valoarea maximă a puterii solare incidente normal pe suprafața celulelor este de cca 1 kW/m<sup>2</sup>, rezultă că, de pe 1 m<sup>2</sup> de celule solare, se poate obține la ieșire o putere maximă de cca 0,1-0,2 kW. Deci, pentru a construi un astfel de vehicul electric cu puterea maximă de doar 5 kW, ar fi necesară o suprafață de captare normală a panourilor solare atașate vehiculului de cca 25-50 m<sup>2</sup> (neținând seama și de randamentul celorlalte componente ale schemei), ceea ce este aproape imposibil de realizat tehnic. Dacă se ține seama de influența factorilor meteorologici, a ciclului zi-noapte și a altor factori care apar în circulația curentă (tregeri prin zone umbrite de clădiri, pe sub poduri etc.), se justifică și afirmația că un astfel de vehicul - chiar dacă ar avea o suprafață rezonabilă a panourilor solare - este inutilizabil în circulația curentă.

De aceea, este absolut necesară utilizarea bateriei solare în tampon cu o baterie de acumulare. În acest fel, în perioadele în care sunt condiții de captare a energiei solare, bateria solară poate prelua o parte din sarcina bateriei de acumulare sau o poate încărca pe aceasta din urmă. Ca urmare, poate fi crescută autonomia vehiculului sau -

pentru o aceeași autonomie - poate fi scăzută greutatea bateriei de acumulare. Evident, în ambele cazuri vehiculul trebuie prevăzut și cu posibilitatea de încărcare a bateriei de acumulare de la o rețea electrică exterioară.

Pe plan mondial, sunt foarte multe cercetări și încercări de realizare a unor astfel de vehicule, fiind unul dintre domeniile cu utilitate imediată de aplicare a celulelor solare de putere. Problemele care se pun sunt legate de amplasarea panourilor solare pe vehicul, de întreținerea lor și de costurile pe care le implică fabricarea acestor vehicule.

De menționat că se organizează și competiții cu vehicule hibride "solar+electric" (revendicate ca *vehicule solare*), cele două mari curse, în acest domeniu, fiind "GM Sunraycer USA", organizat de General Motors, în SUA, pe un traseu de 2650 km (Orlando - Detroit), și "World Solar Challenge", în Australia, pe un traseu de 3013 km (Darwin - Adelaide). Aceste competiții sunt, de fapt, terenuri de experimentare importante pentru dezvoltarea unor noi materiale și a unor soluții constructive performante pentru vehicule, pentru sistemele de tracțiune electrică (motoare, sisteme de comandă, sisteme de transmisie, baterii de acumulare) și pentru bateriile solare, în condiții extreme.

S-a reușit, astfel, propulsarea unui automobil de 6 m lungime și 2 m lățime, la o viteză de peste 120 km/h, cu mai puțin de 1 kW, ceea ce confirmă înalta tehnologie realizată.

### C. Sistem hibrid "pilă de combustie+baterie de acumulare"

Într-un sistem de acest fel, motorul de tracțiune poate fi alimentat de la o pilă electrică de combustie și de la o baterie de acumulare, aflate pe vehicul.

Schema bloc a unui astfel de sistem hibrid este prezentată în Fig. 2.68, semnificația majorității componentelor fiind aceeași cu cea din Fig. 2.66. În afara pilei de combustie PC, aici mai apare blocul SCO - sistem de condiționare a combustibilului și a oxidantului care alimentează pila de combustie.

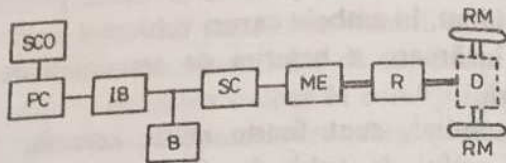


Fig. 2.68. Schema bloc a unui vehicul hibrid "pilă de combustie+baterie de acumulare".

PC - pilă de combustie; SCO - sistem de condiționare a combustibilului și a oxidantului; ME - motor electric de tracțiune; B - baterie de acumulare; IB - instalație de încărcare a bateriei; SC - sistem de comandă a motorului electric; R - reductor; D - diferențial; RM - roți motoare.

În acest caz, sursa principală o constituie pila de combustie, ale cărei avantaje au fost detaliate în §2.1.4. Avantajul principal al funcționării acesteia în tampon cu o baterie de acumulare rezultă din posibilitatea de a dimensiona pila de combustie numai pentru puterea medie a vehiculului și de a obține performanțe dinamice ridicate ale vehiculului prin acoperirea vârfurilor de putere (pe durata accelerărilor) cu ajutorul bateriei de acumulare. În plus, există posibilitatea frânării recuperative a vehiculului, folosind energia rezultată prin frânare pentru încărcarea bateriei. Bateria poate fi încărcată și de pila de combustie, în perioadele în care puterea cerută acesteia din urmă, de către vehicul, este inferioară puterii medii.

## 2.2. METROURI CU ROȚI PNEUMATICE

Ideea utilizării roților pneumatice pentru vehicule pe căi ghidate este relativ veche, atractivitatea ei fiind determinată de principalele avantaje pe care le au aceste roți:

- coeficient de aderență superior celui din cazul roților metalice;
- zgomot și vibrații reduse.

Valorile medii generale ale coeficientului de aderență, pentru roți metalice și roți pneumatice, în diverse condiții, pot fi luate cele indicate

în Tab. 1.1.

Se remarcă faptul că, în cazul roților pneumatice, se pot obține valori ale coeficientului de aderență mult superioare celor din cazul roților metalice. Însă, influența stării căii de rulare este mult mai puternică în primul caz - când coeficientul de aderență poate scădea de la 0,75 la 0,10 - decât în al doilea caz - când variația coeficientului de aderență este doar de la 0,30 la 0,10. De aceea, pentru a profita la maximum de valorile ridicate ale coeficientului de aderență, este bine ca vehiculul cu roți pneumatice să circule pe o cale cât mai puțin expusă factorilor externi (umezeală, gheață, noroi etc.) ce înrăutățesc aderența, și acesta este - în primul rând - cazul căilor subterane. Ceea ce explică de ce utilizarea roților pneumatice la vehicule pe căi ghidate a prezentat un interes deosebit pentru metrouri.

Prima aplicație de anvergură a acestei idei aparține rețelei de transport urban din Paris (RATP), care, încă de la începutul anilor '50, a instalat pe una din liniile de metrou o nouă cale de rulare ce permite circulația unor rame cu roți pneumatice, adoptând o soluție constructivă originală. În Fig. 2.69, este prezentată această soluție pentru un boghiu (cu patru roți) al vehiculului.

Roțile pneumatice 1 de sustentație și propulsie, rulând pe calea principală 2 (grinzi metalice sau de beton), sunt dublate de roți metalice 3, care intră în acțiune, rulând pe șinele metalice 4, la eventuala dezumflare a pneurilor, precum și pentru a asigura ghidarea vehiculului la derivații ale căii. Roțile metalice servesc, în plus, ca suport pentru saboții de frână, care realizează frânarea mecanică a vehiculului. Ghidarea transversală - la funcționarea normală - este asigurată de roțile pneumatice 5 (ce se pot roti în jurul unor axe verticale, fixate în suporturi montate de fiecare parte a boghiului), care rulează pe niște bare (șine) metalice laterale 6, instalate pe toată lungimea căii, ele fiind susținute de suportii-izolatori 7.

Barele 6 servesc și pentru alimentarea cu energie electrică a vehiculului, pe ele alunecând captatoarele de curent aflate pe vehicul. Suprafața de contact a acestora este verticală, iar captatoarele sunt desfășurate (împinse spre bare) în plan orizontal. Partea de contact a captatoarelor este înzestrată cu două benzi de carbon, întărite la

extremități cu tije de bronz. Carbonul lubrifiază bara de ghidare, ceea ce este absolut necesar, întrucât rezistența la înaintare datorată captatoarelor este mult mai mare decât în cazul captatoarelor desfășurate în plan vertical (având suprafața de contact orizontală), așa cum se folosesc la metroul cu roți metalice.

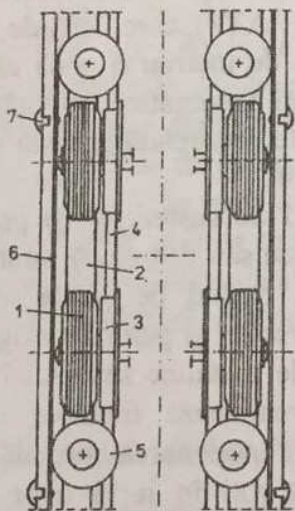
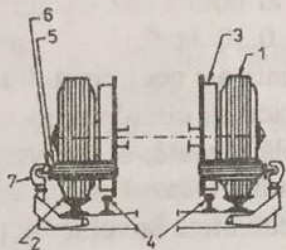


Fig. 2.69. Schema unui boghiu al metroului pe pneuri din Paris.

- 1 - roți pneumatice de susținere și propulsie; 2 - grinzile de rulare; 3 - roți metalice de siguranță; 4 - șine metalice de siguranță; 6 - bare metalice de ghidare; 7 - suporturi-izolatori.

Roțile de rulare pneumatice sunt izolante electrice și, deci, nu pot fi utilizate - ca roțile metalice - pentru întoarcerea curentului prin calea de rulare. Întoarcerea curentului poate fi realizată într-una din

modalitățile prezentate mai jos.

O soluție constă în a avea la ambele bare de ghidare aceeași polaritate (pozitivă), întoarcerea curentului făcându-se prin captatoarele montate sub boghiuri, care alunecă pe șinele metalice de pe cale - eventual, pe grinzile de rulare, dacă sunt metalice.

O altă soluție, adoptată pe unele rețele de metrou cu roți pneumatice - de exemplu, cea din Lille -, constă în a avea polarități diferite la cele două bare de ghidare. Aceasta are un dublu avantaj: nu mai sunt necesare captatoarele de sub boghiuri și nu mai apar curenți vagabonzi în sol. Are, însă, dezavantajul că nu mai este indiferent modul în care sunt orientate vehiculele pe cale.

Un vagon motor are două boghiuri cu câte două punți, fiecare punte fiind acționată de un motor de tracțiune longitudinal, conform schemei din Fig. 2.70. Motorul 1 transmite cuplul către cele două roți motoare, 5, prin intermediul reductorului 2 și al diferențialului 3. Motorul este semisuspendat, sprijinindu-se - pe de o parte - de cadrul boghiului și - pe de altă parte - de axele roților, prin intermediul carcasi 4 a blocului reductor + diferențial.

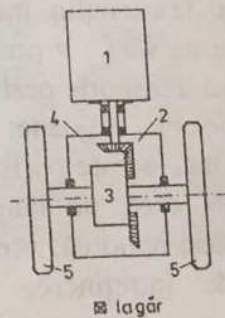


Fig. 2.70. Acționarea roților unei punți a metroului pe pneuri din Paris.  
1 - motor; 2 - reductor; 3 - diferențial; 4 - carcasa blocului reductor + diferențial; 5 - roți motoare.

Sistemul de metrou prezentat mai sus a fost pus în aplicare progresiv, pe mai multe linii din Paris: mai întâi, pe o linie care prezenta caracteristici tehnice dificile, datorită rampelor relativ mari (40 ‰), și care constituia, astfel, un excelent stand de încercări; apoi, pe cele mai

încărcate două linii (cu trafic foarte intens) ale rețelei de metrou; ulterior, pe mai multe alte linii ale acestei rețele.

Un material rulant de același tip există și la Montreal (Canada), Ciudad de Mexico (Mexic), Santiago (Chile), Marsilia, Lyon și Lille (Franța), precum și în SUA și în Japonia, unde au fost realizate sisteme integral automatizate. Ca urmare, există în jurul a 10.000 vagoane de metrou pe roți pneumatice care circulă, actualmente, în lume, ceea ce atestă calitatea acestui sistem și succesul de care s-a bucurat.

**Avantajele** sistemului, care decurg din avantajele de bază pe care le au roțile pneumatice - enunțate la începutul acestui subcapitol -, sunt următoarele:

- performanțe ridicate de accelerare și frânare, care nu mai sunt limitate de aderența dintre roți și cale, ci de confortul călătorilor (de exemplu, accelerația de pornire este limitată de aderență la cca  $1,1 \text{ m/s}^2$  pentru roțile metalice pe șine metalice și, respectiv, de confortul călătorilor în picioare la cca  $1,3 \text{ m/s}^2$  pentru roțile pneumatice); acestea conduc la o creștere a vitezei comerciale și a debitului liniei; pe linia cea mai încărcată a metroului din Paris, de exemplu, intervalul dintre două trenuri succesive - la orele de vârf - a putut fi redus la 95 secunde, ceea ce permite să se transporte peste 35.000 călători pe oră și pe sens, cu trenuri de cinci vagoane;
- posibilitatea de a atinge aceste performanțe ridicate cu trenuri cu aderență parțială, care, pe lângă vagoane-motor, au în componență și vagoane-remorcă; aceasta conduce la economii de investiții și de întreținere, în raport cu trenurile convenționale;
- capacitatea de a urca rampe mari, tot datorită aderenței ridicate, ceea ce poate permite - în cazul realizării unei linii noi - să se diminueze cheltuielile de construcție, aducând, de exemplu, linia cât mai aproape de suprafața solului, atunci când o cere relieful orașului;

- performanțe de frânare garantate, acestea conducând la o mare precizie în oprirea trenurilor în stații, precizie pe care o reclamă - în particular - sistemele de conducere automată;
- reducerea zgomotului și vibrațiilor, având ca efecte pozitive: poluare fonică mai redusă, confort sporit pentru călători, precum și solicitări mai reduse ale vehiculului și căii; aceasta prezintă interes deosebit și pentru faptul că imobilele situate în lungul liniei nu sunt afectate de vibrațiile produse la deplasarea materialului rulant;
- reducerea cheltuielilor de întreținere a căii, ca urmare a solicitării și uzurii mai reduse ale acesteia;
- condiții de circulație a trenurilor cu un nivel foarte ridicat de siguranță, ca urmare a existenței dispozitivelor de ghidare a materialului rulant.

Aceste avantaje sunt considerabile, dar trebuie puse în balanță cu **dezavantajele** pe care le prezintă utilizarea roților pneumatice:

- rezistență la înaintare mai ridicată, care determină un consum mai mare de energie; el nu are, însă, o pondere prea însemnată în consumul global de energie al unei rețele de metrou de tip urban, cu interstații scurte, în care partea principală a acestui consum este utilizată pentru accelerarea trenurilor;
- cheltuieli de investiții mai ridicate, atât în materialul rulant, cât și, mai ales, în cale; acestea sunt compensate, într-o oarecare măsură, de cheltuielile de întreținere a căii, net mai scăzute.

### 2.3. VEHICULE MONOȘINĂ

Sintagma "vehicul monoșină" este folosită, de regulă, pentru a desemna vehicule care au drept cale de rulare ghidată fie o singură șină metalică (vehiculele fiind înzestrate cu roți metalice - de exemplu, vehiculele giroscopice), fie o grindă - uzual, înălțată deasupra solului, pe estacadă. În cel de al doilea caz, vehiculele sunt înzestrate, de obicei, cu roți pneumatice de rulare și ghidare.

Vehiculele cu o singură șină metalică prezintă un interes tehnic foarte restrâns. De aceea, în cele ce urmează, ne vom ocupa numai de vehiculele monoșină din a doua categorie.

Trebuie subliniat faptul că nu orice vehicul care se deplasează pe căi deasupra solului este un vehicul monoșină. Există și vehicule cu roți (trenuri, tramvaie etc.) sau fără roți (cu pernă pneumatică sau magnetică), care circulă pe estacade, fără a fi considerate vehicule monoșină.

Pe de altă parte, deși majoritatea vehiculelor monoșină construite circulă pe estacade, ele pot fi și la nivelul sau sub nivelul solului, ori în tunele subterane.

Există mai multe soluții constructive pentru vehiculele monoșină. Una dintre cele mai cunoscute este soluția germană Alweg, realizată în două variante: de tip sprijinit (Fig. 2.71.a) sau de tip suspendat (Fig. 2.71.b), ele diferind doar prin poziția cutiei 1 a vehiculului față de calea de rulare 2.

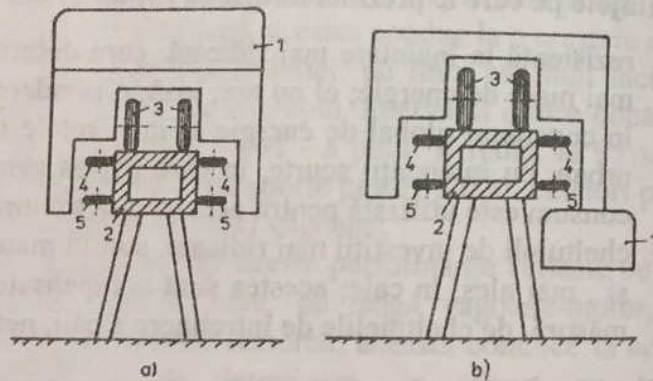


Fig. 2.71. Principiul soluției Alweg pentru vehicule monoșină:

a) de tip sprijinit; b) de tip suspendat.

- 1 - cutia vehiculului; 2 - cale de rulare; 3 - roți pneumatice de susținere și rulare;  
4 - roți pneumatice de ghidare; 5 - roți pneumatice de stabilizare.

În Fig. 2.71, au fost prezentate foarte schematic doar componentele care servesc la înțelegerea principiului soluției Alweg. Astfel, roțile 3 sunt roți pneumatice de susținere și rulare, roțile 4 sunt roți pneumatice de ghidare, iar 5 sunt roți pneumatice de stabilizare,

acestea din urmă fiind necesare pentru a contracara balansul lateral al vehiculului. Grinda 2, care constituie "șina" de rulare, este realizată din beton sau metal.

De menționat că, în foarte multe construcții, pentru susținerea grinzii - realizată cu piloni dispuși în lungul căii, la anumite intervale, nu se folosesc piloni dubli (așa cum s-au reprezentat în Fig. 2.71), ci piloni simpli, dimensionați corespunzător.

Varianta de tip sprijinit are avantajul unei construcții simetrice, dar necesită dispunerea stațiilor de acces la un nivel relativ ridicat. Varianta de tip suspendat diminuează acest inconvenient, cheltuielile de construire a stațiilor fiind mai scăzute, iar accesul călătorilor fiind mai comod, însă cu prețul unei complicații determinate de sistemul de suspendare a cutiei vehiculului și al unei disimetrizări a construcției, aceasta conducând la solicitări neuniforme în vehicul și cale.

O altă soluție, care păstrează avantajul construirii stațiilor de acces la un nivel relativ scăzut, fără a disimetriza, însă, construcția, o constituie sistemul francez Savege (Fig. 2.72). Semnificația reperelor principale este aceeași ca în Fig. 2.71, în acest caz nemaifiind, însă, necesare roți de stabilizare.

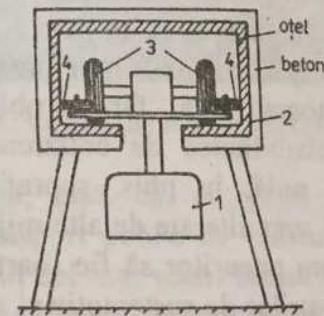


Fig. 2.72. Principiul soluției Savege pentru vehicule monoșină.

- 1 - cutia vehiculului; 2 - cale de rulare; 3 - roți pneumatice de susținere și rulare;  
4 - roți pneumatice de ghidare.

Sistemul Savege are și avantajul că suprafețele de rulare și boghiurile vehiculului sunt protejate față de influența factorilor externi (zăpadă, gheață etc.), ele aflându-se în interiorul grinzii de rulare. În

cazul sistemului Alweg, în condițiile unor ghețuri și zăpezi abundente, este necesară fie dispunerea în grindă a unor instalații de încălzire, fie înzestrarea vehiculelor cu pluguri de curățire.

Dezavantajul esențial al sistemului Savege îl constituie dimensiunile mai mari ale grinzilor de rulare.

Există mai multe motive care justifică părerea că vehiculele monoșină pot servi mai bine decât altele ca mijloace de transport urban, și anume:

- estacadele pentru vehiculele monoșină pot fi construite mai ușor decât alte căi de rulare, întrucât grinzile de rulare și pilonii de susținere a acestora pot fi prefabricați și instalați mult mai repede decât construirea unei căi la nivelul solului (sau subterane), fără a deranja prea mult alte activități de pe sol; în plus, suprafețele ocupate de pilonii de susținere sunt mult mai mici decât cele necesare altor mijloace de transport;
- căile de rulare pentru vehiculele monoșină sunt mai înguste decât căile convenționale pentru trenuri, tramvaie, autobuze etc.; ca urmare, ele sunt mai puțin costisitoare și ocupă mai puțin spațiu, chiar dacă sunt la nivelul solului;
- căile de rulare pentru vehiculele monoșină sunt complet separate de cele ale altor mijloace de transport, astfel că posibilitatea respectării unui orar prestabilit este foarte mare, permițând automatizarea, fără probleme, a circulației; de asemenea, probabilitatea de coliziune cu alte mijloace de transport este nulă; în plus, suprafețele de rulare - bine prelucrate - nu sunt alterate de alte mijloace de transport, ceea ce face ca uzura pneurilor să fie foarte scăzută (s-a ajuns ca schimbarea pneurilor de sustentație și rulare să se facă și după 150.000 km parcurși);
- principiul de construcție și funcționare al vehiculelor monoșină face ca siguranța în circulație a acestora să fie foarte mare (deraierea este, virtual, imposibilă);

Evident, ca orice vehicul electric cu roți pneumatice, vehiculele monoșină sunt nepoluante chimic și fonic.

Motivele care au împiedicat răspândirea pe scară largă a vehiculelor monoșină sunt legate de impactul asupra arhitecturii zonelor în care circulă și/sau de inerția factorilor de decizie, corelată cu experiența mai puțin bogată în construcția acestor vehicule.

Există ideea - oarecum, deformată - că vehiculele monoșină sunt utilizate doar în parcuri de distracții, exemplul foarte cunoscut fiind acela al vehiculului monoșină din Disneyland (California - SUA). Acesta este de tip Alweg sprijinit (Fig. 2.73) și a intrat în funcțiune în anul 1959, calea având o lungime de 3,7 km.

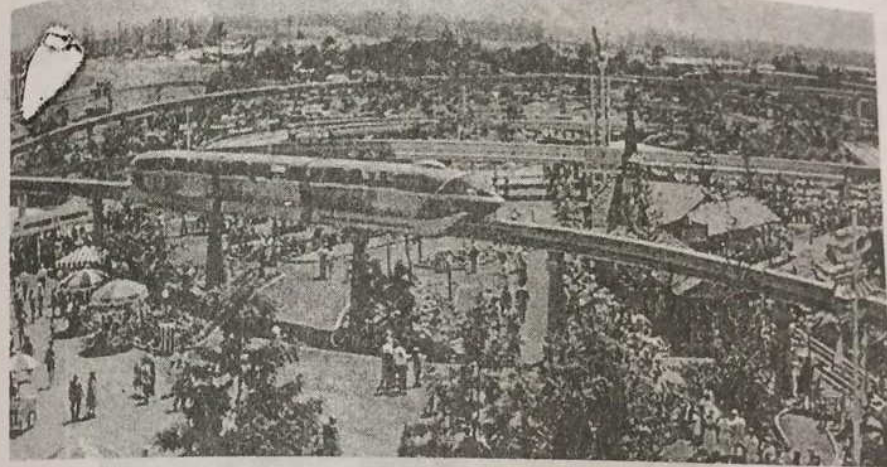


Fig. 2.73. Vehicul monoșină din Disneyland.

Trebuie menționat, însă, că, în orașul Wuppertal (Germania), există un sistem de transport public cu vehicule monoșină (Fig. 2.74) încă din anul 1901, fiind cel mai vechi sistem de transport de acest fel din lume și având, actualmente, o lungime de 13,3 km, cu 18 stații, asigurând transportul a 70.000 călători pe zi, cu o viteză maximă de 56 km/h.

În Europa, au mai fost construite, relativ recent, și în alte câteva locuri, vehicule monoșină, însă cu lungimi mai mici ale traseelor, atât pentru transport urban curent, cât și pentru legături cu aeroporturile sau

pentru parcuri zoologice ori de distracții: Dortmund și Düsseldorf (Germania), Alton Towers și Chester Zoo (Anglia).

Utilizarea sistemului Alweg, în 1962, la Expoziția Secolului 21, din Seattle (Washington - SUA), deși doar cu o lungime de 1,9 km, a



Fig. 2.74. Vehicul monoșină din Wuppertal.

influențat construirea multor vehicule monoșină, atât în SUA, cât și în alte țări ale lumii, mai ales în Japonia.

Astfel, în SUA, sunt de menționat sistemele monoșină folosite în transportul urban curent în Las Vegas (Nevada) - construit în 1995, având 1,6 km și urmând a fi extins - și din Jacksonville (Florida) - 1997; 6,9 km -, precum și pentru legături cu aeroporturile: Tampa (Florida) - 1991 - și Newark (New Jersey) - 1995.

În Japonia, au fost construite mai multe sisteme monoșină, atât de tip Alweg, cât și de tip Savege. Astfel, primul sistem tip Alweg a fost cel

din Inuyama - 1962; 1,1 km -, urmat, în 1964, de cel de legătură Tokyo-Haneda. Acesta are 19 km (căi pe estacadă, la sol și subterane), 10 stații și transportă 170.000 călători pe zi. Au urmat și altele, demne de menționat fiind cel din Osaka - 1990; 21,2 km; 14 stații; 150.000 călători pe zi - și cel din Tama (la Est de Tokyo), intrat în funcțiune în 1998, pe o lungime de 5,4 km, intenționându-se extinderea sa pe considerabila distanță de 93 km.

Primul sistem operațional de tip Savege din lume a fost construit în 1970, în Japonia, la Shonan (Fig. 2.75), având 6,6 km; 8 stații; 30.000 călători pe zi, iar cel mai lung - la Chiba, (în 1988), având 15,5 km; 18 stații; 40.000 călători pe zi. S-a preferat acest sistem, ținând seama de condițiile climatice din zonă (zăpezi abundente).



Fig. 2.75. Vehicul monoșină din Shonan.

Și în alte țări au fost construite sisteme monoșină (tip Alweg): Brazilia, Australia, Singapore, Coreea de Sud, Tailanda, Malaiezia. Se remarcă cel din Kuala Lumpur (Malaiezia), construit în 1999, având 16 km, 21 stații și transportând 18.000 călători pe oră și sens, cu viteza maximă de 80 km/h.

### Capitolul 3

## VEHICULE ELECTRICE DE MARE VITEZĂ, CU ADERENȚĂ LA CALE

### 3.1. PROBLEME GENERALE

În general, se consideră vehicule de mare viteză vehiculele a căror viteză maximă de circulație depășește 200 km/h. În cazul vehiculelor electrice, problema atingerii unor astfel de viteze s-a pus, în primul rând, pentru trenurile electrice - cu alimentare de la un grup termoelectric (motor termic + generator electric rotativ) sau de la linia de contact -, cu aderență la cale, având roți metalice pe șine metalice.

Inițial, s-a crezut că tehnica feroviară avea niște limite foarte modeste și că domeniul de viteze menționat nu putea fi abordat decât cu vehicule fără aderență la cale, folosind pentru propulsie motoare electrice liniare, iar pentru sustentație și ghidare - perna magnetică.

Problemele care se puneau erau atât de natură electrică, cât și de natură mecanică, ele putând fi grupate după cum urmează.

#### 3.1.1. Puterea instalată

În esență, pentru vehiculele care circulă pe distanțe mari, fără porniri și opriri dese, - așa cum sunt și trenurile de mare viteză -

dimensionarea motoarelor de tracțiune se face pentru serviciul continuu, la viteza maximă  $v_{\max}$  a vehiculului.

La viteză constantă, forța de tracțiune dezvoltată de motoarele de tracțiune  $F_T$  este egală cu rezistența la înaintare  $R$  a vehiculului:

$$F_T = R \quad (3.1)$$

puterea de dimensionare a motoarelor de tracțiune fiind deci:

$$P = F_T v_{\max} = R v_{\max} \quad (3.2)$$

Rezistența la înaintare poate fi aproximată analitic, în funcție de viteza vehiculului, sub forma:

$$R = a + bv + cv^2 \quad (3.3)$$

În care  $a$ ,  $b$  și  $c$  sunt niște constante, pentru un vehicul și o cale date. Primii doi termeni din (3.3) corespund, în esență, rezistenței de rulare, iar cel de al treilea termen - rezistenței opuse de aer. La viteze ridicate, ponderea cea mai mare o are rezistența opusă de aer, încât se poate scrie:

$$R \approx cv^2 \quad (3.4)$$

puterea de dimensionare fiind aproximativ:

$$P \approx cv_{\max}^3 \quad (3.5)$$

Rezultă că, pentru un vehicul dat, o dublare a vitezei maxime (de exemplu, de la 200 km/h la 400 km/h) ar necesita o mărire de cca 8 ori a puterii instalate.

Pentru reducerea acestei puteri și, implicit, a energiei consumate, este obligatorie carenarea vehiculului (realizarea unei forme aerodinamice a acestuia). Dar, chiar și în această situație, puterea necesară este semnificativ sporită și, ca urmare, sunt necesare motoare de tracțiune - și echipamentele aferente - de puteri mari, cu gabarite și greutatea corespunzător ridicate, instalarea acestora pe vehicul punând probleme - printre altele, acelea de a nu depăși sarcina admisă pe o osie (uzual, cca 17 t) și de a oferi cât mai mult spațiu pentru călători. De

aceea, sunt de preferat motoare cu puteri specifice (masice) cât mai mari și instalații cât mai simple, mai ușoare și mai puțin voluminoase pentru reglarea vitezei și a efortului de tracțiune.

### 3.1.2. Captarea curentului

În cazul vehiculelor neautonome (cu alimentare de la linia de contact), captarea curentului la viteze mari pune probleme deosebite.

În primul rând, pentru asigurarea unui contact electric ferm între captator (pantograf) și linia de contact, trebuie realizată o presiune corespunzătoare a captatorului pe linie. Aceasta provoacă o ondulare a liniei, determinând oscilații mecanice ale liniei, care se propagă în sensul de mers al vehiculului. Este necesar ca viteza de propagare a oscilațiilor să fie mereu superioară vitezei de circulație a vehiculului, întrucât, la egalarea celor două viteze (când se ajunge la rezonanță), apar solicitări foarte mari în linie și captator, care pot provoca distrugerea acestora. Pentru a preîntâmpina o astfel de situație, se impune o tensionare mecanică mărită a liniei de contact.

În al doilea rând, este de preferat să se recurgă la serviciile unui singur captator pentru întregul vehicul (tren), întrucât, dacă ar exista mai multe captatoare în funcțiune, oscilațiile liniei de contact provocate de primul captator (în sensul de mers) s-ar resimți asupra captatoarelor următoare. Utilizarea unui singur captator pune, însă, probleme pentru alimentarea tuturor motoarelor unui tren, mai ales în cazul liniilor de contact de tensiuni ridicate (15 kV sau 25 kV) și al trenurilor cu două locomotive dispuse la extremități, între care se află mai multe remorci. În acest caz, trebuie adusă tensiunea - printr-un cablu de putere, montat, de regulă, pe acoperiș, în lungul trenului - de la o locomotivă (uzual, cea din spate), care are captatorul ridicat, până la cealaltă locomotivă, la care captatorul nu este în funcțiune.

În al treilea rând, dacă trenul urmează să circule pe căi electrificate în diverse sisteme, folosind unități motoare policurent care pot fi alimentate de la linii de curent alternativ (tensiuni relativ ridicate: de exemplu, 15 kV sau 25 kV), dar și de la linii de curent continuu (tensiuni relativ scăzute: de exemplu, 1500 V sau 3000 V), trebuie

folosite captatoare diferite pentru curent alternativ și pentru curent continuu. Aceasta - atât datorită diferențelor mari dintre tensiunile de lucru, precum și dintre curenții vehiculați, cât și datorită modului diferit de comportare la arcul electric care apare accidental între captator și linia de contact, în cele două situații.

În al patrulea rând, pentru a reduce rezistența opusă de aer, captatorul trebuie să aibă o construcție aerodinamică; în plus, el trebuie realizat astfel (de exemplu, folosind un sistem de amortizare în două trepte) încât masa dinamică a contactului mobil să fie cât mai redusă.

### 3.1.3. Construcția mecanică a vehiculului și a căii de rulare

Ghidarea roților metalice de către șine provoacă o mișcare de oscilație și deplasări transversale ale boghiurilor vehiculului. La depășirea unei viteze critice, fenomenul devine instabil și conduce la șocuri foarte violente. De aceea, trebuie utilizate boghiuri de mare stabilitate, cât mai ușoare, o primă măsură fiind ca - în cazul boghiurilor motoare - să se recurgă la suspendarea completă a motoarelor de tracțiune, pentru transmiterea cuplului de la motoare la roți folosindu-se transmisii cardanice. Aceasta conduce, în plus, la o solicitare mecanică a motoarelor - provocată de șocurile primite de la cale - mult mai scăzută.

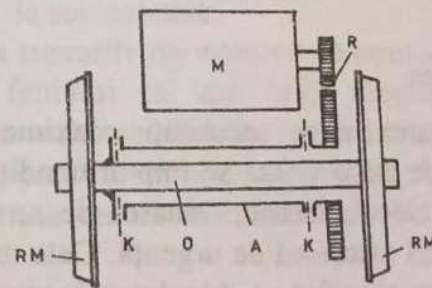


Fig. 3.1. Acționare cu motor suspendat și transmisie cardanică între reductor și osie.

M - motor; R - reductor; A - arbore cardanic; K - articulație cardanică; O - osie; RM - roată motoare.

Trebuie găsite soluții care să determine, de asemenea, solicitări mecanice mai reduse ale elementelor transmisiei cardanice și a

reductoarelor. În acest sens, o soluție adecvată o constituie cea prezentată în Fig. 3.1, în care motorul suspendat M transmite cuplul de motoare O (și, implicit, roților motoare RM) prin intermediul cuplajelor cardanice K și al arborelui cardanic tubular A. Față de soluția mai simplă, în care transmisia cardanică ar fi fost dispusă între motor și reductor (ea neimplicând utilizarea unui arbore cardanic tubular), soluția prezentată asigură solicitări mai reduse ale cuplajelor cardanice, întrucât acestea din urmă lucrează la viteză mai scăzută decât a motorului. De asemenea, faptul că arborele cardanic are o lungime mai mare conduce la solicitări mai reduse ale cuplajelor cardanice. În plus, există avantajul că motorul poate avea lungime mai mare - deci, putere mai mare la același diametru -, iar accesul la motor este simplificat.

Pentru a putea aborda cu viteză ridicată și curbele căii (în scopul obținerii unei viteze comerciale cât mai mari), există, în principiu, două soluții: fie să se construiască o cale de rulare specială, la care curbele să aibă raze suficient de mari, fie să se folosească o construcție specială a vehiculului (sistem pendular), care să asigure înclinarea acestuia spre interiorul curbelor, pentru a compensa forța centrifugă. A doua soluție permite să se circule pe căile uzuale, ale căror terasamente trebuie doar renovate pentru a suporta presiuni suplimentare la tronsoanele în curbă.

### 3.1.4. Frânarea

Pentru asigurarea unei securități maxime a circulației, la vehiculele electrice de mare viteză se impun condiții de frânare foarte stricte. Ca la orice vehicul electric, frânarea de serviciu este electrică, existând însă și o frână mecanică de urgență. Cele mai importante două condiții pentru frânarea electrică a vehiculelor de mare viteză sunt:

- frâna trebuie să fie tot timpul disponibilă, chiar și în cazul nefuncționării liniei de contact;
- echipamentul de frânare al fiecărui boghiu motor trebuie să constituie un ansamblu independent.

Prima condiție interzice - în general - frânarea recuperativă, impunând folosirea frânării reostatice, aceasta din urmă trebuind să se

poată realiza independent de prezența tensiunii la linia de contact. Dacă totuși se intenționează utilizarea frânării recuperative, este obligatoriu să se poată realiza și frânarea reostatică, în condițiile lipsei tensiunii la linia de contact sau a unor consumatori pe această linie care să absoarbă energia rezultată prin frânarea recuperativă.

A doua condiție impune, de regulă, folosirea - la frânarea reostatică - a unui reostat de frânare pentru fiecare boghiu motor, dacă nu chiar pentru fiecare motor în parte.

Frânarea mecanică trebuie dimensionată corespunzător, pentru a permite o frânare sigură - în caz de urgență, chiar la viteză ridicată - și o disipare adecvată a imensei cantități de căldură care se produce în procesul de frânare.

### 3.1.5. Sistemul de semnalizare

Sistemul de semnalizare trebuie adaptat vitezelor ridicate la care se circulă. În cazul utilizării unor căi speciale numai pentru trenuri de mare viteză, sistemul de semnalizare se realizează de la bun început încât să corespundă cerinței menționate. În cazul trenurilor de mare viteză care pot circula și pe căile uzuale, în afara unor renovări ale terasamentelor la tronsoanele în curbă și la pasajele de nivel, trebuie renovat și sistemul de semnalizare.

De regulă, la trenurile de mare viteză semnalizarea nu se face din exterior, datorită faptului că, din cauza vitezei mari, conducătorul trenului nu ar putea vedea semnalele. Semnalizarea se face - în acest caz - în cabina conducătorului, cu ajutorul calculatorului de bord, care este permanent în legătură cu un calculator central, prin intermediul unei antene.

## 3.2. REALIZĂRI ÎN DOMENIUL VEHICULELOR ELECTRICE DE MARE VITEZĂ, CU ADERENȚĂ LA CALE

Încercările de a realiza trenuri de mare viteză cu roți metalice pe șine datează de la începutul anilor '60. Acestea au fost făcute într-o serie

de țări dezvoltate: Japonia, Franța, Germania, Marea Britanie, Italia, Suedia, SUA.

Prima generație de trenuri care au circulat cu viteze peste 200 km/h (mai precis: 210 km/h, încă din anul 1964) este aceea a trenurilor japoneze Shinkansen, cunoscute și sub numele de "tren-glonte". Generațiile următoare de trenuri Shinkansen au evoluat - în ceea ce privește construcția, dar, mai ales, în ceea ce privește schema electrică de tracțiune -, unele dintre ele ajungând să circule, începând din anul 1997, cu viteza de 300 km/h. În Fig. 3.2 sunt prezentate câteva trenuri Shinkansen din diverse generații.

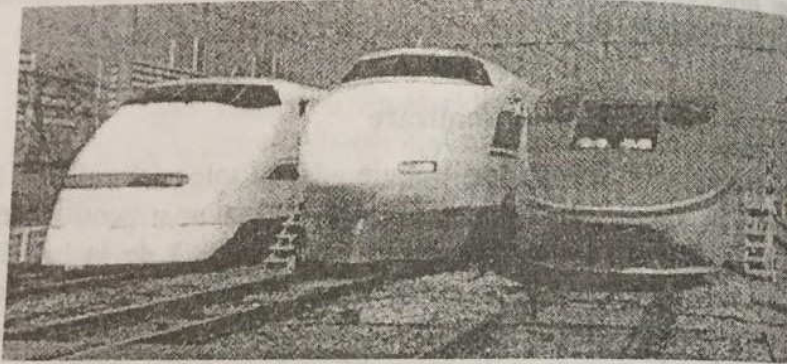


Fig. 3.2. Trenuri Shinkansen.

Performanțele cele mai spectaculoase s-au obținut însă cu trenurile de mare viteză (TGV - Train à Grande Vitesse) construite în Franța. Testele la primul TGV au fost făcute în varianta autonomă (cu alimentarea motoarelor electrice de tracțiune de la un grup termoelectric: turbină cu gaz + generator electric rotativ), atingându-se, în timpul încercărilor (8 Decembrie 1972), viteza record - pentru un tren cu tracțiune autonomă - de 318 km/h.

Apoi, în variantă neautonomă, cu alimentare de la linia de contact, s-a realizat TGV-Paris Sud-Est (TGV-PSE), care a intrat în exploatare curentă în anul 1981, pe o cale ferată specială cu lungimea de 530 km, între Paris și Lyon. Viteza maximă de circulație pe această cale este de 270 km/h, dar, în timpul încercărilor (26 Februarie 1981) - cu o ramă

având un număr mai redus de vagoane decât rama normală -, a fost atins recordul de 380 km/h.

Folosind o generație nouă de echipamente și materiale, a fost realizat TGV-Atlantique (TGV-A), care a intrat în exploatare curentă în anul 1989 între Paris și Vestul & Sud-Vestul Franței, viteza maximă de circulație pe calea de rulare specială (ce totalizează 282 km) fiind de 300 km/h. Pe aceeași cale de rulare, la 18 Mai 1990, în timpul încercărilor, a fost realizat recordul mondial de viteză pe șine: 515,3 km/h.

O a treia generație de TGV o constituie TGV-Eurostar, care, din 1994, leagă Londra de Paris și de Bruxelles, subtraversând Canalul Mânecii prin Eurotunel. Și aceste trenuri au viteza maximă de 300 km/h pe calea specială din Franța, care acoperă 333 km.

Trenurile din toate cele trei generații TGV au fost introduse și pe căi ferate uzuale, care au legături cu căile speciale, circulând însă cu viteze maxime de 160-220 km/h.

Soluțiile adoptate pentru TGV-Atlantique și TGV-Eurostar stau la baza construirii altor variante de trenuri TGV, care circulă și pe alte linii decât cele menționate, urmând ca rețeaua acoperită de aceste trenuri să se extindă și performanțele să fie îmbunătățite.

Printre realizările notabile în domeniul trenurilor de mare viteză, cu aderență la cale, trebuie amintit și trenul german InterCity Express (ICE), care - începând din anul 1991, pe porțiunile cu cale specială Hanovra-Warzburg și Mannheim-Stuttgart, iar, apoi, și pe alte linii cu cale specială - circulă cu viteze de 250-280 km/h (fiind planificată și circulația cu 300 km/h). La 1 Mai 1988, un tren ICE a atins viteza record (pentru acel timp) de 406,9 km/h.

De menționat că, în afara trenurilor de mare viteză amintite mai sus - care circulă cu viteze ridicate numai pe căi speciale (la care, printre altele, s-a avut în vedere ca raza curbilor căii să fie aleasă astfel încât să permită deplasarea cu viteză mare a trenurilor și pe tronsoanele în curbă; această rază este de ordinul a 5000 m) -, s-au realizat și trenuri ce au posibilitatea să circule cu viteze mari chiar și pe căile existente, cu raze ale curbilor ce pot coborî până la 600 m.

Aceste trenuri au însă o construcție specială, fiind echipate cu un sistem de pendulare, care permite înclinarea vagoanelor spre interiorul

curbelor, pentru a compensa forța centrifugă. Este cazul trenurilor italiene din seria "Pendolino" (ETR 450, aflat în circulație din 1988, ETR 460 - din 1995 și ETR 480 - din 1997, toate cu viteza maximă de 250 km/h, precum și ETR 500 - din 1996, cu viteza maximă de 300 km/h; acesta din urmă este prezentat în Fig. 3.3) și al trenului suedez X2000, intrat în exploatare curentă în 1990, ce poate atinge 210 km/h (reglementările feroviare din Suedia limitează, deocamdată, viteza la 200 km/h; este planificată, însă, circulația acestui tren cu viteze până la 250 km/h). Sunt utilizate terasamentele tradiționale, renovate doar la sistemul de semnalizare și pentru a suporta presiuni suplimentare la tronsoanele în curbă și la pasajele de nivel.

Înclinarea este controlată de un senzor, dispus pe primul boghiu (în sensul de mers) al trenului. Semnalul furnizat este procesat printr-un filtru trece-jos, pentru a elimina influența neregularităților de scurtă durată ale căii de rulare. Înclinarea maximă a vagoanelor (față de cale) este, la trenul suedez X2000, de  $6,5^\circ$ , aceasta eliminând cca 80% din accelerația laterală - suficient pentru a asigura un confort corespunzător al călătorilor.

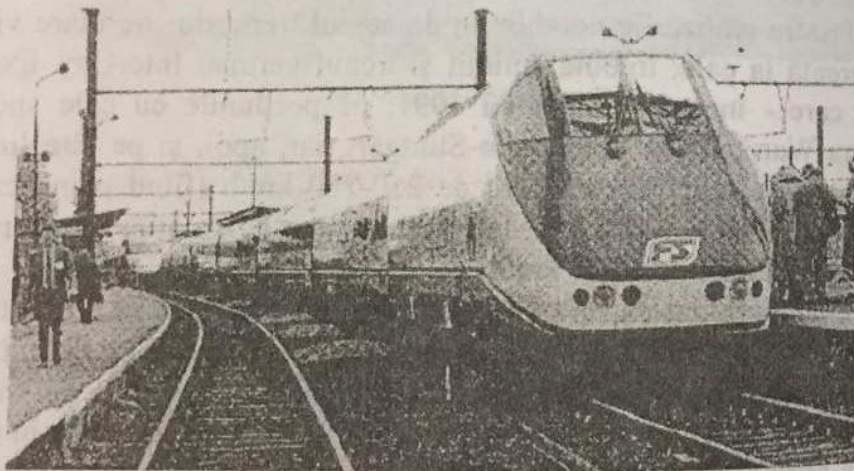


Fig. 3.3. Trenul ETR 500 Pendolino.

În cele ce urmează, vom prezenta detalii tehnice privind trenurile de mare viteză cele mai performante și anume: Shinkansen și TGV.

### 3.2.1. Trenul de mare viteză japonez Shinkansen

După cum am menționat, primele trenuri de mare viteză Shinkansen au intrat în exploatare curentă în Japonia încă din anul 1964, pe linia specială Tokio-Osaka (numită și linia Tokaido) cu lungimea de 515 km. Ulterior, s-au deschis și alte linii: Sanyo (Osaka-Hakata, 554 km), Tohoku (Tokio-Morioka, 496 km), Joetsu (Tokio-Niigata, 301 km), precum și derivații din aceste linii: Yamagata (Fukushima-Yamagata), Akita (Morioka-Akita) și Hokuriku (Takasaki-Nagano).

Trenurile au fost realizate în diverse variante (tipuri) constructive, principalele caracteristici ale acestora și liniile pe care sunt utilizate fiind prezentate în Tab. 3.1. Datele din acest tabel corespund situației existente în anul 1997.

În principiu, soluția adoptată pentru toate trenurile Shinkansen a fost aceea de a utiliza unități motoare care au și spații pentru călători, formate din câte două vagoane-motor, aceste unități circulând cuplate între ele (cel puțin două) și, eventual, cuplate cu unul sau mai multe vagoane-remorcă. Vagoanele au două boghiuri cu câte două osii. În cazul vagoanelor-motor, fiecare osie este acționată de câte un motor (acționare individuală); deci, un vagon-motor are patru motoare de tracțiune. Puterea unitară a motoarelor este de 185 kW la trenurile de tipul 0, crescând la celelalte tipuri, așa cum rezultă din Tab. 3.1.

Inițial, acționarea unităților motoare a fost realizată cu motoare de curent continuu (pentru trenurile tip 0, 100 și 200), o bună parte din aceste unități aflându-se încă în exploatare.

În anul 1986, au fost făcute primele încercări ale unui tren acționat cu motoare asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit, pentru comanda lor fiind utilizate convertoare statice de frecvență cu tiristoare cu stingere pe poartă (GTO) de 4500 V, 2500 A.

Ele au stat la baza construirii trenurilor de tipul 300 (și următoarele), care au intrat în exploatare curentă începând din anul 1992.

Folosirea noilor echipamente de tracțiune menționate a permis creșterea fiabilității, reducerea cheltuielilor de exploatare, a dimensiunilor și greutateii sistemului de propulsie, reducerea numărului

Tabelul 3.1. Caracteristici ale trenurilor Shinkansen.

Tipul	0	100	200	300	400	500	700	E1	E2	E3	E4
Anul intrării în exploatare	1964	1985	1982	1992	1992	1997	1999	1994	1997	1997	1997
Numărul de vehicule construite	3216	1056	700	688+	84	16+	-	72	152	80	-
Limitele folosite	Tokaido Sanyo	Tokaido Sanyo	Tohoku Joetsu	Tokaido Sanyo	Tohoku Yamagata	Sanyo Tokaido	Tokaido Sanyo	Tohoku Joetsu	Tohoku Hokuriku	Tohoku Akita	Tohoku
Numărul de vagoane ale unui tren	16 12 6 4	16	16 12 10 8	16	7	16	16	12	8	5	8
Vagoane motor (M)/remorcă (R)	16M 12M 6M 4M	12M/4R	14M/2R 12M 10M 8M	10M/6R	6M/1R	16M	12M/4R	6M/6R	6M/2R	4M/1R	4M/4R
Puterea instalată pe tren (MW)	11,84 8,88 4,44 2,96	11,04	12,88 11,04 9,20 7,36	12,00	7,20	18,24	-	9,84	7,20	4,80	-
Viteza maximă de circulație (km/h)	210	220-230	210-275	270	240	300	270+	240	275	275	240

de unități motoare din componența unui tren și a consumului de energie, precum și creșterea vitezei de circulație. Convertorul de frecvență este de tip sursă de tensiune, cu circuit intermediar de curent continuu, folosind modularea în lățime a impulsurilor (PWM). Deși sistemul necesită condensatoare de capacitate mare pentru comutația tiristoarelor GTO, el poate fi realizat cu dimensiuni relativ mici și greutate relativ scăzută, întrucât nu implică folosirea unor bobine de filtrare, care au greutate și dimensiuni mari.

În Fig. 3.4, este prezentată schema de principiu a circuitelor de putere pentru o unitate motoare a acestui nou sistem de trenuri Shinkansen. O astfel de unitate motoare are un transformator principal, un convertor de rețea, două invertoare și opt motoare. Un tren de tipul 300 este compus din 16 vagoane, dintre care 10 vagoane-motor și 6 vagoane-remorcă, putând circula cu 270 km/h în palier și cu 160 km/h pe rampe de 30 ‰. Echipamentul este proiectat astfel încât să nu se depășească 16 t pe osie.

Transformatorul principal are o înfășurare primară și patru înfășurări secundare de tracțiune. Acestea din urmă sunt conectate la convertorul de rețea, format din patru punți, legate în paralel pe partea de curent continuu. O astfel de realizare a convertorului este impusă, pe de o parte, de curenții admiși pentru elementele semiconductoare utilizate, iar pe de altă parte - de asigurarea unei fiabilități ridicate a sistemului (la defectarea unei punți, alimentarea invertoarelor este asigurată de celelalte punți și propulsia trenului poate fi realizată în continuare, chiar dacă aceasta se face cu performanțe mai scăzute). În plus, se obține și o reducere a armonicilor.

Tensiunea circuitului intermediar de curent continuu a fost stabilită la 1900 V, ținând seama de tensiunea maximă admisă de elementele semiconductoare.

În regim de tracțiune, diodele  $D_c$  ale punților convertorului asigură funcționarea acestor punți ca redresoare, convertorul realizând astfel conversia curentului alternativ în curent continuu. După filtrarea cu condensatoarele  $C_F$ , tensiunea continuă este aplicată invertoarelor formate din tiristoarele (GTO)  $T_i$  și diodele de regim liber  $D_i$ , obținându-se la ieșire - folosind tehnica PWM - tensiuni alternative cu

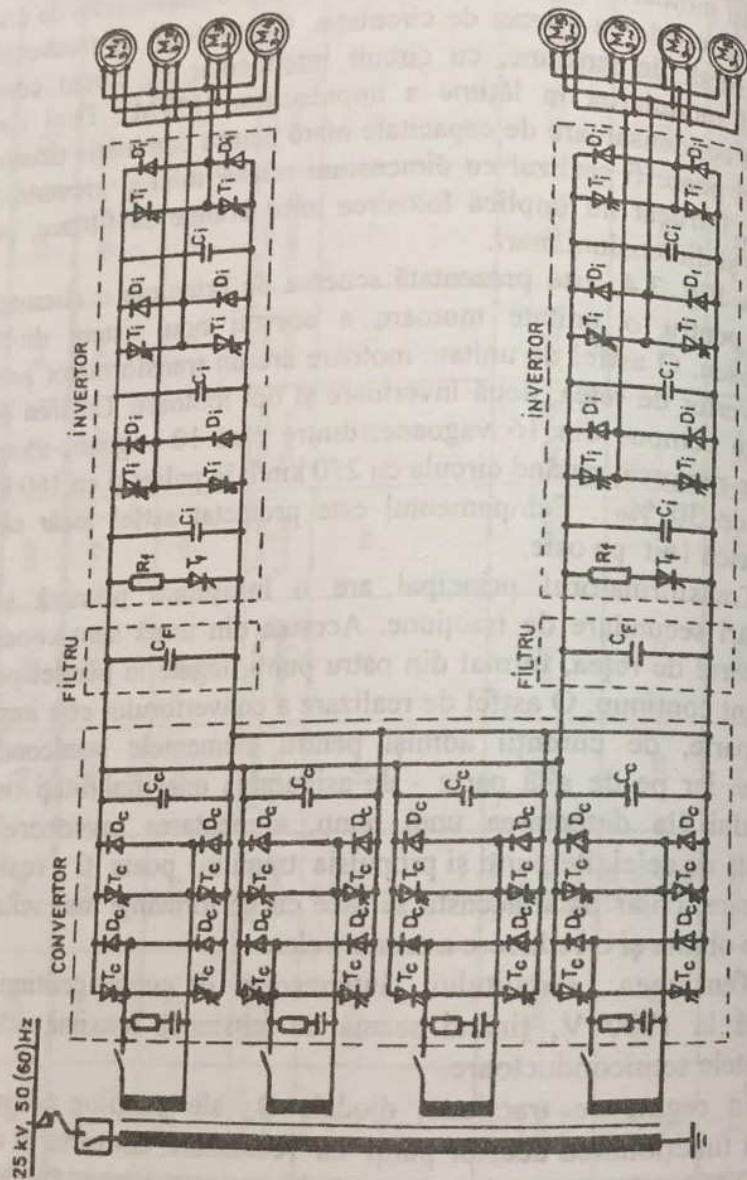


Fig.3.4.Schema de principiu a circuitelor de putere pentru o unitate motoare Shinkansen cu motoare asincrone trifazate.

valori efective și frecvențe reglabile, aplicate câte unui grup de patru motoare asincrone (care acționează un vagon-motor), conectate în paralel pe fiecare invertor.

Sistemul permite atât frânarea recuperativă, cât și frânarea reostatică. La frânarea recuperativă, energia activă dată de mașinile asincrone funcționând în regim de generator trece, prin punțile redresoare formate de diodele  $D_i$ , în circuitele intermediare de curent continuu și apoi prin punțile convertorului care - folosind tiristoarele (GTO)  $T_c$  și diodele  $D_c$ , ca diode de regim liber - funcționează de această dată ca invertoare de tensiune (formând acum un convertor c.c.-c.a.). În acest fel, energia activă furnizată de mașinile asincrone este transmisă în final - prin intermediul transformatorului principal - liniei de contact, realizându-se, deci, recuperarea energiei de frânare.

În cazul în care lipsește tensiunea la linia de contact sau nu există consumatori pe această linie, se trece automat pe frânarea reostatică prin deschiderea tiristoarelor  $T_f$ , care permite disiparea pe rezistențele  $R_f$  a energiei de la ieșirea punților formate de diodele  $D_i$ . Energia reactivă necesară funcționării, în acest caz, a mașinilor asincrone în regim de generator este asigurată de condensatoarele din schemă.

Principalele date tehnice ale echipamentului prezentat sunt următoarele:

**a) Transformatorul principal**

- putere: 3030 kVA
- tensiune primară: 25000 V
- tensiune secundară: 870 V
- frecvență: 50/60 Hz
- masă: 3090 kg

**b) Convertorul**

- tip: convertor PWM sursă de tensiune
- intrare: c.a. 870 V, 937 A, 50/60 Hz
- ieșire: c.c. 1900 V, 1630 A, 3100 kW
- componente: tiristoare (GTO) 4500 V, 2500 A  
diode 4500 V, 800 A

- randament: peste 95%
  - masă: 1900 kg (partea de putere)  
170 kg (partea de comandă)
- c) Invertorul**
- tip: inverter PWM sursă de tensiune
  - tensiune de intrare: 1900 V, c.c.
  - tensiune de ieșire: 0 - 1450 V, c.a. trifazat
  - putere: 1760 kVA
  - componente: tiristoare (GTO) 4500 V, 2500 A  
diode 4500 V, 800 A
  - masă: 1150 kg
- d) Motorul de tracțiune**
- tip: motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit
  - putere: 300 kW
  - masă: 600 kg

Folosind un echipament similar, trenul Shinkansen de tipul 500, compus din 16 vagoane-motor (8 unități motoare) - acționate cu motoare de 285 kW - și aflat în exploatare din 1997 pe linia *Sanyo*, circulă cu viteză de 300 km/h, devenind astfel cel mai rapid tren din Japonia și egalând serviciile curente ale trenului de mare viteză francez TGV.

### 3.2.2. Trenul de mare viteză francez TGV

În cele ce urmează, vom prezenta principalele variante ale trenului de mare viteză francez care se află actualmente în exploatare.

Evoluția acestor variante s-a bazat pe progresele realizate în domeniile mecanicii și electricității, echipele de concepție a trenurilor fiind pluridisciplinare: mecanici, electricieni, electroniști și informaticieni. Noile tehnologii utilizate au fost din ce în ce mai pretențioase, întrucât performanțele cerute, precum și nivelul de siguranță și de disponibilitate necesare pentru materialul rulant și echipamentele aferente au fost tot mai mari.

#### 3.2.2.1. Trenul de mare viteză TGV-Paris Sud-Est (TGV-PSE)

Acesta face parte din prima generație de trenuri de mare viteză TGV, aflate în exploatare din anul 1981, care circulă pe o cale specială între Paris și Lyon, dar și în prelungirea acesteia, pe căi uzuale din Sud-Estul Franței și chiar din Elveția și Italia.

O ramă TGV-PSE este compusă din două locomotive la extremități, între care se află opt vagoane. În total, însă, sunt șase boghiuri motoare: două pe fiecare locomotivă și unul pe fiecare vagon adiacent locomotivei. În Fig. 3.5, este prezentată o vedere a locomotivei și a unui astfel de vagon.



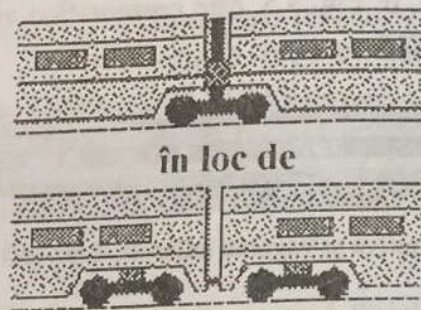
Fig. 3.5. Locomotiva și vagonul adiacent dintr-un tren TGV-PSE.

Un boghiu motor are două osii, acționate individual de câte un motor de curent continuu cu excitație serie.

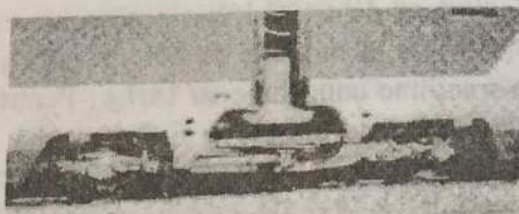
Ramă are o putere de 6400 kW (la alimentarea de la linia de contact de 25 kV, 50 Hz), o lungime de 200 m și o masă de 418 t, la care motoarele de tracțiune contribuie cu 18,7 t. Pentru o capacitate de 368 călători - în vagoane de clasele 1 și 2 - rezultă 1135 kg/călător. Sarcina pe osie este limitată la 17 t. Ramele pot fi cuplate în unități multiple, fiind capabile să circule cu viteze de 270 km/h pe calea specială Paris-Lyon și 160-200 km/h pe celelalte căi.

Rama are o arhitectură articulată, vagoanele nefiind cuplate în modul obișnuit, ci semi-permanent atașate unul altuia, capetele a două vagoane adiacente fiind așezate pe un boghiu comun cu două osii (Fig. 3.6). Sunt mai multe motive pentru care a fost adoptată o astfel de soluție, utilizată și la generațiile următoare de TGV. Poate că cel mai evident este acela că TGV a fost proiectat de la bun început pentru a fi un tren foarte ușor, încât nu era lipsit de sens să se reducă numărul total de osii, fără a depăși sarcina limită pe osie de 17 t. De asemenea,

plasarea roților între vagoane contribuie la reducerea vibrațiilor și a zgomotului interior și, deci, la creșterea confortului pentru călători; asigură ridicarea nivelului la care se află suspensia față de cale; asigură mai mult spațiu (pe înălțime) pentru dispunerea suspensiei; îmbunătățește aerodinamicitatea, datorită spațiilor mai mici dintre vagoane și profilului pe care-l capătă aceste spații. În plus, articularea ramei permite ca vagoanele adiacente să fie cuplate dinamic prin tampoane-amortizoare și face posibilă o trecere liniștită a călătorilor dintr-un vagon în altul.



a)



b)

Fig. 3.6. Dispunerea capetelor a două vagoane adiacente pe un boghiu comun, la trenul TGV-PSE: a) principiul soluției adoptate, comparat cu cel al soluției clasice; b) detaliu al soluției adoptate.

Există în circulație 107 rame, dintre care 98 sunt bicurent (25 kV, 50 Hz și 1,5 kV c.c., pentru rețelele din Franța), iar 9 sunt

tricurent (25 kV, 50 Hz și 1,5 kV c.c., precum și 15 kV, 16 2/3 Hz, pentru circulația în Elveția, spre Lausanne).

Trecerea de la un sistem de alimentare a liniei de contact la altul - de exemplu, de la cel de 25 kV, 50 Hz la cel de 1,5 kV c.c. - se face printr-o *secțiune de separare* (Fig. 3.7), care reprezintă o porțiune de linie pusă la pământ (din motive de securitate) și plasată, cu izolațiile adecvate, între cele două linii de contact menționate. Locomotiva va trebui să treacă de secțiunea de separare cu pantografele coborâte, încât - la apropierea de această secțiune -, în exemplul considerat, se dea semnalul de coborâre a pantografului de c.a. și, după depășirea secțiunii de separare, se dea semnalul de ridicare a pantografului de c.c.

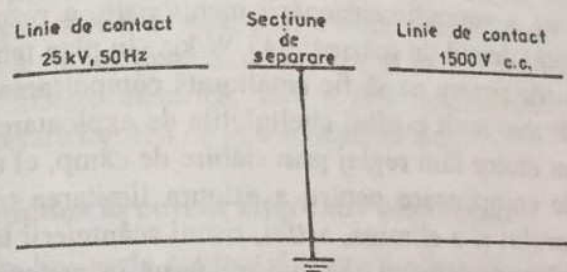


Fig. 3.7. Trecerea de la un sistem de alimentare a liniei de contact la altul.

Reglarea vitezei și a efortului de tracțiune se face numai prin modificarea tensiunii de alimentare a motoarelor. Este evitată modificarea fluxului de excitație, obținându-se astfel o simplificare semnificativă a echipamentului de tracțiune.

Dar, profilul căii speciale pe care circulă trenul, cu rampe de 35 ‰, conduce - în unele cazuri - la constrângeri foarte severe. Astfel, s-a impus ca trenul să poată fi pornit și pe astfel de rampe. De asemenea, s-a impus - pentru a asigura un serviciu cât mai bun - ca performanțele ramei să nu fie afectate în mod semnificativ (în particular, să fie încă posibilă pornirea pe rampe de 35 ‰), chiar și la scoaterea din funcțiune a unui boghiu motor; deci, fără două motoare de tracțiune.

Aceste constrângeri conduc la necesitatea ca motoarele să fie capabile de a suporta, timp de 7 minute, curenți de cca două ori mai

mari decât curenții din regim continuu, ceea ce a impus o supradimensionare a motoarelor.

Principalele caracteristici ale motorului de tracțiune sunt următoarele:

— putere la arbore:	535 kW
— tensiune maximă:	1050 V
— curent de regim continuu:	535 A
— curent de pornire:	1000 A, timp de 7 minute
— turație maximă:	3150 rot/min, la 270 km/h
— număr de poli:	4, cu înfășurări de compensare
— masă:	1560 kg

Ca urmare a supradimensionării menționate, a rezultat o putere specifică (masică) destul de scăzută: 343 W/kg. În plan tehnologic, s-au luat toate măsurile pentru ca să fie ameliorată comportarea motorului și să se reducă cât mai mult posibil cheltuielile de exploatare. Astfel, deși este vorba de un motor fără reglaj prin slăbire de câmp, el a fost echipat cu înfășurări de compensare pentru a asigura limitarea tensiunii între lamelele colectorului și a elimina, astfel, riscul scânteierii la colector. În plus, motorul folosește tehnica cea mai modernă în materie de izolație: rotorul și statorul său sunt impregnate cu rășini în clasa C fără solvent, ceea ce aduce - în comparație cu izolația în clasă F, utilizată curent la motoarele de tracțiune ale altor unități motoare contemporane cu TGV-PSE - un spor de siguranță în funcționare.

Pentru a asigura în toate cazurile cea mai bună disponibilitate posibilă a unei rame, soluția ideală ar fi constat în a avea șase echipamente motoare (câte unul pe boghiu) complet independente unul de celălalt. Fiecare din aceste echipamente ar fi trebuit să aibă propriile sale întreruptoare automate (în monofazat și în curent continuu), propriul său transformator și propriul său echipament de reglaj. O astfel de soluție, seducătoare din punctul de vedere al disponibilității, prezintă însă inconvenientul de a fi scumpă și a avea o greutate însemnată. De aceea, s-a căutat o schemă care să conducă la un compromis acceptabil.

Experiența îndelungată din Franța privind tracțiunea feroviară în curent alternativ monofazat a arătat că un transformator bine construit

prezintă o fiabilitate excelentă și că, pentru a obține o comportare perfectă a unor elemente cum sunt bobinele din circuitele de putere, acestea trebuie tratate ca și transformatoarele (montaj în cuvă, cu răcire prin circulație de ulei).

Aceasta a permis simplificarea schemei, prin utilizarea unui **ansamblu unic transformator-bobine** pentru fiecare grup de trei boghiuri motoare aflate la câte o extremitate a ramei; dar aparatul aferent acestui ansamblu (întreruptor automat, pompă de ulei, ventilatoare etc.) trebuie dublat sau asigurat parțial - la nevoie - de grupul de la cealaltă extremitate a ramei, pentru a elimina orice incident.

În cele ce urmează, vom prezenta elementele esențiale ale schemelor de putere pentru o ramă TGV-PSE, aceste scheme ținând seama de considerațiile de mai sus. Pentru simplificare, vor fi redată separat schemele de tracțiune în monofazat și în curent continuu, precum și schema de frânare electrică, fără a mai detalia toate contactele și manevrele necesare trecerii de la o schemă la alta.

#### a) Tracțiunea în curent alternativ monofazat

În Franța, liniile de contact de curent alternativ sunt alimentate la 50 Hz, cu tensiunea de 25 kV. Schema corespunzătoare tracțiunii în monofazat este redată în Fig. 3.8.

În afară de înfășurarea primară a transformatorului - care se alimentează de la linia de contact prin pantograful și întreruptorul rapid (IM) adecvate funcționării în monofazat -, circuitele de putere sunt tratate astfel încât echipamentul corespunzător unui boghiu motor să fie complet independent de cel al omologelor sale, formând un așa-numit **bloc motor**. Pentru aceasta, transformatorul are trei înfășurări secundare de tracțiune, fiecare dintre ele alimentând o punte redresoare mixtă (semicomandabilă) asimetrică, formată din diodele D și tiristoarele T care funcționează cu comutație naturală. Fiecare punte alimentează, cu tensiune reglabilă, două motoare ale unui boghiu conectate în paralel, în circuitele rotorice ale acestora fiind înseriate bobinele de netezire  $L_N$ . O astfel de configurație asigură o foarte bună disponibilitate a echipamentului de tracțiune: orice incident la un motor de tracțiune sau

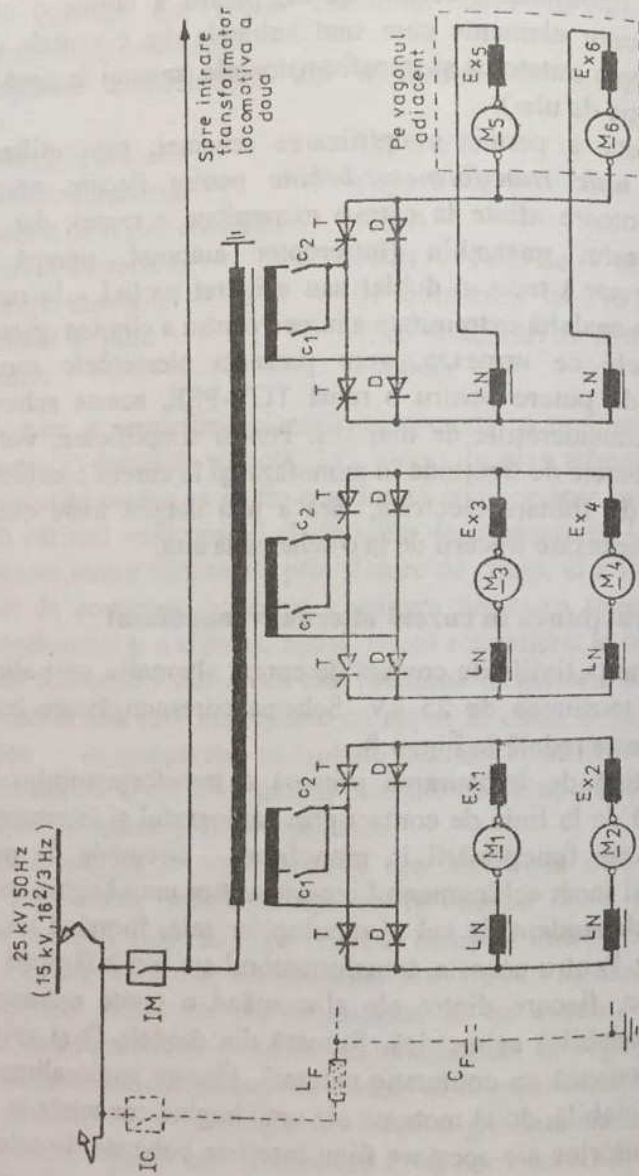


Fig. 3.8. Schema electrică de tracțiune în c.a. monofazat pentru trenul TGV-PSE.

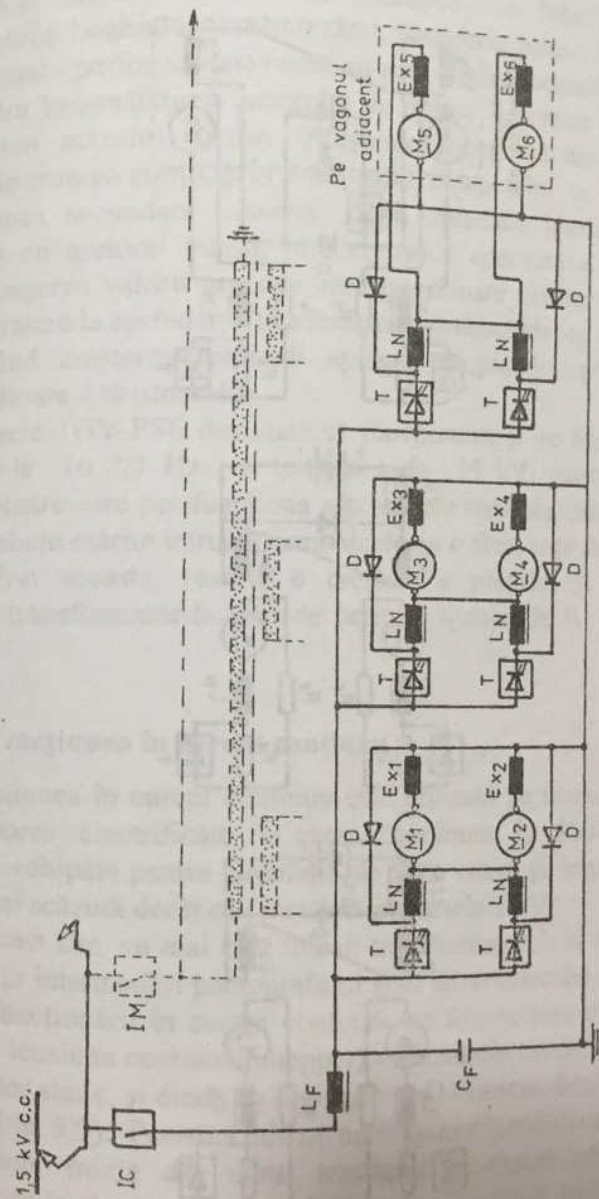


Fig. 3.9. Schema electrică de tracțiune în c.c. pentru trenul TGV-PSE.

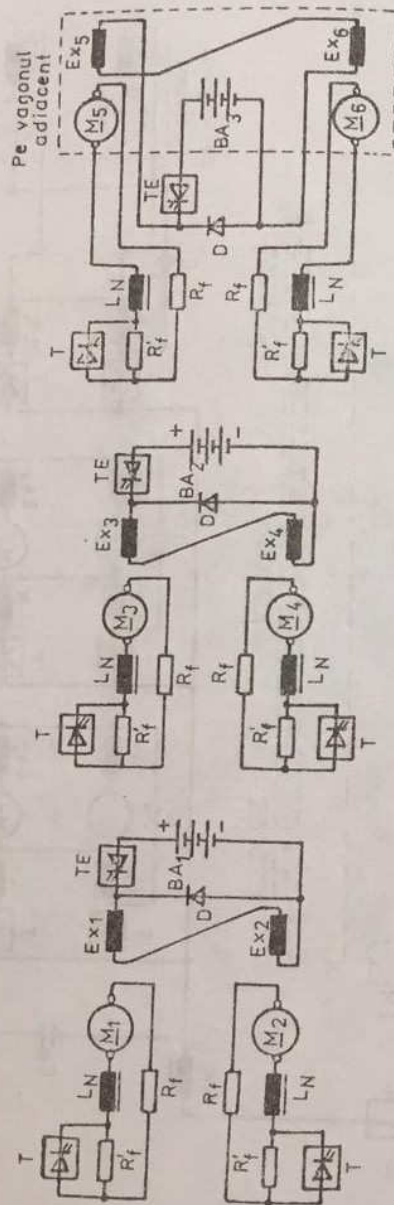


Fig 3.10. Schema electrică de frânare reostatică pentru trenul TGV-PSE.

la aparatul aferent conduce la scoaterea din funcțiune doar a echipamentului boghiului corespunzător, iar prin aceasta - după cum s-a mai menționat - performanțele ramei nu sunt afectate semnificativ.

Pentru îmbunătățirea factorului de putere la pornire (viteze mici, deci tensiuni scăzute), fiecare înfășurare secundară are o priză ce permite alimentarea punții, prin intermediul contactului  $c_1$ , cu o treime din tensiunea secundară maximă. După creșterea tensiunii aplicate motoarelor cu ajutorul punții, prin comandă adecvată a tiristoarelor, până la atingerea valorii maxime corespunzătoare acestei prize (unghi nul de întârziere la aprinderea tiristoarelor), se deschide  $c_1$  și se închide  $c_2$ , reluând creșterea tensiunii aplicate motoarelor prin comanda corespunzătoare a tiristoarelor.

Ramele TGV-PSE destinate să funcționeze și pe linii de contact alimentate la  $16 \frac{2}{3}$  Hz cu tensiunea de 15 kV sunt echipate cu transformatoare care pot funcționa sub ambele tensiuni, dar bobinele de netezire trebuie mărite întrucât armonicile au o frecvență de trei ori mai scăzută. Prin aceasta, rezultă o creștere a prețului și a greutateii: ansamblul transformator-bobine de netezire ajunge de la 8000 kg la 10300 kg.

### b) Tracțiunea în curent continuu

Tracțiunea în curent continuu este utilizată pe tronsoanele căilor ferate franceze electrificate în curent continuu la 1500 V, care nu sunt, însă, echipate pentru circulația de mare viteză și, implicit, solicită o putere mai scăzută decât cea instalată pe ramele TGV.

În acest caz, nu mai este folosit transformatorul, ci de la linia de contact, prin intermediul pantografului și al întreruptorului automat (IC) adecvate funcționării în curent continuu, se alimentează direct câte un variator de tensiune continuă (chopper) - format din tiristorul T, pe post de comutator static, și dioda de regim liber D - asociat fiecărui motor de tracțiune (Fig. 3.9). Pentru a utiliza aceleași semiconductoare de putere, fiecare punte mixtă din cazul tracțiunii în curent alternativ este reconfigurată în două variatoare de tensiune continuă, tiristoarele fiind echipate, în acest scop, cu circuite de stingere forțată.

Pentru reducerea undulațiilor curentului de alimentare, comenzile celor două variatoare ale unui boghiu sunt sincrone, dar decalate cu câte o treime de perioadă față de comenzile variatoarelor de pe celelalte boghiuri.

### c) Frânarea electrică

Din motive de siguranță (absența tensiunii la linia de contact), ca frânare electrică nu este folosită frânarea recuperativă, ci doar frânarea reostatică. Ea se realizează, indiferent de schema de tracțiune de la care se trece în regim de frânare, conform schemei din Fig. 3.10.

În acest caz, mașinile sunt transformate din motoare cu excitație serie în generatoare cu excitație separată care debitează pe rezistențele  $R_f$ ,  $R'_f$ . În paralel cu  $R'_f$  este conectat tiristorul T (cu stingere forțată), pe post de comutator static - utilizat și în schemele de tracțiune -, ceea ce permite modificarea parțială a rezistenței de frânare și, implicit, a forței de frânare. Tot pentru reglarea forței de frânare, este creată posibilitatea modificării curentului de excitație al celor două mașini ale fiecărui boghiu, folosind câte un variator de tensiune continuă alimentat de la o baterie de acumuloare BA, a cărei stare de încărcare este controlată permanent.

Utilizarea în regim de frânare a excitației separate a mașinilor asigură o frânare mult mai eficientă și mai ușor controlabilă decât dacă s-ar fi păstrat excitația serie, care ar fi implicat autoexcitarea mașinilor. Alimentarea înfășurărilor de excitație de la baterii asigură totală independență a frânării de tensiunea liniei de contact.

#### 3.2.2.2. Trenul de mare viteză TGV-Atlantique (TGV-A)

Acesta face parte din a doua generație de trenuri de mare viteză TGV, aflate în exploatare din anul 1989, care circulă pe căi speciale între Paris și Le Mans, precum și pe o ramificație spre Tours (din 1990), dar și în prelungirea acestora, pe căi uzuale spre mai multe orașe din Vestul (până la Oceanul Atlantic) și Sud-Vestul Franței.

Trecerea la această nouă generație a finit, evident, seama de rezultatele obținute în rețeaua Sud-Est, dar a integrat cele mai recente progrese de natură mecanică și electrică.

Principalele obiective propuse la realizarea TGV-A au fost:

- creșterea vitezei de circulație la 300 km/h;
- creșterea capacității de transport;
- reducerea cheltuielilor de exploatare.

Aceste obiective nu mai puteau fi atinse folosind pentru tracțiune motoare de curent continuu, întrucât ele au, pe de o parte, o putere masică scăzută (iar creșterea vitezei și a efortului de tracțiune implică puteri instalate mult sporite); pe de altă parte, prezența colectorului determină cheltuieli ridicate de întreținere a motoarelor.

Motoarele de curent alternativ trifazat, datorită turațiilor mai ridicate și absenței colectorului, au o putere masică mult mai mare decât motoarele de curent continuu. Rămânea de ales între două soluții: motorul sincron și motorul asincron. Semiconductoarele de putere existente la acel moment nu ofereau o soluție convenabilă pentru construirea de invertoare necesare alimentării motoarelor asincrone, în scopul obținerii unor caracteristici de tracțiune adecvate, la puterile mari pe care le implicau ramele pentru TGV-A.

Ca urmare, a fost aleasă soluția acționării cu motoare sincrone autopilotate. Una dintre caracteristicile motorului sincron este aceea că în înfășurările sale statorice se induce tensiuni electromotoare chiar și în absența curenților în aceste înfășurări; ceea ce permite utilizarea unor invertoare de curent cu comutație naturală pentru alimentarea statorului, comutația inverterului fiind asigurată de către motorul însuși. Acesta este un avantaj deosebit, întrucât, pentru realizarea inverterului, pot fi utilizate tiristoare convenționale, care nu trebuie să fie rapide.

Momentele de comutație a tiristoarelor inverterului pot fi determinate de electronica de comandă, plecând de la măsurarea tensiunilor statorice ale mașinii și ținând seama de timpul necesar comutației, precum și de un timp de siguranță. Astfel, pentru ca să se poată realiza comutația naturală, este necesar ca motorul să se învârtă și să dezvolte tensiuni electromotoare suficiente. În fapt, comutația

naturală este posibilă la viteze de valori peste cca 3-10 % din viteza maximă. La viteze inferioare - implicit, la pornire - este necesar să se recurgă la dispozitive auxiliare pentru comutația forțată. Comenzile pentru comutație, în acest caz, sunt date logicii de comandă de către traductoare de poziție, care reperează poziția rotorului mașinii față de stator.

Motorul sincron autopilotat funcționează după un principiu asimilabil cu al motorului de curent continuu și, ca urmare, se pot obține caracteristici similare cu ale motorului de curent continuu. Prin înserierea înfășurării de excitație cu circuitul de alimentare a ansamblului inverter-motor (sau prin excitarea separată și realizarea unei proporționalități a curentului de excitație cu curentul de alimentare), se obțin caracteristici asemănătoare cu ale motorului serie de curent continuu, adecvate tracțiunii electrice, asigurând: un efort de tracțiune însemnat la viteze scăzute și zona de putere constantă cea mai întinsă posibil.

Reglarea vitezei și a efortului de tracțiune se obține acționând asupra tensiunii de alimentare a ansamblului inverter-motor și, eventual, asupra curentului de excitație.

Principalele **avantaje** care au fost hotărâtoare în alegerea motorului sincron autopilotat (și nu a motorului asincron), ca motor de tracțiune pentru TGV-A, pot fi rezumate astfel:

- extrema simplitate a inverterului;
- fiabilitatea ridicată datorită simplității inverterului;
- randamentul ridicat;
- protecția asigurată natural prin prezența bobinei de filtrare în circuitul de intrare al inverterului;
- masa redusă a echipamentului, condensatoarele necesare comutației forțate la viteze mici având o masă foarte mică; de asemenea, dispozitivele necesare excitației rotorului sunt foarte simple și au o masă foarte mică;
- ușurința deosebită de realizare a frânării electrice, chiar și în absența tensiunii la linia de contact, excitarea rotorului

putându-se obține de la o baterie de acumuloare, prezentă pe orice vehicul electric.

**Dezavantajele** esențiale ale acestui motor sunt legate de prezența înfășurării de excitație: costul mai ridicat al rotorului și necesitatea alimentării înfășurării de excitație, aflată în mișcare. Dar costul mai ridicat al rotorului este compensat de costul mai scăzut al inverterului, iar alimentarea înfășurării de excitație se realizează prin intermediul sistemului clasic perii-inele colectoare. Din experiența acumulată în construcția și exploatarea unor locomotive electrice de mare putere echipate cu motoare sincrone, înainte de realizarea ramelor TGV-A, a rezultat că acest sistem nu pune nici o problemă.

Principiile generale de realizare a ramelor TGV-A au rămas aceleași ca la ramele TGV-PSE:

- material rulant bicurent (pentru 25 kV, 50 Hz și 1,5 kV c.c.);
- posibilitatea de cuplare în unități multiple;
- rame articulate, dar cu zece vagoane în loc de opt, pentru a exploata în întregime lungimea existentă a peroanelor;
- compatibilitate completă cu rețeaua existentă și circulația posibilă pe linia nouă Sud-Est.

Caracteristicile principale ale motoarelor sincrone autopilotate utilizate pe ramele TGV-A sunt următoarele:

- putere la arbore: 1100 kW
- turație maximă: 4000 rot/min, la 300 km/h
- număr de poli: 6
- stator: trifazat, în stea simplă;  
tensiune nominală între faze: 1246 V;  
curent nominal pe fază: 588 A
- rotor: cu excitație separată, poli aparenti
- masă: 1450 kg.

Datele prezentate în Tab. 3.2 permit să se aprecieze avantajul adus de utilizarea acestui motor în locul motorului de c.c.: masa totală a ansamblului inverter-motor, inclusiv sistemele sale de excitare și autopilotare, este de 1590 kg; deci, numai cu 30 kg mai mult decât a unui motor de c.c. (cu puterea de cca două ori mai mică) utilizat pe

ramele TGV-PSE, rezultând o putere masică de 692 W/kg - deci, practic dublă.

Tabelul 3.2.

TGV-PSE		TGV-A	
Masă motor de c.c., excitație serie, 535 kW	1560 kg	Masă motor sincron autopilotat, excitație separată, 1100 kW	1450 kg
		Masă invertor de curent (răcit cu freon)	80 kg
		Masă sistem de autopilotare	30 kg
		Masă sistem de excitare	30 kg
<b>TOTAL</b>	1560 kg	<b>TOTAL</b>	1590 kg

Aceasta a permis reducerea numărului de boghiuri motoare pe ramă de la șase la patru - câte două boghiuri pe fiecare din cele două locomotive aflate la extremitățile ramei, un boghiu având și în acest caz două osii acționate individual - și totodată creșterea puterii ramei la 8800 kW (față de 6400 kW la TGV-PSE). S-au putut astfel crește viteza de la 270 km/h la 300 km/h, precum și numărul de vagoane de la opt la zece, cu o capacitate crescută de la 386 călători la 485 călători. Creșterea capacității a fost posibilă și datorită reducerii echipamentului de tracțiune (dispar două boghiuri motoare), care a permis ca toate vagoanele ramei TGV-A să fie complet degajate de echipament de tracțiune.

Cu toată această creștere a performanțelor ramei, sarcina pe osie nu depășește 17 t.

Rama are o masă totală de 475 t, la care motoarele de tracțiune contribuie doar cu 12,7 t (față de 18,7 t la TGV-PSE), rezultând 979 kg/călător în loc de 1135 kg/călător la TGV-PSE.

Sistemul de autopilotare a motoarelor sincrone permite să se dezvolte în domeniul de viteze 0-80 km/h un efort de tracțiune de cca două ori mai mare decât în regim continuu, cu valori ale curentului de doar 1,4 ori mai mari.

În Fig. 3.11, sunt prezentate caracteristicile de tracțiune  $F_T$  (v) ale unei rame TGV-A, obținute - în cadrul studiului de motorizare a

ramei - cu 8 motoare sincrone de 1100 kW, comparativ cu 8 motoare de curent continuu de 535 kW.

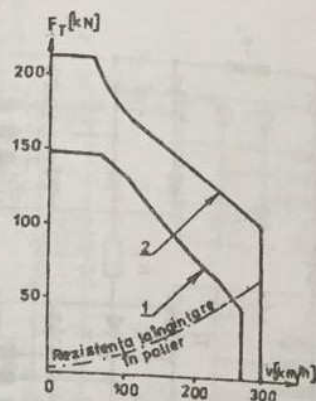


Fig. 3.11. Caracteristicile de tracțiune ale unei rame TGV-A obținute cu: (1) 8 motoare de c.c. de 535 kW; (2) 8 motoare sincrone de 1100 kW.

În Fig. 3.12, este redată schema de principiu a circuitelor de putere pentru o locomotivă a ramei, în această schemă fiind cuprinse elementele esențiale care permit trecerea la regimul de tracțiune în curent alternativ monofazat (25 kV, 50 Hz), la regimul de tracțiune în curent continuu (1500 V) sau la regimul de frânare electrică (reostatică).

#### a) Tracțiunea în curent alternativ monofazat

Pentru realizarea tracțiunii în curent alternativ monofazat (25 kV, 50 Hz), în schema din Fig. 3.12 trebuie închise contactele  $c_1$ ,  $c_2$  și  $c_4$ , rămânând deschise contactele  $c_3$ . Schema obținută în acest caz, cu unele detalii suplimentare, este prezentată în Fig. 3.13.

Fiecare locomotivă are un transformator cu o înfășurare primară [care se alimentează de la linia de contact prin pantograful și întreruptorul rapid (IM), adecvate funcționării în monofazat] și cinci înfășurări secundare, dintre care patru sunt destinate alimentării circuitelor statorice ale motoarelor de tracțiune, iar una - pentru alimentarea circuitelor de excitație ale acestor motoare, precum și a

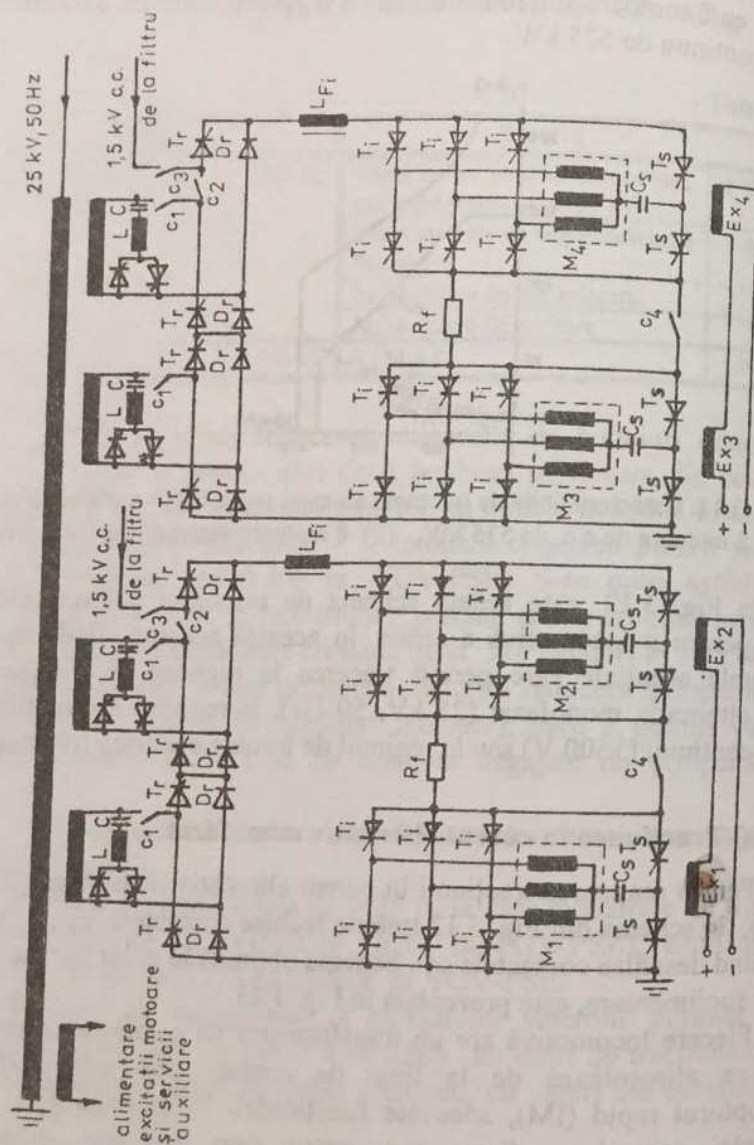


Fig. 3.12. Schema de principiu a circuitelor de putere pentru o locomotivă TGV-A.

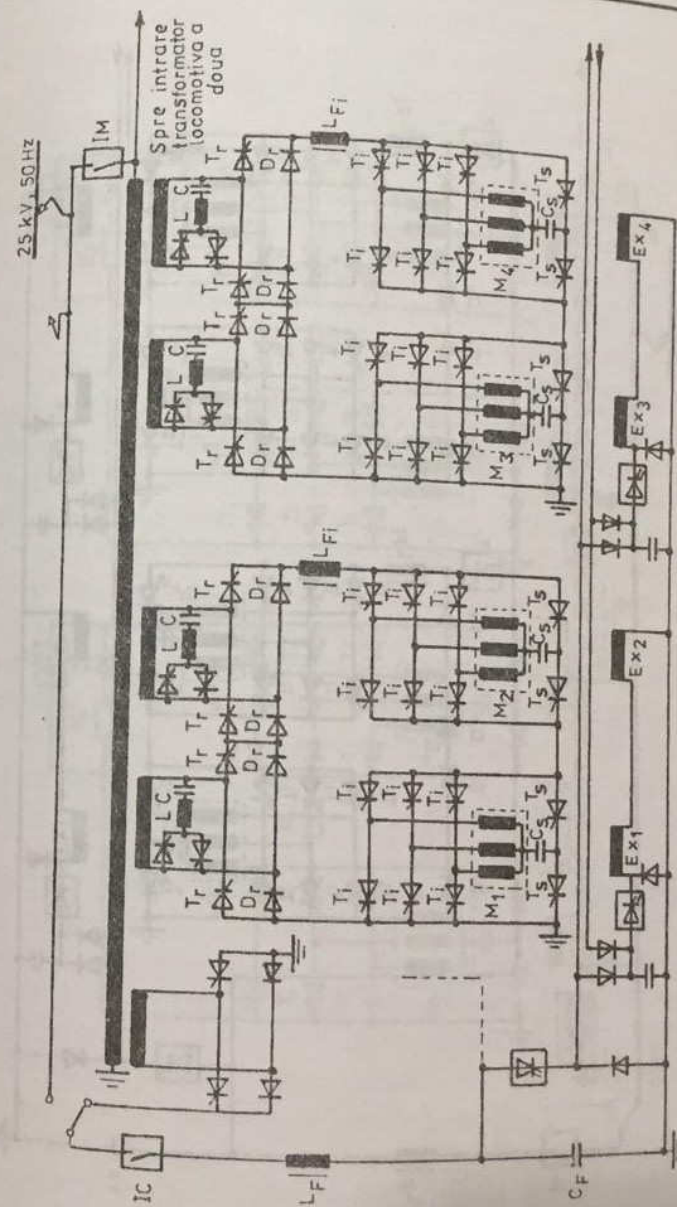


Fig. 3.13. Schema electrică de tracțiune în c.a. monofazat pentru trenul TGV-A.

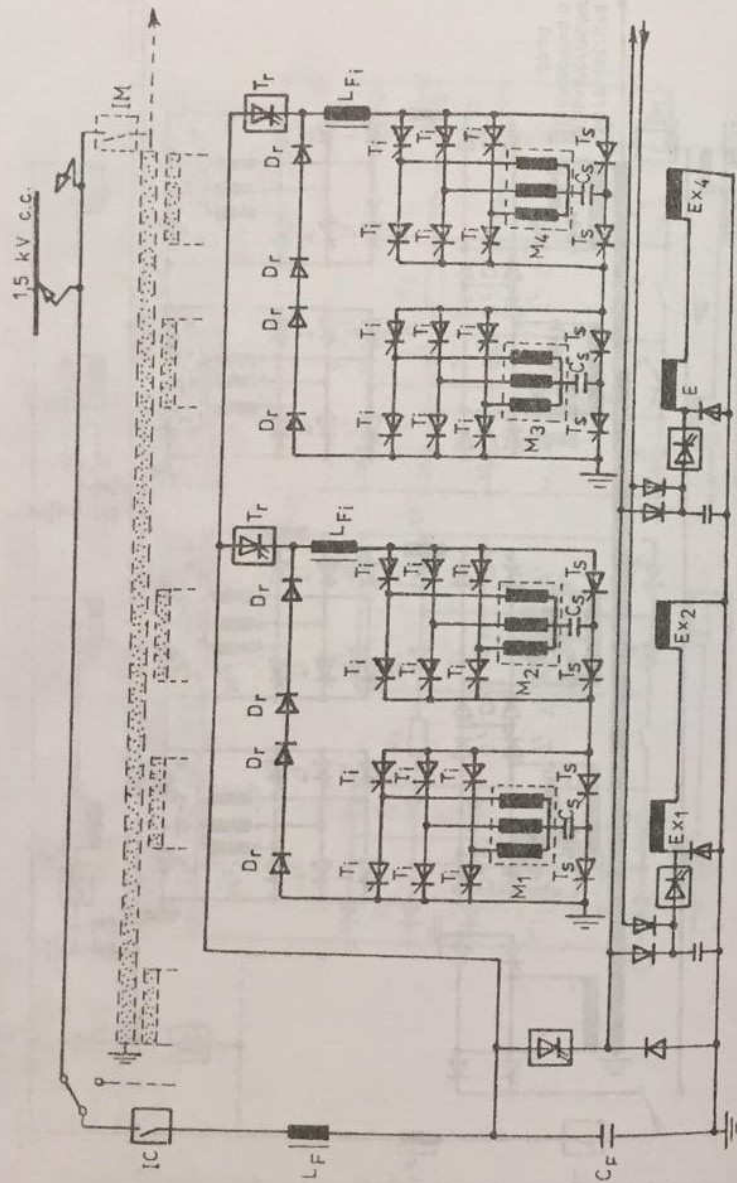


Fig. 3.14. Schema electrică de tracțiune în c.c. pentru trenul TGV-A.

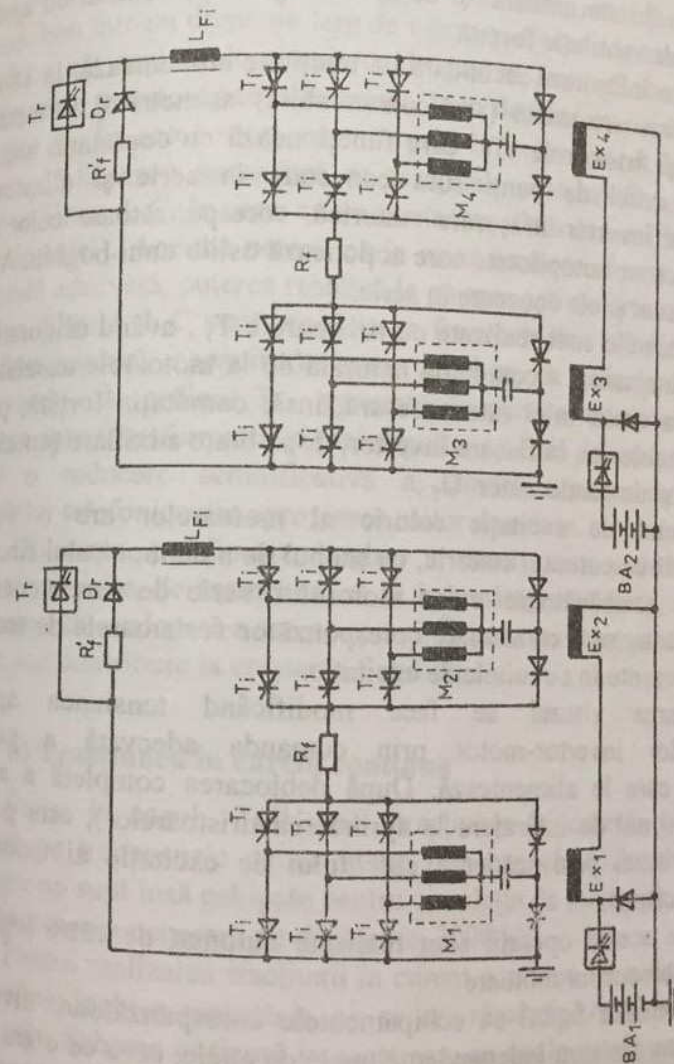


Fig. 3.15. Schema electrică de frânare reostatică pentru trenul TGV-A.

serviciilor auxiliare. Transformatorul - realizat cu înfășurări alternate - formează împreună cu diversele bobine din schemă un ansamblu unic, dispus într-o cuvă, răcirea acestui ansamblu fiind asigurată printr-un dublu circuit de ulei mineral și de aerorefrigeranți, ventilat cu ajutorul unui sistem de ventilație forțată.

Fiecare înfășurare secundară de tracțiune alimentează, la 1800 V, o punte redresoare mixtă (semicomandabilă) asimetrică, formată din diodele  $D_T$  și tiristoarele  $T_T$  care funcționează cu comutație naturală. Câte două astfel de punți sunt conectate în serie și alimentează ansamblurile invertor-înfășurare statorică, corespunzătoare celor două motoare sincrone autopilotate care acționează osiile unui boghiu. Aceste ansambluri sunt și ele conectate în serie.

Invertoarele sunt realizate cu tiristoarele  $T_i$ , având asigurată - la funcționarea normală - comutația naturală de la motoarele asociate. La pornire și la viteze mici este necesară, însă, comutația forțată; pentru aceasta sunt folosite, la fiecare invertor, două brațe auxiliare (cu câte un tiristor  $T_s$ ) și un condensator  $C_s$ .

Curentul de excitație rotoric al motoarelor are o valoare proporțională cu curentul statoric, cu scopul de a da motorului sincron o comportare asemănătoare cu a motorului serie de curent continuu. Pentru aceasta, sunt comandate corespunzător variatoarele de tensiune continuă prezente în circuitele de excitație.

Reglarea vitezei se face modificând tensiunea aplicată ansamblurilor invertor-motor prin comanda adecvată a punților redresoare care le alimentează. După deblocarea completă a acestor punți (unghi nul de întârziere la aprinderea tiristoarelor), este posibilă creșterea vitezei prin scăderea curentului de excitație al motoarelor (slăbire de câmp).

Toate aceste operații sunt realizate automat de către logica de comandă a blocurilor motoare.

Se remarcă faptul că echipamentele corespunzătoare diverselor boghiuri motoare sunt independente unele de altele, ceea ce oferă - ca și în cazul TGV-PSE - o foarte bună disponibilitate: orice incident la un motor de tracțiune sau la aparatul aferent conduce la scoaterea din funcțiune doar a echipamentului boghiului corespunzător. La nevoie,

funcțiunile ansamblului "pantograf-întreruptor automat" de pe o locomotivă pot fi preluate de către ansamblul respectiv de pe cealaltă locomotivă.

S-au luat măsuri deosebite pentru obținerea unui factor de putere cât mai bun într-un domeniu larg de viteze și eforturi de tracțiune, pentru a reduce cât mai mult circulația de putere reactivă, care ar încărca suplimentar transformatoarele ramei, linia de contact și instalațiile fixe aferente ei. În acest scop, este folosit, în primul rând, la ieșirea din fiecare înfășurare secundară de tracțiune, câte un dispozitiv format dintr-un filtru  $L,C$  în serie cu un contactor static de c.a. (două tiristoare în antiparalel). Acestea permit ca în orice moment să se adapteze, prin comandă adecvată, puterea reactivă la puterea activă consumată de ramă. În plus, filtrele  $L,C$  sunt acordate pe frecvența de 150 Hz (la 50 Hz ele funcționează capacitiv), ceea ce face ca principala armonică superioară - de ordinul 3 -, generată de punțile redresoare, să nu se propage spre transformator și mai departe, pe linia de contact, asigurând astfel o reducere semnificativă a efectelor perturbatoare asupra circuitelor telefonice din apropierea căilor de rulare.

Utilizarea pe fiecare boghiu a două punți redresoare mixte inseriate permite, de asemenea, să se îmbunătățească factorul de putere, prin comanda eşalonată a acestor punți. În plus, existența a două punți în loc de una contribuie la creșterea fiabilității.

### b) Tracțiunea în curent continuu

Ca și în cazul TGV-PSE, tracțiunea în curent continuu este utilizată pe tronsoanele căilor ferate franceze electrificate la 1500 V c.c., care nu sunt însă echipate pentru circulația de mare viteză. În aceste condiții, puterea necesară nu depășește 3000 kW.

Pentru realizarea tracțiunii în curent continuu, în schema din Fig. 3.12 trebuie închise contactele  $c_3$  și  $c_4$ , rămânând deschise contactele  $c_1$  și  $c_2$ . Schema obținută în acest caz, cu unele detalii suplimentare, este prezentată în Fig. 3.14. Alimentarea sa se face prin intermediul pantografului și al întreruptorului automat (IC), adecvate funcționării în curent continuu, precum și al unui filtru  $L_F, C_F$  unic pe locomotivă.

Punțile redresoare mixte asociate fiecărui boghiu, de la tracțiunea în monofazat, sunt acum reconfigurate în câte un variator de tensiune continuă (chopper), care alimentează cu tensiune reglabilă ansamblurile înseriate inverter-înfașurare statorică (rămase, evident, neschimbate), corespunzătoare motoarelor sincrone autopilotate care acționează osiile aceluși boghiu. Variatorul de tensiune continuă este format din tiristorul  $T_r$  (unul din tiristoarele punților mixte, echipat în acest scop cu circuit de stingere forțată), pe post de comutator static, și diodele  $D_r$  (toate diodele punților mixte conectate în serie), pe post de diodă de regim liber.

### c) Frânarea electrică

Ca și în cazul TGV-PSE, frânarea electrică este reostatică. Pentru realizarea acesteia, schema din Fig. 3.12 se reconfigurează (după deschiderea tuturor contactelor  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  și introducerea unor elemente suplimentare) ca în Fig. 3.15.

În acest caz, motoarele sincrone ale unui boghiu funcționează ca generatoare sincrone, iar invertoarele asociate funcționează ca redresoare, care debitează - în serie - pe rezistențele  $R_f$ ,  $R'_f$ . În paralel cu  $R'_f$  este conectat tiristorul  $T_r$  (cu stingere forțată), pe post de comutator static, ceea ce permite modificarea parțială a rezistenței de frânare și, implicit, a forței de frânare. Întrucât schema de frânare se obține prin reconfigurarea schemelor de tracțiune, din motive de comoditate s-a menținut, în afara tiristorului  $T_r$ , și dioda  $D_r$  (în serie cu  $R'_f$ ), ambele provenite din schemele de tracțiune.

Reglarea forței de frânare poate fi realizată și prin modificarea curentului de excitație al celor două mașini ale fiecărui boghiu, folosind variatorul de tensiune asociat înfașurărilor respective de excitație.

Frânarea trebuind să fie asigurată chiar și în lipsa tensiunii la linia de contact, alimentarea înfașurărilor de excitație ale mașinilor sincrone și a circuitelor de comandă se face - în caz de nevoie - de la bateriile de acumulare BA, a căror stare de încărcare este controlată permanent. În plus, echipamentele de frânare corespunzătoare diverselor boghiuri

motoare sunt independente unele de altele, asigurându-se astfel o foarte bună disponibilitate.

În ceea ce privește sistemele informatice de pe TGV-A, apariția pe piață a microprocesoarelor a permis să se regândească în întregime circuitele de comandă, control și reglaj ale ansamblului de echipamente ale ramei și să se asigure alte funcțiuni care înainte erau imposibil de realizat.

Un număr de 18 calculatoare echipează TGV-A, ele fiind repartizate în trei grupe: *calculator de remorcă*; *calculator de bloc motor*; *calculator de cabină*. Ansamblul acestor calculatoare este legat la o rețea internă de comunicație pentru a permite conducerea, exploatarea și întreținerea ramelor.

Calculatorul fiecărei remorci asigură:

- comanda și reglarea climatizării;
- gestionarea ușilor de acces și a pasajelor dintre vagoane;
- supravegherea funcționării sistemului de frânare;
- controlul stabilității boghiurilor;
- afișarea informațiilor destinate călătorilor;
- controlul echipamentelor și memorarea defectelor etc.

Calculatorul de comandă a fiecărui bloc motor asigură:

- comanda, reglajul și supravegherea motoarelor de tracțiune;
- adaptarea puterii cerute de ramă la posibilitățile liniei de contact;
- adaptarea efortului de tracțiune la limitele permise de aderență;
- conjugarea, în regim de frânare, a sistemului de frânare electrică cu sistemul de frânare mecanică (pneumatică);
- memorarea defectelor etc.

Calculatorul de cabină se compune dintr-un calculator principal și un calculator auxiliar.

Calculatorul principal asigură:

- gestionarea schimburilor de informații în rețeaua ramei;
- gestionarea informațiilor între tren și sol, prin legătură radio;

- codarea informațiilor provenite de la pupitrul de comandă și destinate blocurilor motoare, celorlalte locomotive ale trenului, remorcilor;
- decodarea pe pupitru și pe consola sa de vizualizare a informațiilor venite din rețea;
- asistarea conducătorului trenului la depanări.

Calculatorul auxiliar asigură interfața între calculatorul principal și echipamentele locomotivei, iar pentru cabina din spatele trenului (care nu este în serviciu) - recepția comenzilor și transmisia semnalizărilor.

Cele 18 calculatoare ale ramei (36 pentru un tren cu două rame) sunt legate prin rețea, iar dialogul lor este pilotat de către calculatorul de cabină. Sistemul permite, deci, în permanență schimburile de informații între echipamentele repartizate în lungul trenului, conducătorul trenului, controlorul de trafic, posturile de exploatare și de întreținere. În aceste condiții, este posibil:

- să se controleze înainte de plecare, de la postul de conducere, ansamblul echipamentelor ramelor;
- să se furnizeze în timp real conducătorului trenului și agenților de bord informații referitoare la starea ramelor, indicând modul de conducere ce trebuie adoptat;
- să se înregistreze și să se transmită prin radio, la centrul de întreținere, defectele de funcționare și condițiile în care s-au produs acestea, ceea ce permite să se pregătească rapid depanarea lor și să se îmbunătățească disponibilitatea ramelor.

### 3.2.2.3. Trenul de mare viteză TGV-Eurostar

Acesta face parte din a treia generație de trenuri de mare viteză TGV, care sunt în exploatare din anul 1994 - când a fost inaugurat tunelul ce subtraversează Canalul Mânecii (Eurotunel) - și leagă Londra de Paris și de Bruxelles. Trenurile circulă pe cale specială în Franța (Calais - Lille - Paris), pe care pot atinge 300 km/h, restul traseelor fiind acoperite de căi uzuale pe care circulă cu viteze maxime de 160-220 km/h (în Eurotunel: maximum 160 km/h).

Trecerea la această nouă generație a ținut seama de dezvoltarea spectaculoasă a tiristoarelor cu stingere pe poartă (GTO), de scăderea prețului lor, precum și de progresele realizate în privința sistemelor de răcire asociate semiconductoarelor de putere. Toate acestea au permis realizarea unor echipamente foarte compacte, fiabile și competitive - de tensiuni și puteri ridicate - bazate pe invertoare de tensiune cu modularea în lățime a impulsurilor (PWM), care puteau fi folosite, în condiții de performanțe ridicate, pentru alimentarea (la tensiune și frecvență variabile) motoarelor asincrone trifazate ca motoare de tracțiune.

Principalele **avantaje** ale motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit, față de motorul sincron, sunt determinate de lipsa înfășurării de excitație: cost mai scăzut al rotorului și eliminarea sistemului de alimentare a acestei înfășurări.

O ramă TGV-Eurostar este compusă din două locomotive la extremități, între care se află 18 vagoane. În total, însă, sunt șase boghiuri motoare (ca și în cazul ramei TGV-PSE): două pe fiecare locomotivă și unul pe fiecare vagon adiacent locomotivei.

Rama are o putere de 12200 kW (la alimentarea de la linia de contact de 25 kV, 50 Hz), o lungime de 394 m și o masă de 752,4 t, la care motoarele de tracțiune contribuie cu 15,7 t. Capacitatea ramei este de 794 călători, rezultând 948 kg/călător (față de 978 kg/călător la TGV-A și 1135 kg/călător la TGV-PSE). Sarcina pe osie nu depășește 17 t.

La această ramă, locomotivele trebuie să se poată alimenta de la trei sisteme diferite de electrificare:

- curent alternativ monofazat 25 kV, 50 Hz în Franța (și în Eurotunel);
- curent continuu 3000 V în Belgia;
- curent continuu 750 V în Anglia.

Alimentarea se face, prin pantografe adecvate, de la linia de contact aeriană (catenară), în cazul curentului alternativ 25 kV, 50 Hz și al curentului continuu 3000 V. În cazul curentului continuu 750 V, alimentarea se face de la "șina a treia", prin intermediul unor captatoare laterale de tip patină.

În Fig. 3.16, sunt reprezentate, într-o formă simplificată, elementele esențiale ale schemei de putere, valabilă pentru fiecare grup de trei boghiuri motoare aflate la câte o extremitate a ramei.

Echipamentul de tracțiune de bază este **blocul motor**. El conține, așa cum s-a mai spus, echipamentele de putere și de comandă necesare alimentării sau frânării celor două motoare ale unui boghiu, aceste echipamente fiind complet independente de omologe lor de pe celelalte boghiuri motoare.

Un bloc motor comportă două invertoare - realizate cu tiristoare GTO (4500 V, 2500 A) și având schema de structură similară celei din Fig. 3.2 -, fiecare dintre acestea alimentând un motor asincron de 1020 kW (masa: 1310 kg). Blocul motor conține și o rezistență  $R_f$  asociată cu un chopper de frânare, care sunt utilizate la frânarea reostatică.

Principiul schemei constă în alimentarea în paralel, de la un circuit intermediar de curent continuu, a celor trei blocuri motoare aflate la o extremitate a ramei. Valoarea nominală a tensiunii intermediare este de 1900 V.

Echipamentele de putere și comandă necesare alimentării circuitului intermediar de la dispozitivele de captare sunt grupate într-un **bloc comun** (dulap electric) care conține două punți redresoare mixte, două choppere coborâtoare de tensiune și două filtre de linie, precum și contactoarele necesare realizării legăturilor sau separărilor, care se impun pentru funcționarea sub cele trei tipuri de tensiuni și pentru obținerea unei disponibilități maxime. Aceasta din urmă este asigurată prin constituirea blocului comun - în esență - din două circuite în paralel, care pot funcționa independent unul de celălalt.

O acordare judicioasă a schemei sub cele trei tipuri de tensiuni de alimentare a permis utilizarea unui maxim de elemente comune, păstrând o redundanță rezonabilă peste tot unde a fost posibil.

Pentru alimentarea în curent alternativ monofazat (25 kV, 50 Hz), fiecare locomotivă are un transformator de 7,5 MVA, înfășurarea primară a acestuia conectându-se la linia de contact prin intermediul pantografului și al întreruptorului rapid (IM) adecvate. Transformatorul reprezintă o realizare tehnologică deosebită, deoarece, în același spațiu ca la TGV-A, s-a obținut o putere cu 40 % mai mare, prin utilizarea ca

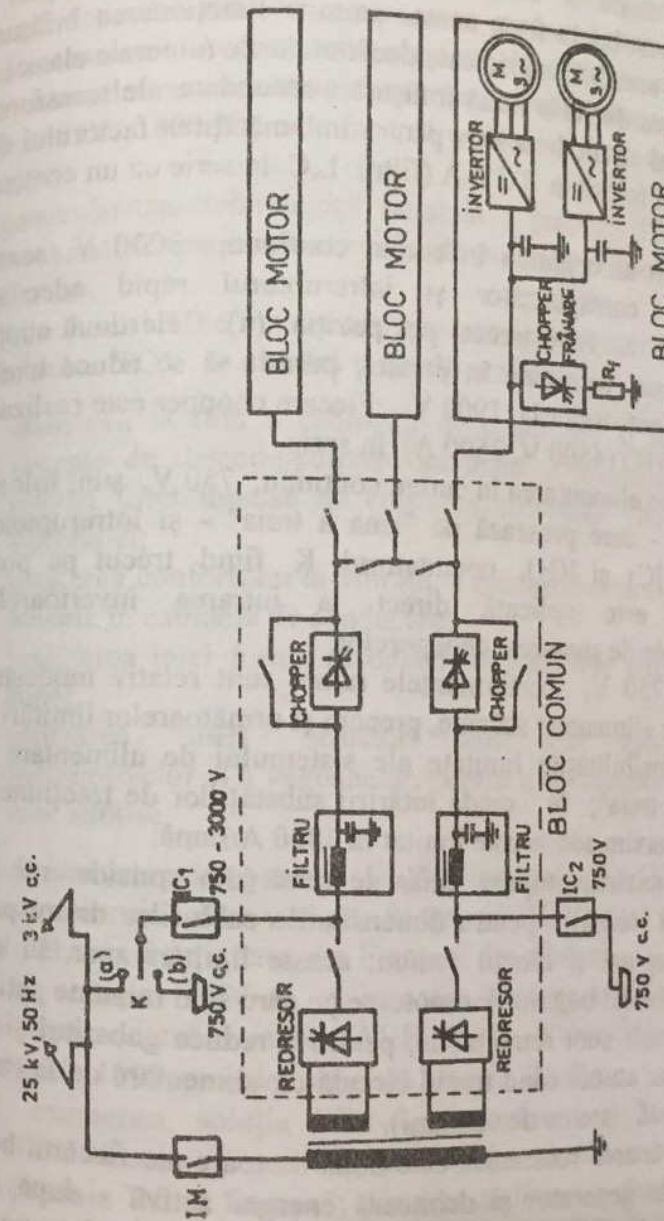


Fig. 3.16. Schema electrică de principiu a trenului TGV-Eurostar.

lichid de răcire a uleiului silionic (ales, în principal, datorită comportamentului la foc); acesta permite funcționarea înfășurărilor la temperaturi sensibil mai ridicate decât uleiurile minerale clasice.

Fiecare din cele două înfășurări secundare ale transformatorului este echipată cu un dispozitiv pentru îmbunătățirea factorului de putere, similar celui folosit la TGV-A (filtru L,C în serie cu un contactor static de c.a.).

Pentru alimentarea în curent continuu, 3000 V, sunt folosite pantograful corespunzător și întreruptorul rapid adecvat (IC<sub>1</sub>), comutatorul K fiind trecut pe poziția (a). Cele două choppere din blocul comun, conectate în paralel, permit să se aducă tensiunea de intrare a invertoarelor la 1900 V. Fiecare chopper este realizat cu două tiristoare GTO (4500 V, 2500 A) în serie.

Pentru alimentarea în curent continuu, 750 V, sunt folosite patine de captare - care presează pe "șina a treia" - și întreruptoare rapide adecvate (IC<sub>1</sub> și IC<sub>2</sub>), comutatorul K fiind trecut pe poziția (b). Tensiunea este aplicată direct la intrarea invertoarelor, prin contactoarele de șuntare a chopperelor.

La 750 V, performanțele ramei sunt relativ modeste datorită tensiunii de alimentare scăzute, precum și următoarelor limitări:

- posibilitățile limitate ale sistemului de alimentare a "șinei a treia"; în ciuda întăririi substațiilor de tracțiune, curentul maxim admis este limitat la 6800 A/ramă;
- limitările impuse chiar de ramă (din considerente de spațiu și masă) pentru dimensiunile cablurilor dintre patinele de captare și blocul comun; aceste limitări apar, în special, la nivelul boghiurilor motoare pe care sunt montate patinele.

Patinele sunt retractabile, pentru a reduce gabaritul și rezistența opusă de aer atunci când trenul circulă cu alimentare de la catenară (în celelalte două sisteme de tensiuni).

La frânarea reostatică, cele două motoare ale fiecărui boghiu trec în regim de generator și debitează energia activă - după redresarea realizată de diodele de regim liber ale invertorului asociat - pe rezistența  $R_f$ , prin intermediul unui chopper de frânare. Acestea din urmă sunt comune pentru fiecare bloc motor, chopperul de frânare permițând

reglarea forței de frânare dezvoltate de boghiul motor corespunzător. Amorsarea funcționării mașinii asincrone ca generator necesită prezența prealabilă a tensiunii. Aceasta este obținută, în orice situație, de la o baterie de acumulatori printr-un convertor c.c.-c.c. (chopper) ridicător de tensiune 72V/ 1800 V, care încarcă condensatoarele de la intrarea invertoarelor.

O particularitate tehnologică notabilă a ramelor TGV-Eurostar este utilizarea răcirii semiconductoarelor de putere prin circulație forțată de ulei silionic.

Printre modificările importante în construcția acestor rame față de a celorlalte rame TGV se numără și următoarele:

- etanșarea la fum a cabinelor de conducere și echiparea cu sisteme de detecție-stingere automată a incendiilor, ambele măsuri fiind impuse de creșterea securității circulației prin Eurotunel;
- creșterea confortului la vibrații, a confortului termic și a celui acustic în cabinele de conducere;
- realizarea unei forme aerodinamice adecvate circulației prin tunel;
- utilizarea unei structuri mult mai ușoare a cutiei locomotivelor și a vagoanelor, pentru a corespunde sarcinii pe osie admise.

Soluțiile adoptate pentru TGV-Atlantique și TGV-Eurostar stau la baza construirii altor variante de trenuri TGV, care circulă și pe alte linii decât cele menționate, din Franța și din afara ei.

Astfel, soluția TGV-A cu motoare sincrone este folosită și pe trenul de mare viteză spaniol AVE (Alta Velocidad Española), care circulă, din 1992, pe calea specială Madrid-Sevilla.

De asemenea, soluția TGV-A se regăsește și în construcția trenurilor TGV-Réseau (Fig. 3.17), care au fost destinate inițial pentru circulația pe linia "Nord Europe"; din această linie s-a deschis în 1993 tronsonul cu cale specială Paris-Lille, care - în afară de utilizarea sa pentru TGV-Eurostar - urmează să facă parte din rețeaua transeuropeană Paris - Bruxelles - Köln - Amsterdam. Se are în vedere,

însă, circulația trenurilor TGV-Réseau pe întreaga rețea TGV, ținând seama de faptul că cele trei linii radiale (Sud-Est, Atlantique și Nord Europe) sunt acum conectate împreună în afara Parisului, încât nu mai este nevoie ca aceste trenuri să oprească în Paris.

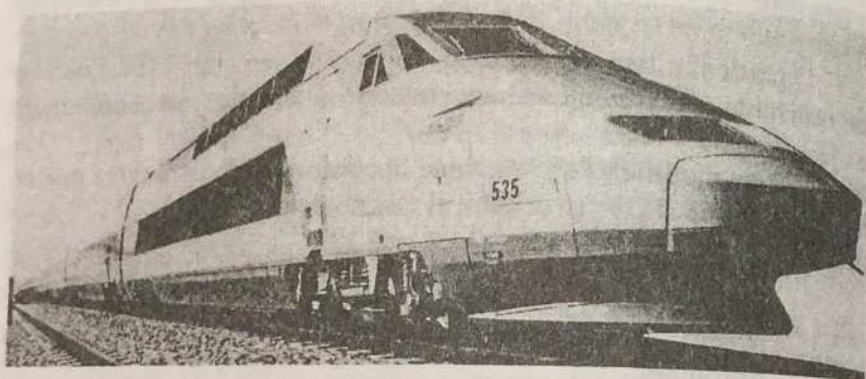


Fig. 3.17. Trenul TGV- Réseau.

Soluția TGV-Eurostar cu motoare asincrone a fost avută în vedere pentru construcția trenurilor TGV-Duplex (care, din 1996, sunt utilizate pe liniile Nord Europe și Sud-Est, scopul principal fiind descongestionarea traficului pe linia Sud-Est), precum și pentru un derivat al acestora - TGV-Thalys, destinat liniei Nord Europe și noilor linii spre Bruxelles, Köln și Amsterdam. Aceeași soluție se prevede a fi adoptată - cu îmbunătățirile necesare - pentru trenurile de mare viteză dintr-o nouă generație TGV-NG (Nouvelle Génération), ce vor avea viteza maximă de 360 km/h și locomotive cuadricurent (25 kV, 50 Hz; 15 kV, 16 2/3 Hz; 1500 V, c.c.; 3000 V, c.c.) adaptate rețelei feroviare europene.

De menționat că SUA (statul Florida), Canada, Coreea de Sud și China intenționează să construiască propriile lor variante de trenuri de mare viteză, bazate, însă, pe soluțiile TGV.

## Capitolul 4

### VEHICULE ELECTRICE FĂRĂ ADERENȚĂ LA CALE

Propulsia vehiculelor electrice fără aderență la cale (nu se au în vedere vehiculele cu tracțiune prin cablu) poate fi obținută folosind fie elice, fie cremalieră - dacă vehiculele sunt echipate cu motoare electrice rotative -, fie interacțiunea directă a două armături, fără contact mecanic, prin intermediul câmpului electromagnetic - dacă vehiculele sunt echipate cu motoare electrice liniare. Întrucât vehiculele cu elice sau cu cremalieră prezintă un interes foarte restrâns, în acest capitol vom prezenta doar vehiculele având propulsia realizată cu motoare electrice liniare.

#### 4.1. PROPULSIA CU MOTOARE ELECTRICE LINIARE

Motoarele electrice liniare sunt mașini electrice în care armătura mobilă efectuează o mișcare de translație, paralel cu armătura imobilă. Această proprietate a motoarelor liniare determină, în principal, interesul pentru utilizarea lor în tracțiunea electrică, având în vedere că scopul tracțiunii îl constituie deplasarea unui vehicul, care - în esență - trebuie realizată printr-o mișcare de translație. Principalele lor aplicații sunt la vehicule de viteze joase (sub 80 km/h), precum și la vehicule de mare

viteză (peste 250 km/h; se au în vedere chiar viteze de ordinul a 1000 km/h). Vehiculele de viteze joase, echipate cu astfel de motoare, pot fi utilizate în transportul minier (în acest caz, profitându-se, îndeosebi, de avantajul posibilității de a elimina liniile de contact pentru alimentarea vehiculelor, precum și de acela al posibilității de a urca rampe mari) și în transportul urban în care se dorește, mai ales, eliminarea influenței pe care o au diverși factori - uzuri, factori meteorologici, declivități ale căii de rulare etc. - asupra forțelor de propulsie și de frânare la tracțiunea prin aderență, un domeniu de maxim interes fiind acela al sistemelor automatizate de transport (vehicule fără conducător).

În principiu, există un corespondent liniar al oricărui motor electric rotativ. Totuși, din motive tehnico-economice, în tracțiunea electrică sunt folosite numai **motoarele liniare de curent alternativ, asincrone și sincrone.**

Ca urmare a transformărilor topologice rezultate - în principal, în circuitul magnetic al mașinii - prin trecerea de la mașina rotativă la mașina liniară corespunzătoare, apar fenomene noi care nu pot fi explicate în întregime cu ajutorul teoriei clasice. În consecință, metodele de analiză folosite în studiul motoarelor rotative trebuie modificate și uneori trebuie dezvoltate noi teorii.

În cele ce urmează, vom prezenta principalele tipuri de motoare electrice liniare utilizate în tracțiunea electrică.

#### 4.1.1. Motorul asincron liniar

##### 4.1.1.1. Principiu de funcționare. Variante constructive

Sugestiv, un motor asincron liniar se poate obține dintr-un motor asincron rotativ prin secționarea acestuia din urmă după o generatoare și desfășurarea în plan a celor două armături - **primarul** (inductorul) și **secundarul** (indusul) -, una din ele fiind mobilă, solidară cu vehiculul, iar cealaltă fixă, solidară cu calea. În Fig. 4.1.b, este prezentată mașina liniară primitivă care rezultă în modul de mai sus dintr-o mașină asincronă rotativă cu rotorul în scurtcircuit (Fig. 4.1.a); pentru simplificare, s-a considerat că mașina este bipolară și are înfășurarea

primară cu pas diametral, cu o singură crestătură pe pol și fază. Prin desfășurarea în plan a coliviei de veveriță, această înfășurare capătă aspectul unei **scări conductoare**, dispusă în crestăturile miezului magnetic secundar (realizat din tole sau din fier masiv).

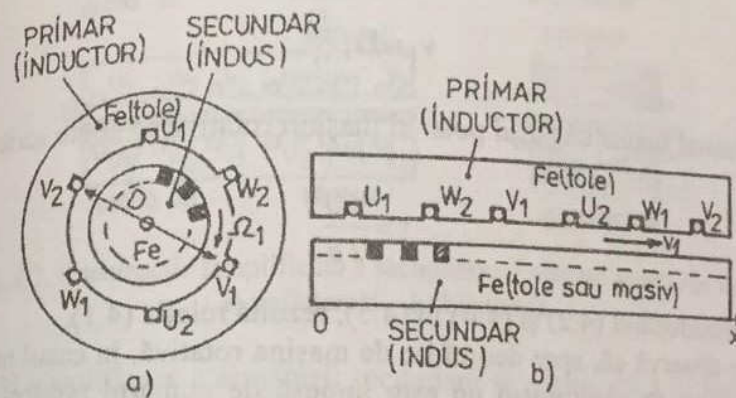


Fig.4.1. Obținerea, din mașina asincronă rotativă (a), a mașinii asincrone liniare (b).

Înfășurarea inductoare polifazată - uzual, trifazată - dispusă în crestăturile miezului magnetic primar, realizat din tole, produce în întrefierul mașinii liniare un **câmp magnetic progresiv** (denumit și "**câmp magnetic alunecător**"), analog câmpului magnetic învârtitor din mașina rotativă, care se deplasează în direcția Ox - față de un sistem de referință solidar cu primarul - cu viteza:

$$v_1 = 2\tau f_1 \quad (4.1)$$

în care  $f_1$  este frecvența curenților ce străbat înfășurarea, iar  $\tau$  - pasul polar al mașinii.

Relația (4.1) se obține ușor, având în vedere că viteza câmpului progresiv este egală cu viteza periferică a câmpului învârtitor din mașina rotativă care a stat la baza mașinii liniare. Dacă această mașină rotativă are  $2p$  poli și diametrul mediu din întrefier  $D$ , iar viteza unghiulară a câmpului învârtitor este:

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (4.2)$$

atunci:

$$v_1 = \Omega_1 \frac{D}{2} \quad (4.3)$$

Ținând seama că pasul polar al mașinii rotative se poate scrie:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (4.4)$$

atunci, introducând (4.2) și (4.4) în (4.3), rezultă relația (4.1).

Se observă că, spre deosebire de mașina rotativă, în cazul mașinii liniare viteza de sincronism nu este impusă de numărul polilor, ci de pasul polar  $\tau$ , ceea ce poate pune unele probleme constructive la realizarea vitezelor mici.

Câmpul magnetic progresiv induce curenți în înfășurarea secundară a mașinii liniare și, interacționând cu ei, produce o **forță electromagnetică** care are o **componentă longitudinală**  $F_x$  (cea mai importantă) după direcția Ox. Dacă viteza relativă a secundarului față de primar este  $v$  (în același sens cu  $v_1$ ), se definește alunecarea:

$$s = \frac{v_1 - v}{v_1} \quad (4.5)$$

și, analog mașinii asincrone rotative, rezultă (neglijând unele fenomene specifice) că:

- pentru  $0 \leq v < v_1$  ( $1 \geq s > 0$ ), forța  $F_x$  acționează asupra secundarului în sensul vitezei  $v$ , constituind o forță activă (de propulsie); mașina funcționează în regim de motor;
- pentru  $v > v_1$  ( $s < 0$ ), forța  $F_x$  acționează asupra secundarului în sens opus vitezei  $v$ , constituind o forță rezistentă (de frânare); mașina funcționează în regim de generator.

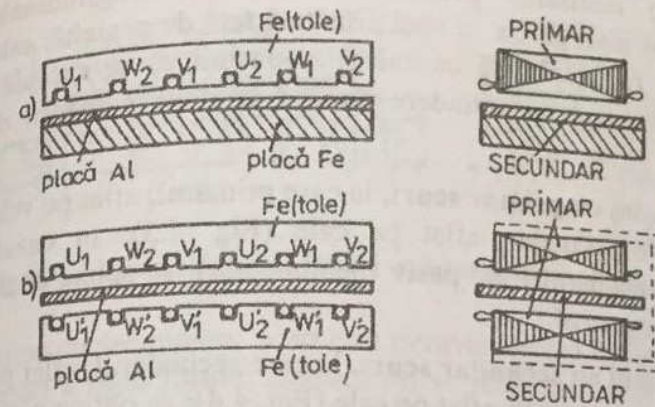


Fig. 4.2. Construcție simplificată a secundarului mașinii asincrone liniare: a) unilaterală; b) bilaterală.

O simplificare a armăturii secundare se obține dacă în locul scării conductoare se folosește o **placă conductoare** din aluminiu (cel mai adesea) sau din cupru (Fig. 4.2.a).

Dublarea construcției din Fig. 4.2.a (**mașina liniară unilaterală**) conduce la construcția din Fig. 4.2.b (**mașina liniară bilaterală**), aceasta dezvoltând o forță longitudinală sporită.

În cazul mașinii liniare unilaterale, cel mai adesea placa se așază peste un miez magnetic (acesta fiind și el realizat, de regulă, sub forma unei plăci de fier). Există, însă, și construcții în care fie placa de fier, fie placa de aluminiu (cupru) lipsește. Pentru aplicațiile pe vehicule electrice ale mașinii unilaterale, cel mai simplu este ca armăturile primară și secundară să fie dispuse în plan orizontal.

În cazul mașinii liniare bilaterale, construcția uzuală cu induș-placă conductoare este aceea fără miez magnetic pe indus, existând, însă, și variante în care indusul este realizat dintr-o placă de fier, simplă sau aflată între două plăci de aluminiu (cupru). Pentru aplicațiile pe vehicule electrice ale mașinii bilaterale, cel mai simplu este ca armăturile primară și secundară să fie dispuse în plan vertical. Secundarul capătă, mai mult sau mai puțin, aspectul unei șine; aceasta justifică denumirea de **șină de reacție** dată uneori indusului-placă.

Pentru realizarea permanentă a forței longitudinale  $F_x$  la deplasarea pe direcția  $Ox$  a unei armături față de cealaltă, este necesar ca armătura fixă (solidară cu calea) a mașinii să se extindă pe toată lungimea căii, această extindere ducând la două categorii de mașini liniare:

a) **Mașini cu primar scurt**, la care primarul, aflat pe vehicul, este scurt față de secundar, aflat pe cale (Fig. 4.3); în cazul mașinii asincrone, secundarul fiind pasiv (nealimentat), se spune că avem de-a face cu o *cale pasivă*.

b) **Mașini cu secundar scurt**, la care secundarul, aflat pe vehicul, este scurt față de primar, aflat pe cale (Fig. 4.4); se obține o *cale activă*, vehiculul devenind pasiv.

Problema alegerii uneia sau alteia dintre aceste două variante este de mare importanță din punct de vedere practic.

Mașina cu primarul scurt este avantajoasă economic, întrucât inductorul - partea cea mai scumpă a mașinii - este de lungime mică, dar pune probleme tehnice legate de alimentarea sa, deoarece aceasta trebuie făcută fie de la o sursă de energie aflată pe vehicul (în cazul vehiculelor autonome), fie de la o sursă exterioară (în cazul vehiculelor neautonome) și captarea curentului în ultimul caz, la viteze mari (peste 300 km/h), implică dificultăți mari.

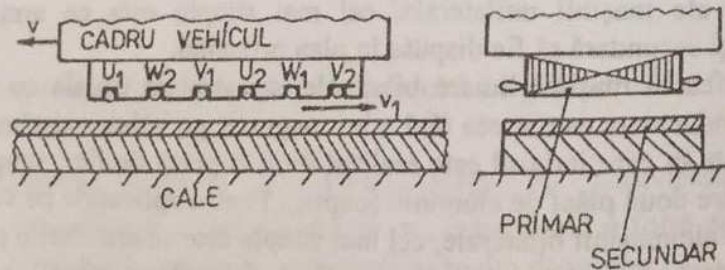


Fig. 4.3. Mașina asincronă liniară unilaterală cu primar scurt.

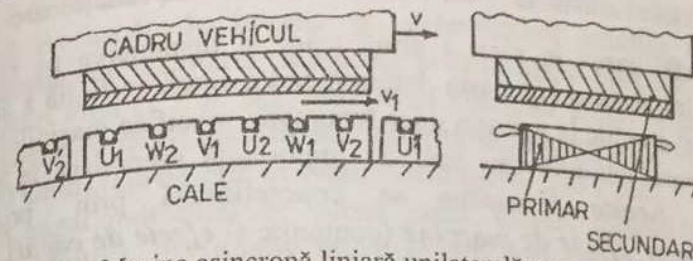


Fig. 4.4. Mașina asincronă liniară unilaterală cu secundar scurt.

Mașina cu secundarul scurt este dezavantajoasă economic datorită lungimii mari a inductorului (inductorul se realizează prin înșirarea pe toată lungimea căii a unor armături trifazate identice, care produc câmp magnetic progresiv în același sens), dar are avantajul tehnic că alimentarea acestuia se poate face direct de la o sursă staționară. Avantajul este important atât la vehiculele de viteze mari, cât și la cele la care nu este permis să se producă scântei, determinate de captarea curentului (de exemplu, la vehiculele care lucrează în medii explozive, în mine etc.).

Întrefierul echivalent al mașinilor având plăci nemagnetice pe indus este mai mare decât al celor cu scări conductoare, dispuse în creștături, întrucât permeabilitatea magnetică a acestor plăci este practic identică cu a aerului. Evident, el nu trebuie confundat cu așa-numitul *întrefier mecanic* ( $\delta_M$ ), care reprezintă distanța dintre suprafețele cele mai apropiate ale primarului și secundarului.

Diversele variante constructive pentru indus conduc la obținerea unor motoare cu caracteristici funcționale diferite.

În mașinile liniare prezentate mai sus, liniile câmpului magnetic principal se închid în plane longitudinale, situate pe direcția de mișcare (**mașini cu flux longitudinal**). Există și construcții în care liniile câmpului magnetic principal se închid în plane transversale pe direcția de mișcare (**mașini cu flux transversal**) [12], [57]; această soluție este mai complicată, dar are avantajul esențial al unei greutatei mai mici a miezului magnetic primar.

## 4.1.1.2. Fenomene specifice. Caracteristici de funcționare

Desfășurarea în plan a armăturilor și dispunerea pe vehicul a uneia dintre armături (aceasta determinând o lungime finită a armăturii respective) conduc la apariția unor fenomene specifice mașinilor liniare, care nu sunt întâlnite sau sunt de importanță secundară în mașinile rotative. Aceste fenomene se concretizează prin producerea așa-numitelor *efecte de margine* (denumite și *efecte de capăt*), precum și a unor forțe suplimentare. Pentru ilustrarea lor, vom considera cazul mașinilor liniare cu primar scurt și secundar-placă.

Efectul de margine tipic pentru mașina liniară este **efectul longitudinal**, determinat de lungimea finită (în direcția de mișcare) a primarului. Acest efect poate fi **static** sau **dinamic**.

**Efectul longitudinal static** este datorat caracterului deschis al circuitului magnetic, care face ca, în mod inevitabil, cele trei înfășurări de fază ale primarului să nu aibă poziții identice față de capetele miezului magnetic. În consecință, inductanțele proprii și mutuale ale fazelor diferă între ele, ceea ce conduce la curenți de magnetizare diferiți în fazele primarului. Dacă însă numărul de poli este mare ( $2p > 8$ ), efectul longitudinal static se poate neglija.

**Efectul longitudinal dinamic** este cauzat de deplasarea relativă a primarului de lungime finită față de secundarul de lungime teoretic infinită. În zona capetelor primarului are loc un salt de inducție, de la valoarea existentă sub armătură la valoarea practic zero din afara armăturii. Datorită acestei variații de inducție, la deplasarea primarului față de secundar, se vor induce în secundar curenți suplimentari celor determinați de câmpul progresiv principal produs de primar. Câmpul principal are perioada  $2\tau$  și este sinusoidal. Curenții suplimentari induși, datorati efectelor de capăt menționate, vor produce și ei niște câmpuri care vor avea perioade diferite de perioada câmpului principal. Câmpul care apare datorită efectului de capăt de intrare (primul capăt al primarului pe care îl "vede" secundarul la deplasarea unuia față de celălalt) are perioada  $2\tau' \neq 2\tau$ , iar cel datorat efectului de capăt de ieșire are perioada  $2\tau'' \neq 2\tau' \neq 2\tau$ . Rezultatul compunerii acestor trei câmpuri este un câmp nesinusoidal.

Unda suplimentară cea mai importantă este aceea datorată efectului de capăt de intrare, ea determinând apariția unei forțe longitudinale suplimentare, care poate avea uneori o pondere însemnată la alunecări mici ( $s = 0 \dots 0,2$ ). Influența efectului longitudinal dinamic asupra performanțelor mașinii este diferită la motoarele de viteză joasă (sub 100 km/h) față de cele de mare viteză (peste 300 km/h).

În cazul motorului de viteză joasă, efectul longitudinal are o influență pozitivă, dar relativ mică, asupra performanțelor motorului: motorul dezvoltă forță de tracțiune chiar și la viteza de sincronism, iar în zona alunecărilor mici randamentul și factorul de putere sunt ușor îmbunătățite.

În cazul motorului de mare viteză, efectul longitudinal are o influență opusă: în zona alunecărilor mici - unde funcționează motorul în majoritatea timpului -, performanțele motorului sunt înrăutățite considerabil, forța de tracțiune, randamentul și factorul de putere fiind mult reduse. Această înrăutățire a performanțelor poate fi inadmisibil de mare, făcând discutabilă utilizarea motorului asincron liniar la viteze mari, dacă nu se iau măsuri pentru reducerea sau compensarea efectului longitudinal.

Alte forțe suplimentare, importante în mașinile liniare, sunt **forța transversală** și **forța normală**.

**Forța transversală (laterală)**  $F_y$  apare la plasarea asimetrică (practic, inerentă la funcționarea motoarelor liniare pe vehicule) în direcția transversală  $Oy$  a primarului față de secundar.

În cazul motorului unilateral (Fig. 4.5.a), această forță are două componente: una de autocentrare  $F_{ya}$ , determinată de atracția magnetică dintre miezurile de fier ale celor două armături, și alta de descentrare  $F_{yd}$ , determinată de respingerea (repulsia) rezultată prin interacțiunea câmpului din întrefier cu componentele longitudinale ale curenților induși în secundar. În funcție de descentrarea  $\epsilon$ , forța rezultantă  $F_y = |F_{ya}| - |F_{yd}|$  poate avea diverse valori, în funcție de cum este  $|F_{ya}|$  față de  $|F_{yd}|$ .

În cazul motorului bilateral (Fig. 4.5.b), forța transversală este de descentrare.

În Fig. 4.5, s-au reprezentat forțele transversale exercitate asupra secundarului. Evident, asupra primarului se exercită forțe corespunzătoare, egale și de semne contrare.

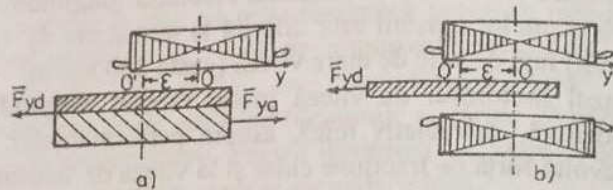


Fig. 4.5. Explicativă pentru forța transversală la mașina asincronă liniară: a) unilaterală; b) bilaterală.

Forța normală  $F_z$  se exercită după direcția Oz, perpendiculară pe planul secundarului. Ea are, în general, două componente: una de atracție  $F_{za}$  și una de repulsie  $F_{zr}$  (Fig. 4.6). Forța de atracție acționează între miezurile magnetice, iar forța de repulsie este determinată de interacțiunea câmpului inductor cu câmpul de reacție al indusului.

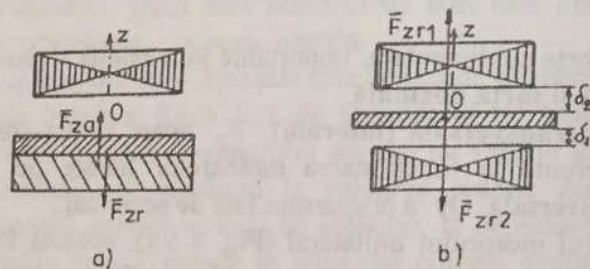


Fig. 4.6. Explicativă pentru forța normală la mașina asincronă liniară: a) unilaterală; b) bilaterală.

La motorul unilateral (Fig. 4.6.a), cele două forțe se exercită asupra ambelor armături, forța normală rezultantă fiind de atracție în zona frecvențelor  $f_2$  relativ mici ale curenților induși și de repulsie în zona frecvențelor  $f_2$  care depășesc o valoare critică  $f_{2cr}$ . Spre exemplificare, în Fig. 4.7 este prezentată dependența  $F_z(f_2)$  pentru un motor dat, având secundarul format dintr-o placă de aluminiu peste o placă de fier masiv; s-a considerat  $F_z = |F_{za}| - |F_{zr}|$ , în care  $F_{zr}$  este

rezultanta forțelor de repulsie obținute prin interacțiunea câmpului inductor cu câmpul de reacție al curenților induși în cele două plăci.

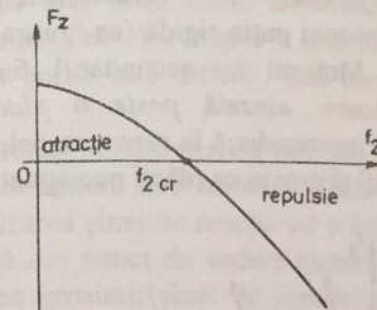


Fig. 4.7. Dependența  $F_z(f_2)$  la o mașină asincronă liniară unilaterală.

La motorul bilateral având indusul nemagnetic (Fig. 4.6.b), forța normală de atracție se exercită numai între cele două miezuri magnetice ale primarului (nu a mai fost reprezentată pe figură), iar între armăturile primare și secundare se exercită doar forțe de repulsie ( $F_{zr1}$ ,  $F_{zr2}$ ), a căror rezultantă este  $F_z = |F_{zr1}| - |F_{zr2}|$ . Întrucât la micșorarea întrefierului forța de repulsie crește, rezultă că, dacă  $\delta_1 < \delta_2$ ,

$|F_{zr1}| > |F_{zr2}|$  și, deci,  $F_z > 0$ , forța rezultantă tinzând să readucă armătura mobilă în poziția de simetrie ( $\delta_1 = \delta_2$ ).

În Fig. 4.6, s-au reprezentat forțele normale exercitate asupra secundarului. Evident, asupra primarului se exercită forțe corespunzătoare, egale și de semne contrare.

Caracteristicile de funcționare ale motorului asincron liniar prezintă similitudini cu cele ale corespondentului său rotativ. Totuși, particularitățile motorului liniar fac să se obțină diferențe între aceste caracteristici, ele depinzând de tipul constructiv al motorului liniar și de domeniul de viteze pentru care este destinat motorul.

Astfel, în cazul neglijării efectului longitudinal, pentru un motor liniar unilateral cu primar scurt dat și diverse tipuri de secundar, se pot obține caracteristici mecanice  $F_T(v)$  cu alura din Fig. 4.8 ( $F_T = F_x$  este forța de tracțiune), pentru  $U_1 = \text{const.}$  și  $f_1 = \text{const.}$  Se observă că, în

cazul secundarului tip *scară conductoare*, caracteristica are aceeași alură ca la motorul rotativ cu înfășurare rotorică în colivie. În cazul secundarului tip *placă feromagnetică*, caracteristica este practic liniară în regimul de motor, dar mai puțin rigidă (ca la motorul rotativ cu rotor feromagnetic masiv). Motorul cu secundarul format dintr-o *placă nemagnetică*, conductoare, așezată *peste o placă de fier*, are o caracteristică mecanică intermediară în raport cu cele precedente; ea este influențată de materialul și grosimea plăcii nemagnetice.

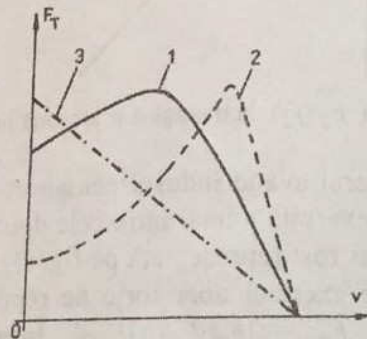


Fig. 4.8. Caracteristici mecanice  $F_T(v)$ , pentru  $U_1 = \text{const.}$ ,  $f_1 = \text{const.}$ , la un motor asincron liniar unilateral cu primar scurt și diverse tipuri de secundar: (1) - placă nemagnetică conductoare + placă Fe; (2) - scară conductoare + tole Fe; (3) - placă Fe.

De remarcat că, în toate variantele, motorul asincron liniar are factor de putere mai scăzut decât al corespondentului său rotativ - în principal, datorită întrefierului mărit (mărimea sa este impusă, în primul rând, din considerente mecanice). Astfel, la motoarele bine dimensionate, el nu depășește 0,5-0,7; în cazul motoarelor cu înfășurări de compensare a efectului longitudinal, poate ajunge la cca 0,75.

De asemenea, randamentul motorului liniar este mai scăzut decât al celui rotativ, din cauza pierderilor suplimentare în secundar și în miezul magnetic primar determinate de efectul longitudinal, precum și a pierderilor mai mari în înfășurarea primară, datorate componentei reactive mărite a curentului. La motoarele bine dimensionate, el ajunge la cca 0,8-0,85.

La viteze mari, este preferat - datorită performanțelor sale mai bune (dacă se iau măsuri de reducere a efectului longitudinal) - motorul asincron bilateral. El are, însă, unele dezavantaje legate de poziția verticală a secundarului (șinei de reacție) și anume:

- înscrierea în curbe este dificilă, mai ales la lungimi mari ale primarului;
- realizarea intersecțiilor și derivațiilor căii prezintă dificultăți;
- necesitatea menținerii unei anumite distanțe între primar și cale impune realizarea șinei de reacție cu o înălțime mai mare decât este necesară din punct de vedere electric; aceasta atrage după sine creșterea grosimii șinei de reacție pentru asigurarea unei rigidități mecanice corespunzătoare; astfel crește costul secundarului.

Aceste dezavantaje dispar la motorul unilateral, el fiind favorizat și de următorii factori:

- controlul și toleranțele pentru întrefier nu sunt atât de severe ca la motorul bilateral;
- dilatarea termică a secundarului nu pune probleme deosebite;
- motorul unilateral poate dezvolta forțe normale rezultante de repulsie (Fig. 4.7), acestea contribuind la ușurarea sarcinii sistemului de sustentație a vehiculului.

#### 4.1.2. Motorul sincron liniar

##### 4.1.2.1. Principiu de funcționare. Variante constructive

Ca și în cazul variantei rotative, motorul sincron liniar a început să se impună în ultimul timp atenției constructorilor de vehicule electrice moderne, în special în domeniul puterilor mari. Faptul se datorează în mare măsură superiorității acestui motor din punctul de vedere al factorului de putere și al randamentului. În plus, după cum se știe, motorul sincron are, de regulă, întrefier mare și, ca atare, este mai adecvat pentru varianta liniară decât cel asincron. Reținerile constructorilor față de motoarele sincrone liniare au fost, în parte, justificate de necesitatea dublei alimentări (curent continuu pentru

înfășurarea de excitație și curent alternativ pentru înfășurarea principală), dar au fost găsite soluții care să diminueze acest dezavantaj.

În principiu, motorul sincron liniar cu flux longitudinal se obține din motorul sincron rotativ uzual printr-un procedeu analog celui sugerat la motorul asincron. Pentru folosirea unei nomenclaturi unitare, vom păstra denumirea de **primar** pentru armătura care poartă înfășurarea principală, de c.a. (de regulă, trifazată), și de **secundar** pentru cealaltă armătură.

Ca atare, primarul motorului sincron liniar uzual este, practic, identic cu al motorului asincron liniar, diferența esențială apărând în construcția secundarului. Acesta din urmă poate fi echipat cu înfășurări de excitație convenționale (polii de excitație fiind, de regulă, aparenti) sau supraconductoare. Pentru a realiza starea de supraconducție (când conductibilitatea materialelor conductoare devine, teoretic, infinită), înfășurările trebuie dispuse într-o incintă - **criostat** - în care se realizează temperaturi foarte scăzute; de regulă, de ordinul câtorva Kelvini. La aceste temperaturi, curenții din înfășurări pot fi foarte intensi - de ordinul  $10^6$  A -, ei menținându-se și după suprimarea sursei care i-a inițializat (practic, însă, curenții trebuie reinițializați la cca 24 ore). Astfel de curenți produc câmpuri magnetice suficient de intense, chiar și în lipsa materialelor feromagnetice pentru armăturile primară și secundară, ceea ce permite realizarea acestora fără fier, compensându-se astfel o parte din investițiile reclamate de criostat.

La puteri relativ mici (sub cca 100 kW), secundarul poate fi realizat și fără înfășurări de excitație - fie cu **magneți permanenți**, fie cu **reluctanță variabilă** (motor sincron reactiv).

Și în cazul motoarelor sincrone liniare, pot fi concepute categorii similare celor în care au fost încadrate motoarele asincrone liniare, și anume:

- motoare cu primar scurt și motoare cu secundar scurt;
- motoare unilaterale și motoare bilaterale;
- motoare cu flux longitudinal și motoare cu flux transversal.

În cele ce urmează, vom trece în revistă câteva dintre soluțiile constructive de motoare unilaterale care prezintă interes major; pentru simplificarea, vom considera, în toate acestea, că mașina este bipolară și

are înfășurarea primară cu pas diametral, cu o singură crestătură pe pol și fază.

În Fig. 4.9, este schițat un motor sincron liniar cu primar scurt, având secundarul echipat cu înfășurări de excitație dispus pe toată lungimea căii. Se remarcă faptul că, în acest caz, spre deosebire de cel al motorului asincron liniar cu primar scurt, calea nu mai este pasivă și are o construcție mai complicată, necesitând investiții mai mari.

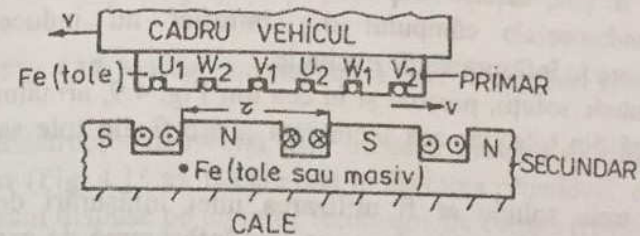


Fig. 4.9. Mașină sincronă liniară unilaterală cu primar scurt și excitație convențională.

În Fig. 4.10, este schițat un motor sincron liniar cu secundar scurt, acesta fiind echipat, de asemenea, cu înfășurare de excitație convențională. Spre deosebire de cazul motorului asincron, vehiculul nu devine pasiv, în acest caz, el necesitând alimentarea înfășurării de excitație (este adevărat, de putere mult mai mică decât înfășurarea primară). Pentru a evita alimentarea excitației de la o linie de contact, pot fi adoptate diverse soluții.

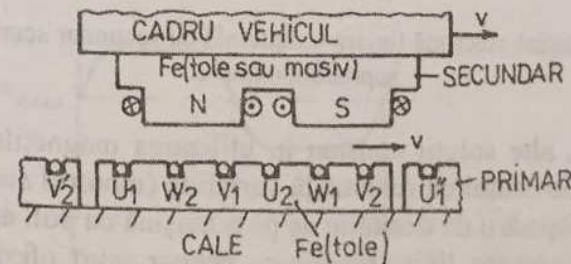


Fig. 4.10. Mașină sincronă liniară unilaterală cu secundar scurt și excitație convențională.

O primă soluție constă în utilizarea unui mic grup electrogen (motor termic+generator electric), aflat pe vehicul.

O a doua soluție constă în echiparea polilor de excitație cu o a doua înfășurare, bobinată similar celei de excitație, și utilizarea tensiunilor electromotoare induse în aceasta de către armonicele superioare (în principal, armonica 3) ale câmpului din întrefier, pentru alimentarea înfășurării de excitație, printr-un redresor aflat pe vehicul. După cum se știe, datorită deplasării sincrone a secundarului față de primar, fundamentala câmpului din întrefier nu induce tensiuni electromotoare în înfășurarea de excitație.

În ambele soluții, precum și în cea din Fig. 4.9, armătura primară se realizează din tole, iar cea secundară poate fi din tole sau din fier masiv.

O a treia soluție ar fi utilizarea unei înfășurări de excitație supraconductoare (Fig. 4.11). În acest caz, înfășurarea de excitație este sub forma unor bobine fără miez, iar înfășurarea primară poate fi bobinată pe un suport nemagnetic (cel mai simplu: beton turnat pe toată lungimea căii).

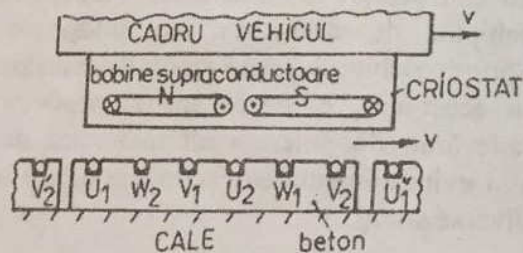


Fig. 4.11. Mașină sincronă liniară unilaterală cu secundar scurt și excitație supraconductoare.

Desigur, alte soluții constau în utilizarea magneților permanenți sau, în cazul motorului cu reluctanță variabilă (motorul sincron reactiv), suprimarea înfășurării de excitație de pe o mașină cu poli aparenti.

Motorul sincron liniar reactiv cu primar scurt oferă posibilitatea realizării secundarului sub o formă simplă și ieftină, prin inserarea unor

plăci de fier într-un suport de beton, turnat pe toată lungimea căii (Fig. 4.12).

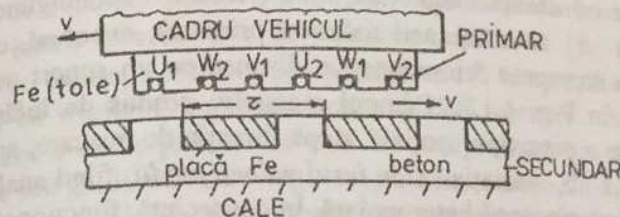


Fig. 4.12. Mașină sincronă liniară reactivă cu primar scurt.

O construcție deosebită este aceea a motorului sincron liniar homopolar (Fig. 4.13.a), la care atât înfășurarea principală, cât și cea de excitație sunt dispuse pe un miez feromagnetic comun (realizat din tole) în formă de U, constituind primarul.

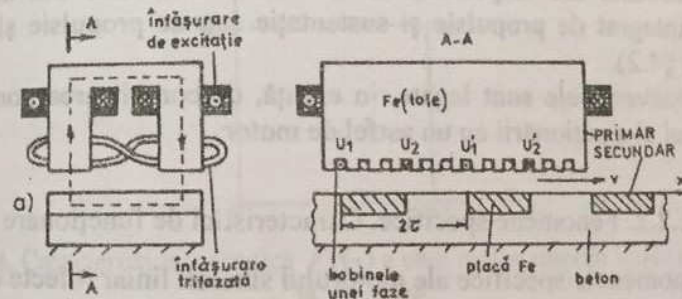


Fig. 4.13. Mașină sincronă liniară homopolară: a) schiță constructivă; b) variația câmpului magnetic de excitație.

Secundarul este realizat sub forma unei structuri având - în direcția de mișcare - zone de reluctanță magnetică mare, care alternează cu zone de reluctanță magnetică mică (fiecare - de lungime egală cu pasul polar  $\tau$  al înfășurării trifazate primare); eventual, el poate fi realizat din segmente feromagnetice dispuse pe un suport nemagnetic, izolant (ca în Fig. 4.12). Câmpul magnetic produs de înfășurarea de excitație are o repartiție spațială, după direcția de mișcare, aproximativ ca în Fig. 4.13.b, variația sa în jurul valorii medii fiind analoagă celei dintr-o mașină sincronă heteropolară. În consecință, funcționarea acestui motor este - în esență - similară cu a motorului heteropolar cu poli aparenti (Fig. 4.9 și Fig. 4.10).

Principalele sale avantaje, față de motorul heteropolar, sunt:

- secundarul nu mai necesită alimentare (este pasiv);
- puterea specifică este mai mare;
- forța normală de atracție pe care o dezvoltă este mai mare; aceasta are importanță la utilizarea motorului într-un sistem integrat de propulsie și sustentație sau de propulsie și ghidare (§4.2).

Dezavantajele sunt legate, în esență, de complicarea construcției primarului și a acționării cu un astfel de motor.

#### 4.1.2.2. Fenomene specifice. Caracteristici de funcționare

Fenomenele specifice ale motorului sincron liniar (efecte de capăt, forțe suplimentare) sunt analoge celor de la motorul asincron liniar, cu particularitățile determinate de tipul de motor considerat și de faptul că, în regim permanent, viteza relativă a primarului față de secundar este totdeauna egală cu viteza de sincronism:

$$v = v_1 = 2\tau f \quad (4.6)$$

Trebuie remarcat faptul că efectul longitudinal este, în general, mai puțin important decât la motorul asincron liniar și, deci, influența sa asupra performanțelor este mai puțin importantă. În cazul motoarelor unilaterale cu secundar pasiv (motoare sincrone reactive sau homopolare), forța normală rezultantă este totdeauna de atracție; dacă

motoarele au secundarul excitat, forța normală rezultantă este de atracție pentru unghiuri interne cuprinse între zero și o valoare  $\beta_0$ , ea devenind de repulsie pentru  $\beta > \beta_0$ . Valoarea de trecere  $\beta_0$  a unghiului intern este departe de valoarea nominală ( $\beta_0 \gg \beta_N$ ) la motoarele cu excitație convențională, dar poate fi în apropiere de  $\beta_N$  la motoarele cu excitație supraconductoare, fără miezuri magnetice. De aceasta trebuie să se țină seama mai ales la proiectarea sistemelor de sustentație sau ghidare în care sunt integrate motoarele sincrone liniare.

Caracteristicile de funcționare ale motorului sincron liniar sunt asemănătoare cu ale corespondentului său rotativ. De exemplu, caracteristica mecanică  $F_T(v)$ , pentru  $f = \text{const.}$ , este superrigidă (Fig. 4.14), existând o valoare de răsturnare  $F_{Tm}$  a forței de tracțiune, dependentă de parametrii motorului și ai sursei de alimentare.

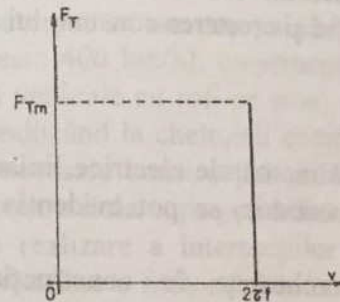


Fig. 4.14. Caracteristica mecanică  $F_T(v)$  a unui motor sincron liniar funcționând la  $f = \text{const.}$

În cazul motorului sincron autopilotat (la care frecvența  $f$  devine un parametru intern), se pot obține caracteristici mecanice similare cu ale motoarelor de curent continuu.

Ca și în cazul variantei rotative, motorului sincron liniar excitat i se poate modifica factorul de putere reglând, corespunzător, curentul de excitație și/sau unghiul curentului  $\gamma$ , fiind posibilă și funcționarea la  $\cos \varphi = 1$  sau capacitiv. Motorul sincron reactiv, fiind lipsit de excitație, are totdeauna factor de putere inductiv; acesta din urmă are o valoare redusă la funcționarea în gol și crește o dată cu încărcarea motorului.

Pornirea motoarelor sincrone liniare se realizează prin metode similare celor utilizate la corespondentele lor rotative. În acționările moderne, în care alimentarea motoarelor se face prin convertoare statice de frecvență, pornirea uzuală este prin modificarea frecvenței (începând cu o valoare, practic, nulă).

Avantajele motorului sincron față de motorul asincron liniar sunt:

- posibilitatea obținerii unor factori de putere și randamente mari (cu variantele de motoare având secundarul excitat electromagnetic sau cu magneți permanenți);
- putere (și forță de tracțiune) specifică sporită, putând ajunge la de cca trei ori mai mare la motoarele cu secundar excitat;
- posibilitatea realizării unor sisteme integrate: propulsie+sustentație sau propulsie+ghidare.

Dezavantajele acestui motor sunt determinate de complicarea construcției secundarului și creșterea consumului de materiale active.

#### 4.1.3. Concluzii

Dacă se compară motoarele electrice liniare cu cele rotative, sub aspectul constructiv-economic, se pot evidenția următoarele **avantaje** ale motoarelor liniare:

- simplitate și robustețe în construcția părții mecanice a motorului, prin eliminarea lagărelor și a maselor de rotație;
- gabarit și greutate reduse ale motorului, puterea specifică fiind ridicată, ca urmare, pe de o parte, a faptului că armătura aflată pe cale are condiții de răcire mult mai bune decât armătura corespunzătoare a unui motor rotativ - ceea ce permite creșterea solicitărilor electromagnetice - și, pe de altă parte, a eliminării unor componente obligatorii în construcția motoarelor rotative: arbori, lagăre, scuturi etc.;
- eliminarea mecanismelor de transmisie (existente între motoarele rotative și roți, la vehiculele cu aderență la cale);
- realizarea unor forțe mari și sigure de tracțiune/frânare, independente de aderență; aceasta, pe de o parte, permite eliminarea dispozitivelor de antipatinare și de diminuare a

efectelor cabrajului, precum și reducerea la minimum posibil a greutății vehiculului, iar, pe de altă parte, conduce la reducerea eforturilor specifice - și, implicit, a uzurii - în roți (folosite, eventual, pentru sustentație și ghidare) și în calea de rulare; reducerea greutății are ca efect suplimentar micșorarea rezistențelor de rulare și a puterii necesare (implicit, a consumului de energie electrică) obținerii unor accelerații/decelerații și viteze date.

Utilizarea motoarelor liniare prezintă, însă, unele **dezavantaje**, care au o pondere mai mult sau mai puțin însemnată în limitarea aplicării în tracțiunea electrică a acestor motoare:

- complicații constructive și de exploatare, determinate de necesitatea menținerii constante, la o valoare rezonabilă, a întrefierului;
- cheltuieli ridicate pentru construcția căii de deplasare; însă, la viteze mari (peste 400 km/h), construcția și întreținerea căilor clasice (pentru vehicule cu roți pe șine) ridică probleme foarte complicate, conducând la cheltuieli comparabile (sau chiar mai mari) cu cele necesare construcției și întreținerii căilor pentru vehicule cu motoare liniare, pe pernă de aer sau magnetică;
- complicații de realizare a intersecțiilor și a derivațiilor căii, precum și de înscriere a motorului în curbe; acestea sunt, însă, importante mai ales în cazul folosirii motoarelor bilaterale;
- valori scăzute (îndeosebi la viteze mici) ale randamentului și factorului de putere, în cazul motoarelor asincrone liniare - datorită efectelor de capăt și întrefierului considerabil mărit -, având repercusiuni asupra consumului de energie și, respectiv, dimensionării instalațiilor de alimentare; dispariția mecanismelor de transmisie și reducerea rezistențelor de rulare la vehiculele acționate cu motoare liniare pot conduce, însă, la randamente globale comparabile (în unele cazuri, chiar superioare cu până la 3-4%) cu ale vehiculelor acționate cu motoare rotative, ceea ce - coroborat cu economiile realizate, ca urmare a simplificării părții mecanice a vehiculelor cu motoare liniare - face ca dezavantajul unor valori mai scăzute ale

randamentului și factorului de putere, la motorul liniar, să nu fie hotărâtor în comparația acestuia cu motorul rotativ.

#### 4.2. SUSTENTAȚIA ȘI GHIDAREA

Sustentația și ghidarea vehiculelor fără aderență la cale, echipate cu motoare electrice liniare, pun unele probleme specifice, legate, în primul rând, de necesitatea menținerii distanței dintre armăturile motorului - una aflată pe vehicul și alta pe cale - la o valoare rezonabilă, pe cât posibil constantă. Pentru aceasta, pot fi folosite următoarele trei soluții:

- a) roți (metalice sau pneumatice);
- b) pernă de aer (pernă pneumatică);
- c) pernă magnetică.

##### 4.2.1. Sustentația și ghidarea cu roți

Soluția clasică, cu roți (metalice sau pneumatice), folosește - în esență - ideile de la vehiculele cu aderență la cale, cu deosebirea fundamentală că toate roțile sunt libere, ele neservind și la dezvoltarea forței de tracțiune.

De exemplu, în cazul unui vehicul propulsat cu motor asincron liniar bilateral, cu cale pasivă, având sustentația și ghidarea cu roți, se poate folosi soluția ilustrată în Fig. 4.15. Inductorul 1 al motorului este complet suspendat, el sprijinindu-se de cadrul 5 al boghiului prin intermediul suportului 3 care poate culisa (la deplasări laterale ale cadrului, îndeosebi în curbe) pe ghidajele 4, fixate de cadru. Pentru asigurarea unui întrefier cât mai mic și mai constant, sunt prevăzute rolele de ghidare 6 care calcă pe indusul 2 (șina de reacție) al motorului, fixat în lungul căii, și au axele prinse de suportul inductorului.

O rezolvare mai comodă a menținerii constante a întrefierului la vehiculele cu roți metalice se poate obține folosind un motor liniar unilateral, nesuspendat. În Fig. 4.16, este prezentată schematic o astfel de soluție pentru un vehicul propulsat cu motor asincron liniar cu cale pasivă (soluția a fost utilizată și la vehiculul experimental ROM-U-LIM,

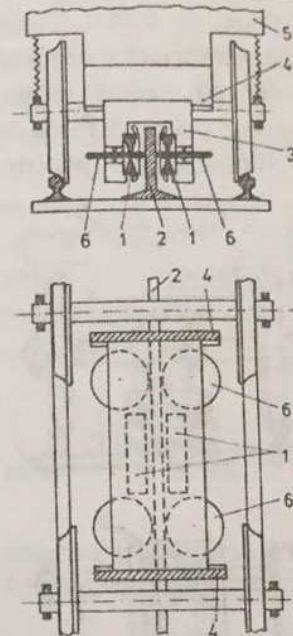


Fig. 4.15. Acționarea cu motor asincron liniar bilateral a unui vehicul pe roți. 1 - inductor; 2 - indus; 3 - suportul inductorului; 4 - ghidaje cu alunecare; 5 - cadrul boghiului; 6 - role de ghidare.

realizat de Electroputere Craiova). Inductorul 1 este montat pe osiile boghiului prin intermediul brațelor reglabile 3 și al lagărelor 4, iar indusul 2 este fixat de-a lungul căii de rulare. Aceasta face ca, la diametre date ale roților și la înălțimi constante ale șinelor și indusului, întrefierul să rămână practic constant. Oscilații pe verticală de ordinul a 1-2 mm sunt acceptabile pentru un întrefier (aer) de cca 10 mm. Reglarea întrefierului în funcție de uzura bandajelor roților se face prin intermediul brațelor 3 (de exemplu, cu ajutorul unor excentrice reglabile). Pentru preluarea șocurilor de la cale (și asigurarea unui mers silențios), se pot folosi roți elastice, intercalând între inima roții și bandaj discuri sau inele de cauciuc. Soluția de mai sus, cu motor unilateral, - deși conduce la o solicitare suplimentară a osiilor și a inductorului, datorită nesuspendării acestuia din urmă, precum și la o forță de tracțiune mai mică pe unitatea de lungime - se remarcă prin

simplitatea sa, față de soluția cu motor bilateral. În plus, utilizarea motorului unilateral permite o înscriere mai ușoară în curbe, iar, printr-o proiectare și comandă adecvate, acest motor poate dezvolta - în domeniul de viteze în care lucrează - o forță normală de repulsie care contribuie la descărcarea osiilor (Fig. 4.7, pentru  $f_2 > f_{2cr}$ ).

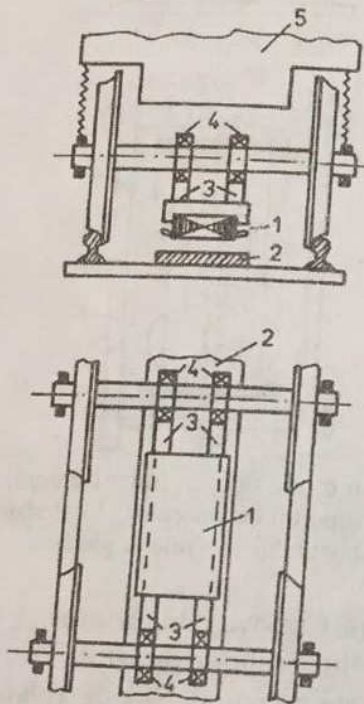


Fig. 4.16. Acționarea cu motor asincron liniar unilateral a unui vehicul pe roți.  
1 - inductor; 2 - indus; 3 - brațe reglabile; 4 - lagăre; 5 - cadrul boghiului.

Sustențația și ghidarea cu roți a vehiculelor propulsate cu motoare electrice liniare sunt aplicate în cazul folosirii căilor de rulare uzuale, pe care circulă și vehicule echipate cu motoare rotative. Deși solicitarea căii este mai redusă când sunt utilizate motoarele liniare, ca urmare a faptului că forța de tracțiune nu se mai obține prin contactul roată-cale, ea este încă importantă, deoarece prin acest contact este asigurată susțințația, iar sarcina este transmisă, practic, punctiform căii (Fig. 4.17.a). O scădere în continuare a solicitării căii s-ar obține dacă sarcina

ar fi repartizată uniform pe cale (Fig. 4.17.b). În plus, în cazul vehiculelor rapide (peste 300 km/h), susțințația cu roți poate fi utilizată cu succes numai dacă se execută calea de rulare cu o precizie deosebită. Execuția și întreținerea unei astfel de căi sunt foarte dificile, iar din punct de vedere energetic, la viteze peste 400 km/h, susțințația cu roți este inferioară sistemelor neconvenționale de susțințație - cu pernă de aer sau cu pernă magnetică. Toate aceste motive impun utilizarea - îndeosebi la viteze mari - a sistemelor neconvenționale, care nu presupun un contact mecanic între vehicul și cale, vehiculul "zburând" la o mică distanță (sub 30 cm) de cale.

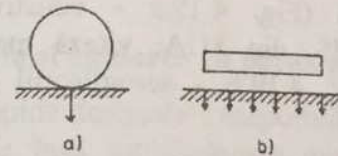


Fig. 4.17. Repartizarea sarcinii pe cale în cazul utilizării:  
a) roților; b) pernelor pneumatice sau magnetice.

#### 4.2.2. Sustențația și ghidarea cu pernă de aer

Sustențația cu pernă de aer poate fi obținută în două moduri:  
a) cu presiune (pernă de aer pozitivă);  
b) cu depresiune (pernă de aer negativă).

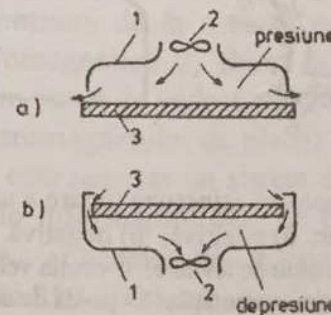


Fig. 4.18. Principiul pernei de aer: a) cu presiune; b) cu depresiune.  
1 - vehicul; 2 - ventilator; 3 - cale de zbor.

În Fig. 4.18.a, este prezentat principiul pernei de aer cu presiune. Din vehicul, 1, cu ajutorul unui ventilator 2, este refulat

aer spre calea de zbor 3 (de exemplu, o grindă metalică sau din beton), iar presiunea creată de aceasta conduce la ridicarea (levitarea) vehiculului, ajungându-se la un echilibru dinamic, fără contact mecanic între vehicul și cale. În cazul **pernei de aer cu depresiune** (Fig. 4.18.b), depresiunea creată de ventilatorul-aspirator, (suspendat), iar conduce la o împingere în sus - de către aerul din exterior - a vehiculului, obținându-se și aici levitarea acestuia.

Perna de aer poate fi utilizată și pentru ghidarea vehiculului.

Spre ilustrare, vom prezenta schemele unor unități motoare cu pernă de aer pozitivă (Fig. 4.19.a - constructor: Transportation Technology Inc. - OTIS, din SUA; viteză maximă 80 km/h) și, respectiv, negativă (Fig. 4.19.b - aeroglisorul francez Urba; viteză maximă 70-80 km/h).

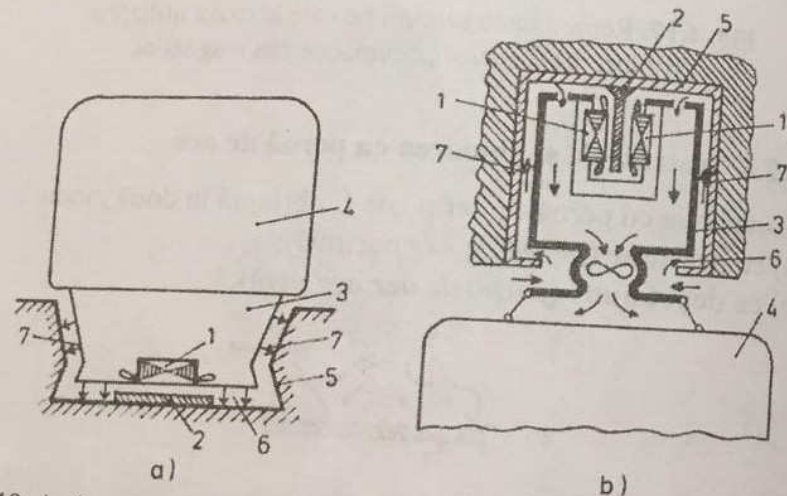


Fig. 4.19. Acționarea cu motoare asincrone liniare a unor vehicule pe pernă de aer: a) pozitivă; b) negativă.

1 - inductor; 2 - indus; 3 - boghiu de levitare; 4 - cutia vehiculului; 5 - cale de zbor; 6 - pernă de aer pentru sustentație; 7 - pernă de aer pentru ghidare.

În primul caz, unitatea este acționată cu motor asincron liniar unilateral, având inductorul scurt 1 pe vehicul și indusul 2 pe calea de zbor 5 - în formă de U -, realizată din beton. În cel de al doilea caz, acționarea se face cu motor asincron liniar bilateral, având, de asemenea,

inductorul scurt 1 pe vehicul și indusul 2 pe calea de zbor 5, realizată sub forma unui cheson de oțel, încastrat într-o grindă de beton suspendată. În ambele cazuri, inductorul motorului este fixat pe partea vehiculului, 3, care servește la sustentație și ghidare - echivalentă boghiului de la vehiculele cu roți -, denumită uneori, din acest motiv, și **boghiu de levitare**. Cutia vehiculului 4 este montată pe unul sau mai multe astfel de boghiuri. Sustentația este asigurată de pernă de aer 6, iar ghidarea - de pernă de aer 7. Dispunerea inductorului motorului în camera de depresiune, în cazul din Fig. 4.19.b, conduce la diminuarea frecărilor vehiculului.

#### 4.2.3. Sustentația și ghidarea cu pernă magnetică

La vehiculele rapide destinate transportului de călători sustentația cu pernă de aer nu este, însă, satisfăcătoare, din cauza zgomotului mare pe care îl produce și a puterii relativ ridicate necesare pentru levitarea vehiculului, chiar la înălțimi mici (2-3 cm), impunându-se, în astfel de cazuri, sustentația cu pernă magnetică. Aceasta se poate realiza în mai multe moduri, de interes tehnic fiind însă două procedee de bază:

- a) cu **atracție electromagnetică**;
- b) cu **repulsie electrodinamică**.

Principiul **pernei magnetice cu atracție** constă în interacțiunea (atracția) dintre un electromagnet cu miez feromagnetic 1 - alimentat, de regulă, în curent continuu de la o sursă reglabilă 3 -, solidar cu vehiculul, și o placă feromagnetică 2, fixată în lungul căii (Fig. 4.20.a). Sistemul este instabil din punct de vedere static (forța de atracție crește o dată cu apropierea electromagnetului de placă) și dinamic, încât, pentru a-i asigura stabilitatea, este necesar un sistem de reglare automată 4 a curentului, în funcție de informațiile date de traductoarele 5 privind întrefierul  $\delta$ , viteza  $v_v$  și accelerația  $a_v$  pe verticală (uneori - fiind posibil ca, la viteze peste 250-300 km/h, oscilațiile să devină supărătoare - este nevoie să se recurgă și la serviciile unui sistem secundar de suspensie, hidraulic sau pneumatic, între electromagnet și corpul vehiculului). Acest sistem de reglare trebuie să mențină întrefierul, în general, în limitele  $(0,75-1,25)\delta_n$ , evitând, astfel, impactul vehiculului

cu calea și limitând, în același timp, consumul de energie. Întrefierul nominal este de regulă  $\delta_n = 1-1,5$  cm.

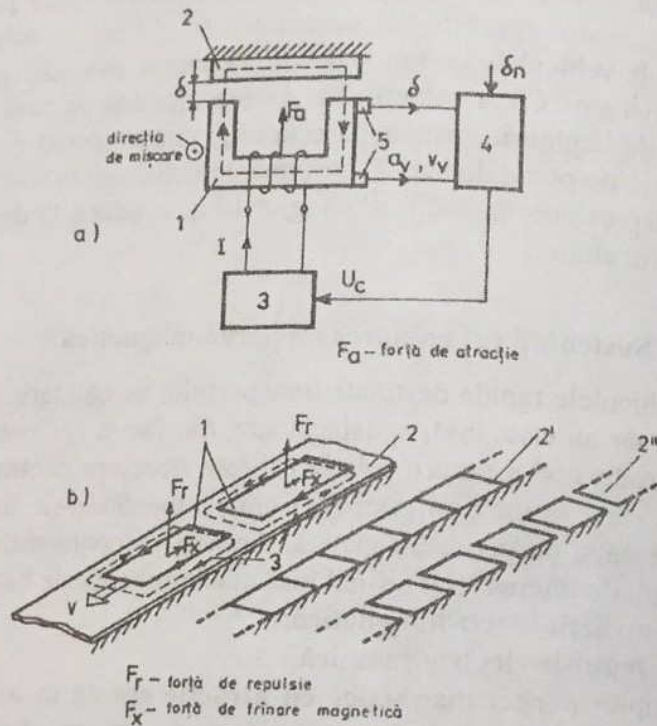


Fig. 4.20. Principiul pernei magnetice:

- a) cu atracție: 1 - electromagnet; 2 - placă feromagnetică fixă; 3 - sursă reglabilă de c.c.; 4 - bloc de reglare; 5 - traductoare;
- b) cu repulsie: 1 - bobine supraconductoare în mișcare; 2 - secundar: placă conductoare (2' - scară conductoare; 2'' - bobine scurtcircuitate); 3 - linia teoretică a curenților induși, la viteze mari.

Perna magnetică cu repulsie se bazează pe interacțiunea (repulsia) dintre bobine 1, alimentate în curent continuu, solidare cu vehiculul aflat în mișcare, și o placă conductoare 2 (sau o scară conductoare 2' ori un șir de bobine scurtcircuitate 2'' - variante ceva mai scumpe, dar cu performanțe mai bune), așezată de-a lungul căii (Fig. 4.20.b). Interacțiunea are loc prin intermediul curenților 3 induși prin

mișcare de către bobină în placa conductoare. În cazurile practice, bobinele sunt supraconductoare (*electromagneți supraconductori*, fără miez), din necesitatea producerii unor câmpuri magnetice puternice în aer, capabile să dezvolte o forță de levitație de cel puțin 6-7 ori mai mare decât greutatea bobinelor și a instalației (criostatului) de menținere a stării supraconductoare. Sistemul bazat pe repulsia electrodinamică este stabil din punct de vedere static (forța de repulsie crește în cazul apropierii bobinelor de placă), dar, la viteze peste 60-80 km/h, el este instabil din punct de vedere dinamic și, pentru amortizarea oscilațiilor, este necesar fie un sistem secundar de suspensie între bobinele supraconductoare și corpul vehiculului, fie un amortizor activ electric construit dintr-o bobină (convențională) de control, așezată pe vehicul sub bobinele supraconductoare, al cărei curent este funcție de viteza  $v_v$  pe verticală și de distanța  $\delta$  dintre placă și bobina de control. Această distanță este de 7-12 cm, iar distanța între centrul bobinelor supraconductoare și cale este de ordinul 20-30 cm - valori care conduc la pretenții mai mici în execuția căii, ceea ce constituie un mare avantaj al sistemului cu repulsie față de cel cu atracție.

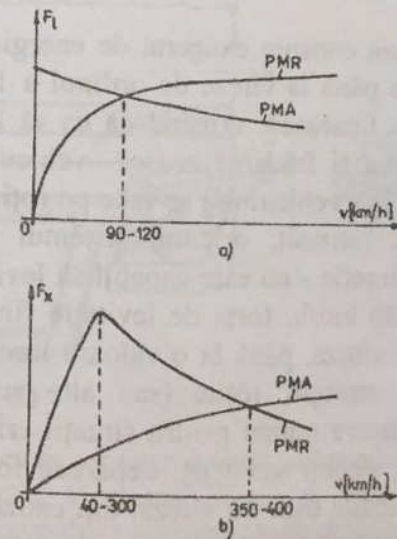


Fig. 4.21. Alura dependențelor de viteză ale forței de levitație (a) și forței de frânare magnetică (b), la pernele magnetice cu atracție (PMA) și cu repulsie (PMR).

Curenții induși în placa conductoare la sistemul cu repulsie, precum și cei induși în placa feromagnetică la sistemul cu atracție produc o forță  $F_x$  opusă mișcării vehiculului - numită *forță de frânare magnetică* - care, la viteze de 350-400 km/h, au același ordin de mărime pentru ambele sisteme. La sistemul cu atracție, forța de frânare magnetică crește monoton cu viteza până la cca 400 km/h, în timp ce la sistemul cu repulsie ea are un maxim pronunțat în zona vitezelor medii, 40-300 km/h, ca apoi să scadă rapid cu viteza (Fig. 4.21.b). Prezența acestui maxim constituie un dezavantaj al sistemului cu repulsie în procesul de pornire, dar este de ajutor la frânare în apropierea stațiilor de oprire.

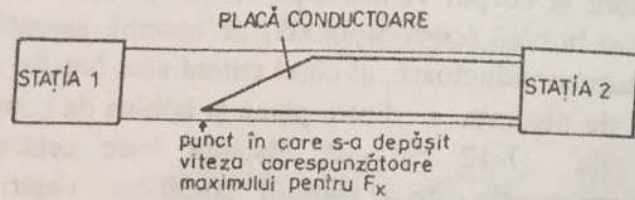


Fig. 4.22. Realizarea plăcii conductoare a pernei magnetice cu repulsie, pentru a evita consumuri mari de energie.

Pentru a evita un consum exagerat de energie, se prevede ca, pe distanța de accelerare până la viteze de ordinul a 100-300 km/h, placa conductoare a căii să lipsească, urmând ca ea să fie introdusă gradat, pentru a evita ridicarea și frânarea bruscă vehiculului (Fig. 4.22). În acest interval, sustentația vehiculului se face pe roți ușoare de tip avion, eventual retractabile, întrucât, oricum, sistemul cu repulsie - spre deosebire de cel cu atracție - nu este capabil să leviteze vehiculul decât la viteze peste 90-120 km/h, forța de levitație fiind nulă în repaus și crescând monoton cu viteza, până la o valoare limită. La vehiculele cu pernă magnetică cu atracție, roțile (sau alte sisteme mecanice de sustentație) ar fi necesare numai pentru situații critice și în perioadele de așteptare în stații, depou sau triaj, deoarece forța de levitație este maximă în repaus și scade ușor cu viteza, din cauza apariției unei forțe de repulsie (opusă, deci, forței principale - de atracție) determinate de curenții turbionari induși prin mișcare în placa feromagnetică. În Fig.

4.21.a este prezentată alura variației cu viteza a forței rezultante de levitație  $F_l$ , în cazul celor două sisteme - cu atracție și cu repulsie.

Pentru viteze peste 400 km/h, forța de frânare magnetică este mai mică la sistemul cu repulsie decât la cel cu atracție. Acest avantaj, coroborat cu cel al unei distanțe  $\delta$  dintre vehicul și cale de cca 10 ori mai mare, impune luarea în considerare a sistemului cu repulsie la asemenea viteze, chiar dacă bobinele supraconductoare au încă un cost ridicat și o fiabilitate discutabilă.

Pernă magnetică - cu atracție sau cu repulsie - poate fi folosită și pentru ghidarea vehiculului pe cale. Sustentația și ghidarea se pot realiza prin sisteme separate sau printr-un singur sistem, integrat. Cercetările experimentale de până acum arată că este preferabilă separarea sustentației de ghidare.

Utilizarea motorului sincron liniar permite realizarea unor sisteme integrate de propulsie și sustentație sau de propulsie și ghidare, întrucât acest motor dezvoltă, pe lângă forța de propulsie, și forțe de levitație sau de ghidare suficient de mari pentru a levita/ghida vehiculele pe pernă magnetică.

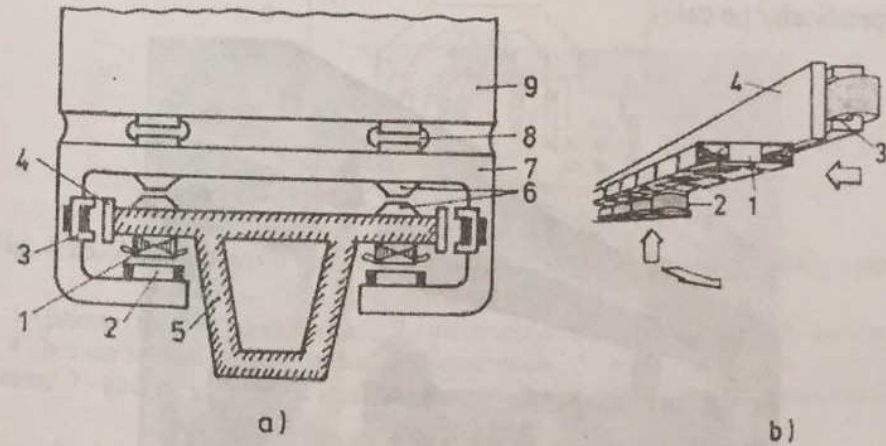


Fig. 4.23. Acționarea cu motor sincron liniar unilateral a unui vehicul pe pernă magnetică cu atracție: a) schema vehiculului; b) detaliu: sistemele de propulsie+sustentație și de ghidare.

1 - armătura primară (trifazată) a motorului; 2 - armătura secundară (de excitație) a motorului; 3 - electromagnet de ghidare; 4 - placă feromagnetică; 5 - cale de zbor; 6 - tălpi tip sanie; 7 - boghiu de levitare; 8 - suspensie secundară; 9 - cutia vehiculului.

Fig. 4.23 ilustrează un vehicul acționat cu motor sincron liniar unilateral (în fapt, două motoare), cu secundar scurt, având propulsia și sustentația integrate. Sustentația și ghidarea sunt realizate cu pernă magnetică cu atracție. Armăturile primare (trifazate) 1 ale motoarelor sunt fixate pe calea de zbor 5, ele jucând și rolul de plăci feromagnetice ale sistemului de sustentație. Tot pe cale, sunt fixate și plăcile feromagnetice 4 ale sistemului de ghidare. Armăturile secundare (de excitație) 2 ale motoarelor sunt montate pe boghiul de levitare 7, ele jucând și rolul de electromagneți ai sistemului de sustentație; tot pe acest boghiu, sunt montați electromagneții 3 ai sistemului de ghidare. Cutia vehiculului 9 se sprijină pe boghiul de levitare printr-o suspensie secundară 8. În situația în care sistemul de sustentație electromagnetică își pierde alimentarea, vehiculul se poate sprijini pe cale prin intermediul unor tălpi 6 de tip sanie.

De remarcat că în soluția constructivă prezentată mai sus electromagneții de levitare - care servesc și ca armătură secundară, de excitație, a motorului sincron de propulsie - sunt cu *flux longitudinal* (în lungul căii), iar electromagneții de ghidare sunt cu *flux transversal* (perpendicular pe cale).

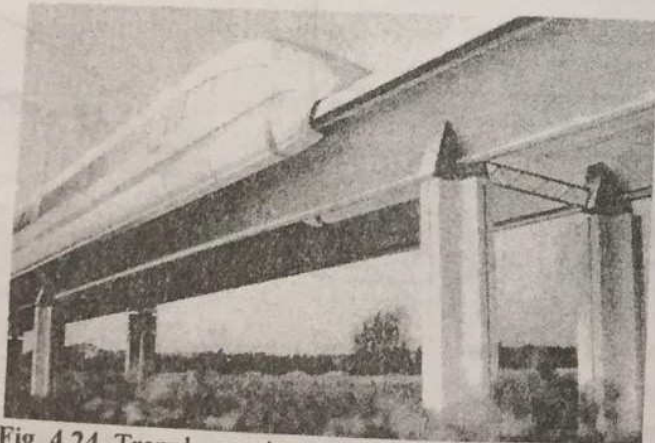


Fig. 4.24. Trenul experimental german Transrapid-07.

Soluția a fost adoptată pentru acționarea trenului experimental german Transrapid-07 (Fig. 4.24), care - pe linia de încercări - a atins, în anul 1993, viteza de 450 km/h. Frânarea de serviciu a vehiculului este

electrică; vehiculul este echipat, însă, și cu o frână mecanică de fricțiune, ca sistem adițional de frânare pentru cazuri de urgență.

O soluție identică stă și la baza variantei Transrapid-08 (care diferă numai prin arhitectura cutiei vehiculului), considerat a fi primul tren european pe pernă magnetică, construit pentru a intra în serviciu curent. El este proiectat pentru a lega Berlinul de Hamburg - linie ce va fi dată, probabil, în exploatare până în 2005 și pe care se va circula cu viteze până la 500 km/h, asigurând parcurgerea celor 292 km în mai puțin de o oră. Ulterior, se intenționează realizarea, cu un astfel de tren, a unei legături Hamburg - Amsterdam - Rotterdam.

În Fig. 4.25, se prezintă schematic un vehicul acționat tot cu motor sincron liniar unilateral (în fapt, și în acest caz, tot două motoare), cu secundar scurt, având, de data aceasta, propulsia și ghidarea integrate; sustentația și ghidarea sunt realizate cu pernă magnetică cu repulsie. Soluția a fost folosită, inițial, pe vehiculul experimental japonez ML-500, cu care s-a atins, în anul 1979, viteza-record (la acel moment) de 517 km/h.

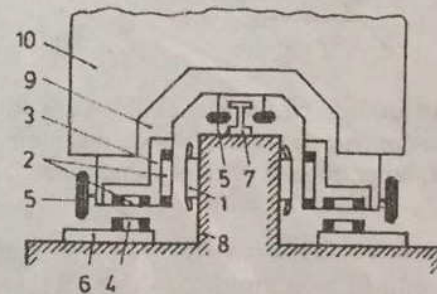


Fig. 4.25. Acționarea cu motor sincron liniar unilateral a unui vehicul pe pernă magnetică cu repulsie.

1 - primar (trifazat) al motorului; 2 - electromagneți supraconductori; 3 - criostat; 4 - bobine secundare ale sistemului de sustentație; 5 - roți de cauciuc; 6 - placă de beton; 7 - șină de ghidare; 8 - cale de zbor; 9 - boghiu de levitare; 10 - cutie vehicul.

Bobinele primare ale sistemului de sustentație, precum și înfășurările de excitație ale motorului sincron - care joacă și rolul de bobine primare ale sistemului de ghidare - sunt supraconductoare (*electromagneți supraconductori* 2), fiind dispuse în criostatul 3, montat pe boghiul de levitare 9. Acesta din urmă este fixat, la rândul său, pe

cutia vehiculului 10. Bobinele supraconductoare permit realizarea fără miez magnetic a înfășurării trifazate a primarului 1 al motorului și montarea sa în calea de zbor 8, realizată din beton. Drept secundar al sistemului de sustentație au fost preferate bobine scurtcircuitate 4, montate tot în cale (pe plăcile de beton 6); soluția cu bobine scurtcircuitate - față de cea cu secundar placă conductoare - conduce la o creștere mai rapidă cu viteza a forței de levitație și la forțe de frânare magnetică mai mici, la viteze mari.

Pentru asigurarea sustentației și ghidării în repaus și la viteze mici (când pernele magnetice cu repulsie nu sunt eficiente), se folosesc roțile de cauciuc 5; în acest caz, roțile de sustentație rulează pe plăcile de beton 6, iar roțile de ghidare - pe șina 7.

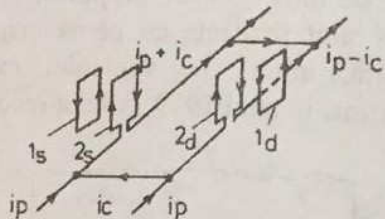


Fig. 4.26. Principiul ghidării cu flux nul pentru vehiculul din Fig. 4.25.  
 $1_s, 1_d$  - bobine supraconductoare pe vehicul (stânga, dreapta);  $2_s, 2_d$  - bobine ale înfășurărilor trifazate pe cale (stânga, dreapta).

Bobinele înfășurărilor trifazate ale sistemului de propulsie, aflate pe cele două părți ale căii ( $2_s$  - stânga,  $2_d$  - dreapta), sunt conectate între ele două câte două, după principiul ilustrat în Fig. 4.26, constituind, astfel, și secundarul sistemului de ghidare. Acest sistem - de tipul cu flux nul - a fost ales pentru a reduce forța de frânare magnetică. Dacă vehiculul este "centrat", tensiunile electromotoare induse prin mișcare de către bobinele supraconductoare ( $1_s$  - stânga,  $1_d$  - dreapta), în cele două bobine considerate mai sus ale înfășurărilor trifazate, sunt egale și curentul de circulație  $i_c$  prin acestea este nul (implicit, forța de frânare magnetică este nulă). La o deplasare laterală a vehiculului, fluxurile magnetice - și, deci, tensiunile electromotoare induse - în bobinele înfășurărilor trifazate devin inegale, ceea ce conduce la apariția unui

curent de circulație  $i_c$ . Acesta se adaugă cu semnul plus la curentul  $i_p$  (care asigură propulsia) din bobina înfășurării trifazate spre care se produce deplasarea laterală a vehiculului și cu semnul minus la curentul  $i_p$  din bobina celeilalte înfășurări trifazate, determinând dezvoltarea unei forțe transversale rezultante, care acționează în sensul recentrării vehiculului, și realizând, astfel, ghidarea sa.

O soluție similară celei folosite pentru acționarea vehiculului ML-500 este utilizată și la vehiculul experimental MLX01 (Fig. 4.27), care va sta la baza construcției trenului Chuo Shinkansen. Acesta a atins - pe linia de încercări -, la 15 Aprilie 1999, viteza-record (pentru un tren) de 552 km/h și este proiectat ca, într-o primă etapă, să circule pe o linie specială Tokyo - Nagoya - Osaka, cu lungimea de 515 km.

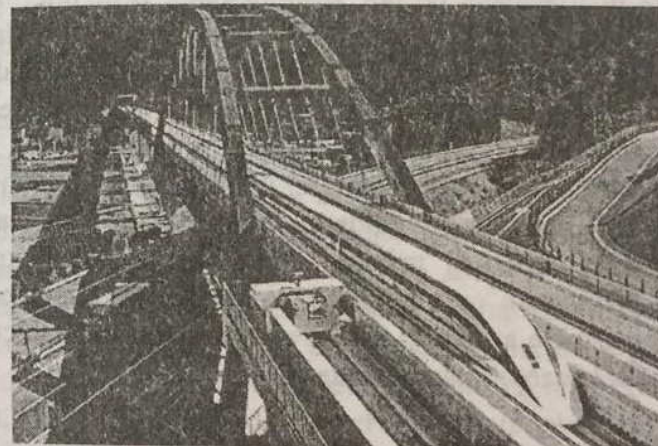


Fig. 4.27. Trenul experimental japonez MLX01.

O problemă a sistemelor prezentate o constituie realizarea derivațiilor căii de zbor. În cazul sistemului Transrapid, la derivații sunt folosite macazuri de tipul ilustrat în Fig. 4.28, în care porțiunea corespunzătoare de cale este construită sub forma unei grinzi de oțel, ce poate fi îndoită elastic, pe toată lungimea sa, astfel încât să asigure circulația vehiculului pe direcția 1 (în linie dreaptă) sau pe direcția 2 (în curbă). O asemenea structură permite ca vehiculul să poată atinge viteze de până la 200 km/h chiar și la intrarea pe direcția 2.

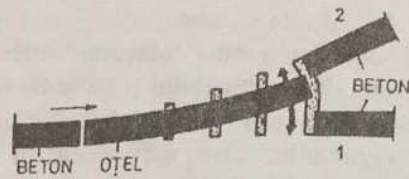


Fig. 4.28. Realizarea macazului de trecere de pe direcția 1 pe direcția 2 a unui vehicul al sistemului Transrapid.

O altă problemă o constituie minimizarea consumului de energie, ținând seama că armăturile primare (trifazate) ale motoarelor liniare sunt desfășurate pe toată lungimea căii. Pentru rezolvarea acestei probleme, se utilizează sistemul prezentat în Fig. 4.29, în care armătura primară AP este divizată în tronsoane ce pot fi alimentate, prin intermediul unor contactoare, de la fiderul F, care primește energia electrică (la parametri adecvați) de la substația de tracțiune ST. Cu ajutorul unui cablu de date CD, se obțin informații asupra poziției și vitezei vehiculului electric VE, care sunt transmise unui sistem de colectare a datelor SCD. Acesta din urmă prelucrează corespunzător datele, încât, prin intermediul blocului de comandă BC, determină închiderea contactoarelor care alimentează doar tronsoanele armăturii primare adiacente poziției momentane a vehiculului. Pe măsură ce vehiculul înaintază, se conectează, astfel, progresiv tronsoanele armăturii primare aflate înaintea vehiculului și se deconectează cele care rămân în urma sa.

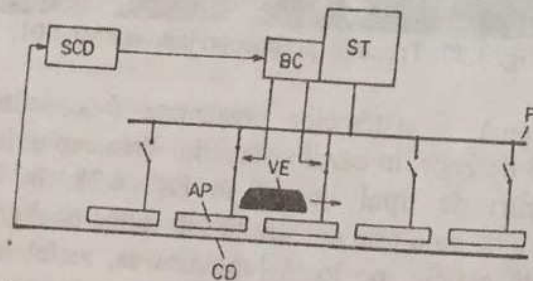


Fig. 4.29. Soluție pentru minimizarea consumului de energie la vehiculele cu motoare liniare cu secundar scurt.  
VE - vehicul electric; AP - armătură primară a motorului; ST - substație de tracțiune; F - fider; CD - cablu de date; SCD - sistem de colectare a datelor; BC - bloc de comandă.

#### 4.3. ASPECTE TEHNICO-ECONOMICE PRIVIND TRENURILE DE MARE VITEZĂ PE PERNĂ MAGNETICĂ

În cursul dezvoltării sale, fiecare sistem de transport a devenit din ce în ce mai rapid. Și aceasta nu datorită dorinței proiectanților sistemelor de transport, ci datorită cerinței călătorilor. Distanțele pe care se circulă sunt din ce în ce mai mari, călătoriile devin din ce în ce mai frecvente, iar călătorii au din ce în ce mai puțin timp de pierdut.

Importanța pe care o acordă călătorii factorului "timp" este ilustrată de faptul că, pe anumite trasee, trenurile actuale pot prelua o parte din pasagerii avioanelor, dacă este crescută semnificativ viteza lor.

Dar, ca și în cazul tuturor aspectelor care se au în vedere pentru aprecierea unui mijloc de transport, viteza nu poate fi separată de alte aspecte majore. De exemplu, viteze mai mari implică, de asemenea, costuri de investiție și exploatare mai ridicate, nivel de zgomot mai ridicat și consum de energie mărit.

În esență, pentru aprecierea unui mijloc de transport pe criteriul duratei călătoriei, o abordare cât de cât realistă a problemei impune ca această durată să fie definită din punctul de vedere al călătorului, și anume: *durata călătoriei "de la ușă la ușă"* (DCU), care, în afara timpului de călătorie propriu-zisă, include și timpii adiționali formați din timpii necesari pentru a ajunge de la ușa de plecare a călătorului (de exemplu, de acasă) până la locul de unde pleacă mijlocul de transport considerat, timpii de acces la acel mijloc (control de documente, așteptare, intrare în vehicul etc.) și timpii necesari pentru a ajunge de la ieșirea din vehicul până la ușa de destinație a călătorului.

În Tab. 4.1, sunt comparate câteva mijloace de transport - unele, deja uzuale (automobil, tren, avion), iar altele, mai mult sau mai puțin neconvenționale (tren de mare viteză - cu aderență la cale, tren de mare viteză - fără aderență la cale, pe pernă magnetică) - din punctul de vedere al vitezelor medii de circulație, al factorilor de ocolire și al timpilor adiționali, aceștia din urmă fiind dați ca valori tipice pentru marile orașe.

*Factorul de ocolire (FO)* al unui traseu se definește ca raportul

dintre lungimea efectivă a aceluui traseu (LT) și distanța în linie dreaptă (numită și distanță aeriană DA) între capetele traseului:

$$FO = LT / DA$$

(4.7)

Tabelul 4.1.

Mijloc de transport	Viteză medie [km/h]	Factor de ocolire	Timpi adiționali [h]
Automobil pe autostradă (AUTO)	90	1,3	0,2
Tren Intercity (IC)	110	1,3	1,0
Tren de mare viteză, cu aderență la cale (TMV)	200	1,2	1,1
Tren de mare viteză, pe pernă magnetică (TPM)	350	1,1	1,0
Avion (AV)	450-700	1,1	1,7

În Fig. 4.30, este prezentată dependența duratei de călătorie "de la ușă la ușă" (DCU) de distanța aeriană (DA), pentru mijloacele de transport cuprinse în Tab. 4.1.

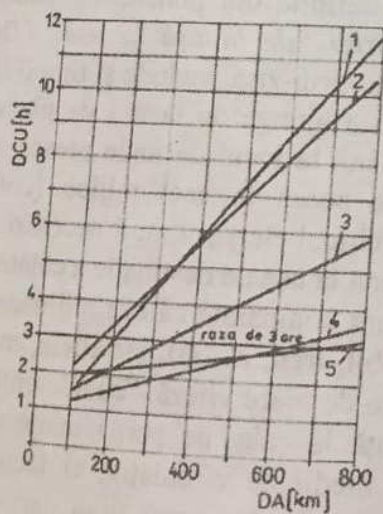


Fig. 4.30. Dependenta duratei de călătorie "de la ușă la ușă" (DCU) de distanța aeriană (DA), pentru diverse mijloace de transport. (1) - AUTO; (2) - IC; (3) - TMV; (4) - TPM; (5) - AV.

Pentru studiile referitoare la duratele de călătorie "de la ușă la ușă", o mărime-standard utilă pentru comparații o constituie așa-numita *rază de trei ore*; ea exprimă distanța aeriană pe care o poate acoperi un călător, cu un mijloc de transport dat, într-un interval de timp "de la ușă la ușă" de trei ore. Acesta este motivul pentru care în Fig. 4.30 este marcată *raza de trei ore* pentru mijloacele de transport analizate.

*Raza de trei ore* este de importanță majoră în călătoriile de serviciu (îndeosebi, de afaceri), pentru care ea corespunde unei călătorii de o zi: trei ore pentru a ajunge la destinație, cinci ore de lucru efectiv, trei ore pentru întoarcere. În general, în țările civilizate, cca 35-65 % din toate călătoriile de serviciu sunt călătorii de o zi. Dar *raza de trei ore* este, de asemenea, de importanță majoră pentru mulți călători particulari.

Fig. 4.30 demonstrează că, în cadrul *razei de trei ore*, un călător poate acoperi doar cca 330 km chiar cu un tren modern de mare viteză, cu aderență la cale, în timp ce el poate acoperi cca 700 km cu avionul. Trenul de mare viteză pe pernă magnetică dă posibilitatea ca, pentru un mijloc de transport terestru pe cale ghidată, să se extindă *raza de trei ore* de la cca 330 km la cca 650 km, deci aproape dublă.

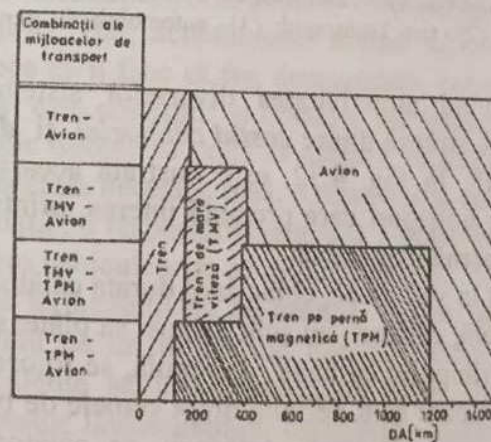


Fig. 4.31. Estimarea împărțirii, în viitor, a rolurilor avionului și ale diverselor mijloace de transport pe căi ghidate, în funcție de distanțele aeriene.

Fig. 4.31 ilustrează cum se întrevide pentru viitor că se vor împărți rolurile diverselor mijloace de transport terestru pe căi ghidate și

ale avionului, ținând seama de DA și de DCU. Cu trenul de mare viteză pe pernă magnetică se prevede că DCU, pentru DA până la cca 550-600 km, vor fi inferioare celor cu avionul. Considerațiile de mai sus nu pot fi extinse într-un mod simplist la o analiză a tuturor sistemelor de transport terestru. Acesta este motivul pentru care în Fig. 4.31 nu a fost inclus și automobilul.

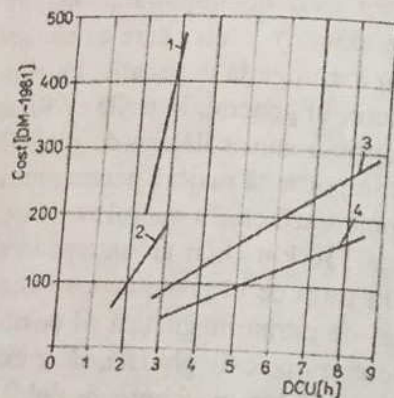


Fig. 4.32. Dependenta costului călătoriei de durata călătoriei "de la ușă la ușă".  
(1) - avion; (2) - tren Transrapid; (3) - automobil; 4 - tren, clasa I.

Studiile privind atractivitatea diverselor sisteme de transport evidențiază legătura strânsă dintre *costul călătoriei* și *durata călătoriei "de la ușă la ușă"*. În Fig. 4.32, este ilustrată această relație pentru câteva mijloace de transport care prezintă interes, printre care și trenul de mare viteză pe pernă magnetică.

Trebuie avut în vedere că, chiar dacă durata călătoriei "de la ușă la ușă" este mai scăzută, călătorii nu sunt dispuși să plătească orice preț. În scopul comparării timpului cu banii, de regulă, se folosesc așa-numitele *valori ale timpului*, care sunt definite drept sumele de bani pe care și le permit să le plătească diversele categorii de călători pentru o oră petrecută în mijlocul de transport considerat. Evident, aceste *valori ale timpului* sunt dependente de scopul călătoriei, ele fiind mai scăzute pentru o călătorie de vacanță și mai ridicate pentru o călătorie de afaceri.

Actualmente, mulți călători consideră relația *cost-durată* a călătoriei cu trenul suficient de favorabilă pentru a prefera trenul avionului. Se întrevede ca, pentru trenurile de mare viteză pe pernă magnetică, această relație *cost-durată* a călătoriei să fie și mai avantajoasă. Previziunile asupra costului călătoriilor cu trenurile de mare viteză pe pernă magnetică arată că acesta va fi mult sub costul călătoriilor cu avionul și chiar sub costul călătoriilor cu automobilul, dacă în ultimul caz se ia în considerare și investiția la cumpărarea automobilului.

În afara priorității acordate de către călători duratei scăzute a călătoriei "de la ușă la ușă" și costului rezonabil al călătoriei, ei au și caracterizată, în principal, prin *disponibilitatea*, *siguranța* și *confortul* oferite de mijlocul de transport considerat.

Termenul de *disponibilitate* cuprinde toate caracteristicile unui mijloc de transport care permit unui călător să fie cât mai independent posibil în planificarea unei călătorii. În principiu, un călător ar prefera un mijloc de transport permanent disponibil, care sa-l ducă de la locul de plecare la cel de destinație, permițându-i să-și aleagă traseul și locurile unde să facă opriri. Dar, actualmente, numai automobilul poate oferi toate acestea, ceea ce îl face să fie, deocamdată, cel mai popular mijloc de transport, deși este costisitor și obositor pe distanțe lungi. Sistemele de transport public trebuie să tindă să asigure, pe cât posibil, o astfel de disponibilitate; aceasta necesită, însă, o rețea deasă de trasee, o frecvență ridicată de circulație, o respectare riguroasă a orariilor și o bună calitate a legăturilor dintre vehiculele de pe diverse trasee.

În privința termenului de *siguranță*, se pot scrie tomuri întregi. Călătorii consideră că un mijloc de transport este sigur atunci când numărul de accidente se încadrează între niște "limite acceptabile". Dimensiunile acestor limite depind, de regulă, de fiecare individ și nu are nici o importanță pentru el dacă sistemul ca atare sau factori externi au determinat accidentul, dacă acesta a fost produs din cauza unei erori umane sau a unei defecțiuni a mijlocului de transport. Se pare că, în general, pentru călători este mai important sentimentul de siguranță decât factorul *siguranță*, așa cum este văzut el de către experții în

sisteme de transport. De exemplu, automobilul este încă - așa cum s-a menționat - cel mai popular mijloc de transport, cu toate că reprezintă cel mai puțin sigur mijloc de transport, ținând seama de numărul morților și răniților la miliardul de pasageri • kilometri. Pe de altă parte, mulți oameni se tem să folosească avionul, deși este mai sigur chiar decât trenul cu roți.

Un alt factor important îl reprezintă *confortul* oferit de un mijloc de transport. Studiile efectuate asupra acestui subiect fac, adesea, o diferențiere între confortul legat de plecare și sosire (de exemplu: sistemele de informare, de intrare și ieșire în/din mijlocul de transport etc.), pe de o parte, și confortul legat de călătoria propriu-zisă (de exemplu: scaunele, spațiul de mișcare în interiorul vehiculului, serviciile, deranjarea de către alți călători, nivelul de zgomot, aerul condiționat, accelerațiile, vibrațiile etc.), pe de altă parte. Termenul *confort* include, de asemenea, aspectul exterior al unui mijloc de transport - de exemplu, impresia de "demodat", "modern" etc.

Trenurile de mare viteză pe pernă magnetică nu vor fi destinate să înlocuiască trenurile uzuale, ci doar să fie un complement al acestora. Pentru călătorii lor, trenurile de mare viteză se prevăd a fi aproape la fel de disponibile ca și trenurile suburbane. La ele se va putea ajunge la fel de ușor ca și la trenurile uzuale, iar stațiile lor vor fi integrate în stațiile de cale ferată. Similare vor fi și legăturile cu alte mijloace de transport în comun.

Trenurile de mare viteză pe pernă magnetică oferă o siguranță în circulație și o fiabilitate mai mari decât trenurile cu roți metalice și chiar mai mari decât avioanele. Ele se deplasează pe căi ghidate proprii, fără intersecții, și independente de alte mijloace de transport, circulația lor putând fi complet automatizată. Întrucât vehiculele "îmbrățișează" permanent calea de deplasare, este exclusă deraierea acestora, iar "zborul" la foarte mică distanță deasupra căii nu poate conduce la accidente similare celor din cazul prăbușirii avioanelor.

În ceea ce privește confortul, acesta va fi pentru trenurile de mare viteză pe pernă magnetică o combinație între confortul oferit de trenurile Intercity și cel oferit de avioane. Astfel, disponibilitatea scaunelor și a spațiului de mișcare din interiorul vehiculelor va fi la nivelul avioanelor

moderne și al trenurilor Intercity. Zgomotul și vibrațiile vor fi neglijabile, datorită utilizării pentru propulsie a motoarelor electrice liniare, iar pentru sustentație și ghidare - a pernei magnetice. Cu toate că vor circula cu viteze ridicate, se are în vedere ca accelerațiile și frânările să fie atât de line (accelerații/decelerații normale de maximum  $1 \text{ m/s}^2$ ) încât - contrar opiniei comune - nu vor fi necesare centuri de siguranță. Instalațiile sanitare și locurile pentru bagaje sunt comparabile cu cele din avioane, în timp ce serviciile vor fi similare celor din trenurile Intercity. Stațiile vor oferi și ele un nivel ridicat de confort, sisteme electronice sofisticate asigurând informarea și dirijarea călătorilor, încât aceștia să se orienteze ușor și să fie serviți fără întârzieri.

În cele de mai sus, diversele mijloace de transport au fost analizate din punctul de vedere al călătorului - utilizatorul acestor mijloace. Este importantă și o analiză din punctul de vedere al operatorului - care, în cazul mijloacelor de transport în comun, este compania de transport corespunzătoare -, pentru a vedea cum se plasează și din acest punct de vedere trenurile de mare viteză pe pernă magnetică.

S-a arătat că cerințele utilizatorilor privind mijloacele de transport cresc continuu. Aceasta reprezintă o problemă aproape nerezolvabilă pentru operatori: performanțe mai bune implică cheltuieli mai ridicate la operator; în consecință - și costuri mai ridicate la utilizator, acestea determinând o scădere a cererii.

Cheltuielile de investiție pe care le reclamă un mijloc de transport operatorului pot fi împărțite în două grupe: investiții în instalații fixe (căi de circulație, stații, poduri etc.), care au ponderea cea mai importantă în totalul investițiilor, și investiții în instalații mobile (vehiculele propriu-zise, cu dotările necesare).

O mărime-standard pentru compararea cheltuielilor de investiție în instalațiile fixe o constituie cheltuielile pentru un kilometru de cale dublă. Investițiile medii în cale sunt determinate, în mare măsură, de terenul pe care se realizează calea, dar și de viteza cu care urmează să se circule, precum și de parametrii de control ai circulației. Întrucât cheltuielile de investiție în cale reprezintă partea cea mai mare din totalul investițiilor într-un sistem de transport, reducerea cheltuielilor în acest sector are o importanță deosebită. Astfel, se întrevide că, de la o

anumită viteză în sus (de exemplu, în cazul sistemului Transrapid, de la cca 300 km/h), cheltuielile de investiție în cale pentru trenurile de mare viteză pe pernă magnetică vor deveni inferioare celor pentru trenurile moderne de mare viteză cu aderență la cale.

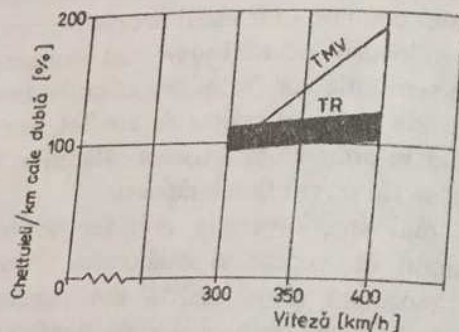


Fig. 4.33. Estimarea dependenței de viteză a cheltuielilor pentru 1 km de cale dublă, la trenurile Transrapid (TR) și la trenurile de mare viteză, cu aderență la cale (TMV).

În Fig. 4.33, este prezentată, conform previziunilor, dependența de viteză - în intervalul de la 300 km/h la 400 km/h - a cheltuielilor pentru 1 km de cale dublă, în cazul trenurilor Transrapid (TR) și în cel al trenurilor de mare viteză, cu aderență la cale (TMV); s-au luat ca referință (100%) cheltuielile din cazul TMV, pentru viteza de 300 km/h. Aceste previziuni indică posibilitatea ca cheltuielile de investiție în cale pentru trenurile Transrapid, la cca 400 km/h, să atingă doar aproximativ 65% din cele pentru trenurile de mare viteză cu aderență la cale. Tab. 4.2 prezintă, în cele două cazuri comparate, valorile estimate pentru cheltuielile de investiție în cale; pentru aceleași cazuri, sunt date și valorile minime ale razei curbelor căii.

Tabelul 4.2.

Sistemul	TMV		TR	
Viteza [km/h]	300	400	300	400
Cheltuieli de investiție în cale [%]	100	190	95-125	105-135
Raza minimă a curbelor [m]	4000	7000	2500	4000

Deși construcția structurii de susținere a căii și echipamentul de cale sunt relativ costisitoare la sistemul Transrapid, rezultatul de mai sus privind cheltuielile de investiție în cale se explică, în principal, prin aceea că Transrapid se adaptează mai bine terenului pe care urmează a fi construită calea, vehiculele acestui sistem având posibilitatea să urce rampe mult mai mari decât cele cu aderență la cale și să abordeze cu viteze mari curbe cu raze mai mici. Ca urmare, Transrapid necesită un minim de construcții scumpe (viaducte, tunele etc.). Situația cheltuielilor de investiție în cale se îmbunătățește în favoarea sistemului Transrapid cu atât mai mult cu cât terenul este mai deluros, cum este cazul Europei Centrale, de exemplu.

Posibilitatea de a urca rampe mari și de a aborda curbe cu raze mici asigură sistemelor care utilizează trenuri pe pernă magnetică, printre altele, și factori de ocolire mai scăzuți decât în cazul trenurilor cu aderență la cale.

Pentru cheltuielile de investiție în instalații mobile, mărimea-standard utilizată în comparații o constituie cheltuielile pe un loc din vehicul, raportate la durata de viață a vehiculului. Această mărime are valoarea cea mai ridicată în cazul avioanelor. Pentru sistemul Transrapid, de exemplu, ea se estimează că va fi de cca o treime din cea pentru avion.

## Capitolul 5

### SISTEME DE TRANSPORT URBAN RAPID DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

#### 5.1. PROBLEME GENERALE ALE TRANSPORTULUI URBAN

Conceptul de transport rapid de tip "lift orizontal" s-a dezvoltat plecând de la o serie de probleme urbane și încercând să se găsească o soluție adecvată acestor probleme, chiar dacă tehnologiile reclamate de acea soluție nu erau disponibile la momentul respectiv.

Problemele transportului urban sunt numeroase. Acestea pot fi evidențiate printr-o analiză a sistemelor curente de transport urban, care se împart în două mari categorii:

- sisteme publice de transport;
- sisteme private de transport.

**Sistemele publice** de transport sunt realizate cu vehicule având autonomie în circulație (autobuze, microbuze, taximetre) și cu vehicule fără autonomie în circulație (troleibuze, tramvaie, metrouri, trenuri urbane, vehicule monoșină). Acestea au o serie de dezavantaje, cele mai importante fiind următoarele:

- necesitatea unor suprafețe mari de teren pentru realizarea căilor de circulație (exceptând metrourele și vehiculele pe estacade);
- investiții mari în cale, în cazul vehiculelor de capacitate ridicată;

### SISTEME DE TRANSPORT DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

- grad scăzut de confort și de comoditate;
- cu excepția taximetrelor, transportul se face pe trasee fixe, disponibilitatea este scăzută (timpii de acces și de așteptare în stații sunt relativ mari) și durata călătoriei "de la ușă la ușă" (definită ca în §4.3) este relativ mare, mai ales la orele de vârf;
- îngreunarea circulației celorlalte mijloace de transport, în cazul vehiculelor la nivelul solului;
- poluare fonică și chimică, în cazul tracțiunii cu motoare termice;
- consum energetic important; în cazul tracțiunii cu motoare termice, el este realizat cu combustibili petrolieri scumpi.

**Sistemele private** de transport sunt realizate, în principal, cu automobile. Ele utilizează pentru tracțiune motoare termice și - într-un număr redus, dar cu tendință de creștere - motoare electrice. Principalele avantaje ale acestor sisteme le constituie marea lor disponibilitate și posibilitatea de transport "de la ușă la ușă", menținându-se, însă, majoritatea dezavantajelor menționate mai sus.

#### 5.2. NECESITATEA ȘI STRUCTURA SISTEMELOR DE TRANSPORT URBAN RAPID DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

S-a pus problema realizării unor sisteme de transport care să îmbine cât mai multe dintre avantajele sistemelor prezentate mai sus - înlăturând dezavantajele lor esențiale - și anume:

- să asigure transportul unui număr mare de călători, cu viteze ridicate de circulație;
- să nu fie poluante;
- să depindă cât mai puțin de combustibili petrolieri;
- să necesite investiții cât mai mici (legate mai ales de calea de rulare, acestea fiind mai scăzute dacă dimensiunile vehiculelor sunt mai mici);
- să aibă un grad ridicat de confort și de comoditate (aceasta din urmă, prin asigurarea unei disponibilități cât mai mari - la orice

- oră - și a unui transport cât mai apropiat de transportul "de la ușă la ușă", la un cost rezonabil);
- să aibă o siguranță mare în circulație (fără generare de accidente);
- să nu îngreuneze circulația celorlalte mijloace de transport;
- să necesite suprafețe de teren cât mai mici pentru realizarea căilor de circulație.



Fig. 5.1. Ilustrativă pentru un sistem de transport urban rapid de tip "lift orizontal".

O soluție a acestei probleme complexe o constituie sistemele de transport urban rapid de tip "lift orizontal", care reprezintă o clasă a sistemelor de transport urban automat. Un astfel de sistem - în cazul în care se dorește a fi, practic, un sistem de *transport personal rapid* (în engleză: *Personal Rapid Transit - PRT*) - se realizează cu o "flotă" formată dintr-un număr mare de cabine, cu acționare electrică, de capacitate scăzută (1-6 persoane), care circulă într-o rețea complexă, exclusivă, de căi ghidate - în marea lor majoritate de tip estacadă (deci, deasupra solului - Fig. 5.1), dar posibil și la nivelul sau sub nivelul solului. În cazul căilor la nivelul solului, acestea trebuie protejate (izolate) de posibila intersectare accidentală cu alte tipuri de vehicule

din circulația stradală, cu oameni sau cu animale. Estacadele au avantajul că implică ocuparea unor suprafețe mici de teren: doar suprafețele necesare pentru stâlpii de susținere și pentru stații.

Sistemele de transport urban rapid pot fi folosite și pentru transportul de mărfuri, bagaje, poștă etc.

Pentru a fi competitive cu automobilele, sistemele trebuie să fie capabile să asigure la cerere serviciul de transport la orice oră, cu costuri rezonabile. Aceasta nu se poate realiza dacă stațiile sunt dispuse pe căile principale de circulație ale sistemului de transport urban rapid, așa cum se întâmplă în cazul sistemelor uzuale de transport public. Stațiile trebuie dispuse, deci, în afara căilor principale, pe niște derivații (refugii), așa cum se arată în Fig. 5.2. În acest fel, se permite, de asemenea, ca o călătorie să se poată desfășura fără oprire de la stația de origine până la cea de destinație. Evident, circulația vehiculelor pe o cale dată se desfășoară numai într-un singur sens.

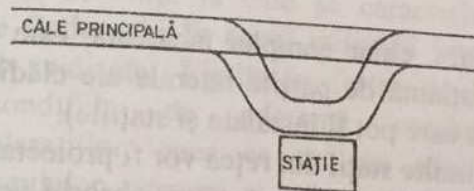


Fig. 5.2. Dispunerea stațiilor în afara căii principale.

Principiul de operare al sistemului este similar cu cel al lifturilor uzuale: chemarea și cererea de transport la punctul de destinație se fac personal de către călător, în același mod ca la lifturi - în cazul cel mai simplu, prin intermediul unor butoane aflate în vehicule și/sau în stații -, acționarea cabinelor și dirijarea traficului fiind complet automatizate.

În sistemele mai evoluate, călătorul își cumpără un bilet de la un distribuitor automat (după indicarea stației de destinație, care este codificată magnetic pe bilet) și îl introduce într-un compostor aflat în dreptul primului vehicul liber (care se presupune că există în stație; uzual, se proiectează sistemul astfel încât în stație să se afle 3-4 vehicule libere, în așteptarea călătorilor). Biletul este citit și destinația este transferată unui microprocesor aflat pe vehicul. Ușa vehiculului se

deschide, călătorul - sau grupul de persoane care călătoresc împreună - intră, se așază pe scaune și ușa se închide. Prin aceasta, este informat microprocesorul vehiculului că vehiculul este gata de plecare. Calculatorul aferent stației sesizează momentul oportun ieșirii vehiculului din stație; vehiculul accelerează și intră în calea principală, deplasându-se, apoi, fără oprire, până la destinația planificată.

Pentru a asigura un serviciu adecvat unei comunități, trebuie să existe un număr mare de stații legate printr-o rețea de căi ghidate interconectate, astfel încât călătorul să nu fie obligat să facă transbordări. Sistemul ideal ar fi acela în care o cabină să fie folosită de o singură persoană sau de un grup foarte restrâns de oameni care să călătorească împreună. În acest caz, cabinele ar trebui să aibă maximum patru locuri, ceea ce înseamnă că ele ar putea fi proiectate încât să nu cântărească mai mult de 900-1000 kg. Ca urmare, căile de circulație necesare pentru a le transporta ar fi relativ mici și, deci, cu un cost minim.

Calea de rulare, chiar complet încărcată, este suficient de mică pentru a fi ușor susținută de părțile laterale ale clădirilor sau pentru a trece prin clădiri (în care pot fi instalate și stațiile).

Una sau mai multe stații din rețea vor fi proiectate special pentru a servi ca "depouri de cabine". Acestea vor absorbi vehiculele în exces, din perioadele în care cererea este scăzută, putând fi folosite și ca spații pentru întreținerea vehiculelor.

În cazuri mai puțin pretențioase ca performanțe, se pot realiza sisteme de transport de tip "lift orizontal" în rețele mai restrânse (eventual, reduse la o simplă buclă), cu vehicule mai puține, dar de capacități mai mari, care să oprească în toate stațiile pentru care există cereri - așa cum se întâmplă, în mod obișnuit, în cazul lifturilor uzuale.

### 5.3. POSIBILITĂȚI DE REALIZARE A VEHICULELOR SISTEMELOR DE TRANSPORT URBAN RAPID DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

După cum s-a menționat, cabinele care formează vehiculele sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal" sunt vehicule

electrice, acestea având următoarele avantaje principale: nu sunt poluante, nu depind de combustibili petrolieri și se pretează fără dificultăți la automatizarea conducerii lor.

Vehiculele pot fi - în funcție de poziția cutiei lor față de calea de rulare - de tipul sprijinit sau suspendat.

Marea majoritate a vehiculelor utilizate în sistemele de transport analizate sunt de tip sprijinit, construcția lor fiind mai simplă și pretându-se atât în cazul căilor pe estacadă, cât și în al celor la nivelul sau sub nivelul solului. În cazul sistemelor având exclusiv căi pe estacadă, poate fi preferată soluția de tip suspendat datorită posibilității de asigurare a unui acces mai ușor al călătorilor de la nivelul solului.

Pot fi utilizate vehicule cu aderență la cale - cu roți metalice sau cu roți pneumatice -, echipate cu motoare electrice rotative de tracțiune, sau vehicule fără aderență la cale, echipate cu motoare electrice liniare de tracțiune.

Vehiculele cu aderență la cale se caracterizează prin poluări fonice acceptabile (îndeosebi în cazul utilizării roților pneumatice) și randamente relativ ridicate. Limitarea forței de tracțiune/frânare a acestora de condițiile de aderență conduce la limitarea accelerațiilor/decelerațiilor, ceea ce are ca efect limitarea vitezei comerciale a vehiculelor, precum și a intervalului dintre două cabine succesive ale unui sistem de transport urban rapid, pentru evitarea coliziunii acestora. De asemenea, ea conduce la limitarea rampei maxime pe care o poate urca un astfel de vehicul, ca urmare a scăderii greutatei aderente a vehiculului. Astfel, rampa maximă pe care o pot urca vehiculele cu roți metalice pe șine metalice este de 7-10 %, iar vehiculele cu roți pneumatice - de cca 12 %.

În consecință, vehiculele cu aderență la cale sunt adecvate pentru sistemele de transport urban rapid care nu implică intervale mici între cabinele succesive și nici urcarea unor rampe mari. Oricum, pentru a menține coeficientul de aderență la o valoare rezonabilă și pe timpul iernii, căile de rulare ale acestor vehicule trebuie echipate fie cu sisteme de protecție la intemperii, fie cu sisteme de încălzire, care să topească zăpada și poleiul.

În §4.1, au fost prezentate avantajele și dezavantajele utilizării motoarelor electrice liniare pentru propulsia/frânarea vehiculelor electrice, aceste vehicule fiind fără aderență la cale. În mod deosebit, eficacitatea energetică globală ridicată, poluarea fonică scăzută (care poate fi, practic, nulă în cazul sustentației și ghidării pe pernă magnetică), precum și posibilitatea realizării unor forțe de tracțiune/frânare mari și ferme, independente de condițiile exterioare, având drept urmare directă posibilitatea obținerii unor accelerații/decelerații mari și a unor viteze comerciale ridicate, în condiții de siguranță sporită a circulației, fac ca vehiculele echipate cu motoare electrice liniare să fie foarte adecvate pentru sistemele de transport urban rapid, mai ales în cazul în care aceste sisteme sunt realizate cu un număr mare de cabine ce se succed la intervale mici de timp (de ordinul a 0,5 s până la câteva secunde).

#### 5.4. IMPLICAȚII ALE UTILIZĂRII SISTEMELOR DE TRANSPORT URBAN RAPID DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

##### 5.4.1. Comanda automată a vehiculelor

Dacă vehiculele unui sistem de transport urban rapid urmează să asigure un serviciu garantat la orice oră din zi, ele trebuie să fie comandate automat și să fie comutate automat - la derivații - de pe o linie pe alta, în funcție de cerere. În esență, așa cum s-a mai spus, principiul de operare trebuie să fie similar cu cel al lifturilor uzuale: chemarea și cererea de transport la punctul de destinație se fac personal de către călător, prin intermediul unor butoane (sau al altor dispozitive) aflate în vehicule și/sau în stații, acționarea vehiculelor și dirijarea traficului fiind complet automatizate.

Controlul vehiculelor se face la trei niveluri. În primul rând, controlul vitezei și poziției, în toate etapele deplasării, se realizează prin interacțiune directă a vehiculului cu calea (prin senzori adecvați) și va trebui să asigure mișcarea în limitele confortului.

În al doilea rând, în fiecare punct de ramificare a căii, un calculator va trebui să examineze instrucțiunile de la bordul fiecărui vehicul, pentru a stabili în ce direcție trebuie să meargă.

Calculatorul va da, de asemenea, semnale fiecărui vehicul să înainteze sau să mai întârzie, similar cazului unui automobil care urmează să intre într-o coloană de vehicule pe o autostradă, astfel încât vehiculul controlat automat să se strecoare într-un spațiu liber de pe calea de rulare. În stații, trebuie folosite calculatoare asemănătoare celor din punctele de ramificare, care să asigure - pe de o parte - controlul accesului vehiculului în stație și - pe de altă parte - controlul ieșirii vehiculului din stație, pentru a intra în calea principală pe principiul prezentat anterior.

În al treilea rând, trebuie utilizat un calculator central care să determine distribuția vehiculelor goale în sistem, în anticiparea cererilor care pot apărea, și să direcționeze vehiculele într-o astfel de manieră încât să prevină congestionările traficului în sistem.

##### 5.4.2. Siguranța circulației și fiabilitatea

Una din principalele dificultăți pe care le întâmpină proiectantul unui sistem de transport urban rapid este aceea de a avea de-a face cu un număr mare de pasageri, care este de așteptat la orele de vârf în centrele urbane dens populate. Aceste volume mari de trafic necesită un număr mare de cabine care să se deplaseze rapid, cu frecvență ridicată, având comandă automată.

Intervalul mediu de timp  $T$  (în secunde) între două vehicule succesive ale unui sistem de transport urban rapid care operează într-o zonă urbană poate fi calculat cu următoarea formulă:

$$T \approx \frac{7300 N}{s l d v} \quad (5.1)$$

în care:  $N$  este numărul mediu de călători dintr-un vehicul;  $s$  - lungimea interstației medii [km];  $l$  - lungimea medie a unei călătorii [km];  $d$  - densitatea populației [locuitori/km<sup>2</sup>];  $v$  - numărul de călătorii pe persoană, la orele de vârf.

Să considerăm interstația medie  $s \approx 0,8$  km, lungimea medie a unei călătorii  $l \approx 8$  km, iar densitatea medie a populației  $d \approx 2700$  locuitori/km<sup>2</sup>. Numărul mediu tipic de călătorii pe persoană la orele de vârf este  $v \approx 1/8$ , dacă jumătate din călătorii sunt efectuate cu sistemul de transport urban rapid. În final, să considerăm că numărul mediu de călători dintr-un vehicul este  $N \approx 1,5$  (aceasta presupune un oarecare efort de a crește factorul de încărcare a vehiculului, folosind o anumită taxă de călătorie mai degrabă pe vehicul decât pe persoană).

În aceste condiții, intervalul mediu între două vehicule este  $T \approx 5$  s. În timp ce aceste intervale sunt comparabile cu cele dintre automobilele de pe autostrăzi, ele sunt mult mai mici decât intervalele dintre vehiculele sistemelor clasice de transport în comun.

Aceste intervale mici de timp dintre vehiculele sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal" impun luarea unor măsuri speciale pentru realizarea siguranței circulației și fiabilității sistemelor. Astfel, în afara controlului automat al poziției și vitezei vehiculelor, care să facă improbabilă coliziunea acestora, pentru maximum de siguranță și fiabilitate - având în vedere că nu există posibilitatea de a proiecta un astfel de sistem care să garanteze că nici o combinație de defecțiuni ale sistemului nu va conduce vreodată la coliziune - se recomandă ca:

- vehiculele din sistemele de transport personal rapid să fie echipate cu amortizoare de șocuri, capabile să absoarbă energia degajată prin coliziunea unui vehicul în mișcare, având viteza de croazieră, cu un vehicul oprit;
- toți pasagerii să stea pe scaune;
- vehiculele să fie căptușite corespunzător, eventual cu pungi de aer ("air bags").

Acestea nu constituie probleme practice deosebite în cazul vehiculelor de capacitate redusă.

În cazul vehiculelor de capacitate mai mare, pentru reducerea lungimii și costului lor, se admit și pasageri în picioare. Acest fapt, împreună cu dimensiunea și greutatea vehiculelor, face practic imposibilă proiectarea lor astfel încât pasagerii să nu sufere în urma coliziunilor. În acest caz, se impun un interval de timp corespunzător

mărit între două vehicule succesive, precum și sisteme suplimentare care să reducă, practic la zero, probabilitatea coliziunii vehiculelor.

Pentru cazuri de forță majoră, fiecare vehicul are un buton de oprire; prin apăsarea acestuia, vehiculul va opri în stația imediat următoare.

În scopul creșterii fiabilității și a siguranței circulației, sistemele de acționare ale vehiculelor au o redundanță adecvată (cel puțin două motoare de tracțiune pe vehicul, cu comenzile aferente). Dacă, totuși, un vehicul nu se poate deplasa, se prevede posibilitatea ca vehiculul din spate să se apropie încet de vehiculul defect și să-l împingă până la stația imediat următoare și numai în cazul extrem, în care această manevră nu este posibilă, să fie activată o echipă de intervenție.

Dacă se pierde alimentarea cu energie electrică de la rețea (vehiculele sunt alimentate în c. c., pentru a avea o influență minimă asupra sistemelor de telecomunicații, instalațiilor de telecomandă și semnalizare etc.), există totdeauna o sursă tampon: fie grupuri electrogene, fie baterii de acumulare, dispuse în lungul căii.

#### 5.4.3. Impactul vizual

Un aspect controversat al sistemelor de transport urban rapid de tip "lift orizontal" este dacă sunt acceptabile pentru comunitate căi de rulare pe estacade. Desigur, este posibilă dispunerea căilor în subteran, dar aceasta - de regulă - cu un cost ridicat, de 3-5 ori mai mare. Dacă se folosesc căile pe estacade, acestea vor trebui să fie pe cât posibil mai mici. În unele locuri, ar putea fi necesară o ameliorare a arhitecturii străzilor care să ofere rezidenților și comercianților din zonă o compensare pentru intruziunea vizuală a căilor pe estacade. Experiența de până acum arată că, odată ce oamenii apreciază costurile și beneficiile sistemelor de transport urban rapid în întregul lor, scade importanța problemei impactului vizual.

#### 5.4.4. Implicații pentru comunitatea urbană

Este necesar a fi făcute cunoscute în detaliu implicațiile pe care le vor avea sistemele de transport rapid de tip "lift orizontal" pentru

indivizi și pentru comunitatea urbană. Pe măsură ce caracteristicile acestor sisteme sunt mai bine înțelese, impactul lor se arată a fi deosebit de favorabil.

Întrucât aceste sisteme de transport utilizează energie electrică, un impact foarte important este acela asupra necesităților energetice. Având în vedere pierderile de energie în centrala electrică și în deplasarea vehiculelor goale, energia pe o călătorie într-un vehicul de mică capacitate al unui astfel de sistem este echivalentă cu cca 5-8 litri de benzină la 100 km. Dacă centrala electrică este folosită și pentru asigurarea apei calde pentru încălzirea locuințelor, energia totală de intrare în centrală nu este, practic, afectată de sistemul de transport considerat. Ca urmare, dacă ar fi posibil să fie atrase în sistemul de transport urban rapid de tip "lift orizontal" 50% din totalul călătoriilor dintr-o zonă urbană, necesitățile energetice totale pentru transportul dintr-un oraș ar putea fi reduse cu cel puțin o treime.

Orice sistem de transport urban rapid este doar o componentă în planificarea urbană, iar implementarea sa este determinată de foarte multe decizii de natură politică. Flexibilitatea sistemelor de transport rapid de tip "lift orizontal" permite adaptarea lor unei game largi de planuri de utilizare a terenului, în timp ce sistemele clasice de transport feroviar urban implică densități mari de populație în stații.

#### 5.4.5. Aspecte economice

Un mod simplu de a evalua economicitatea sistemelor de transport rapid de tip "lift orizontal" este să se exprime costul unei călătorii ca fiind costul investițiilor amortizat plus costul anual de exploatare și întreținere, împărțite prin numărul anual de călătorii. Studii efectuate de Aerospace Corporation asupra sistemelor de transport urban rapid pentru orașul Los Angeles, S.U.A., arată că, în comparație cu o propunere de sistem feroviar urban pentru acel oraș, un sistem de *transport personal rapid* de tip "lift orizontal", cu un număr mare de cabine, ar putea fi construit astfel încât acesta - la un cost identic - să aibă o lungime a căilor de cinci ori mai mare și un număr de stații de 18 ori mai mare.

Costurile de exploatare și întreținere pe călător • km la sistemele de *transport personal rapid* de tip "lift orizontal" sunt minimizează dacă funcționarea este strict la comandă și dacă vehiculele goale sunt redirecționate, de către calculatorul central, din stațiile cu vehicule în exces spre stațiile unde lipsesc vehicule. Pentru a minimiza costurile, vehiculele trebuie să aștepte călători (sau marfă) în fiecare stație dispusă în afara căii principale (pe refugiu) și să se deplaseze numai dacă sunt solicitate. Aceasta este o caracteristică fundamental diferită față de mijloacele convenționale de transport în comun, în care vehiculele trebuie să se deplaseze după un orar, independent - în esență - de fluctuațiile în cererile călătorilor, forțându-i pe aceștia să aștepte vehiculele.

Combinăția dintre călătoria fără opriri și vehiculele ușoare, circulând unul după altul, conduce și la minimizarea energiei, obținându-se mai mult decât dublarea eficienței energetice.

#### 5.5. REALIZĂRI ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE TRANSPORT URBAN RAPID DE TIP "LIFT ORIZONTAL"

Problema realizării unor sisteme de transport urban rapid de tip "lift orizontal" s-a pus încă din anii '60. Primul sistem bazat pe "adevăratul" concept de *transport personal rapid* (PRT - în sensul prezentat mai sus) a fost experimentat, sub numele de *Cabintaxi*, la Hagen, în Westfalia - Germania, între anii 1973 și 1979, de către companiile Messerschmitt-Bolkow-Blohm (MBB) și Demag. El a fost considerat viabil și apt pentru a fi aplicat - inițial, într-o zonă a orașului Hamburg -, dar, din cauza diminuării bugetului în acea perioadă, guvernul federal nu a mai putut susține dezvoltarea sistemului și aceasta a fost întreruptă. Proiectul nu a mai fost reluat, dar tehnologia de la *Cabintaxi* a fost folosită, sub numele de *Cabinlift*, în aplicații mai simple, prima dintre ele (în 1976) fiind utilizată pentru a asigura legătura între clădirile unui complex spitalicesc din Schwalmstadt. Această tehnologie este aplicabilă, fără mari dificultăți, și în aeroporturi (de exemplu, sistemul aflat acum în construcție la aeroportul internațional

din Düsseldorf), campusuri universitare, complexe expoziționale și comerciale, zone industriale sau turistice.

Până în prezent, nici un alt sistem PRT nu a mai fost capabil să atingă nivelul de dezvoltare la care a ajuns *Cabintaxi*. Recent (1996), însă, compania Raytheon (împreună cu TAXI2000 Corporation) din SUA a început experimentarea, pe linia de încercări de la Marlborough, Massachusetts, a sistemului *PRT2000*, acesta constituind al doilea efort de realizare a unui "adevărat" sistem de *transport personal rapid*, care urmează a fi aplicat în suburbia Rosemont a orașului Chicago (având și scopul de a asigura un acces mai convenabil al populației din zonă la stațiile sistemului existent de trenuri suburbane).

Un sistem căruia i s-a făcut publicitate ca fiind primul sistem funcțional de *transport personal rapid* de tip "lift orizontal" din lume este cel de la Morgantown, Virginia de Vest - SUA (constructor: Alden-Boeing). Acesta, însă, nu este un sistem cu adevărat "personal", ci unul "de grup": vehiculele sunt de capacitate relativ ridicată (21 persoane) și nu toate călătoriile sunt fără oprire, din stația de origine până la cea de destinație. Sistemul face legătura între campusul central al universității din oraș (West Virginia University), centrul de afaceri al orașului și două campusuri suburbane ale universității. Construcția sa a început în 1971 și, într-o primă fază, a fost terminată în 1972, după care a urmat o perioadă de încercări minuțioase, până în 1975, când a fost dat în exploatare pentru public. Sistemul a fost extins apoi, în 1978, fiind adus la configurația actuală.

Eforturi serioase pentru realizarea unor sisteme de transport de tip "lift orizontal" au fost făcute și de alte companii din SUA, Germania, Japonia, Franța, Anglia și Suedia. Rezultatele, până în prezent, au fost concretizate în unele sisteme relativ simple de transport în grup, bazate pe principiul menționat, care sunt utilizate pe aeroporturi, în zone comerciale sau turistice ale unor orașe, pentru legături cu mijloace de transport de mare capacitate (metrouri, trenuri urbane și suburbane.) ș.a.

În continuare, vom prezenta unele caracteristici ale principalelor sisteme de transport de tip "lift orizontal" menționate mai sus.

### 5.5.1. Sistemul de transport personal rapid *Cabintaxi*

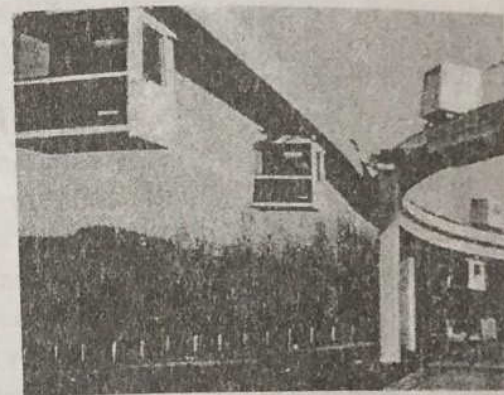


Fig. 5.3. Cale și vehicule ale sistemului *Cabintaxi*.

Sistemul a avut în final:

- **Linia de încercări:** cu lungimea de 1,9 km, 6 stații și 24 vehicule funcționale.
- **Calea de rulare:** din grinzi, pe estacadă, atât pentru vehicule suspendate, cât și sprijinite (Fig. 5.3).
- **Stațiile:** dispuse în afara căii principale, pe refugii, distanțate la 0,3-0,8 km, putând asigura până la 1200 vehicule/h.
- **Vehiculele:** cu capacități de 3 și 12 călători, pentru aplicații PRT; cu capacități de 12 și 24 călători, pentru aplicații de transport în grup (folosite la *Cabinlift*).
- **Propulsia:** cu două motoare asincrone liniare bilaterale, șina de reacție fiind montată orizontal pe grinda de rulare.
- **Viteza:** 36 km/h.
- **Intervalul între două vehicule:** 2,5 s, pentru aplicații PRT (la încercări, s-a putut realiza și 0,5 s).
- **Frânarea:** cu trei sisteme independente, care pot fi combinate.

### 5.5.2. Sistemul de transport personal rapid *PRT2000*

În faza actuală, încercările de prototip se fac pe o linie ovală, cu o stație (dispusă pe refugiu) și trei vehicule (Fig. 5.4); structura cabinelor

este realizată cu materiale ușoare - fibră de sticlă și aluminiu.



Fig. 5.4. Stație și vehicule ale sistemului PRT2000.

Vehiculele, cu 4 locuri pe scaune, folosesc pentru propulsie și frânare motoare asincrone liniare, puterea instalată pe vehicul fiind de 50 kW. Ele rulează, cu roți pneumatice de presiune ridicată, pe grinzi ușoare de oțel, protejate împotriva intemperiilor (ninsoare, furtună etc.), fixate rigid - cu buloane - pe stâlpii de susținere. Alimentarea vehiculelor se face de la linia de contact, 600 V c.c.

La aplicarea sa, în faza finală, sistemul va avea următoarele performanțe esențiale:

- **Viteză maximă:** 48 km/h, la mersul normal înainte; 8 km/h, la mersul înapoi (în situații speciale: revizii, depanări etc.); 24 km/h, la împingerea unui vehicul defect.
- **Interval între două cabine:** 2,5 s, la 48 km/h (se au în vedere și intervale mai mici, în funcție de caracteristicile traficului).
- **Debit maxim:** peste 10.000 călători pe oră și sens.
- **Capacitatea peroanelor din stații:** 1000-3000 călători pe oră (stații de 2-10 cabine).
- **Timp de așteptare în stații:** practic, nul, în afara orelor de vârf; sub 3 minute, în orele de vârf.
- **Durata călătoriei:** 1,5-2,2 min, pentru o călătorie de 1 km.

Concepția PRT2000 permite ca acest sistem să fie ușor de instalat, de extins și de mutat.

Trebuie remarcat sistemul original folosit pentru abordarea ramificațiilor căii (care sunt numai în Y, cu două direcții de ramificare). Acesta se află pe vehicul și constă, în esență, în niște role de ghidare, ce pot fi comandate să se poziționeze - în interiorul boghiului - spre dreapta sau spre stânga, asigurând astfel acroșarea uneia sau alteia dintre șinele de ghidare, aflate pe ambele părți ale căii în zona ramificației, și determinând, în acest fel, intrarea vehiculului pe direcția dorită din ramificație. Un astfel de sistem, care nu implică nici o piesă mobilă pe cale - spre deosebire de macazurile din sistemele convenționale pe șine -, este mult mai rapid și mai fiabil decât sistemele convenționale. În consecință, ramificațiile pot fi abordate cu viteze relativ mari și în deplină siguranță, ceea ce este foarte important pentru un sistem PRT.

### 5.5.3. Sistemul de transport rapid în grup de la Morgantown

Scopul acestui sistem a fost dublu: să servească drept laborator național de cercetări în transporturi, precum și să asigure, în principal, transportul celor 20.000 studenți și 6.000 profesori + personal administrativ din West Virginia University, răspândiți în trei campusuri, dar și locuitorilor din Morgantown (populație: 37.000).

Datele tehnice referitoare la acest sistem sunt următoarele:

- **Sistemul** (în ansamblu). Număr total de vehicule: 71; Număr de stații (pe sens): 5; Lungimea căii (pe sens) 13,9 km; Interval între două vehicule: 15 s; Debit maxim: 3600 călători pe oră și sens; Moduri de operare: programat (la ore de vârf) sau la cerere (în afara orelor de vârf).
- **Vehiculele.** Capacitate: 8 călători pe scaune, 13 călători în picioare; Viteză maximă: 48 km/h; Cutia: din fibră de sticlă; Masa vehiculului gol: 3970 kg; Lungime: 5,1 m; Lățime: 2 m; Numărul roților: 4; Tipul roților: pneumatice; Suspensie: pe burduf de aer; Motor de tracțiune: rotativ, asincron trifazat, 51 kW; Alimentare: de la linia de contact, 575 V c.c.

- **Calea.** Tipul: dublă (una pe fiecare sens), pe estacadă (65%) și la nivelul solului (35%); Construcția: beton armat (65%) și oțel; Rampa maximă: 10%; Raza minimă a curbelor: 10 m; Încălzirea: cu soluție de etilen glicol-apă, circulând prin conducte aflate la baza căii.

În Fig. 5.5, sunt prezentate două fotografii, evidențiind alura vehiculelor și a căii, iar Fig. 5.6 ilustrează una dintre stațiile sistemului.

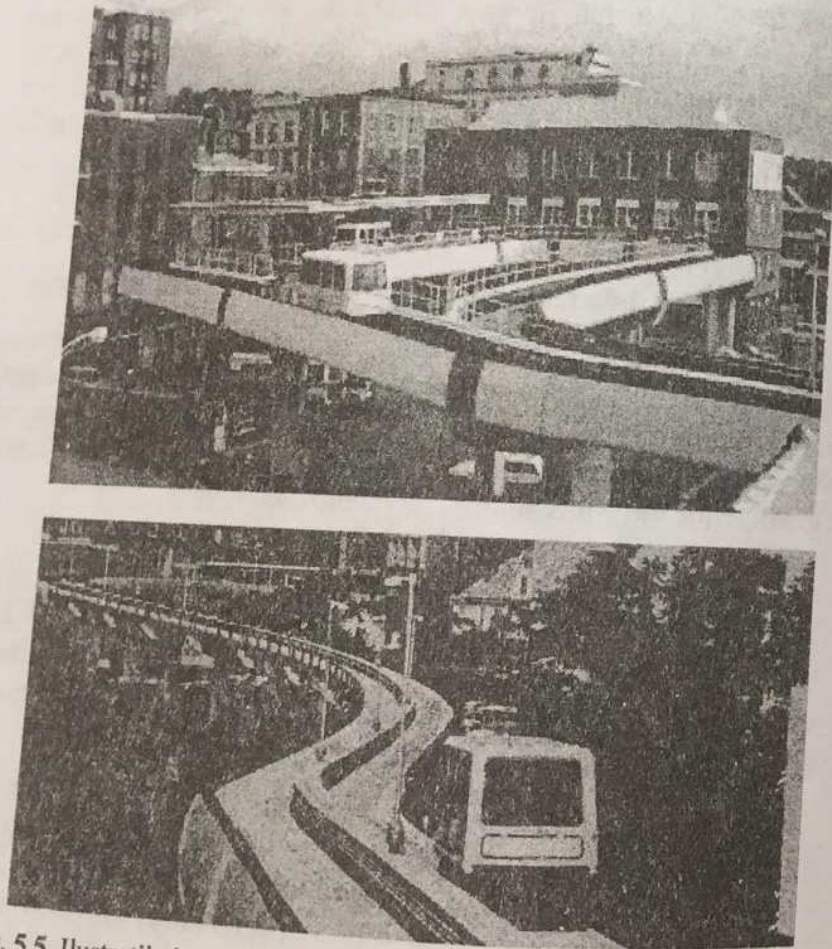


Fig. 5.5. Ilustrații ale vehiculelor și căii sistemului de transport rapid de la Morgantown.

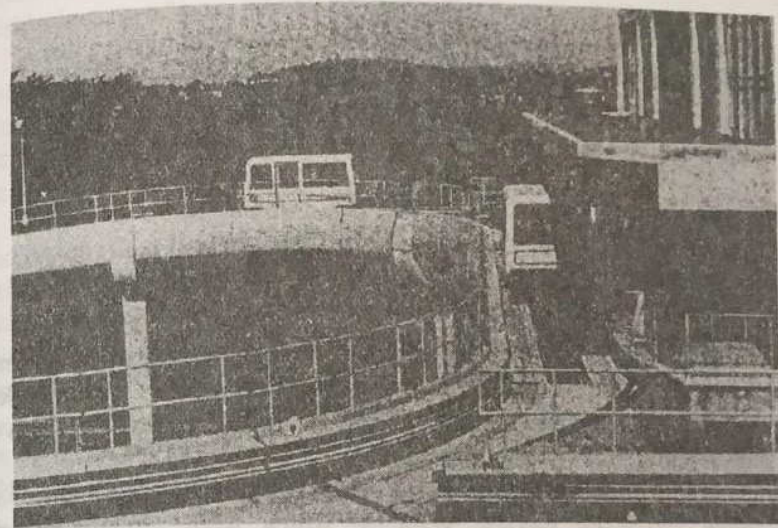


Fig. 5.6. Exemplu de stație a sistemului de transport rapid de la Morgantown.

## Abstract

In recent years, attempts to develop new means of efficient, pollution-free transportation have led to considerable world-wide interest in some electric vehicles whose history is more or less old, but technological problems have not allowed their coming into current operation.

This book is intended to present the actual status of development of some unconventional terrestrial electric vehicles, which have already begun to proliferate or have big chances to proliferate in the near future. It is based on a large scientific documentation, as well as on the results of some own research works developed at the "Politehnica" University of Bucharest.

In Chapter 1, one presents some general problems of the electric vehicles, which aim at defining the basic terminology used in electric traction, recalling some specific magnitudes and relations for various types of vehicles, and justifying some solutions adopted in the design of the present and future electric vehicles.

Chapter 2 deals with the main unconventional electric vehicles on pneumatic tires that are of interest: road electric vehicles (essentially, electric cars and buses), metros on pneumatic tires, and monorail vehicles.

In the case of the electric cars/buses, one gives details concerning the traction electric motors and their controls - both those ones which have been used so far (mainly, DC motors) and long-term ones (induction motors, permanent-magnet synchronous motors, switched reluctance motors) -, solutions for the torque transmission from motors to wheels (emphasizing also the in-wheel-motor solutions, and the various solutions for the electric differential), and, compulsorily, electrochemical generators (batteries and fuel cells) - present and long-term ones -, the viability of the all-electric cars/buses being given by these generators. One analyzes the main solutions for hybrid-electric cars/buses as well; the flywheel system is only tangentially mentioned, as the chances for

the future development of such a system are small, as soon as the other systems of hybrid-electric vehicles and all-electric vehicles will evolve.

In the case of the metros on pneumatic tires and monorail vehicles, one presents only the specific operating and constructive elements (examples of vehicle realizations included), without detailing the electrical drive schemes, as the latter do not have - essentially - peculiarities (they are similar to the schemes known for other electric vehicles).

Chapter 3 treats the high-speed electric vehicles (trains) with wheel-to-road adhesion. One presents the main problems implied by the construction and operation of such trains, which run at over 200 km/h, and one analyzes - especially from the viewpoint of the power electrical schemes and performances achieved - the most important realizations in the field: the *Shinkansen* Japanese train and the *TGV* French train (with its various solutions).

Chapter 4 deals with the adhesion-free electric vehicles, namely: vehicles driven by linear electric motors. Other types of adhesion-free vehicles are either already conventional vehicles - such as cable-driven vehicles (cable cars, cable chairs, funiculars; an exception is represented by the famous cable car of San Francisco, which is - in a way - an unconventional vehicle, but its chances to proliferate are small) - or of restricted interest (e.g. propeller-driven and rack-and-pinion vehicles). One presents various types of linear electric motors, with their constructive and operating characteristics, as well as various solutions for suspension and guidance of the vehicles equipped with such motors. One gives examples of vehicles having wheel-based, air-cushion-based, and magnetic suspension and guidance. For the high speed trains with magnetic suspension/guidance, one carries out an analysis of the main technical-economical aspects, in a comparison of these trains to other types of transportation means.

Chapter 5 is dedicated to some special rapid transit systems, namely: systems of "horizontal lift" type. One discusses the necessity and structure of these systems, in the context of the present problems of the transit systems. Also, one analyzes the possibilities to design the vehicles of such systems, and various implications the utilization of these systems could have. One gives some examples (technical characteristics included) of rapid transit systems of "horizontal lift" type which have been or are to be realized.

The book is hoped to be useful to all those who are interested in the electric vehicles of the future, and especially to the researchers, engineers, university teachers, as well as to the senior students in pursuit of knowledge relating to unconventional vehicles.