



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2016

**Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky /
Katedra elektromechaniky a výkonové
elektroniky**

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 056 - 2016

HYBRIDNÍ POHON S PLANETOVOU PŘEVODOVKOU

PRACOVNÍ REŽIMY ELEKTRICKÝCH MOTOR / GENERÁTORŮ

Řešitel: Karel Zeman

Počet stran: 34

Datum vydání: Září 2016

Anotace

V předkládané studii je popisován hybridní pohon, který je složen z těchto hlavních částí: Spalovací motor, planetová převodovka, 2 elektrické motor/generátory, baterie. Podrobně je popsána činnost motorgenerátorů při všech pracovních režimech pohonu. Řídící algoritmy motorgenerátorů jsou převzaty z archivu RICE.

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ÚVOD | 4 |
| 2 | STRUKTURNÍ SCHÉMA POHONU | 5 |
| 3 | JEDNOTLIVÉ BLOKY POHONU | 6 |
| 3.1 | Planetová převodovka | 6 |
| 3.1.1 | Odvození převodů..... | 6 |
| 3.1.2 | Vlastnosti planetové převodovky, využívané hybridním pohonem..... | 7 |
| 3.2 | Elektrická část pohonu..... | 9 |
| 3.2.1 | Baterie s pulsním měničem napětí | 9 |
| 3.2.2 | Pohon se synchronním motorem s vektorovým řízením | 10 |
| 3.2.3 | Pohon s asynchronním motorem s vektorovým řízením | 11 |
| 3.2.4 | Tok výkonu od spalovacího motoru na hnací hřídel | 12 |
| 4 | PRACOVNÍ REŽIMY | 13 |
| 4.1 | Vyšší otáčky spalovacího motoru, menší rychlost n_1 , dobíjení baterie | 14 |
| 4.2 | „Přímý“ záběr – $\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1$ | 15 |
| 4.3 | Vysoká rychlost vozidla, menší otáčky spal. motoru | 16 |
| 4.4 | Maximální výkon spalovacího i elektrického motoru E1 | 17 |
| 4.5 | Maximální dobíjení baterie..... | 18 |
| 4.6 | Jízda pouze na elektrický pohon..... | 19 |
| 4.7 | Plachtění | 19 |
| 4.7.1 | Spalovací motor – volnoběh..... | 19 |
| 4.7.2 | Spalovací motor bez paliva | 19 |
| 4.8 | Brzdění..... | 20 |
| 4.9 | Zpátečka..... | 21 |
| 4.9.1 | Couvání pomocí elektromotoru E1 | 21 |
| 4.9.2 | Couvání pomocí spalovacího motoru | 21 |
| 4.10 | Start spalovacího motoru | 22 |
| 5 | PRINCIPIÁLNÍ FUNKCE REGULAČNÍCH ALGORITMŮ..... | 23 |
| 5.1 | Jízda s dobíjením baterie..... | 23 |
| 5.2 | Jízda s maximálním využíváním E1 | 24 |
| 6 | ROZJEZD VOZIDLA S PLYNULE MĚNITELNÝM PŘEVODEM..... | 25 |
| 7 | VELIČINY POHONU V ZÁVISLOSTI NA OTÁČKÁCH HNACÍHO HŘÍDELE | 26 |
| 7.1 | Spalovací motor pracuje v oblasti vyšších n_1 s maximálním výkonem – nabitá baterie se nevyužívá..... | 27 |
| 7.2 | Třetina výkonu spalovacího motoru využívána k nabíjení baterie | 28 |
| 7.3 | Maximální zrychlení vozidla – plné využívání všech motorů. | 28 |
| 7.4 | Spalovací motor pracuje stále s malými otáčkami – nabitá baterie | 30 |
| 8 | OPTIMÁLNÍ PARAMETRY POHONU..... | 31 |
| 8.1 | Spalovací motor..... | 31 |
| 8.2 | Planetová převodovka | 31 |
| 8.3 | Motor / generátor E2..... | 31 |
| 8.4 | Motor / generátor E1..... | 32 |
| 9 | ZÁVĚR - SROVNÁNÍ HYBRIDNÍHO POHONU S POHONY BĚŽNÝMI..... | 33 |

1 Úvod

V předkládané studii je popisován hybridní pohon, který je složen z těchto hlavních částí: Spalovací motor, planetová převodovka, 2 elektrické motor/generátory, baterie. Pohon je výjimečný tím, že „elektrická část“ pohonu jednak snižuje spotřebu paliva spalovacího motoru (to je hlavní funkce každého hybridního pohonu), jednak spolu s planetovou převodovkou plní funkci automatické bezestupňové převodovky (je označována e-CVT).

Hybridní pohony s planetovou převodovkou využívá zejména firma Toyota.

V motorických časopisech bývá hybridní pohon Toyoty popisován zjednodušeně a neúplně, popisy často obsahují mnoho polopravd.

- První elektrický stroj (E1) – je popisován jako motor, využívaný jako pomocník spalovacího motoru při jízdě a jako generátor při brzdění.
- Druhý elektrický stroj (E2) – je popisován jako generátor, využívaný k dobíjení baterie při jízdě a jako motor při startu spalovacího motoru.
- Často je převodovka e-CVT zaměňována s variátorovou převodovkou CVT.

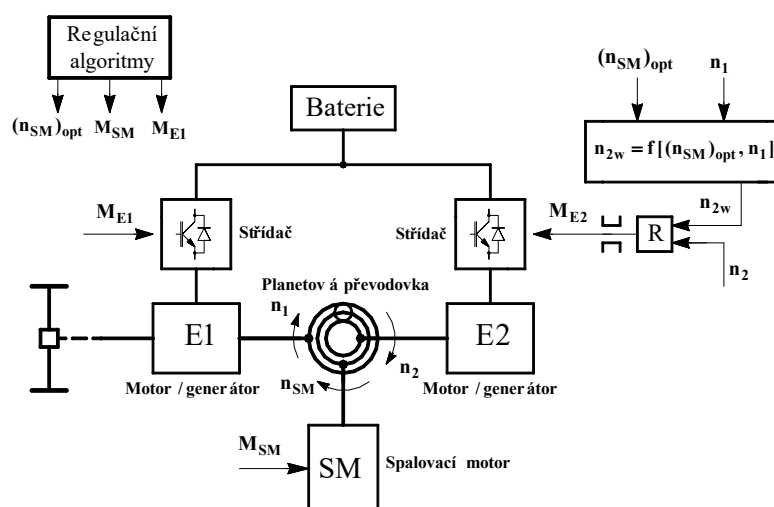
Ve skutečnosti je činnost pohonu složitější

- Planetová převodovka má 3 výstupní hřídele (kap.3.1). S prvním je spojen motor/generátor E1 s hnacím hřídelem, s druhým motor/generátor E2, se třetím spalovací motor.
Dané otáčky 2 hřídelů jednoznačně určují otáčky 3. hřídele (kap. 3.1.2).
⇒ Nastavováním otáček motor/generátoru E2 lze tak plynule měnit převod mezi spalovacím motorem a hnacím hřídelem (kap. 2). Při všech jízdních režimech proto může spalovací motor pracovat s optimálními otáčkami.
- Tok energie ve vybraných jízdních režimech:
 - Nízká rychlost auta, vysoké otáčky spalovacího motoru (kap. 4.1).
Aby měl E2 pro tento pracovní režim potřebné otáčky, musí brzdit příslušný hřídel planetové převodovky. Proto pracuje E2 jako generátor, který dodává energii přes E1 (ten pracuje jako motor) na hnací hřídel. V tomto pracovním režimu může E2 také dobíjet baterii.
 - Vysoká rychlost auta (po rovině), malé otáčky spalovacího motoru (kap. 4.3).
Aby měl E2 pro tento pracovní režim potřebné otáčky, musí roztáčet hřídel planetové převodovky v opačném smyslu. Proto E2 pracuje jako motor, energii odebírá z E1 (ten pracuje jako generátor), nebo z baterie.
- Pohon může pracovat v režimech:
 - Jízda s „elektrickou výpomocí“, jízda s nenastartovaným spalovacím motorem, „plachtění na neutrálu“, brzdění rekuperací, couvání – vše bez dalších převodovek, spojek, hydraulických měničů apod. (kap. 4.7, 4.8, 4.9).

Předkládaná studie je zaměřena na rozbor činnosti zejména elektrické části pohonu. Rozbor činnosti v uvedených pracovních režimech je prováděn prostřednictvím fyzikálních úvah a počítačových simulací. K simulacím jsou využívány imaginární trakční motory s parametry zvolenými tak, aby jejich momentové charakteristiky přibližně odpovídaly Toyotě Prius 2016. Řídící algoritmy elektrické části pohonu jsou převzaty z archivu RICE / Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky ZČU Plzeň.

V hybridních automobilech Toyota jsou používány synchronní motory s permanentními magnety, lze však využívat i motory asynchronní. V předkládané studii jsou popsány obě možnosti.

2 Strukturální schéma pohonu



Základní funkce:

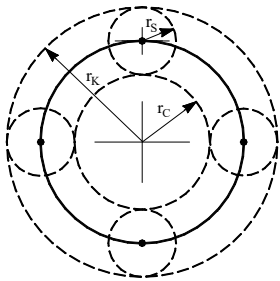
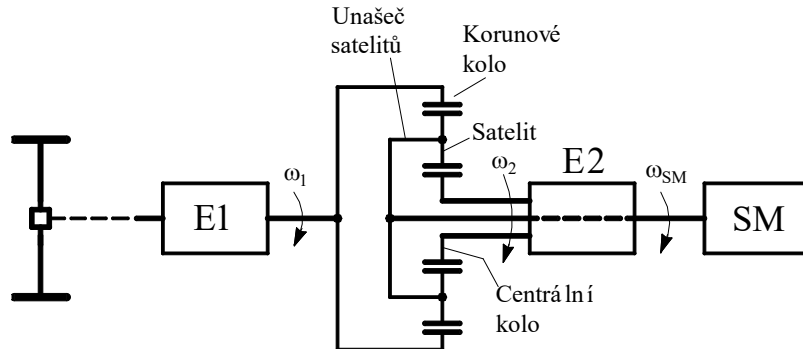
Dále uvedená fakta jsou uvedena bez důkazů. Podrobný popis je uveden v označených kapitolách.

- Baterie může být dobíjena z venkovního zdroje. Pokud však baterie neumožňuje delší jízdu s nenastartovaným spalovacím motorem (např. kapacita 1,5 kWh), nabíjení z venkovního zdroje se nevyužívá.
- Planetová převodovka (je zakreslena schematicky, skutečné znázornění v kap. 3.1.)
 - (Planetová převodovka + E1 + E2) \approx automatická bezestupňová převodovka. Převod n_{SM} / n_1 lze měnit prostřednictvím otáček n_2 (viz kap. 3.1.1).
 - V režimech - jízda čistě na elektrickou energii, brzdění rekuperací a „plachtění na neutrálu“ - umožňuje planetová převodovka provoz pohonu s nulovými otáčkami SM (viz kap. 4.8. 4.7). Mezi SM a E1 nemusí být umístěna spojka.
- Motor / generátor E1 ... kap. 3.2
 - Součást automatické bezestupňové převodovky ... kap. 3.1.2, 4.1, 4.3. Umožňuje dodávání (nebo odebírání) výkonu do E2, tak aby E2 měl vhodné otáčky.
 - Odebírá energii z baterie a dodává ji na hnací hřídel
 - Ve spolupráci se SM ... kap. 4.1
 - Bez spolupráce se SM – jízda čistě na elektrickou energii ...kap. 0
 - Dodává energii do baterie
 - Při brzdění rekuperací ... kap. 4.8
 - Při jízdě v režimu 3 ... kap. 4.3
- Motor / generátor E2 ... kap. 3.2
 - Udržuje otáčky n_2 na takové hodnotě, při které jsou otáčky SM optimální (funkce automatické bezestupňové převodovky ... viz kap.3.1.2).
 - Pokud je při udržování otáček výkon odebírán z hřídele převodovky, lze tímto výkonem dobíjet baterii, nebo se výkon dodává přes E1 na hnací hřídel ... kap. 4.1
 - Pokud se při udržování otáček musí výkon dodávat na hřídel převodovky, odebírá se tento výkon z baterie, nebo z E1 ... kap. 4.3
 - Při pracovních režimech - jízda bez SM, brzdění a „plachtění“ - pracuje E2 s nulovým momentem. Planetová převodovka roztočí hřídel E2 na takové otáčky, při kterých jsou otáčky SM nulové ... kap. 0, 4.7, 4.8
 - E2 je využíván také jako startér ... kap. 4.10

3 Jednotlivé bloky pohonu

3.1 Planetová převodovka

3.1.1 Odvození převodů



Z_k ... počet zubů korunového kola

Z_c ... počet zubů centrálního kola

ω ... úhlová rychlost

n ... otáčky

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, [\omega] = 1/\text{sec}, [n] = \text{ot/min}$$

Zabrzděné centrální kolo:

Satelit se pootočí o úhel $\alpha \Rightarrow$

- Unášeč satelitů se pootočí o $\beta = \alpha \cdot \frac{r_s}{r_c}$
- Korunové kole se pootočí
 - vlivem otáčení satelitů o $\alpha \cdot \frac{r_s}{r_k}$
 - vlivem otáčení unášeče o $\alpha \cdot \frac{r_s}{r_c}$
 - celkově o $\delta = \alpha \cdot \left(\frac{r_s}{r_k} + \frac{r_s}{r_c} \right) = \alpha \cdot \frac{r_s(r_k + r_c)}{r_k \cdot r_c}$

$$\frac{\omega_{us}}{\omega_k} = \frac{\beta}{\delta} = \frac{r_k}{r_k + r_c} = \frac{Z_k}{Z_k + Z_c} = p_1$$

$$\omega_{us} = \omega_k \cdot p_1$$

Zabrzděné korunové kolo:

Satelit se pootočí o úhel $\alpha \Rightarrow$

- Unášeč satelitů se pootočí o $\beta = \alpha \cdot \frac{r_s}{r_k}$
- Centrální kole se pootočí
 - vlivem otáčení satelitů o $\alpha \cdot \frac{r_s}{r_c}$
 - vlivem otáčení unášeče o $\alpha \cdot \frac{r_s}{r_k}$
 - celkově o $\delta = \alpha \cdot \left(\frac{r_s}{r_c} + \frac{r_s}{r_k} \right) = \alpha \cdot \frac{r_s(r_k + r_c)}{r_k \cdot r_c}$

$$\frac{\omega_{us}}{\omega_c} = \frac{\beta}{\delta} = \frac{r_c}{r_k + r_c} = \frac{Z_c}{Z_k + Z_c} = p_2$$

$$\omega_{us} = \omega_c \cdot p_2$$

Zabrzděný unášeč satelitů:

- Satelit se pootočí o úhel α
- Korunové kolo se pootočí o $\varepsilon_k = \alpha \cdot r_s / r_k$
- Centrální kolo se pootočí (obráceně) o $\varepsilon_c = -\alpha \cdot r_s / r_c$

$$\Rightarrow \frac{\omega_k}{\omega_c} = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_c} = -\frac{r_c}{r_k} = -\frac{Z_c}{Z_k}, \quad \frac{\omega_c}{\omega_k} = -\frac{Z_k}{Z_c}$$

3.1.2 Vlastnosti planetové převodovky, využívané hybridním pohonem

Funkce bezestupňové převodovky

Dané otáčky 2 hřídelů jednoznačně určují otáčky 3. hřídele dle vztahu

$$\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1 + \omega_2 \cdot p_2 \quad (\text{viz kap. 3.1.1} \dots \omega_{us} = \omega_{SM}, \omega_k = \omega_1, \omega_c = \omega_2)$$

Realizace nastavení optimálního převodu ω_{SM} / ω_1 :

- Dle okamžité ω_1 a požadovaného zrychlení se vyhodnotí optimální otáčky SM ... $(\omega_{SM})_{opt}$
- Prostřednictvím E2 se nastaví otáčky centrálního kola $\omega_2 = \frac{1}{p_2} \cdot (\omega_{SM})_{opt} - \frac{p_1}{p_2} \cdot \omega_1$
- „Nastavování“ požadovaných otáček ω_2 realizuje E2 takto :
 - Při nulovém momentu E2 roztáčí spalovací motor připojený k unášeči satelitů centrální kolo do vysokých otáček ve shodném smyslu ... $\omega_2 > 0$.
 - Při požadovaných konkrétních $\omega_2 > 0$ musí E2 brzdit hřídel centrálního kola. Proto pracuje E2 jako generátor, výkon $M_2 \cdot \omega_2$ dodává do E1, nebo do baterie.
 - Při požadovaných konkrétních $\omega_2 < 0$ musí E2 roztáčet hřídel centrálního kola do opačných otáček. E2 pracuje jako motor, který odebírá výkon $M_2 \cdot \omega_2$ z E1, nebo z baterie.

Momenty na hřídelích převodovky

$$p_1 = \frac{Z_k}{Z_k + Z_c}$$

$$p_2 = \frac{Z_c}{Z_k + Z_c}$$

- Moment M_{SM} přivedený na hřídel unášeče satelitů vyvolá tečné síly T , kterými působí volně otočný satelit na korunové a centrální kolo.
- Momenty na hřídelích převodovky

$$M_{SM} = 2 \cdot T \cdot r_{us} = 2 \cdot T \cdot \frac{r_k + r_c}{2} = T \cdot (r_k + r_c) \Rightarrow$$

$$M_1 = T \cdot r_k, \quad M_2 = T \cdot r_c$$
- $$M_1 = M_{SM} \cdot \frac{r_k}{r_k + r_c} = M_{SM} \cdot \frac{Z_k}{Z_k + Z_c} = M_{SM} \cdot p_1$$
- $$M_2 = M_{SM} \cdot \frac{r_c}{r_k + r_c} = M_{SM} \cdot \frac{Z_c}{Z_k + Z_c} = M_{SM} \cdot p_2$$

Výkony na hřídelích převodovky

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad [n] = \text{ot} / \text{min}$$

M ... moment, $[M] = \text{Nm}$

$P = M \cdot \omega$... výkon, $[P] = \text{W}$

$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad [\omega] = 1 / \text{sec}, \quad [n] = \text{ot} / \text{min}$

- Znázorněné smysly otáčení hřídelů převodovky a směry toku výkonů vznikají při $\omega_{SM} > \omega_1 \cdot p_1$
- Výkon P_{E2} je využíván k dobíjení baterie, nebo se dodává přes E1 na hnací hřídel.

| | |
|--|--|
| $\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1 + \omega_2 \cdot p_2 \quad \cdot M_{SM}$ $\omega_{SM} \cdot M_{SM} = \omega_1 \cdot M_{SM} \cdot p_1 + \omega_2 \cdot M_{SM} \cdot p_2 =$ $= \omega_1 \cdot M_1 + \omega_2 \cdot M_2$ $P_{SM} = P_1 + P_2$ | $P_k = P_1 + P_{E1}, \quad M_k = \frac{P_1 + P_{E1}}{\omega_1}$ $P_1 = \omega_1 \cdot M_{SM} \cdot p_1, \quad P_2 = \omega_2 \cdot M_{SM} \cdot p_2$ |
|--|--|

3.2 Elektrická část pohonu

Motor / generátory E1, E2 jsou většinou synchronní stroje s permanentními magnety. Méně se využívají asynchronní stroje.

Asynchronní motor je jednodušší (levnější), ale při stejném jmenovitém momentu je těžší.

Důvodem je tato skutečnost:

- *Asynchronní stroj musí vybudit magnetický tok proudem ve statorovém vinutí.*
- *Magnetický tok synchronního stroje je buzen permanentními magnety na rotoru.*

Požadované otáčky (n) obou typů motorů lze nastavovat kmitočtem střídače (f_s), který napájí motor. Pro dvupólové motory platí: $n[\text{ot / sec}] \approx f_s [\text{Hz}]$.

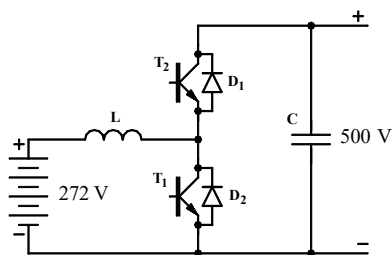
Takto jednoduše řízené motory však mají špatné dynamické vlastnosti (zejména motory synchronní).

Dokonalé dynamické vlastnosti pohonu zajistí řízení střídače, které udržuje vhodnou vzájemnou polohu prostorových vektorů proudu a magnetického toku motoru. Řízení je známé pod názvem „vektorové řízení“. Pohonu s takto řízeným střídačem lze vstupním řídicím signálem zadávat moment motoru. Výhodou (zejména pro trakční pohony) je skutečnost, že maximální moment lze zadávat i v nulových otáčkách.

V následujících kapitolách 3.2.2, 3.2.3 je simulován rozjezd vozidla se synchronním a asynchronním motorem. Parametry obou imaginárních motorů jsou zvoleny tak, aby jejich momentové charakteristiky byly přibližně shodné se synchronním motorem E1 - Toyota Prius 2016. Algoritmy vektorového řízení, využívané při simulacích, jsou převzaty z archivu RICE / Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky ZČU Plzeň.

3.2.1 Baterie s pulsním měničem napětí

Elektrické stroje daného výkonu pracují s menšími ztrátami, pokud jsou napájeny vyšším napětím. Napětí baterie lze zvýšit pulsním měničem stejnosměrného napětí. Měnič umožňuje průchod energie oběma směry.



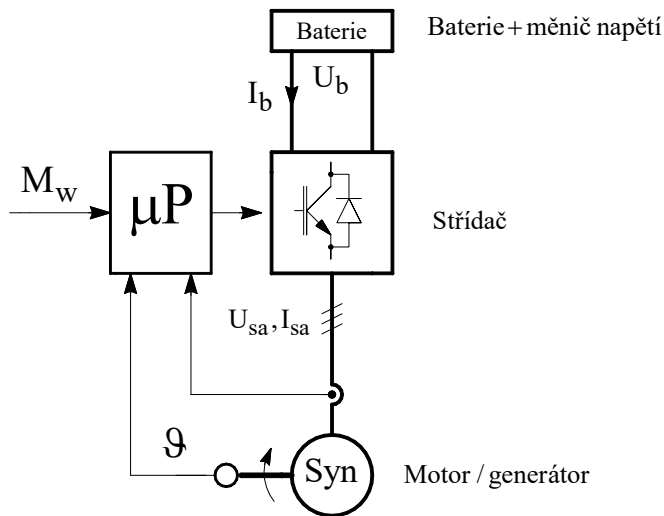
Odběr energie z baterie

- zap. T_1 ... energie z baterie do L
- vyp. $T_1 \rightarrow$ zap. D_1 ... energie z baterie a z L do C a zátěže

Dobíjení baterie

- zap. T_2 ... energie do L a baterie
- vyp. $T_2 \rightarrow$ zap. D_2 ... energie z L do baterie

3.2.2 Pohon se synchronním motorem s vektorovým řízením



M_w ... požadovaný moment

ϑ ... poloha (úhel pootočení) rotoru

M ... moment motoru

P ... výkon motoru

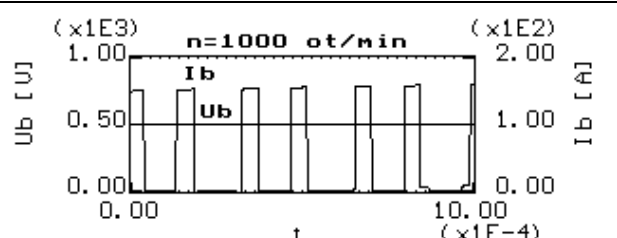
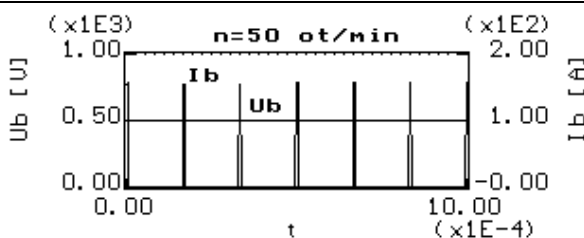
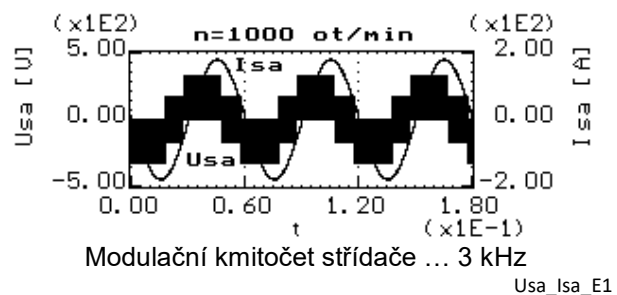
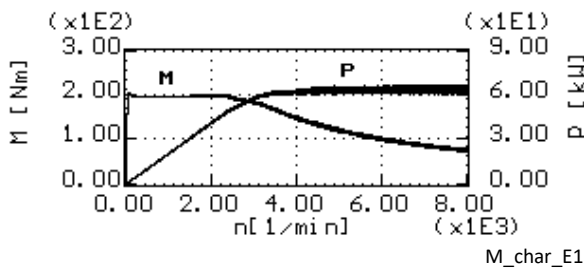
U_{sa}, I_{sa} ... okamžité hodnoty napětí a proudu motoru

I_b ... proud odebíraný střídačem z baterie

n ... otáčky motoru

μP ... počítač pracující dle algoritmů vektorového řízení

„Elektrický“ rozjezd – synchronní E1, maximální proud



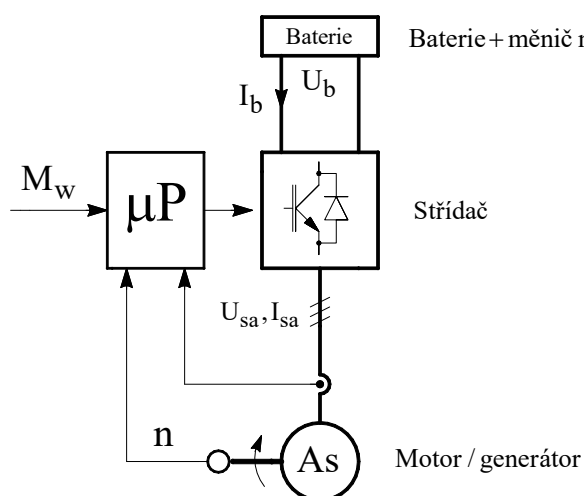
- V oblasti nižších otáček je moment úměrný proudu (při konstantním maximálním proudu je moment konstantní). Napětí střídače je přibližně úměrné otáčkám.
- V oblasti vyšších otáček je napětí střídače konstantní – maximální. S růstem otáček se snižuje výsledný magnetický tok \Rightarrow klesá moment (při konstantním proudu). Výkon motoru je konstantní.
- Střídač odebírá z baterie proud ve tvaru pulsů.

Poznámka

Synchronní motory bez vektorového řízení mají špatné dynamické vlastnosti. Po skokové změně zatěžovacího momentu, nebo po rychlé změně kmitočtu střídače, může nastat tzv. vypadnutí za synchronizmu - točivé magnetické vytvářené proudem ve statorovém vinutí nerotuje synchronně s rotorem. Vznikají velké proudy a motor je nutno odpojit od zdroje.

U pohonu s vektorovým řízením je napětí střídače synchronizováno s úhlem natočení rotoru – viz signál ϑ . Vypadek ze synchronizmu nemůže vzniknout.

3.2.3 Pohon s asynchronním motorem s vektorovým řízením



M_w ... požadovaný moment

M ... moment motoru

P ... výkon motoru

U_{sa}, I_{sa} ... okamžité hodnoty napětí a proudu

I_b ... proud odebíraný střídačem z baterie

n ... otáčky motoru

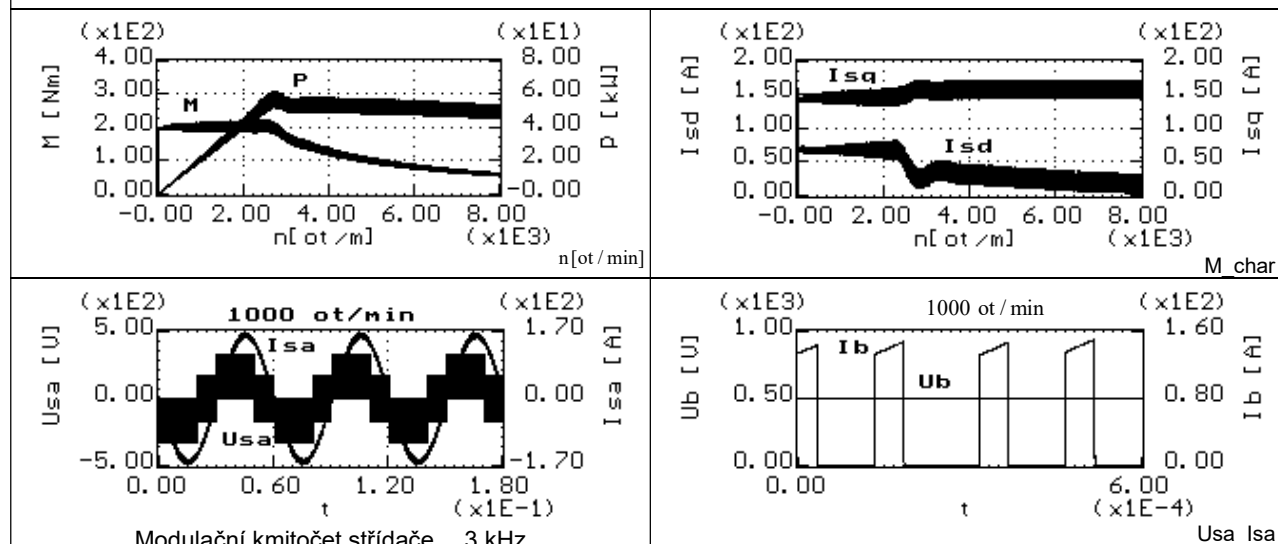
I_{sq} ... „momentová“ složka proudu motoru

I_{sd} ... „magnetizační“ složka proudu motoru

$|I_s| = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}$... amplituda proudu

μP ... počítač pracující dle algoritmu vektorového řízení

„Elektrický“ rozjezd – asynchronní E1, maximální proud



- V oblasti nižších otáček je motor plně nabuzen (maximální magnetizační tok), moment motoru je při konstantním proudu konstantní. Napětí střídače je přibližně úměrné otáčkám.
- V oblasti vyšších otáček je napětí střídače konstantní – maximální. S růstem otáček klesá složka proudu $I_{sd} \Rightarrow$ motor se odbuzuje \Rightarrow klesá moment. Výkon motoru je přibližně konstantní.
- Střídač odebírá z baterie proud ve tvaru pulsů.

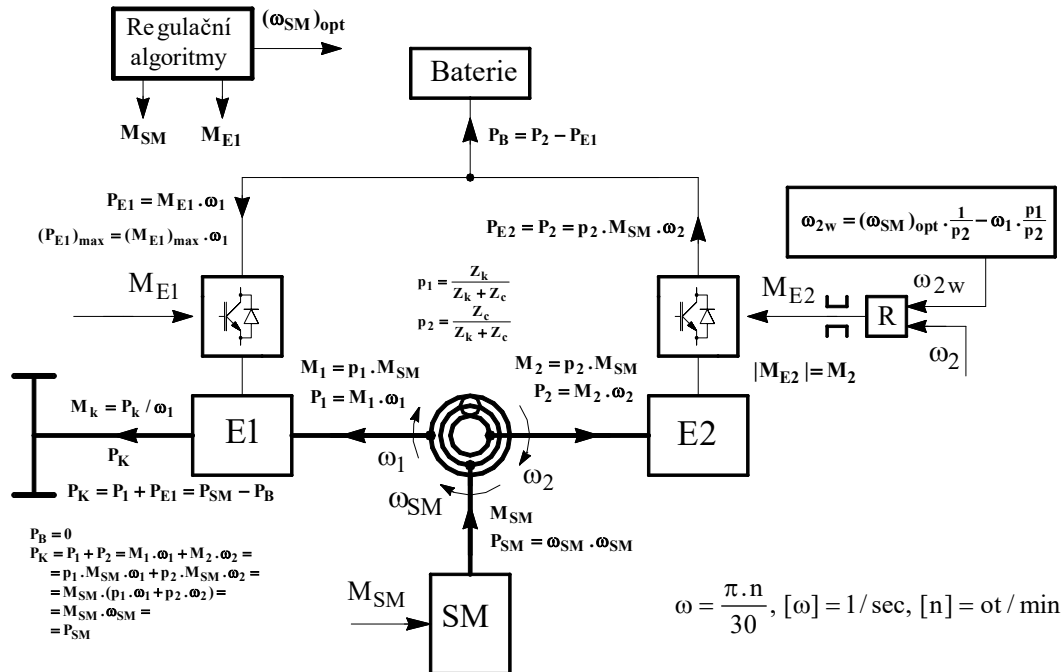
Poznámka:

Asynchronní motor s vektorovým řízením je principiálně srovnatelný se stejnosměrným motorem:

- Složka proudu statoru $I_{sq} \approx$ proudu kotvy ss motoru.
- Složka proudu statoru $I_{sd} \approx$ budicímu proudu ss motoru (v ustáleném stavu.)

3.2.4 Tok výkonu od spalovacího motoru na hnací hřídel

Na následujícím obrázku jsou uvedeny vztahy pro výpočet jednotlivých momentů a výkonů. Šipkami vyznačený směr toku výkonů vzniká při vyšších otáčkách spalovacího motoru ($n_{SM} > n_1 \cdot p_1$). Tok výkonu v jiných pracovních režimech je znázorněn v kap. 4.



Blok „regulační algoritmy“ vyhodnotí optimální otáčky spalovacího motoru $(n_{SM})_{opt}$. Aby $n_{SM} = (n_{SM})_{opt}$, musí být otáčky centrálního kola $n_2 = \frac{1}{p_2} \cdot (n_{SM})_{opt} - \frac{p_1}{p_2} \cdot n_1$ (kap. 3.1.2). Aby E2 rotoval těmito otáčkami, musí být centrální kolo bržděno momentem $|M_{E2}| = M_2$. Tento moment zadá pohonu E2 regulátor R (nejjednodušší vyhodnocení potřebného M_{E2}).

E2 pracuje při $n_{SM} > n_1 \cdot p_1$ v generátorickém režimu ... z hřídele centrálního kola odebírá výkon $|P_{E2}| = |M_{E2}| \cdot \omega_2$. Tímto výkonem se dobíjí baterie, nebo se výkon dodává přes E1 (ten pracuje v motorickém režimu) na hnací hřídel.

Pozn.: Pro větší názornost je moment M_{E2} a výkon P_{E2} uváděn v absolutní hodnotě (zvolené kladné polarity veličin ... kap. 4)

Částečně nabitá baterie

- Vhodný výkon P_B , kterým se nabíjí baterie, se nastaví prostřednictvím velikosti P_{E1}
 $P_B = P_{E2} - P_{E1}$. P_{E1} se zadává prostřednictvím M_{E1} ... kap. 5.1

Pozn.: Hlavně je baterie dobíjena při rekuperativním brzdění motor / generátorem E1

Plně nabitá baterie

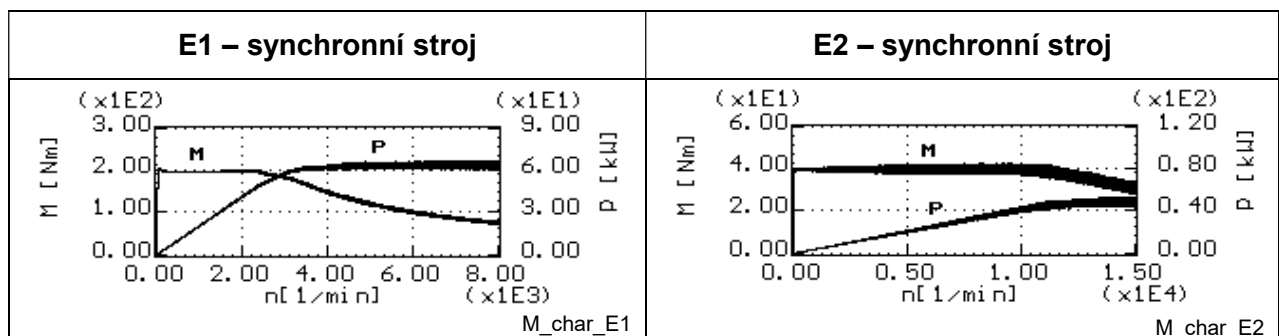
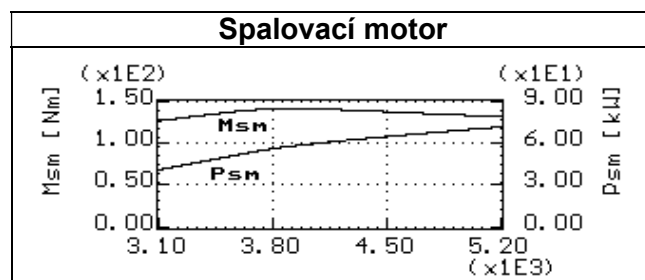
- Při vyšších otáčkách n_1 je celý výkon P_{E2} dodáván přes E1 na hnací hřídel.
- Při malých otáčkách n_1 nemůže celý výkon P_{E2} projít E1, neboť $P_{E1} \leq (M_{E1})_{max} \cdot \omega_1$. Přebytek výkonu $P_{E2} - P_{E1}$ musí odebrat baterie. Pokud dobíjení není vhodné, musí se při malých n_1 snížit výkon spalovacího motoru P_{SM} .

4 Pracovní režimy

V následujících podkapitolách jsou popsány a simulovány vybrané pracovní režimy hybridního pohonu se zážehovým motorem (parametry shodné s Toyotou Prius 2016) a s imaginárními elektrickými synchronními motory (trakční motory s parametry upravenými tak, aby jejich momentové charakteristiky přibližně odpovídaly motorům v Toyotě Prius).

Dostupné údaje o motor / generátorech Toyota Prius:

- E1 ... dostupné parametry jsou dostačující pro přibližné určení průběhu momentové charakteristiky
- E2... jsou udávány pouze maximální otáčky. Průběh momentové charakteristiky je navržen rozbohem činnosti uvedeným v kap. 8.3 .



Planetová převodovka: Zvolená hodnota $Z_k/Z_c = 2.5$

(Hodnota Z_k/Z_c realizovaná v Toyotě Prius není v dostupných materiálech publikovaná).

Zvolené polarity veličin v kap. 4 :

Otáčky

- Kladné otáčky ... viz následující obrázek (kap. 4.1)

Výkon

- Kladný výkon – motorický režim (motor dodává výkon na hřídel převodovky)
- Záporný výkon – generátorický režim (motor odebírá výkon z hřídele převodovky)

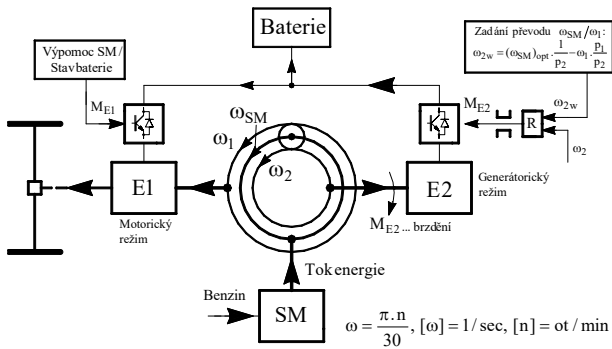
Moment

- Kladný moment – motor pohání příslušný hřídel převodovky při kladných otáčkách, nebo brzdí při záporných otáčkách.
- Záporný moment – motor brzdí příslušný hřídel převodovky při kladných otáčkách, nebo pohání při záporných otáčkách.

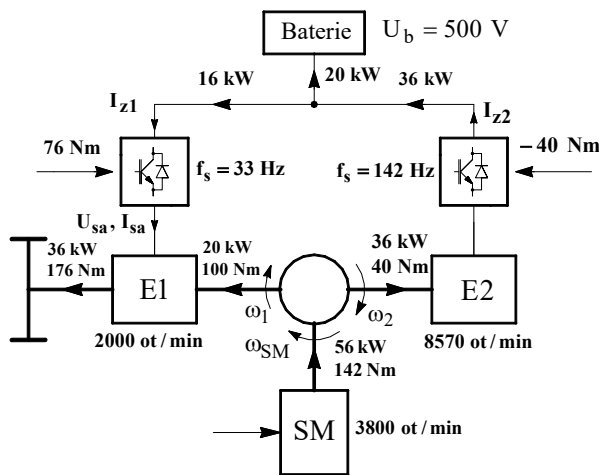
Stejnoseměrný proud měničů

- Kladný proud – motorický režim

4.1 Vyšší otáčky spalovacího motoru, menší rychlost n_1 , dobíjení baterie

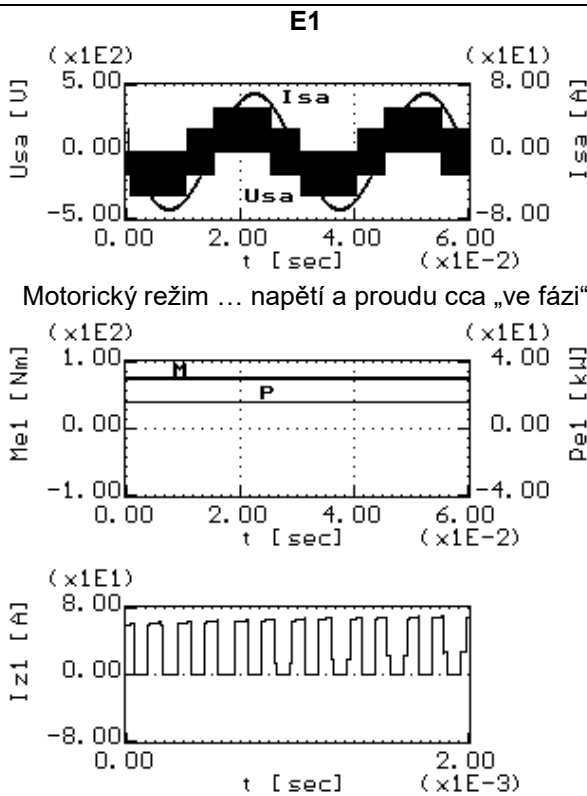


- Spalovací motor SM roztáčí korunné i centrální kolo ve stejném smyslu. Otáčky jednotlivých kol jsou určeny vztahem: $\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1 + \omega_2 \cdot p_2$
- Prostřednictvím E2 se centrální kolo brzdí momentem M_{E2} tak, aby při okamžitých otáčkách korunního kola ω_1 byly otáčky SM optimální ... $\omega_2 = (\omega_{SM})_{opt} \cdot \frac{1}{p_2} - \omega_1 \cdot \frac{p_1}{p_2}$
- Energii získanou brzděním centrálního kola lze využít k dobíjení baterie, nebo prostřednictvím E1 dodat na hnací hřídel.

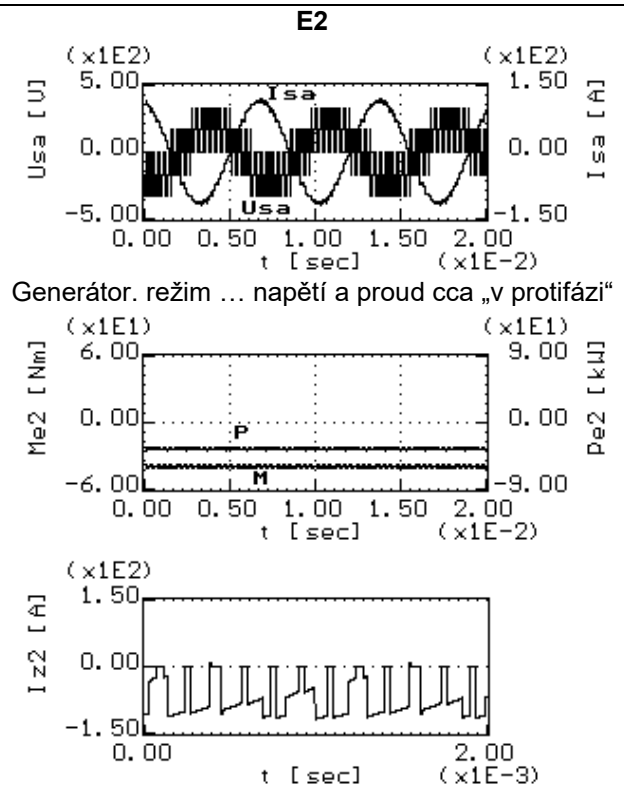


Simulovaný pracovní režim:

- $n_1 = 2000$ ot/min, $n_{SM} = 3800$ ot/min \Rightarrow $n_2 = +8570$ ot/min
- $M_{SM} = 142$ Nm $\Rightarrow M_2 = M_{SM} \cdot p_2 = 40$ Nm
- Ustálený stav po dosažení požadovaných otáček ... $M_{E2} = -40$ Nm .
- E2 brzdí centrální kolo ... z hřídele odebírá výkon $P_{E2} = M_{E2} \cdot \omega_2$
 $P_{E2} = (-40) \cdot \frac{\pi \cdot (+8570)}{30} \cdot \frac{1}{1000} = -36$ kW
- Baterie vyžaduje dobíjení ... moment M_{E1} zvolen tak, aby E1 odebíral pouze $P_{E1} = 16$ kW .
- $M_1 = M_{SM} \cdot p_1 = 100$ Nm, $P_1 = M_1 \cdot \omega_1$
 $P_1 = 100 \cdot \frac{\pi \cdot 2000}{30} \cdot \frac{1}{1000} = 20$ kW

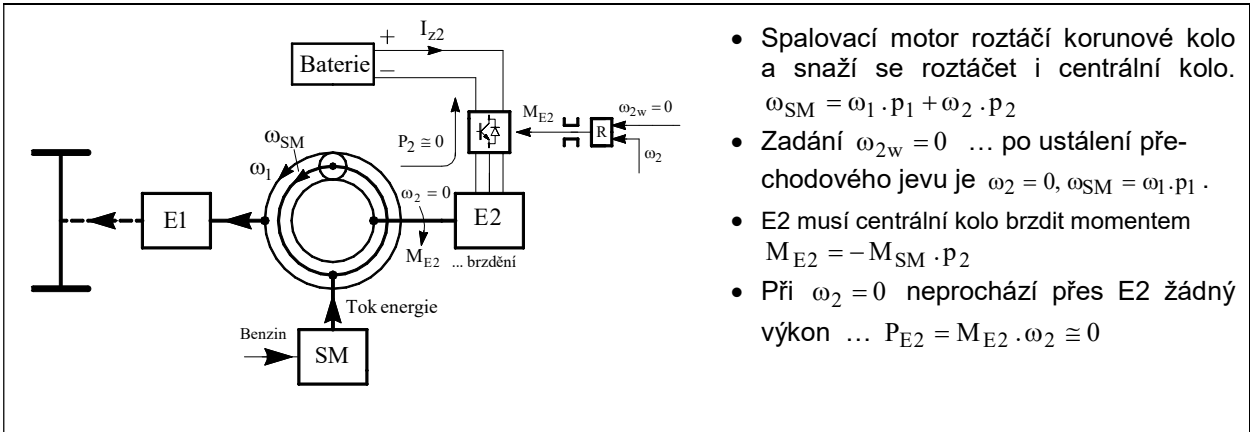


Rez_1_E1

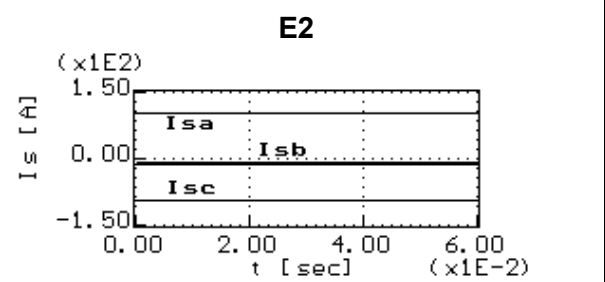
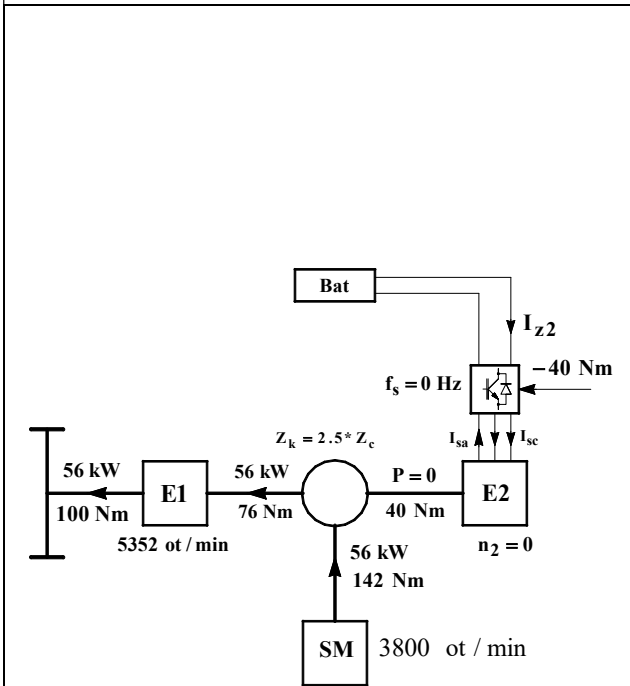


Rez_1_E2

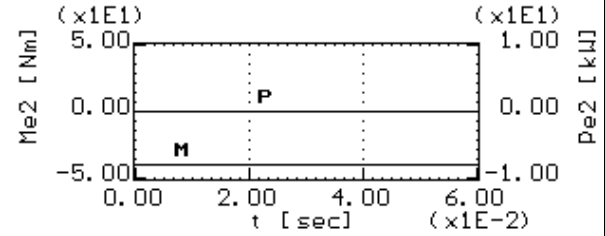
4.2 „Přímý“ záběr – $\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1$



- Spalovací motor roztáčí korunové kolo a snaží se roztáčet i centrální kolo.
 $\omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1 + \omega_2 \cdot p_2$
- Zadání $\omega_{2w} = 0$... po ustálení přechodového jevu je $\omega_2 = 0, \omega_{SM} = \omega_1 \cdot p_1$.
- E2 musí centrální kolo brzdít momentem $M_{E2} = -M_{SM} \cdot p_2$
- Při $\omega_2 = 0$ neprochází přes E2 žádný výkon ... $P_{E2} = M_{E2} \cdot \omega_2 \cong 0$



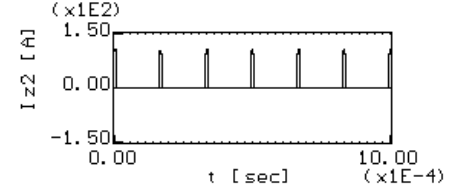
- Motor / generátorem E2 protékají v popisovaném režimu stejnosměrné proudy (kmitočet střídače je nulový), které vytvářejí moment M2.



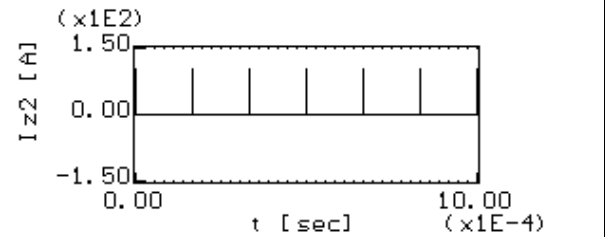
- Moment M_{e2} je záporný, neboť E2 brzdí hřídele centrálního kola (viz zvolené kladné hodnoty veličin).
- Z hřídele centrálního kola nepřichází do E2 žádný výkon, neboť $n_2 = 0$.
- V motoru vznikají Jouleovy ztráty (statorem protékají zřetelné proudy I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}).
- Ztrátový výkon dodává baterie ve tvaru velmi úzkých pulsů proudu I_{z2} .

Poznámka:

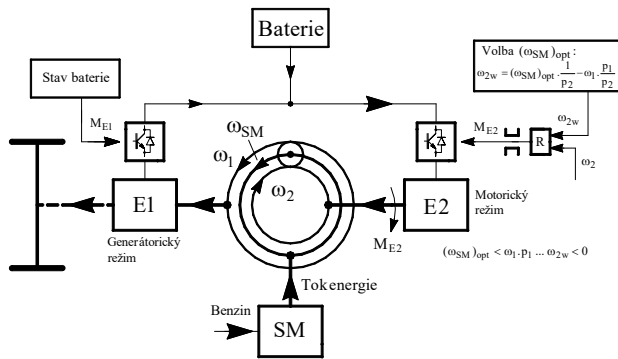
Motor s velkými ztrátami (10% P_N)



Rez_2_E2

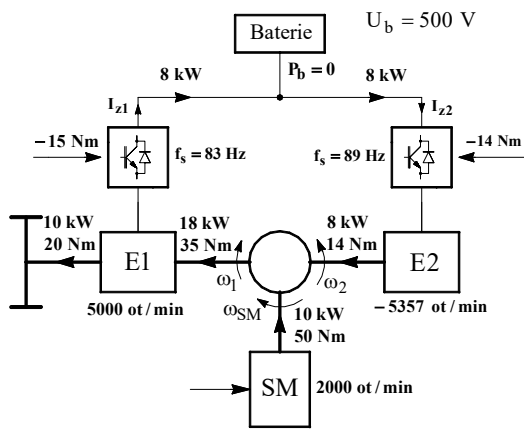


4.3 Vysoká rychlost vozidla, menší otáčky spal. motoru



- Spalovací motor roztáčí korunové kolo a snaží se roztáčet i centrální kolo kladným směrem.
 - Vysoké n_1 , malé $n_{SM} \Rightarrow$

$$\omega_2 = (\omega_{SM})_{opt} \cdot \frac{1}{p_2} - \omega_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} < 0 \dots E2 \text{ musí otáčet centrálním kolem obráceně.}$$
 - Smysl momentu $M_2 = M_{SM} \cdot p_2$ je stejný jako v 4.1, při záporných otáčkách je tok výkonu obrácený.
 - Do E2 se musí dodávat výkon. E2 odebírá výkon z E1, nebo z baterie.
 - Při delší jízdě v popisovaném režimu musí E1 pracovat jako generátor a dodávat výkon do E2.
- Pozn.: Krátkodobě může E1 pracovat jako motor a odebírat také výkon z baterie.*

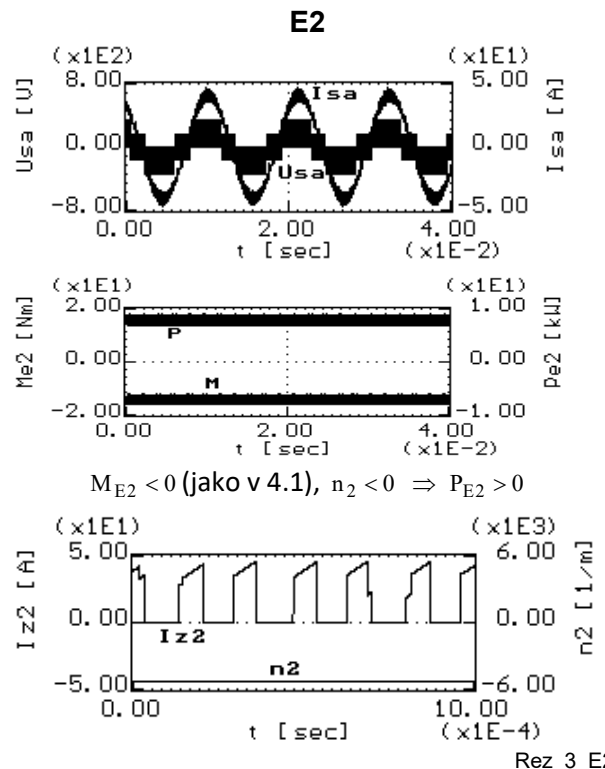
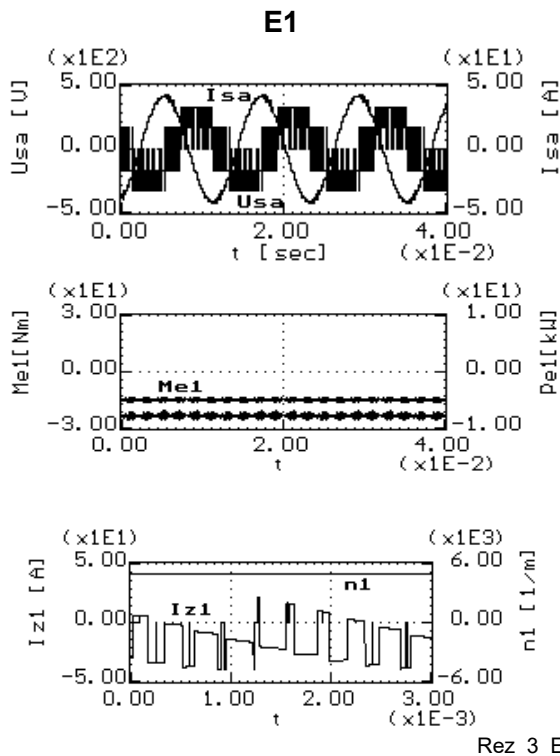


Simulovaný pracovní režim:

- Baterie se nevyužívá
- $n_1 = 5000 \text{ ot/min}$, $n_{SM} = 2000 \text{ ot/min} \Rightarrow n_2 = -5357 \text{ ot/min}$
- $M_{SM} = 50 \text{ Nm} \Rightarrow M_2 = M_{SM} \cdot p_2 = 14 \text{ Nm}$
Ustálený stav po dosažení požadovaných otáček $M_{E2} = -14 \text{ Nm}$.
- E2 roztáčí centrální kolo do záporných otáček ... na hřídel dodává výkon $P_{E2} = M_{E2} \cdot \omega_2$

$$P_{E2} = (-14) \cdot \frac{\pi \cdot (-5357)}{30} \cdot \frac{1}{1000} = +8 \text{ kW}$$
- $M_1 = M_{SM} \cdot p_1 = 35 \text{ Nm}$, $P_1 = M_1 \cdot \omega_1$

$$P_1 = 35 \cdot \frac{\pi \cdot 5000}{30} \cdot \frac{1}{1000} = 18 \text{ kW}$$

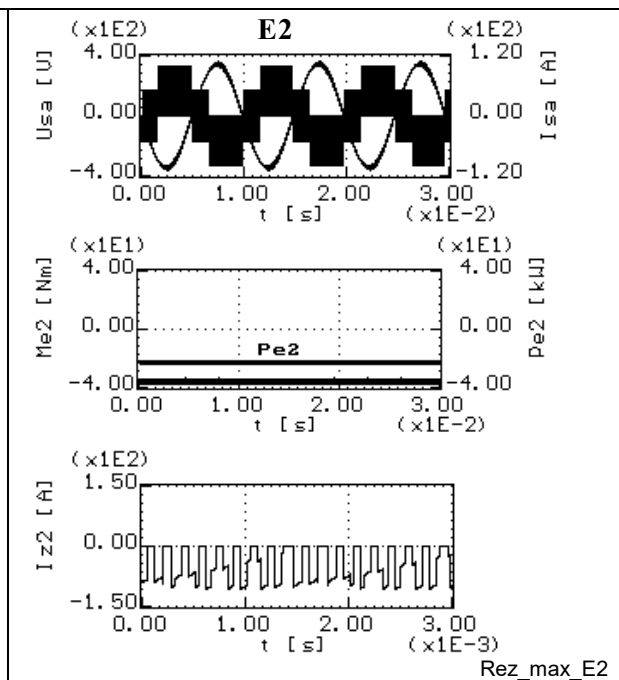
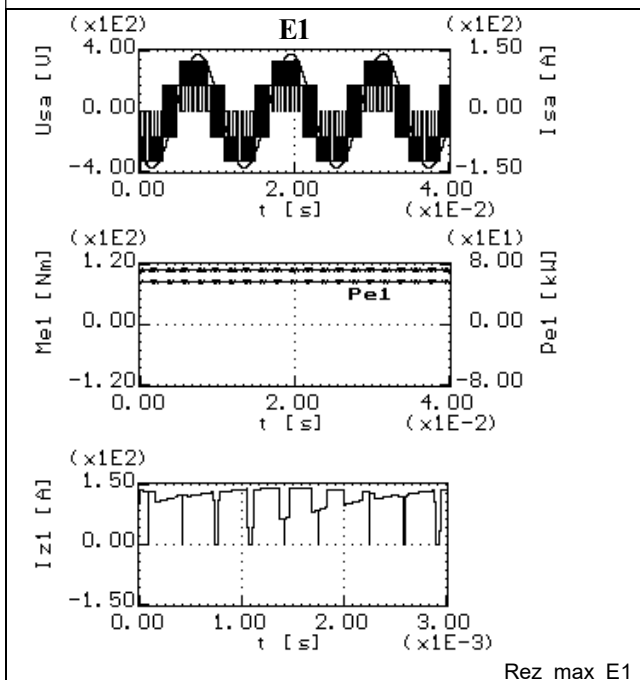


4.4 Maximální výkon spalovacího i elektrického motoru E1

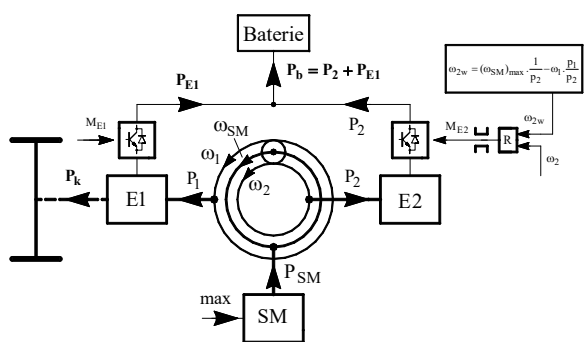
- Maximální výkon SM: $\omega_{SM} = (\omega_{SM})_{max}$
- $\omega_2 = (\omega_{SM})_{max} \cdot \frac{1}{p_2} - \omega_1 \cdot \frac{p_1}{p_2}$... E2 musí brzdít centrální kolo
- Výkon na hřídeli E2: $P_2 = M_2 \cdot \omega_2$, $M_2 = M_{SM} \cdot p_2$
- Výkon na hřídeli korunního kola $P_1 = M_1 \cdot \omega_1$, $M_1 = M_{SM} \cdot p_1 = P_{SM} - P_2$ není dostatečný, musí vypomáhat E1.
- Motor E1 dodává maximální výkon P_{max}
- Baterie dodává výkon $P_b = P_{max} - P_2$
- Výkon na hnacím hřídeli: $P_k = P_1 + P_{max} = P_{SM} + P_b = (M_1 + M_{E1}) \cdot \omega_1$, $M_1 = M_{SM} \cdot p_1$

Simulovaný pracovní režim:

- SM: $M_{SM} = 128 \text{ Nm}$, $P_{SM} = 70 \text{ kW}$
- $P_2 = M_{SM} \cdot p_2 \cdot \omega_2 / 1000 = 23 \text{ kW}$
- $P_1 = M_{SM} \cdot p_1 \cdot \omega_1 / 1000 = 47 \text{ kW} = P_{SM} - P_2$
- E1: $n_1 = 5000 \text{ ot/min}$, $P_{E1} = P_{max} = 60 \text{ kW}$
- Hnací hřídel: $P_k = P_1 + P_{E1} = 47 + 60 = 107 \text{ kW}$

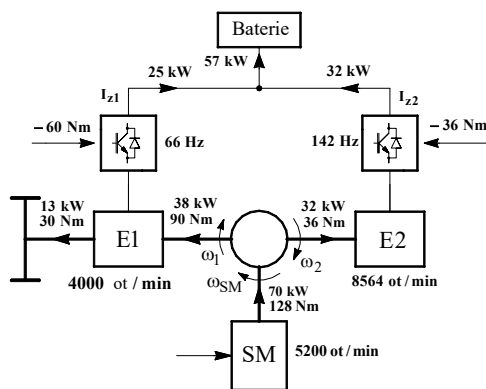


4.5 Maximální dobíjení baterie



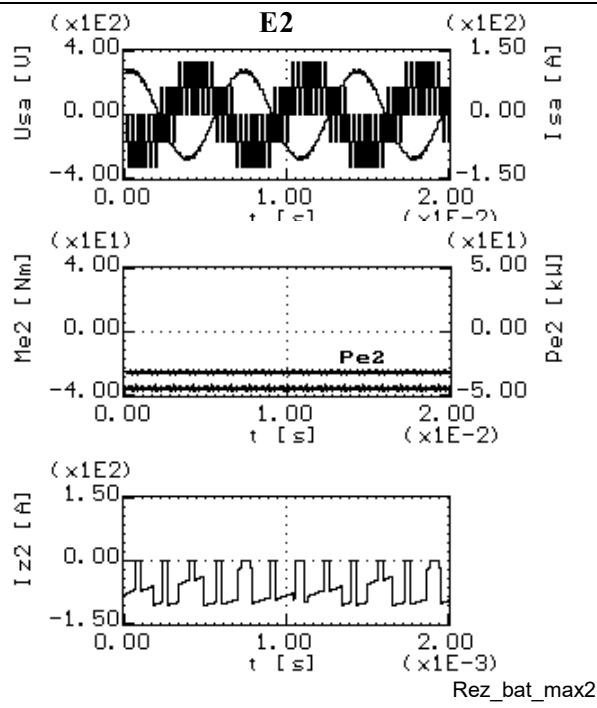
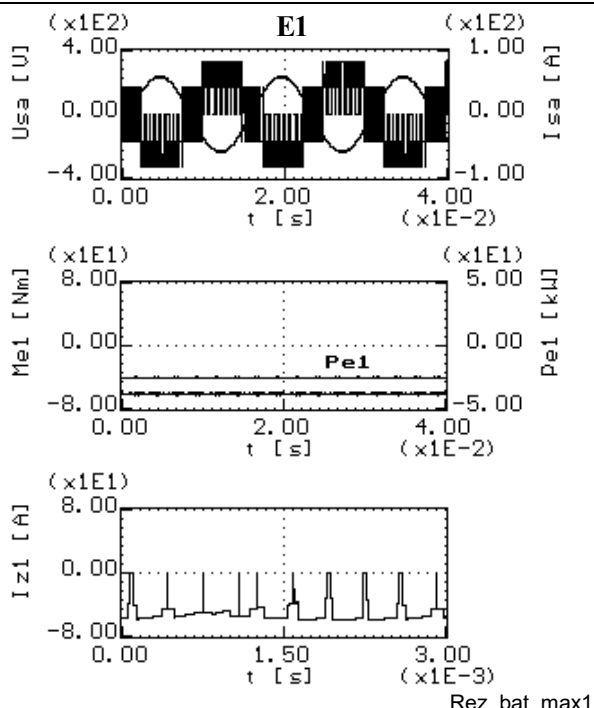
- V popisovaném režimu jede auto průměrnou rychlostí po rovině. Motor klasického auta má malé otáčky.
- SM hybridního auta má maximální otáčky. V motorických časopisech bývá tento fakt kritizován.
- Kritika je však neprofesionální, režim 4.5 umožňuje realizaci režimu 4.4. (Úpravou řídicích algoritmů lze „zlepšit“ režim 4.5 a „zhoršit“ 4.4).

- Baterie vyžaduje maximální dobíjení \Rightarrow
- Maximální výkon SM: $\omega_{SM} = (\omega_{SM})_{max}$
- $\omega_2 = (\omega_{SM})_{max} \cdot \frac{1}{p_2} - \omega_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} \dots$ E2 musí brzdít hřídel centrálního kola
- Výkon na hřídeli E2:
 $P_2 = M_2 \cdot \omega_2$, $M_2 = M_{SM} \cdot p_2$, $M_{E2} = -M_2$
- Výkon na hřídeli korunního kola
 $P_1 = M_1 \cdot \omega_1$, $M_1 = M_{SM} \cdot p_1$
- Požadovaný moment na hnacím hřídeli $(M_k)_w$,
 $(P_k)_w = (M_k)_w \cdot \omega_1$
- Pokud je $(P_k)_w < P_1$ může E1 spolu s E2 dobít baterii.
- $|P_{E1}| = P_1 - (P_k)_w$, $|M_{E1}| = \frac{P_{E1}}{\omega_1} \dots$ E1 pracuje jako generátor (na grafech $M_{E1} < 0$, $P_{E1} < 0$)



Simulovaný pracovní režim:

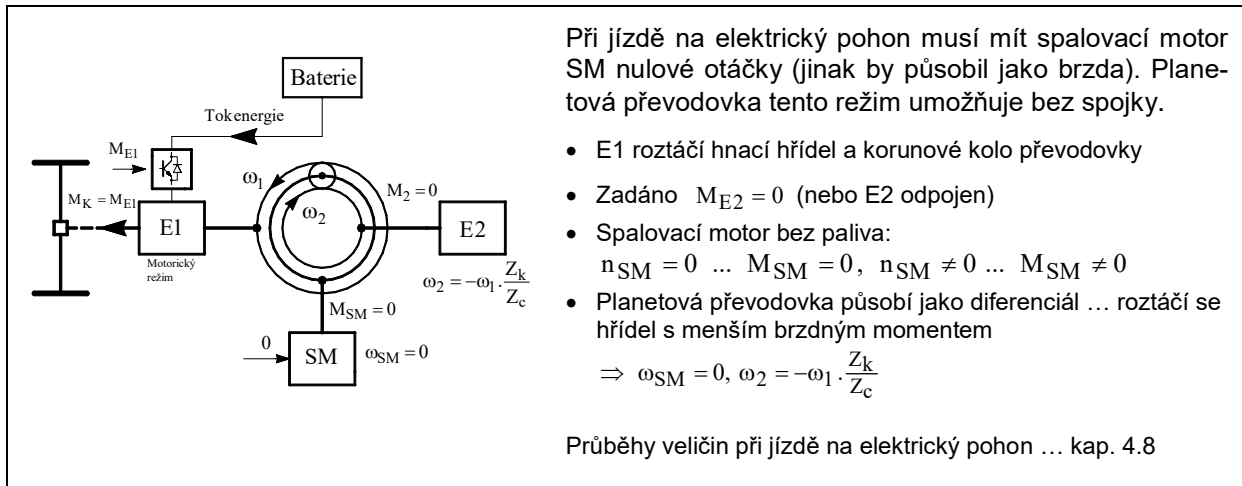
- SM maximální výkon : $M_{SM} = 128 \text{ Nm}$, $P_{SM} = 70 \text{ kW}$
- $n_{SM} = 5200 \text{ ot/min}$, $n_1 = 4000 \text{ ot/min} \Rightarrow$
 $n_2 = 8564 \text{ ot/min}$
- $P_2 = M_{SM} \cdot p_2 \cdot \omega_2 / 1000 = 32 \text{ kW}$
- $P_1 = M_{SM} \cdot p_1 \cdot \omega_1 / 1000 = 36 \text{ kW} = P_{SM} - P_2$
- Požadovaný moment na hnacím hřídeli
 $(M_k)_w = 30 \text{ Nm}$, $(P_k)_w = 13 \text{ kW}$
- $|P_{E1}| = P_1 - (P_k)_w = 25 \text{ kW}$, $|M_{E1}| = \frac{P_{E1}}{\omega_1} = 60 \text{ Nm}$



Rez_bat_max1

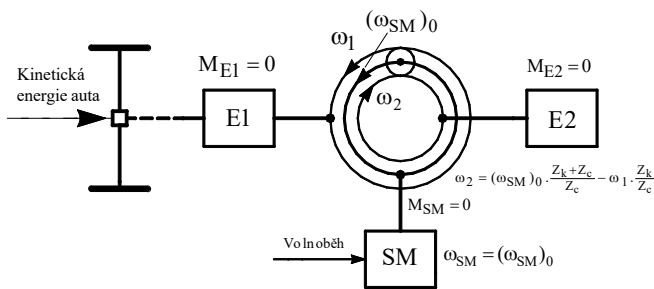
Rez_bat_max2

4.6 Jízda pouze na elektrický pohon



4.7 Plachtění

4.7.1 Spalovací motor – volnoběh



- Hřídel korunního kola je roztáčen kinetickou energií vozidla
- Zadané momenty elektrických motorů:
 $M_{E1} = 0, M_{E2} = 0$
- Nezatížený spalovací motor na volnoběh: $\omega_{SM} = (\omega_{SM})_0 \dots M_{SM} = 0$
- Pokud by se spalovací motor v režimu volnoběh roztáčel kinetickou energií vozidla na vyšší otáčky:
 $\omega_{SM} > (\omega_{SM})_0 \dots M_{SM} \neq 0$

- Planetová převodovka se chová jako diferenciál - roztáčí se hřídel s menším brzdícím momentem
- Po roztočení E2 na $\omega_2 = (\omega_{SM})_0 \cdot \frac{Z_k + Z_c}{Z_c} - \omega_1 \cdot \frac{Z_k}{Z_c}$ pracuje SM v režimu „volnoběh“.
- Při plachtění se hybridní vozidlo chová jako běžné vozidlo s „vyhozenou rychlostí“.

4.7.2 Spalovací motor bez paliva

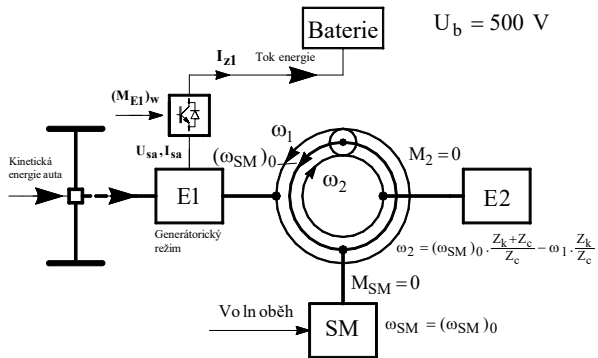
Pokud posilovač řízení, brzdy, klimatizace apod. pracují nezávisle na spalovacím motoru, lze při delším „plachtění“ spalovací motor uvést do režimu STOP.

- Spalovací motor bez paliva ... $n_{SM} = 0 \dots M_{SM} = 0, n_{SM} \neq 0 \dots M_{SM} \neq 0$
- Zadané momenty: $M_{E1} = 0, M_{E2} = 0$
- Planetová převodovka působí jako diferenciál ... korunné kolo roztáčí hřídel s menším brzdícím momentem, tedy opět kolo centrální .

Ustálený stav: $M_{SM} = 0, M_{E2} = 0 \dots \omega_{SM} = 0, \omega_2 = -\omega_1 \cdot \frac{Z_k}{Z_c}$

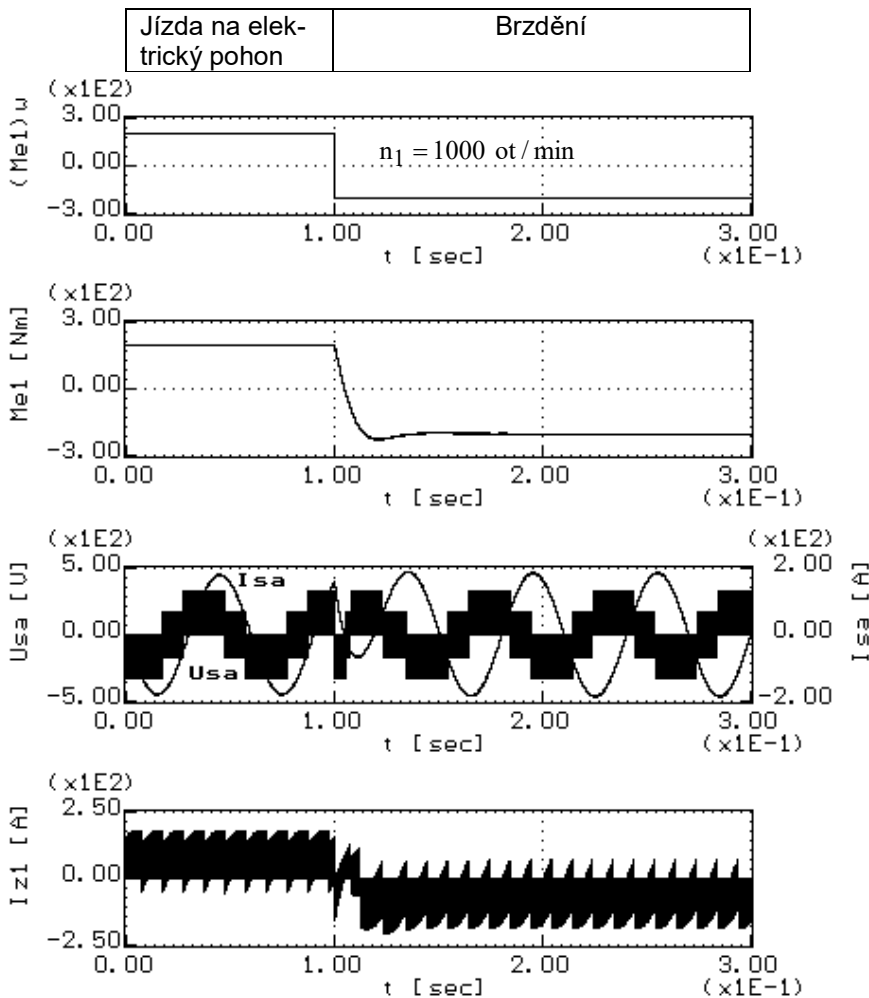
Po „přidání plynu“, příp. po zabrzdění se uvede motor do režimu START. Ten je usnadněn tím, že start se uskutečňuje prostřednictvím E2.

4.8 Brzdění



- Je vhodné, aby co největší část kinetické energie přešla do baterie \Rightarrow spalovací motor se proto nemá na brzdění plachtět .
- Teoreticky je možné (stejně podmínky jako při plachtění) během delšího brzdění uvést spalovací motor do režimu STOP.

- Spalovací motor v režimu volnoběh ... $\omega_{SM} = (\omega_{SM})_0 \dots M_{SM} = 0$
Brzdění motorem ... $\omega_{SM} > (\omega_{SM})_0 \dots M_{SM} \neq 0$
- $M_{E2} = 0$
- Planetová převodovka působí jako diferenciál ... korunové kolo roztáčí hřídel s menším brzdícím momentem, tedy kolo centrální .
- Po roztočení E2 na $\omega_2 = (\omega_{SM})_0 \cdot \frac{Z_k + Z_c}{Z_c} - \omega_1 \cdot \frac{Z_k}{Z_c}$ pracuje SM v režimu „volnoběh“.

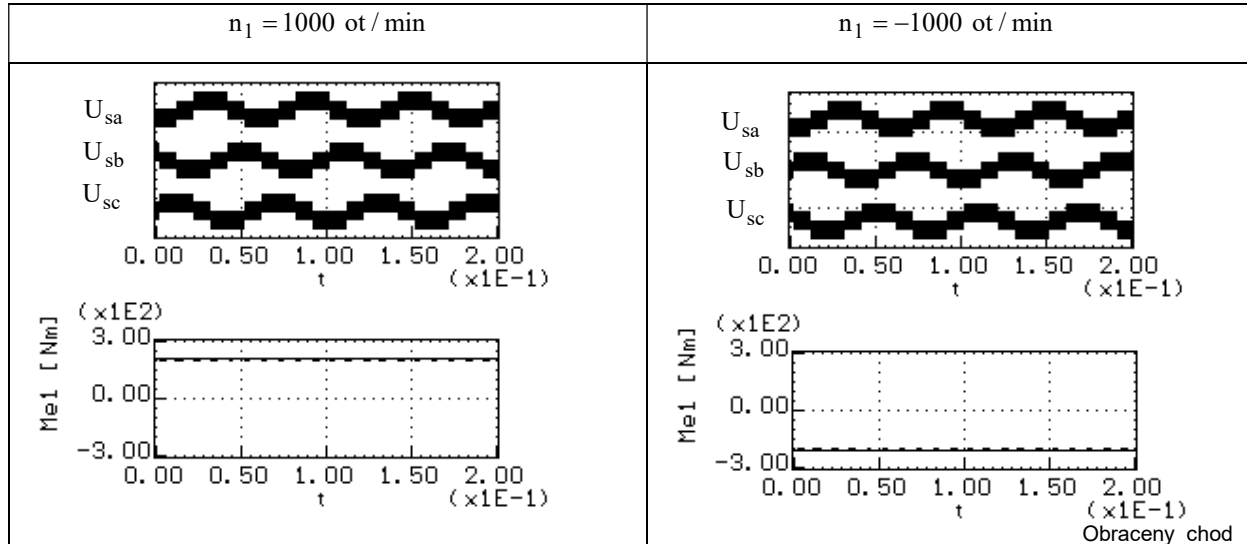


Při brzdění protéká I_{z1} ve směru šipky. Graf ... kladné I_{z1} při motorickém režimu E1.

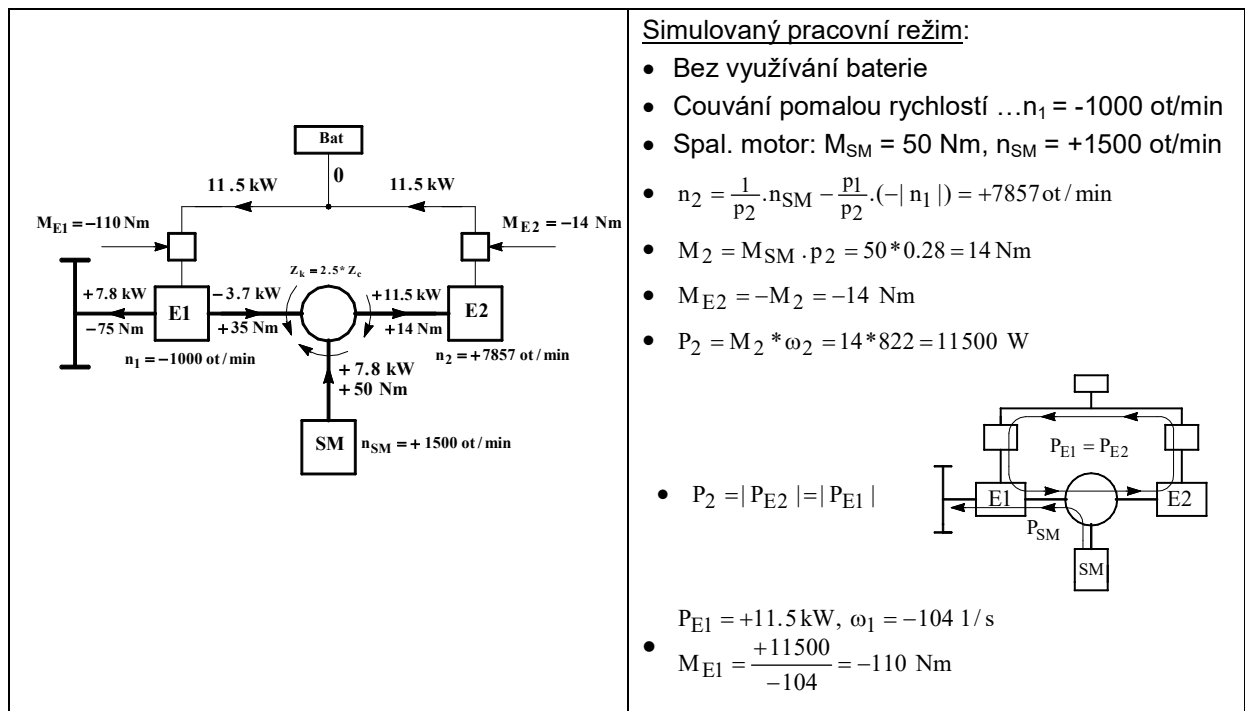
4.9 Zpátečka

4.9.1 Couvání pomocí elektromotoru E1

Obrácený chod třífázového motoru se realizuje zcela bezproblémově změnou sledu fází napětí střídače. Vektorové řízení tuto změnu provede automaticky (plynule při přechodu přes nulové otáčky).

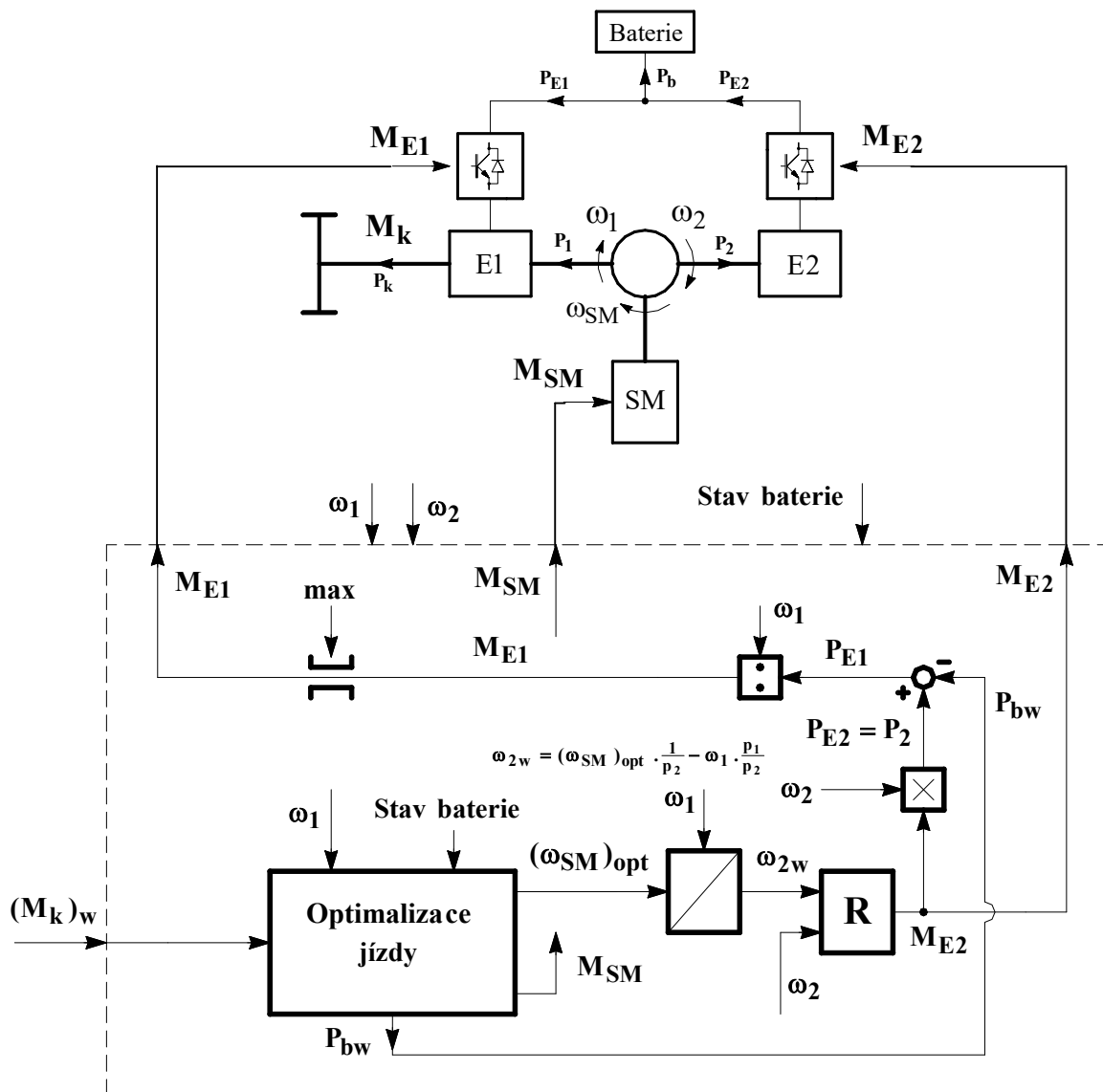


4.9.2 Couvání pomocí spalovacího motoru



5 Principiální funkce regulačních algoritmů

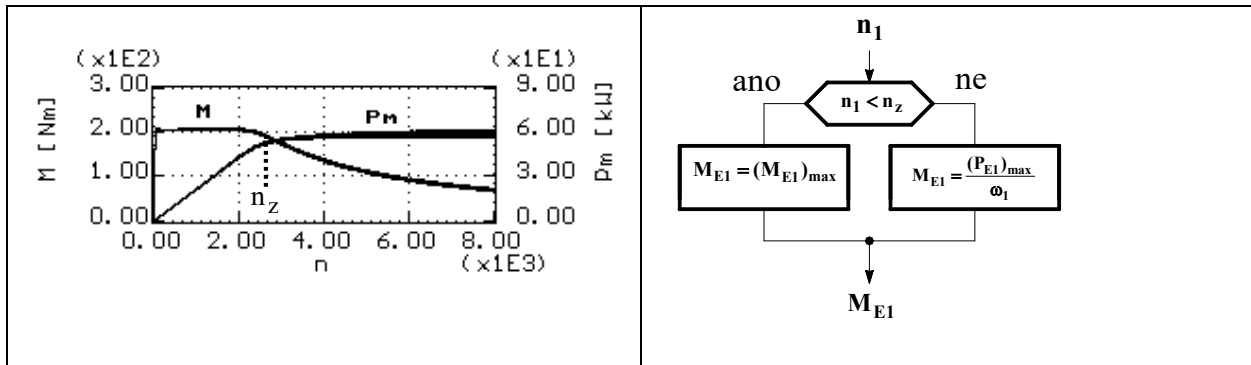
5.1 Jízda s dobíjením baterie



Závěry:

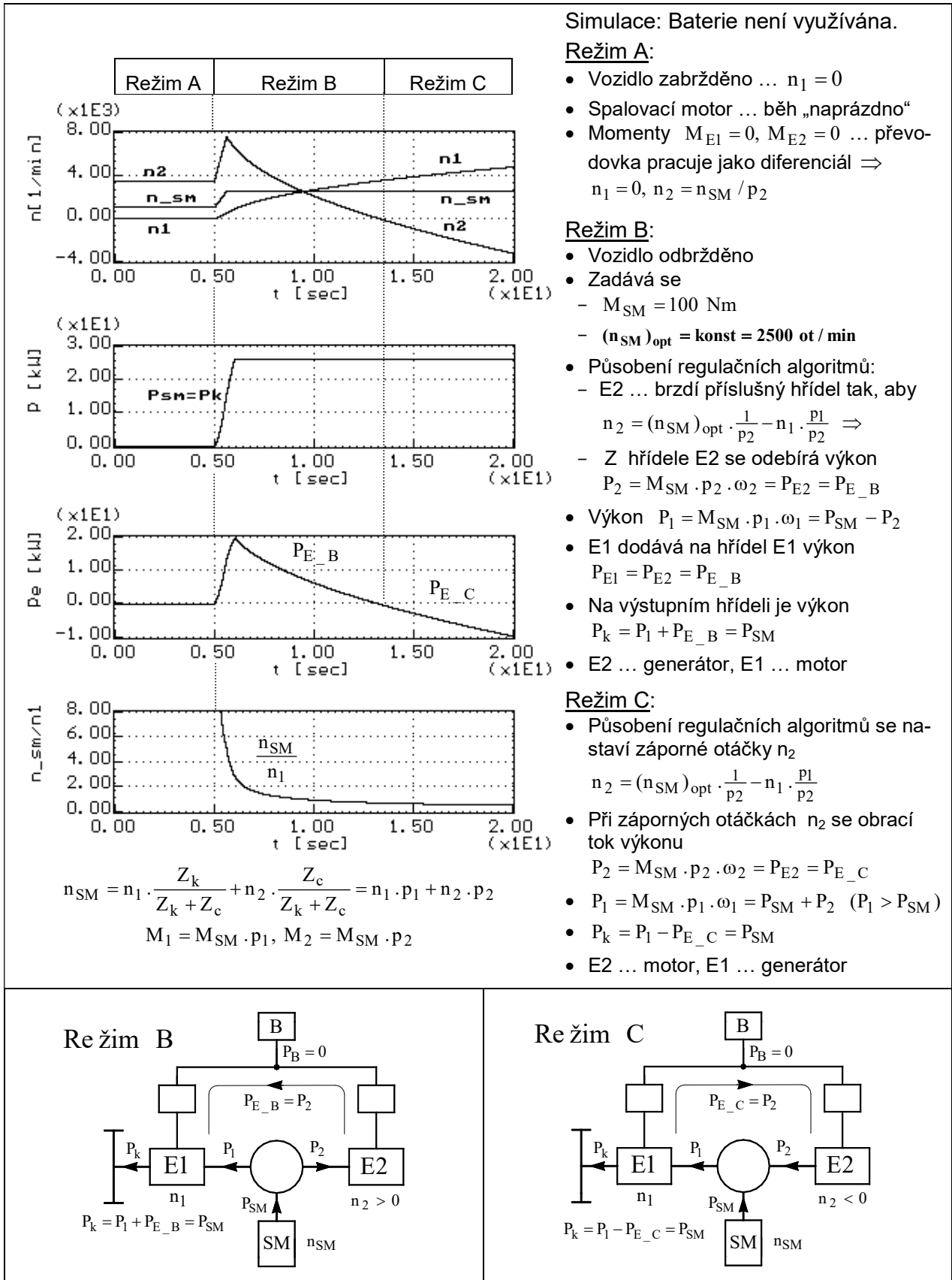
- Blok „Optimalizace jízdy“ vyhodnocuje dle požadovaného momentu $(M_k)_w$, rychlosti hnačího hřídele ω_1 a stavu baterie optimální otáčky spalovacího motoru $(\omega_{SM})_{opt}$, moment spalovacího motoru M_{SM} a potřebný výkon k dobíjení baterie P_{bw} .
- Funkce automatické převodovky:
Z $(\omega_{SM})_{opt}$ a rychlosti ω_1 se vypočte požadovaná rychlost (otáčky) ω_{2w} . Regulátor R vyhodnotí takový moment M_{E2} , při kterém se zabrzdí hřídel E2 na $\omega_2 = \omega_{2w}$.
- Další zobrazené algoritmy odpovídají toku výkonu odvozenému v kap. 3.2.4.
 $P_{E2} = M_{E2} \cdot \omega_2$, $P_{E1} = P_{E2} - P_{bw}$, $M_{E1} = P_{E1} / \omega_1$

5.2 Jízda s maximálním využíváním E1

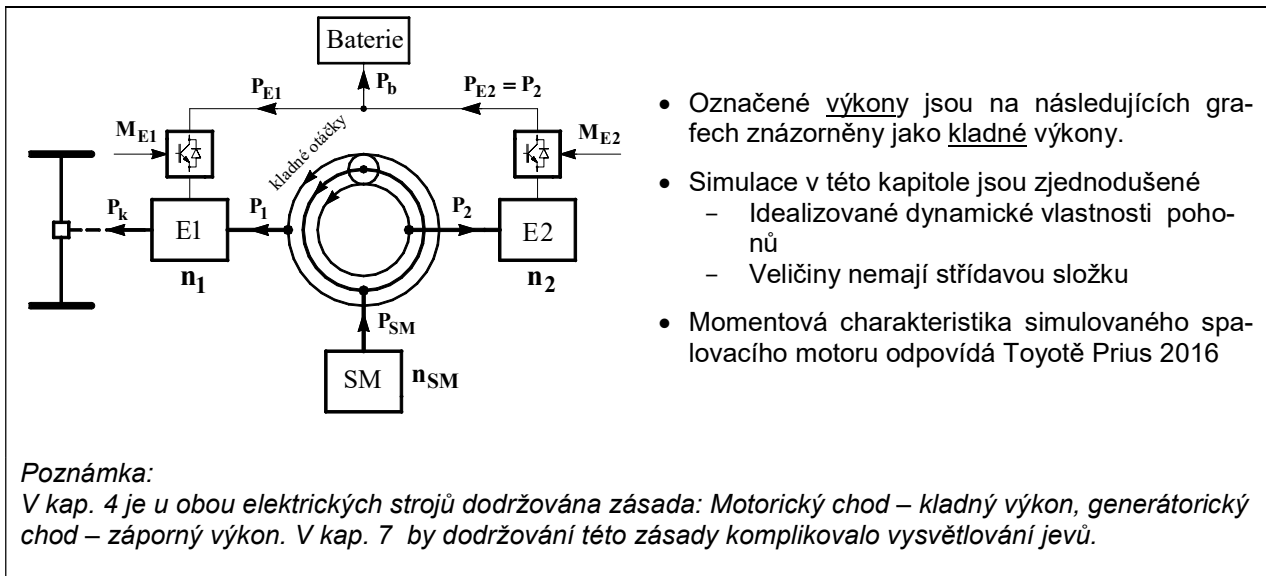


6 Rozjezd vozidla s plynule měnitelným převodem

Simulace v této kapitole jsou zjednodušené. Dynamické vlastnosti pohonů jsou idealizované, moment elektrických motorů nemá střídavou složku.



7 Veličiny pohonu v závislosti na otáčkách hnacího hřídele

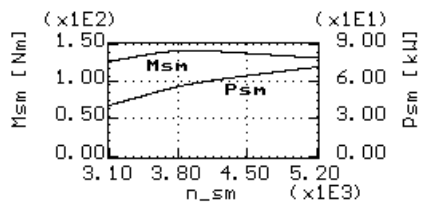


Parametry simulovaných motorů

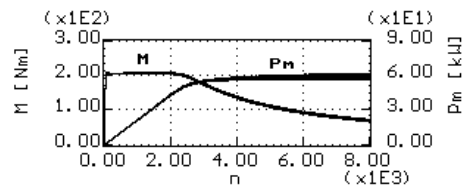
SM ... benzinový motor

Maximální výkon 72 kW / 5200 ot/min

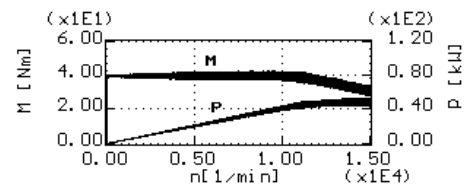
Maximální moment 142 Nm / 3800 ot/min



E1 ... synchronní stroj



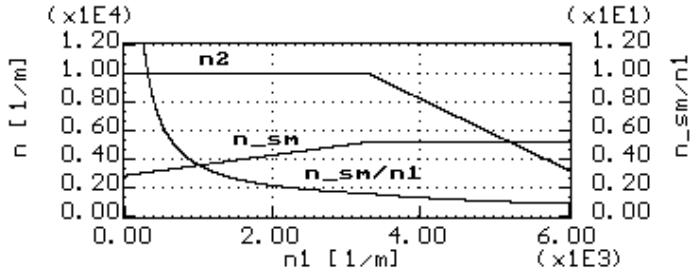
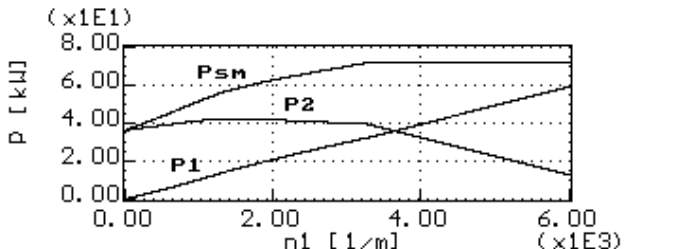
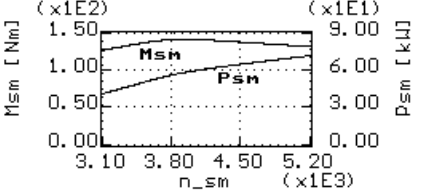
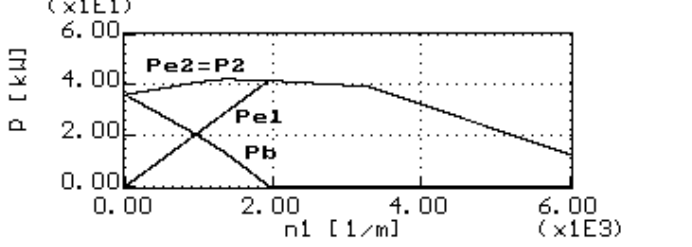
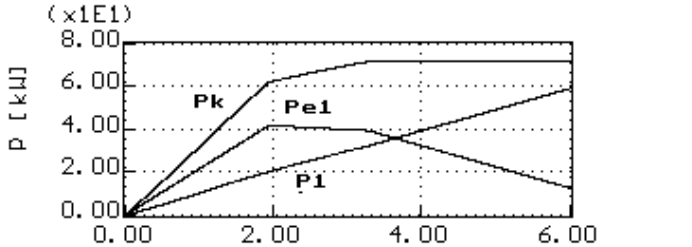
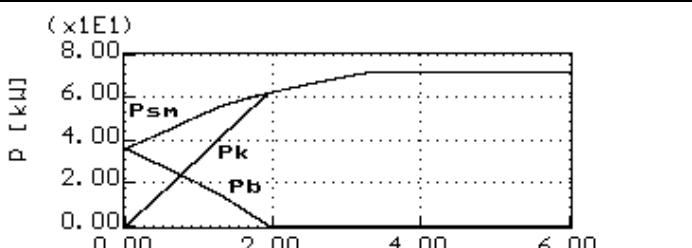
E2 ... synchronní stroj



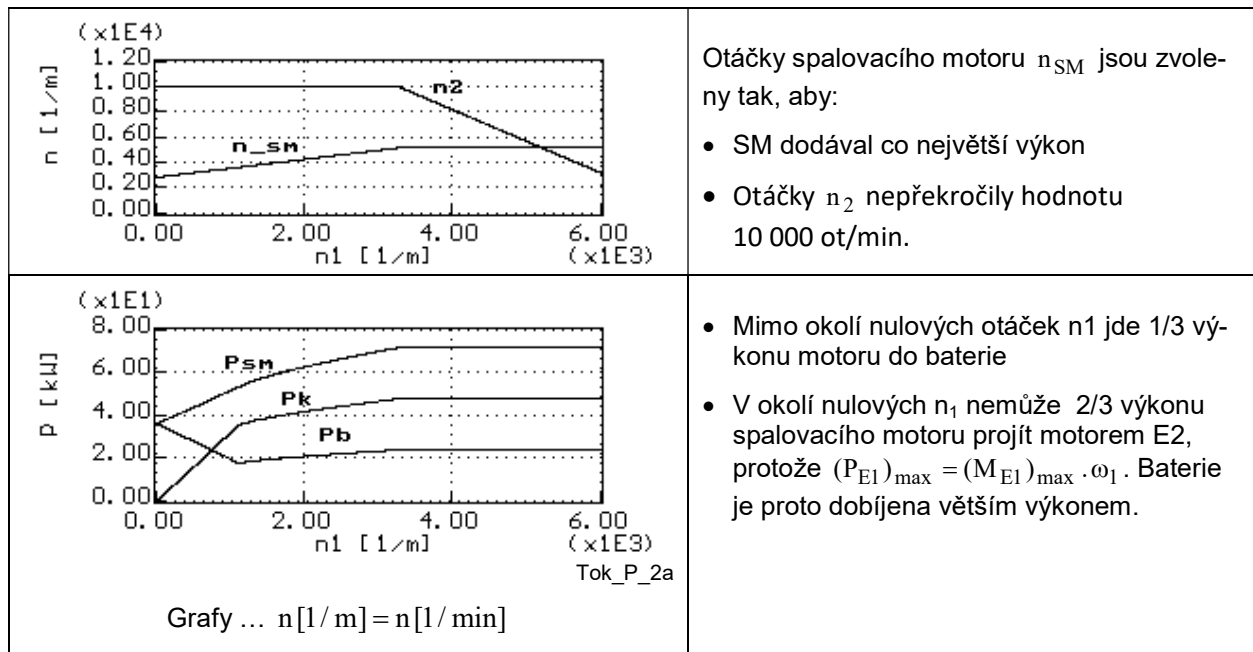
Maximální otáčky 10 000 ot/min

Převodovka ... $\frac{Z_k}{Z_c} = 2.5$

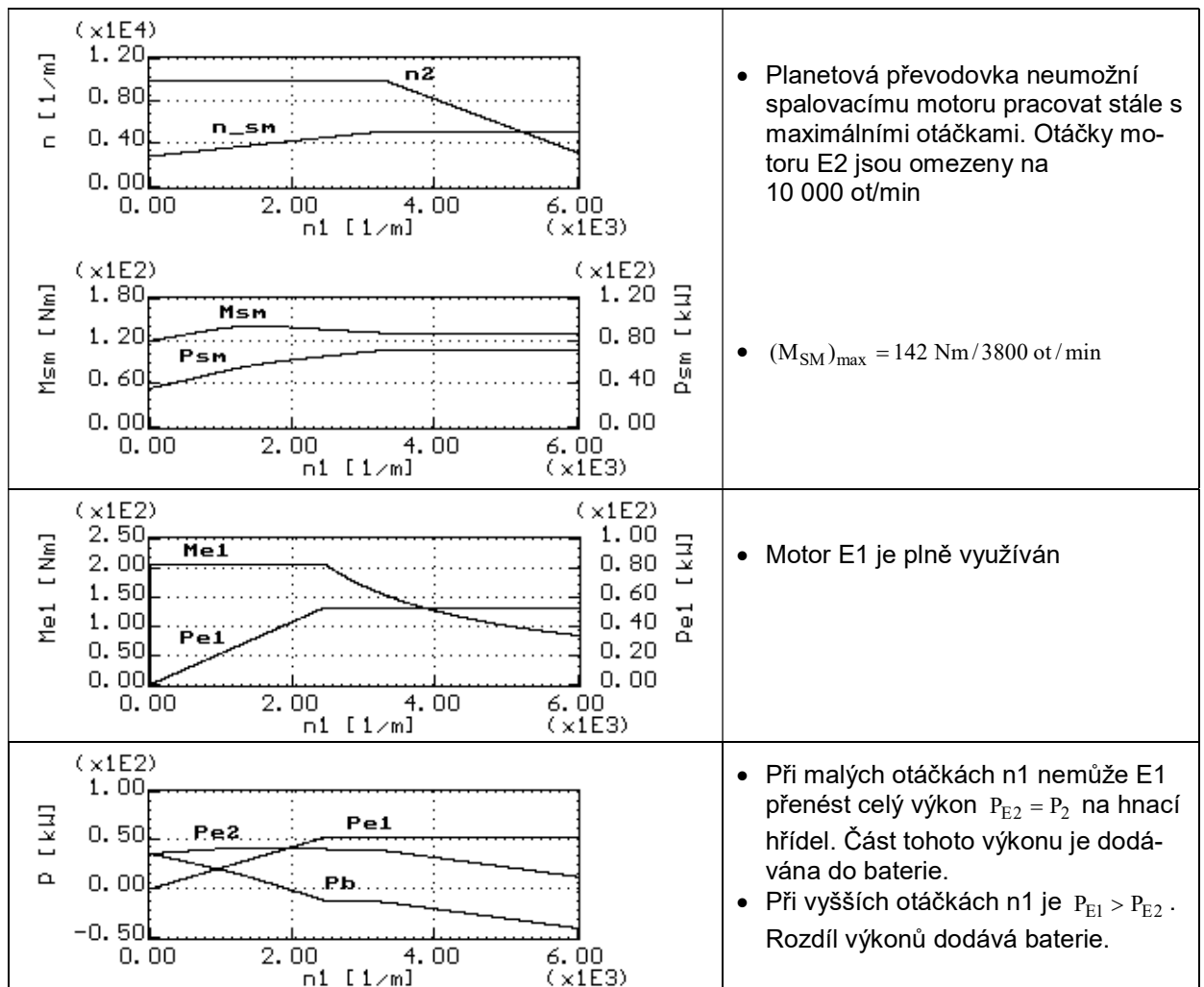
7.1 Spalovací motor pracuje v oblasti vyšších n_1 s maximálním výkonem – nabitá baterie se nevyžívá.

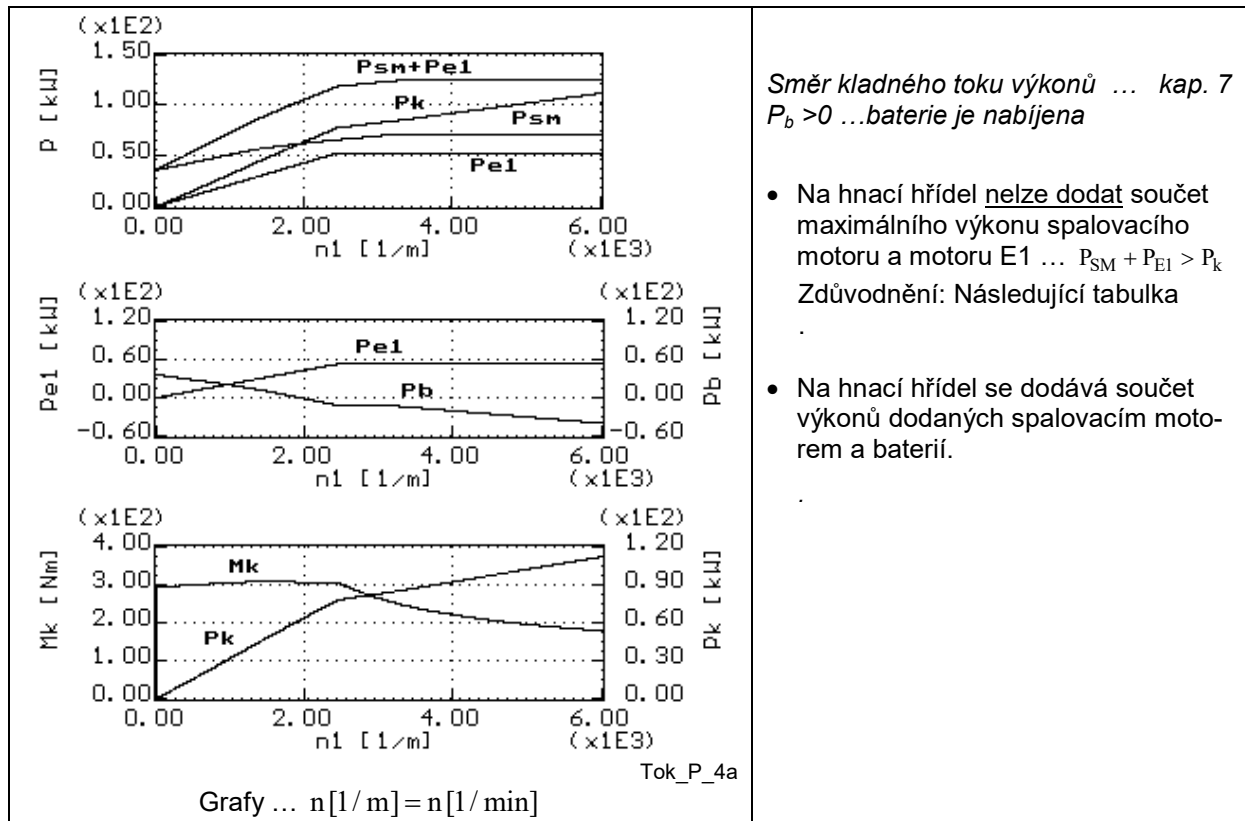
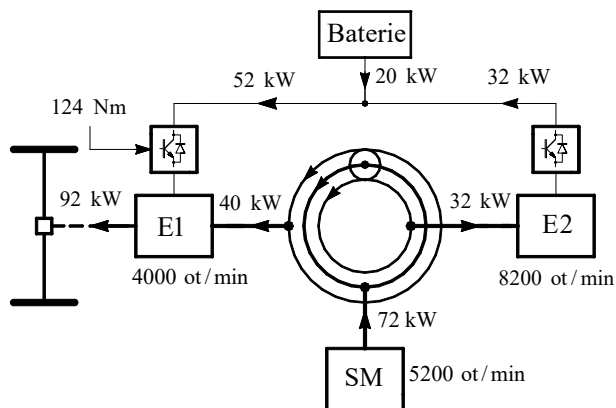
| | |
|--|--|
|  | <p>Otáčky spalovacího motoru n_{SM} jsou zvoleny tak, aby</p> <ul style="list-style-type: none"> • SM dodával co největší výkon • Otáčky n_2 nepřekročily hodnotu 10 000 ot/min. |
|  |  <p>$(M_{SM})_{max} = 142 \text{ Nm} / 3800 \text{ ot/min}$ $(P_{SM})_{max} = 72 \text{ kW} / 5200 \text{ ot/min}$</p> |
|  | <ul style="list-style-type: none"> • Motorem E1 nemůže v oblasti malých n_1 prostoupit výkon P2 ... $P_{E2} = M_{E1} \cdot \omega_1$, $M_{E1} \leq (M_{E1})_{max}$ • Výkonem $P_{E2} - P_{E1}$ se dobíjí baterie. Pokud by baterie již dobíjení nenesla, musí se v oblasti malých n_1 snížit výkon P_{SM} |
|  | <p>Tok výkonu ze SM na hnací hřídel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Při malé rychlosti vozidla jde větší část výkonu přes elektrické motory. • Při velké rychlosti vozidla jde větší část výkonu přes převodovku |
|  <p style="text-align: right;">Tok_P_1a</p> <p style="text-align: center;">Grafy ... $n[1/m] = n[1/min]$</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Při nízké rychlosti vozidla nemůže SM dodávat výkon na hnací hřídel ... $P_k = M_k \cdot \omega_1$ • Přebytečný výkon jde do baterie |

7.2 Třetina výkonu spalovacího motoru využívána k nabíjení baterie



7.3 Maximální zrychlení vozidla – plné využívání všech motorů.



Tok výkonu při $n_1 = 4000$ ot/min

- E2 musí brzdít centrální kolo tak, aby $n_2 = 8200$ ot/min (funkce automatické převodovky). Při brzdění odebírá s hřídele 32 kW.
- Maximální výkon E1 při daných otáčkách je 52 kW. Pouze část tohoto výkonu odebere E1 z baterie.

$$P_{\Sigma} = P_{sm} + P_{E1} = 124 \text{ kW}$$

- $P_k = 92 \text{ kW}$
- $P_{\Sigma} - P_k = 32 \text{ kW} = P_{E2}$

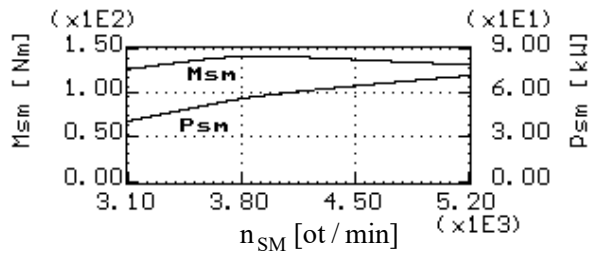
7.4 Spalovací motor pracuje stále s malými otáčkami – nabitá baterie

| | |
|---|--|
| | <p>Při vyšších otáčkách n_1 jsou otáčky n_2 záporné.</p> |
| | <p>Otáčky n_2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kladné ... E2 – generátor • Záporné ... E2 - motor |
| | <ul style="list-style-type: none"> • V okolí $n_1=0$ nemůže výkon P2 projít E1, proto se nabíjí baterie $(P_{E1})_{\max} = (M_{E1})_{\max} \cdot \omega_1$ • Režim práce E1, E2 $n_1 < n_{lh}$: $n_1 > n_{lh}$: E1 ... motor E1 ... generátor E2 ... generátor E2 ... motor |
| <p style="text-align: right;">Tok_P_3</p> <p style="text-align: center;">Grafy ... $n[1/m] = n[1/min]$</p> | |

8 Optimální parametry pohonu

8.1 Spalovací motor

Benzinový motor Toyota Prius 2016 má vzhledem k objemu 1800 cm³ malý výkon i moment. Maximální moment je však dosažitelný při nízkých otáčkách, motor má zvýšenou účinnost (Atkinsonův cykl). Planetová převodovka umožňuje udržovat takové otáčky motoru, při kterých je spotřeba paliva minimální.



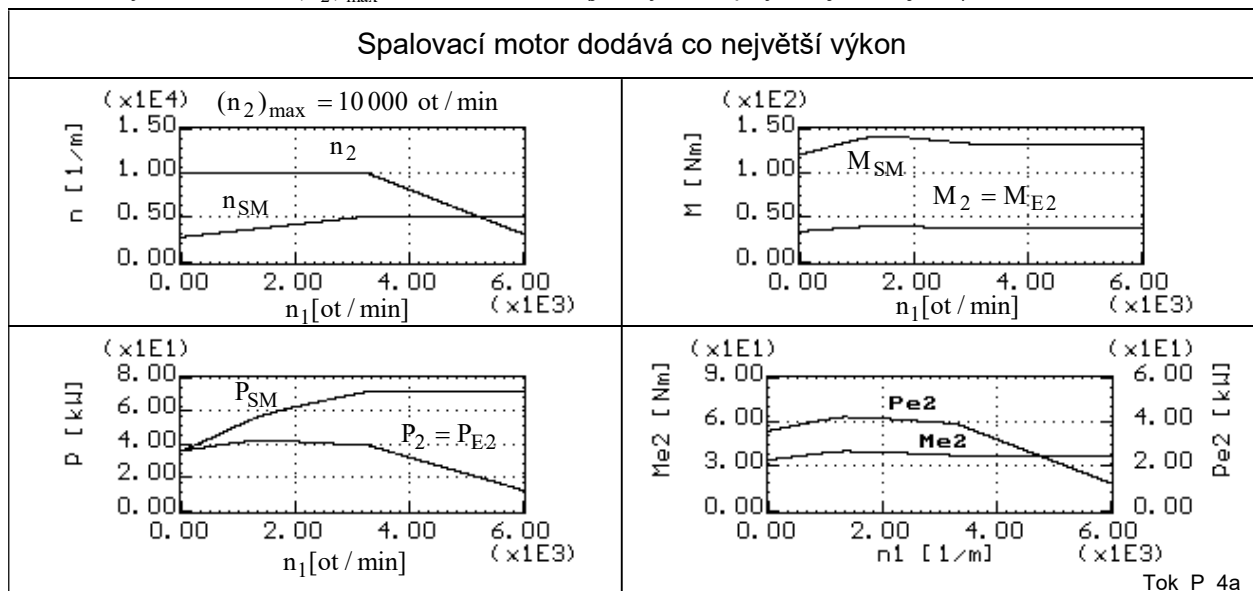
8.2 Planetová převodovka

$$p_1 = \frac{Z_k}{Z_k + Z_c}, p_2 = \frac{Z_c}{Z_k + Z_c}$$

Na hřídeli centrálního kola je moment $M_2 = M_{SM} \cdot p_2$. S růstem Z_k/Z_c tento moment klesá, otáčky centrálního kola vzrůstají. Vhodné Z_k/Z_c nutno volit kompromisem (ve studii zvoleno $Z_k/Z_c = 2.5$).

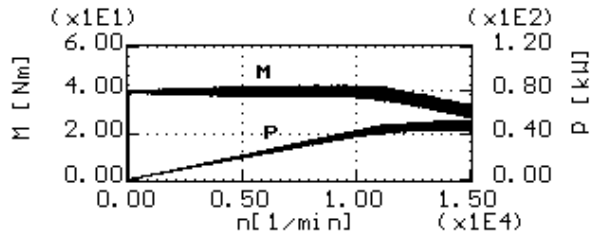
8.3 Motor / generátor E2

- E2 v generátorickém režimu musí brzdit centrální kolo momentem $M_{E2} = M_2 = M_{SM} \cdot p_2$
- Maximální otáčky E2 se musí volit kompromisem:
 - $(n_2)_{\max}$ určují maximální otáčky SM při $n_1 = 0$ ot/min ... $(n_{SM})_{\max} = 0 \cdot p_1 + (n_2)_{\max} \cdot p_2$ (vhodné co nejvyšší)
 - $(n_2)_{\max}$ určují technologii výroby rotoru (vhodné co nejnižší)
 - Toyota Prius ... $(n_2)_{\max} = 10000$ ot/min (jediný dostupný údaj o stroji E2)



- E2 může spolupracovat s uvedeným spalovacím motorem a převodovkou $Z_k/Z_c = 2.5$ s těmito parametry: $(M_{E2})_{\max} = 40$ Nm, $(P_{E2})_{\max} = 42$ kW
- Protože maximální moment je vyžadován i maximálních otáčkách, není vhodné motor v oblasti $(0 \div 10000)$ ot/min odbuzovat.
- Simulovaný motor (následující stránka) tyto požadavky splňuje

- Momentová charakteristika imaginárního motoru E2, který vyhovuje uvedeným požadavkům.



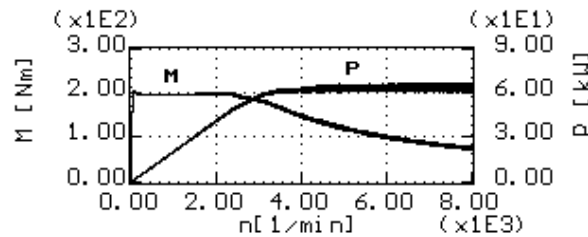
8.4 Motor / generátor E1

Funkce motor / generátoru E1:

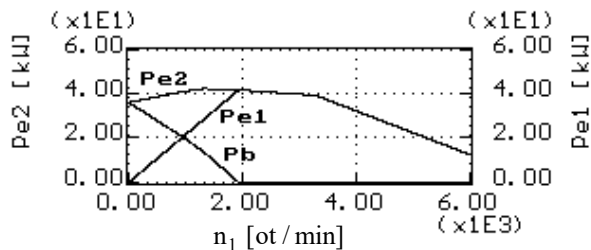
- Dodávat na hnací hřídel požadovaný moment (zejména v oblasti malých rychlostí)

Imaginární motor E1, využívaný při simulacích

Dle dostupných informací má motor E1 v Toyotě Prius obdobnou charakteristiku.



- Převádět výkon motoru E2 - $(P_{E2})_{\max} = (P_2)_{\max}$ na hnací hřídel při maximálním výkonu spalovacího motoru



Tok_P_1a

- Při malých n_1 je podmínka principiálně nesplnitelná ($P_{E1} = M_{E1} \cdot \omega_1$). Výkonem $P_b = P_{E2} - P_{E1}$ se dobíjí baterie (pokud je již plně nabitá, je nutno snížit výkon SM).
- Při větších n_1 je procházející výkon P_{e1} menší, než maximální moment simulovaného motoru (motor splňuje diskutovanou podmínku)

9 Závěr - srovnání hybridního pohonu s pohony běžnými

Zásadní nevýhodou hybridních automobilů je nutnost vozit v autě baterii.

- Cena
- Hmotnost (váha)
- Objem (velikost kufru)
- Životnost baterie ?
- Životnost příslušenství baterie (chlazení) ?
- Recyklování baterie ?

Zásadní výhodou hybridních aut je možnost získat dotace na nákup i provoz automobilu (v některých státech)

Spotřeba paliva

Spotřeba paliva hybridního auta je nízká zejména v jízdních režimech s častým brzděním a následnými rozjezdy (evropský zkušební režim)

Skutečná spotřeba bývá přibližně srovnatelná s pohonem s naftovým motorem.

Konstrukční složitost, poruchovost

- Atmosférický benzinový motor je výrazně jednodušší než benzinový turbomotor a velmi výrazně jednodušší než naftový turbomotor. S jednoduchostí je svázána poruchovost a životnost.
- Automatická převodovka e-CVT má jedinou „strojařskou“ část – planetovou převodovku. Na rozdíl od dvojspojkových převodovek i převodovek s hydraulickým měničem může mít životnost shodnou s životností automobilu.

Jízdní vlastnosti automobilu

| | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Převodovka e-CVT může přeřazovat zcela plynule, dvojspojkové převodovky mívají v některých pracovních režimech nepravidelný chod. • Rychlost změny převodu bývá u převodovky e-CVT pomalejší. | |
| Město a okolí | <ul style="list-style-type: none"> • Působením častého brzdění rekuperací má automobil malou spotřebu. • Působením elektrické části pohonu může část jízd probíhat s nenastartovaným spalovacím motorem • Rozjezd z křižovatek může být velmi rychlý, neboť správně řízený synchronní i asynchronní motor může v okolí nulových otáček poskytovat maximální moment. |
| Silnice nižších tříd | <ul style="list-style-type: none"> • Působením častého brzdění rekuperací může mít hybridní automobil malou spotřebu i mimo město. |
| Dálnice | <ul style="list-style-type: none"> • Hybridní pohon nemůže uplatnit své přednosti. |

Poznámky:

- Automobilům s převodovkou e-CVT bývají vytýkány vyšší otáčky spalovacího motoru v situacích, kdy motor běžného automobilu pracuje s malými otáčkami.

Tato skutečnost není principiální. Při uvedeném jízdním režimu se dobíjí baterie, aby byla připravená k příp. provozu elektrické části pohonu. Řídící algoritmy pohonu lze samozřejmě sestavit tak, aby zvýšené otáčky neobtěžovaly.

- SM s převodovkou e-CVT se po prudkém sešlápnutí „plynu“ rozbíhá do vyšších otáček než SM s automatickou dvojspojkovou převodovkou.

Tato skutečnost opět není principiální. Převodovka e-CVT může rychle realizovat velkou změnu převodu. Řídící algoritmy této vlastnosti využívají k rychlému zvýšení výkonu SM.

Použitá literatura

Hybridní pohon Toyota

Hyan, T.: Toyota Prius 2016, Automobil 4/2016

Problematika vektorového řízení motorů

Archiv RICE / Katedra KEV ZČU Plzeň