

# **МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

II тур Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2019/2020 зі спеціальності «Автомобільний транспорт» за напрямом «Автомобільна електроніка»

## **ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ**

**Шифр: “Водень”**

**2020**

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>1. СУЧАСНІ АВТОМОБІЛІ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ</b> .....	4
1.1. Автомобілі, що використовують електричні батареї.....	4
1.2. Гібридні автомобілі.....	4
1.3. Автомобілі на водневих паливних елементах.....	5
<b>2. ПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ</b> .....	7
2.1. Види паливних елементів.....	7
2.2. Принцип роботи паливної комірки .....	9
<b>3. ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ</b> .....	11
3.1. Методи та засоби зберігання водню.....	11
3.2. Небезпека зберігання водню.....	12
<b>4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМОБІЛЯ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ</b> .....	13
4.1. Математична модель, що використовується в середовищі ADVISOR.....	15
4.1.1. Блок-схема автомобіля на протоно-обмінних мембранних паливних елементах.....	
4.1.2. Моделювання паливної комірки.....	16
4.1.3. Моделювання паливних елементів.....	18
4.1.4. Моделювання інвертора/перетворювача.....	22
4.1.5. Вибір електродвигуна.....	23
4.1.6. Моделювання системи зберігання енергії.....	25
4.1.7. Вибір системи управління енергією.....	26
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	28
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	31
<b>ДОДАТОК</b> .....	31

## ВСТУП

**Актуальність теми.** З стрімким розвитком сучасних технологій у автомобільному транспорті найбільшого попиту набувають паливні елементи, що використовують водень. Таки елементи, виробляючи електричний струм для руху автомобіля, викидають воду на відміну від багатьох шкідливих речовин двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ).

**Мета роботи:** моделювання автомобіля на водневих паливних елементах.

**Задачі роботи.** Для досягнення мети були визначені та вирішені наступні задачі: аналіз існуючих конструкцій автомобілів на паливних елементах, аналіз паливних елементів та методів зберігання водню, комп'ютерне моделювання автомобіля на водневих паливних елементах.

**Об'єкт дослідження:** процес використання паливних елементів для автомобілів.

**Предмет дослідження:** автомобіль на водневих протонно-обмінних мембранних паливних елементах.

**Методи дослідження:** аналіз, узагальнення, комп'ютерне моделювання та тестування розробленого автомобіля в програмному середовищі ADVISOR на основі Matlab та Simulink.

**Наукова новизна:** в роботі у програмному середовищі ADVISOR змодельовано автомобіль на протонно-обмінних мембранних паливних елементах, що використовують водень,

**Практичне значення роботи:** створено програмний код, який дозволяє моделювати автомобілі на паливних елементах.

**Структура роботи.** Робота складається з вступу, 3 розділів, висновків, списку використаної літератури, додатку і викладена на 46 сторінках. Робота містить 28 сторінок основного тексту та 5 таблиць, 11 малюнків, 21 джерело використаної літератури та 1 додаток.

# **1. СУЧАСНІ АВТОМОБІЛІ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ**

## **1.1. Автомобілі, що використовують електричні батареї**

Електромобілі призначені для використання тільки акумулятора для живлення двигуна. Існує шість типів систем передачі енергії у всіх електромобілях, які детально описано в [5]. Вони поділяються на три види: електромобілі на акумуляторних батареях (BEV), автомобілі на паливних елементах (FCEV) та гібридні автомобілі на паливних елементах (FCHEV). BEV та FCEV мають схожість, але у порівнянні з FCHEV вони мають відмінності. Гібридні автомобілі на паливних елементах включають гібридизацію батареї та паливного елемента. BEV використовують системи зберігання енергії, в той час як FCEV використовують паливні елементи. FCHEV використовують як паливні елементи, так і систему акумуляування енергії. Електромобіль з акумуляторної батареєю класифікуються як повністю електричні транспортні засоби (ТЗ) (AEV). Основним елементом їх трансмісії є тягові двигуни з високим крутним моментом [6]. Акумуляторні електричні ТЗ можуть пересуватися в основному на відносно короткі дистанції та з обмеженою швидкістю.

## **1.2. Гібридні автомобілі**

Рішення проблеми з гібридним автомобілем, відповідно до [7], полягає в тому, щоб направляти електричну енергію від генератора на електричний двигун, або на батареї, в залежності від стану заряду батареї і необхідної енергії на колесах.

Гібрид призначений для поглинання енергії, яка втрачається за рахунок гальмування та накату, щоб зарядити батарею. В свою чергу, регенеративне гальмування приводить в рух електродвигун. Гібридні електричні автомобілі включають в себе два типи джерел: ДВЗ та електродвигун. Гібридні автомобілі

також поділяються на три категорії: помірний, повний та зарядний гібридний електричний автомобіль.

Гібридні автомобілі надають можливість одночасного використання двигунів та електродвигунів в різних обставинах, щоб мати найкращий пробіг. Електричні двигуни приводять в рух автомобіль, використовуючи акумулятор. Найчастіше такий автомобіль використовує електродвигун до 24 км/год для живлення.

### **1.3. Автомобілі на водневих паливних елементах**

Автомобілі на паливних елементах (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) також потрапляють під всі електричні типи ТЗ, і вони також мають аналогічну трансмісію, що й в BEV, але її джерелом енергії є стек паливних елементів. В основному FCEV працює з використанням водню, що в результаті роботи якого утворюється вода та виділяється та тепло, а отже, в ньому немає забруднюючих відпрацьованих газів, тому він визнаний нульовим емісійним засобом. Найбільш використовуваним паливним елементом для транспорту являється PEMFC (протоно-обмінний мембранний паливний елемент), оскільки, він має високу густину потужності, більш низьку робочу температуру (60-80 °C), а також дуже низьку корозію, в порівнянні з паливним елементом іншого типу [14]. Водень використовується в якості палива, яке зберігається в резервуарі, змонтованому в ТЗ, або отриманому з палива, використовуючи генератор водню. Для постійного живлення, паливний елемент є одним з найкращих варіантів, але не підходить до різкої зміни попиту потужності. На рис. 1.1 наведена типова конфігурація трансмісії для FCEV з додатковим процесором.

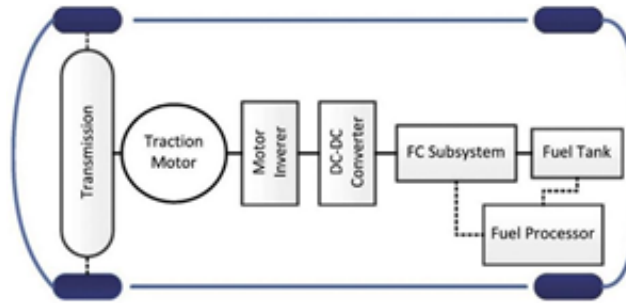


Рис. 1.1. Схема трансмісії автомобіля на паливних елементах [4]

На даний час існує велика кількість паливних елементів, які бувають легко- та високотемпературні.

Стек містить в собі сотні одиничних комірок, і так само, як і акумулятор, перетворює хімічну в електричну енергію. Система побудована так, щоб функціонувати як канал для транспортування палива до електроду. При достатній подачі палива та окислювача забезпечується генерація електричної енергії. Основною проблемою паливних елементів є витяг реакційних відходів та забезпечення всіх окремих комірок стеку паливом. Відходами комірок є вода, але в процесі її отримання утворюється шум.

Для забезпечення необхідного пробігу на автомобілі повинно зберігатись 4-7 кг водню, що до недавнього часу стримувало їх розробку. Крім того, для такого зберігання потрібні резервуари з певними властивостями.

Модифікація трансмісії електромобіля на паливних елементах привела до нової конфігурації автомобіля – гібридного електричного автомобіля на паливних елементах (FCHEV). Система цього автомобіля залежить від системи зберігання енергії для підтримки паливного елемента. В залежності від споживаної потужності та живлення замість системи зберігання енергії може використовуватись ультраконденсатор або акумулятор. Щоб використовувати паливний елемент в якості основного джерела енергії та акумулятор чи ультраконденсатор в якості системи зберігання енергії. Трансмісію такого автомобіля зображено на рис. 1.2.

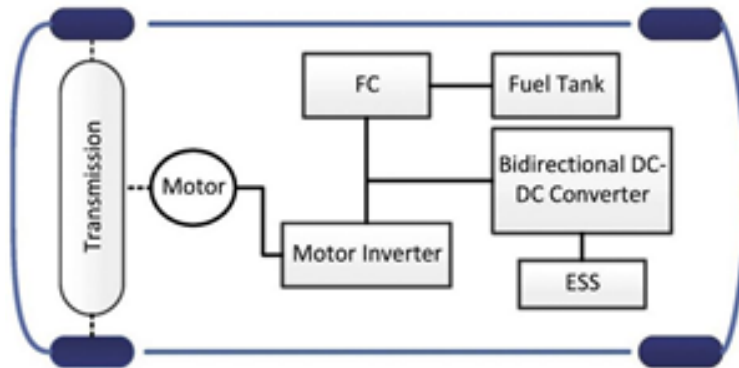


Рис. 1.2. Схема трансмісії гібридного автомобіля на паливних елементах [4]

## 2. ПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ

### 2.1. Види паливних елементів

Будь-який електрохімічний пристрій, що перетворює хімічну енергію будь-якого палива безпосередньо в електричну, називається паливною коміркою. Одною з основних характеристик паливних елементів є те, що реагуючі речовини подаються безпосередньо із зовнішніх джерел.

Паливні елементи класифікуються відповідно до типу використовуваного в них електроліту, палива, температури експлуатації та фізичної природи електроліту, як твердого, так і рідкого. Майже всі типи паливних елементів працюють на водні, але також можуть використовуватись інші типи іонів. У роботі [21] виділяють п'ять основних типів паливних елементів (табл. 2.1).

Оскільки в роботі проводиться моделювання автомобіля саме з паливною коміркою з протонно-обмінною мембраною (рис. 2.1.), необхідно розглянути її більш детально.

Дані паливні елементи забезпечують високу потужність, мають низьку вагу та об'єм в порівнянні з іншими паливними елементами. Вони використовують твердий полімер як електролітні та пористі вуглецеві електроди, що містять каталізатор з платини чи платинового сплаву. Їм потрібні лише водень та кисень

з повітря. Вони, як правило, працюють з чистим воднем, що постачається з резервуарів для його зберігання. Такі паливні елементи працюють при відносно низькій температурі – 80°C. Проте, цей процес вимагає, щоб металевий каталізатор (зазвичай платина) використовувався для відділення електронів та протонів водню, що суттєво збільшує вартість системи.

Таблиця 2.1

Основні типи паливних комірок та їх характеристики [21]

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Electrolyte	<i>Solid Polymer</i>
	Operating Temp. °C	20 - 180
	Anode Reaction	$H \rightarrow 2H_2^+ + 2e^-$
	Cathode Reaction	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
	Mobile ion	$H^+$
Alkaline Fuel Cell (AFC)	Electrolyte	<i>(KOH) solution</i>
	Operating Temp. °C	60 - 120
	Anode Reaction	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow H_2O + 2e^-$
	Cathode Reaction	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
	Mobile ion	$(OH)^-$
Phosphoric Acid Fuel Cell (FAFC)	Electrolyte	<i>Phosphoric Acid</i>
	Operating Temp. °C	160 - 200
	Anode Reaction	$H \rightarrow 2H_2^+ + 2e^-$
	Cathode Reaction	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
	Mobile ion	$H^+$
Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Electrolyte	<i>Molten Carbonate</i>
	Operating Temp. °C	500 - 650
	Anode Reactions	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$
	Cathode Reaction	$\frac{1}{2} O_2 + 2H + 2e^- \rightarrow H_2O^-$
	Mobile ion	$CO_3^{2-}$
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Electrolyte	<i>Ceramic Compound</i>
	Operating Temp. °C	600 - 1000
	Anode Reactions	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$
	Cathode Reaction	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
	Mobile ion	$O^{2-}$



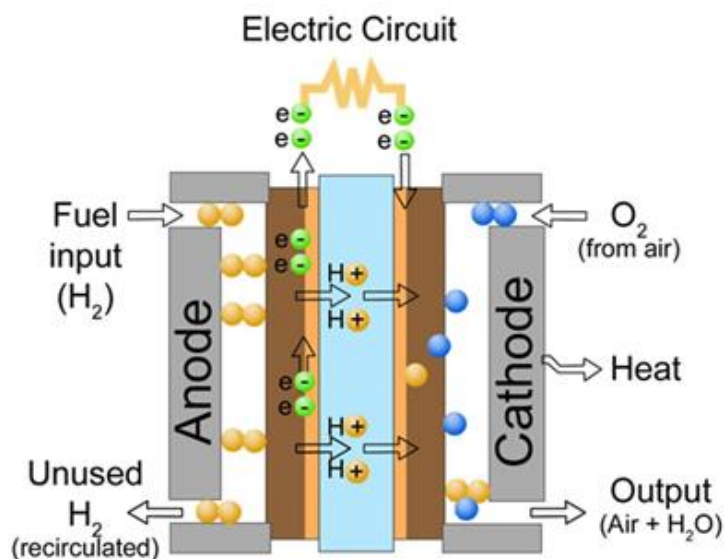


Рис. 2.1. Паливна комірка з протонно-обмінною мембраною

Більшість паливних елементів живиться воднем, який може безпосередньо подаватися в систему паливних елементів або може генеруватися в цій же системі, шляхом реформування багатих воднем палив, таких як метанол, етанол та вуглеводневі види палива тощо.

## 2.2. Принцип роботи паливної комірки

Незалежно від типу, принцип роботи паливних елементів однаковий. Водень, який є найпростішим атомом, що складається з одного протона та одного електрона та не включає жодних нейтронів, розчіплюється за допомогою матеріалу каталізатора на елементарні складові: протон та негативно заряджений електрон. Якщо реакція здійснюється шляхом прямого змішування водню та кисню за наявності каталізатора, продуктами будуть лише вода та тепло, оскільки процес є екзотермічним. Проте, в паливній комірці цю реакцію потрібно контролювати так, щоб потоки електронів та протонів були розділені, та щоб створити потік електронів через зовнішню схему, що вироблятиме струм, якого вимагає навантаження. Для цього водень та кисень не змішують у паливній

комірці. Вони містяться в двох окремих відсіках, розділених протонною провідною електролітною мембраною (рис. 2.2.). Електролітна мембрана дає можливість для паливного елемента проводити електричний струм і повинна бути вологою, для того щоб дозволити протонам проходити через її поверхню.

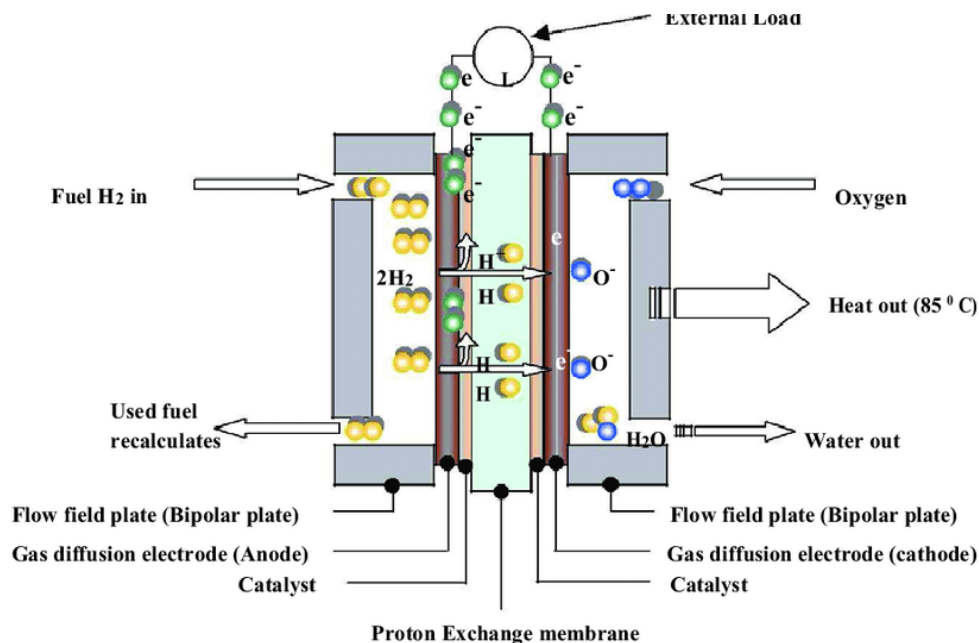


Рис. 2.2. Схема роботи PEMFC [21]

Водень надходить на анодну стінку паливної комірки і протікає через каталізатор під тиском. Коли молекула  $H_2$  контактує з платиною на каталізаторі, вона розщеплюється на два іони  $H^+$  та два електрони  $e^-$ . Електрони проводяться через анод, де вони проходять через зовнішній ланцюг. Таким чином отримується корисна робота, наприклад поворотом ротора електродвигуна, і електрони знову повертаються на катодну сторону паливної комірки.

В той же час на катодній стороні паливної комірки газоподібний кисень витікає через каталізатор, де він утворює два атоми кисню. Кожен з цих атомів має сильний негативний заряд. Цей заряд притягує два іони  $H^+$  через мембрану, де вони з'єднуються з атомом кисню і двома електронами з зовнішнього ланцюга. При цьому утворюється молекула води.

В одному паливному елементі ця реакція утворює напругу близько 0,7 В [21].

### 3. ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ

#### 3.1. Методи та засоби зберігання водню

Водень має високу енергоємність за масою, в порівнянні з бензином (водень – 120 МДж/кг, бензин – 44МДж/кг), але має погану об'ємну енергоємність (водень, при стандартних температурі та тиску – 0,01 МДж/л, бензин – 32 МДж/л). Цей недолік створює значні труднощі в зберіганні великої кількості водню для транспортних засобів. На рис. 3.1 зображені методи зберігання водню.

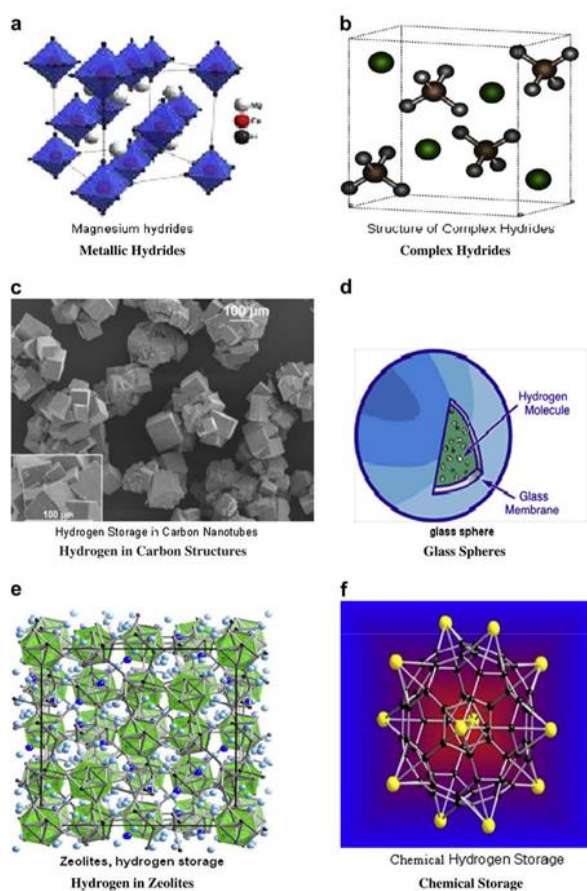


Рис. 2.3. Методи та засоби зберігання водню на автомобілі: а) гідриди металів; б) комплекс гідридів; с) водень у вуглецевих структурах; d) скляні сфери; е) водень в цеолітах; f) хімічне зберігання [21]

До методів зберігання водню на борту автомобіля відносяться поточні методи, які включають стислий водневий газ, вакуумний і рідкий водень, сорбенти, гідриди металів і хімічні гідриди, які класифікуються як «реверсивні бортові» або «регенеративні поза бортом».

Система зберігання водню складається з таких компонентів як: бак, клапани, трубопроводи, теплоізоляція, реагенти та інше, в той час, як матеріальна цінність враховує тільки реагенти та матеріали, що містять в собі водень.

### **3.2. Небезпека зберігання водню**

Водень має унікальні властивості, які дуже відрізняються від властивостей часто використовуваних видів палива, особливо таких як природний газ та бензин.

Бортовий накопичувач стисненого газоподібного водню для водневих транспортних засобів призначений, як правило, для типових робочих тисків: 35 МПа та 70 МПа. Для бортового зберігання використовують композитні резервуари CGH2 завдяки їх малій масі та характеристикам міцності. Їх виготовляють із поліетиленового вкладиша з високою густиною та покривають вуглецевим волокном з епоксидною смолою. Недоліком такого резервуару є руйнування під дією теплового навантаження, наприклад, від вогню.

Водень є не більш небезпечним, ніж будь-яке легкозаймисте паливо. Як і інші палива, водень можна також використовувати, якщо відомі його властивості та вжиті запобіжні заходи. Фактично, деякі характеристики водню насправді забезпечують додаткові переваги щодо безпеки, ніж бензин та інші види палива.

#### 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМОБІЛЯ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Існує безліч програм, завдяки яким створюються нові автомобілі. Одну з таких програм розробила Національна лабораторія відновлюваної енергії США. Це програма ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) – вдосконалений симулятор автомобілів. Користувач може здійснювати обмін різними компонентами, конфігураціями транспортного засобу та стратегіями управління, завдяки тому, що в модульне середовище Matlab та Simulink можна включати різні характеристики та інформацію про автомобіль. Ще з особливих функцій ADVISOR є те, що вони включають в себе можливість швидко виконувати параметричні та точні дослідження параметрів автомобіля на загальну продуктивність та економічність.

Виходячи з того, що людство віддає перевагу малим та компактним автомобілям, на базі такої програми ADVISOR, були проведені розрахунки саме для такого автомобіля. Даний автомобіль, параметри якого наведені в табл. 4.1, а схема на рис. 4.1., має ряд гібридних електричних складових. Потужність двигуна береться з паливного перетворювача та з системи зберігання енергії. В якості паливного перетворювача і системи накопичення енергії використовуються стек водневих паливних комірок та нікелева металогідридна (NIMH) батарея. Ці та інші базові компоненти були визначені для використання в елементах текстових документів ADVISOR з платформою моделювання Matlab та Simulink. Дані основних компонентів наведені в додатку. Маса розрахованого автомобіля становить 1446 кг, при чому маса вказаних компонентів досягла 447 кг.

Таблиця 4.1

Компоненти автомобіля

Параметр	Обраний варіант
Load File	fuel_cell_h2_in

Drivetrain Config	fuel cell
Vehicle	VEH_compact
Fuel Convecter	fcell; net; FC_ANL50H2
Exhaust Aftertreat	EX_FUELCELL_NULL
Energy Storage	rint; nimh; ESS_NIMH90_OVONIC
Motor	MC_PM32
Transmission	man; man; TX_1SPD
Wheel/Axle	WH_SMCAR
Accessory	Var; Spd; ACC_SMALL_CAR_AC
Powertrain	Control fc; man; PTC_FUELCELL
Type of drive	front wheel drive

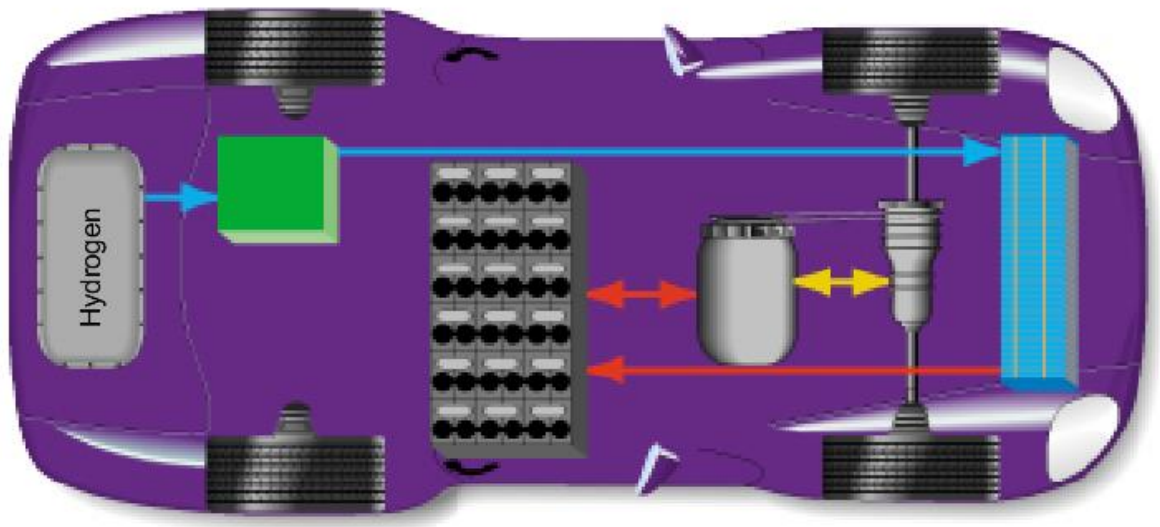


Рис. 4.1. Схема трансмісії автомобіля

Система рушійної сили створює механічну енергію, яка зберігається у вигляді кінетичної та потенційної енергій.

#### 4.1. Математична модель, що використовується в середовищі ADVISOR, та результати моделювання

Поздовжню динаміку автомобіля описує елементарне рівняння:

$$P_t = F_t \dot{x}(t) = (F_i + F_a + F_r + F_g) \dot{x}(t), \quad (4.1)$$

де  $P_t$  та  $F_t$  – рушійна потужність та сила, н.

Сила інерції, н:

$$F_i = (m_{veh} k_m + m_{cargo}) \dot{x}(t) \dot{x}(t). \quad (4.2)$$

Сила аеродинамічного опору, н:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d \dot{x}(t)^2. \quad (4.3)$$

Сила опору кочення, н:

$$F_r = c_r (m_{veh} + m_{cargo}) g \cos(\alpha). \quad (4.4)$$

Сила тяжіння, н:

$$F_g = (m_{veh} + m_{cargo}) g \sin(\alpha), \quad (4.5)$$

де  $\dot{x}(t)$  – функція положення автомобіля від часу,  $m_{veh}$  – маса автомобіля, кг;  $m_{cargo}$  – маса вантажу, кг;  $k_m$  – еквівалент збільшення маси за рахунок обертаючих компонентів;  $\rho_a$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $A_f$  – фронтальна площа автомобіля, м<sup>2</sup>;  $c_d$  – аеродинамічний коефіцієнт;  $c_r$  – коефіцієнт опору кочення.

Водій дає команду руху чи гальмування через акселератор або педаль гальма, яка представлена наданням потужності –  $P_{comm}$ , яку двигун очікує виробляти. Таким чином, у режимі руху, вхідна електрична потужність на привід двигуна може бути виражена як:

$$P_{m-in} = \frac{P_{comm}}{\eta_m}, \quad (4.6)$$

де  $\eta_m$  – коефіцієнт корисної дії двигуна.

Однак, при гальмуванні, функції приводу двигуна стають такі, як у генератора, а вихідна потужність електродвигуна, Вт:

$$P_{m-out} = P_{mb-comm} \eta_m, \quad (4.7)$$

де  $P_{mb-comm}$  – команда скидання потужності, необхідної для гальмування двигуна, яка може відрізнитись від команди потужності  $P_{comm}$ , так як не вся гальмівна рідина може забезпечити рекуперативне гальмування.

#### 4.1.1. Блок-схема автомобіля на протоно-обмінних мембранних паливних елементах

Саме протоно-обмінний мембранний паливний елемент найбільше підходить для використання в автомобільній промисловості, завдяки його структурі електроліту, високій щільності потужності та низькій робочій температурі. Приймаємо схему автомобіля на паливних елементах, що наведено на рис. 4.2.

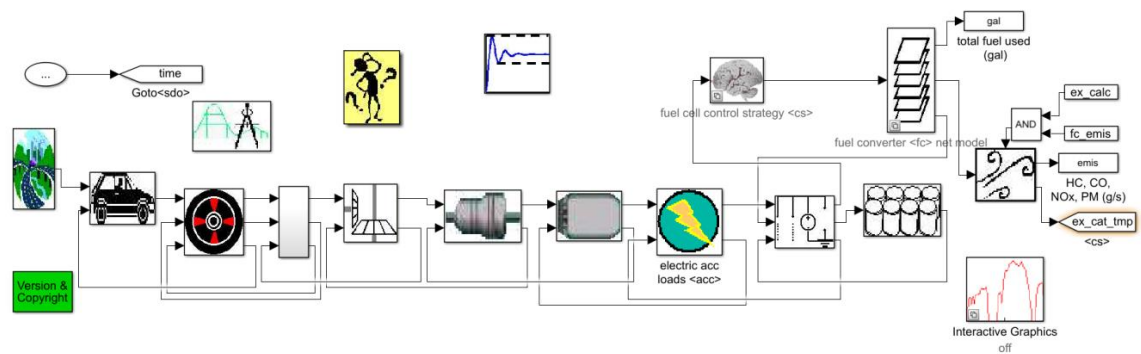


Рис. 4.2. Блок-схема автомобіля

#### 4.1.2. Моделювання паливної комірки

Хімічна реакція в паливному елементі аналогічна реакції у хімічній батареї. Термодинамічна напруга паливного елемента тісно пов'язана з енергією та кількістю електронів, переданих реакції. Енергія, отримана від реакції комірки, визначається зміною вільної енергії Гіббса  $\Delta G$ , яка зазвичай виражається в молях. Зміна вільної енергії Гіббса в хімічній реакції може бути виражена як:

$$\Delta G = \sum_{Products} G_i - \sum_{Reactants} G_j, \quad (4.8)$$



де  $G_i$  та  $G_j$  – вільні енергії типу  $i$  продуктів та  $j$  – реагентів. У зворотному процесі,  $\Delta G$  повністю перетворюється в електричну енергію, тобто

$$\Delta G = -nFV_r, \quad (4.9)$$

де,  $n$  – кількість електронів переданих в реакції;  $F$  – стала Фарадея,  $F = 96,495$  Кл/моль;  $V_r$  – зворотна напруга комірки. За нормальних умов: температура  $25^\circ$  та тиск  $0,1$  МПа.

Напруга розімкнутого контуру зворотного елементу стеку може бути виражена як:

$$V_r^0 = -\frac{\Delta G^0}{nF}, \quad (4.10)$$

де  $\Delta G^0$  – різниця вільної енергії Гіббса за нормальних умов.  $\Delta G$  може виражатись як:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (4.11)$$

де  $\Delta H$  та  $\Delta S$  – ентальпія та ентропія реакції при нормальній температурі  $T$  відповідно. В таблиці 5.2 наведені термодинамічні дані рівнянь за нормальних умов.

Таблиця 4.2

Термодинамічні дані для хімічних реакцій з воднем, при нормальних умовах

Рівняння	$\Delta H_{298}^\circ$ , кДж/моль	$\Delta S_{298}^\circ$ , кДж/моль·К	$\Delta G_{298}^\circ$ , кДж/моль	$n$ ,	$E^\circ$ , В	$\eta_{id}$ , %
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O (l)$	-286,2	-0,1641	-237,3	2	1,23	83
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O (g)$	-242	-0,045	-228,7	2	1,19	94

Ідеальна ефективність оберненої гальванічної комірки пов'язана з ентальпією реакції комірки:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{\Delta S}{\Delta H} T. \quad (4.12)$$

Вона може сягати 100%, якщо електрохімічна реакція не змінює кількість газових молей, тобто коли  $\Delta S = 0$ . Але якщо  $\Delta S > 0$ , то в комірці відбувається ізотермічна та обернена реакція, яка має в своєму розпорядженні не тільки хімічну енергію, але й кількість тепла, що поглинається з навколишнього середовища для перетворення в електричну енергію.

Зміна вільної енергії, а також напруга комірки в хімічній реакції являється функцією активності видів рішення. Залежність напруги комірки від активності реагенту можна виразити наступним чином:

$$V_r = V_r^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{\prod (\text{activities of products})}{\prod (\text{activities of reactants})} \right], \quad (4.13)$$

де  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,31$  Дж/моль·К;  $T$  – абсолютна температура, К [93].

Для газоподібних реагентів та продуктів рівняння (4.13) виражається так:

$$V_r = V_r^0 - \frac{RT}{nF} \sum_i V_i \ln \left( \frac{p_i}{p_i^0} \right), \quad (4.14)$$

де  $V_r$  – напруга комірки, в якій протікає реакція газоподібних учасників при ненормальному тиску  $p_i$ ;  $V_r^0$  – відповідне значення напруги комірки з всіма газами при нормальному тиску  $p_i^0$ ;  $V_i$  – кількість молей типу  $i$ , які є позитивними для продуктів та негативними для реагентів.

#### 4.1.3. Моделювання паливних елементів

Ефективність паливних елементів, типу PEM, є високою в малому робочому діапазоні. За малої потужності, високе значення відношення додаткових підсистем до потужності, виробленої паливними елементами, та стрімке падіння напруги при великій потужності, викликають значні втрати ефективності паливних елементів. Контролер потужності повинен бути спроектований так, щоб паливний елемент працював в оптимальній області ефективності для підвищення ефективності самої системи.

Вихідна напруга паливних елементів може бути визначена наступним чином:

$$V = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}, \quad (4.16)$$

де:

$$E_{nerst} = E^0 - RT \ln \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}, \quad (4.17)$$

де  $V$  – напруга паливної комірки, В;  $E_{nerst}$  – напруга Нернста, В;  $V_{act}$  – втрати робочої напруги, В;  $V_{ohm}$  – втрати омичної напруги, В;  $V_{conc}$  – втрати концентраційної напруги, В;  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$ ,  $P_{H_2O}$  – парціальний тиск водню, кисню та води відповідно.

Втрати робочого процесу можуть бути виражені через рівняння Тафеля, що показує взаємовідношення швидкості електрохімічної реакції та перенапруги:

$$V_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left( \frac{I_{FC}}{I_0} \right). \quad (4.18)$$

Омічні втрати визначаються за наступним рівнянням:

$$V_{ohm} = I_{FC} R \quad (4.19)$$

Втрати концентрації можуть бути виражені так:

$$V_{conc} = -\frac{RT}{2F} \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{max}} \right), \quad (4.20)$$

де  $I_{FC}$  – струм PEMFC, А;  $\alpha$  – нахил Тафеля для активаційних втрат;  $I_0$  – густина обмінного струму для активації, мА/см<sup>2</sup>;  $j_{max}$  – максимальна густина струму для концентрації, А/см<sup>2</sup>.

Кількість споживаного водню визначається наступним чином:

$$H_{2conso} = \frac{N_{cell} I_{FC}}{2F}, \quad (4.21)$$

де  $H_{2conso}$  – кількість споживаного водню, моль/с;  $N_{cell}$  – кількість паливних елементів.

Ефективність паливних елементів може розраховуватися за наступною формулою:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{\dot{m}_H LHV_H}, \quad (4.22)$$

де  $LHV_H$  – нижча теплотворна здатність водню.

Здатність реагувати паливним елементам на перехідні коливання ( $\frac{dP_{FC}}{dt}$ ) зазвичай обмежена. В даній моделі паливних елементів швидкість збільшення потужності була обмежена постійним значенням  $P_{FC_{max}}$ . Припускається, що воно дорівнює 4000 Вт/с на 100 кВт паливного елемента:

$$\frac{dP_{FC}}{dt} \leq P_{FC_{max}} \quad (4.23)$$

В даній роботі використовується стек паливних елементів на 50 кВт, з характеристиками наведеними в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Технічна характеристики паливних елементів

Тип	FC_ANL50H2
Тип палива	Водень
Вихідна потужність	50 кВт
Кількість комірок	167
Робоча температура	80°
Максимальна ефективність	0,6

В даному випадку, ефективність є паливною, що являє собою співвідношення зусилля до результату процесу, під час якого хімічний потенціал енергії перетворюється у кінетичну енергію (роботу). На рис. 4.3 зображена отримана залежність паливної ефективності від потужності паливних комірок.

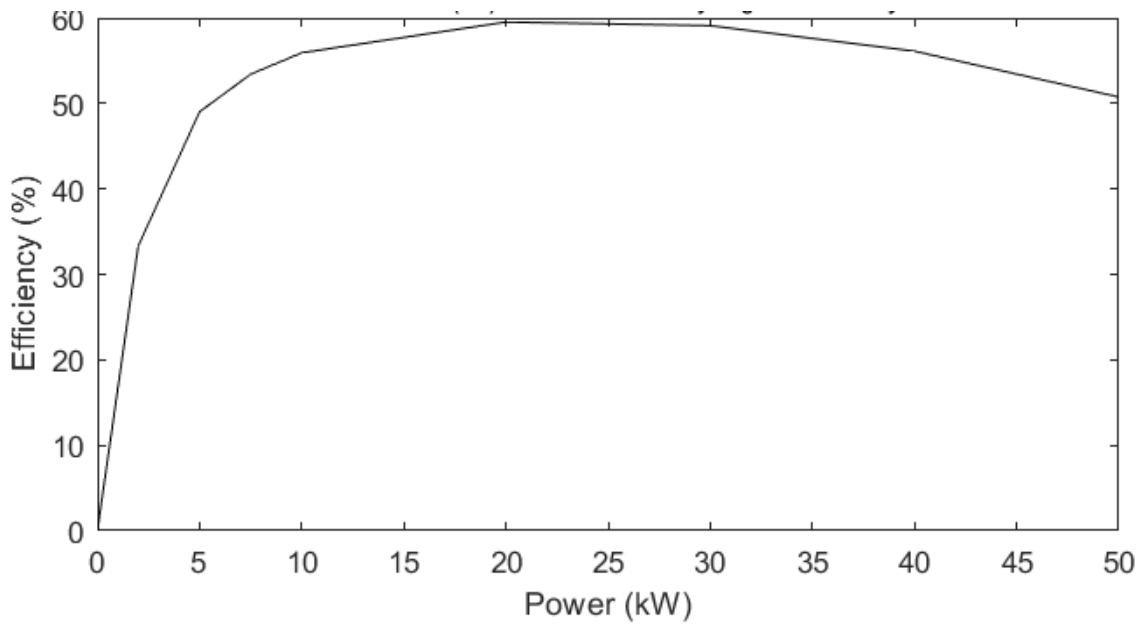


Рис. 4.3. Залежність ефективності від потужності паливних елементів

За допомогою програми ADVISOR отримана залежність питомої витрати палива від потужності стеку паливних елементів, зображеним на рис. 4.4, де межа між 10 та 40 кВт є задовільним діапазоном.

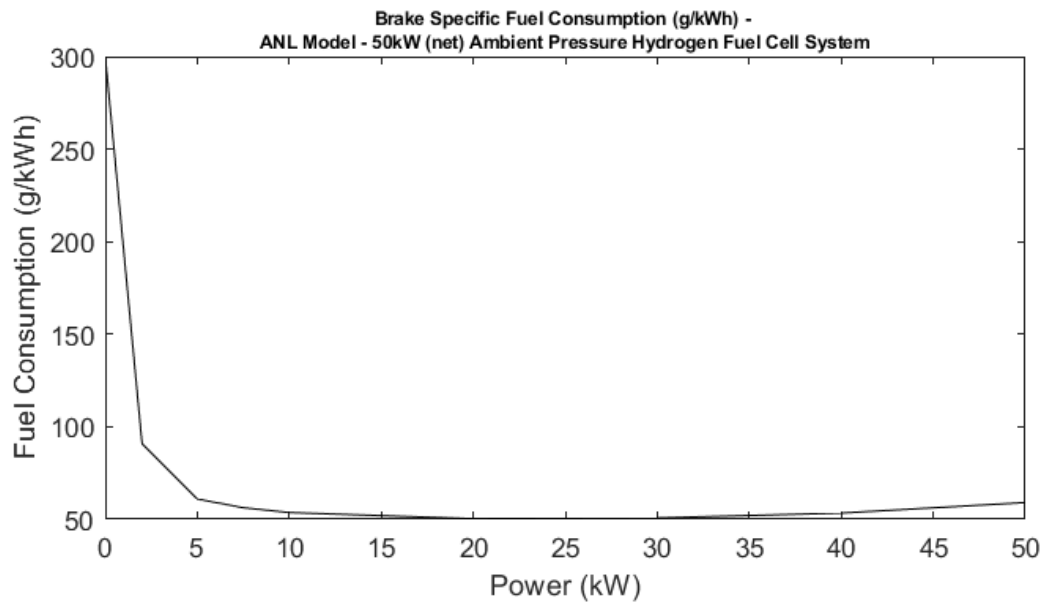


Рис. 4.4. Залежність питомої витрати палива від потужності PEMFC

#### 4.1.4. Моделювання інвертора/перетворювача

Зазвичай, цей пристрій має ефективність від 90 до 99% і був спрощений до постійної ефективності  $\eta_{EIC}$ :

$$P_{EICout} = \eta_{EIC} P_{EICin}, \quad (4.24)$$

де  $P_{EICout}$  – вихідна потужність,  $P_{EICin}$  – потужність, що поступає на електронний пристрій.

Перетворювач є другим джерелом енергії та обирається для реагування на вимоги потужності гібридного автомобіля. У цій роботі використовується модуль Maxwell VMOD0083 P048 B01 [98]. Він дозволяє перемикати потужність між системою зберігання енергії та синхронного двигуна постійного магніту (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM). У режимі роботи накопичення енергії, додаткове джерело отримує енергію під час фаз гальмування (фаз заряду суперконденсатора). У режимі підвищення потужності, суперконденсатор, генерує потужність і допомагає паливній комірці (фаза розряду в суперконденсаторі).

Напруга відкритої електричної мережі суперконденсатора задана наступним виразом:

$$E_{SC} = E_{SC0} - \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t I_{SC} dt, \quad (4.25)$$

де  $C_{SC}$  – місткість Ф; та  $I_{SC}$  – струм суперконденсатора, А.

Енергія суперконденсатора:

$$X_{SC} = \frac{C_{SC} E_{SC}^2}{2} \quad (4.26)$$

$$X_{SC \max} = \frac{C_{SC} E_{SC0}^2}{2} \quad (4.27)$$

Рівень заряду (state of charge, SOC) можна записати як:

$$SOC = \frac{X_{SC}}{X_{SC \max}} \quad (4.28)$$

Вихідна напруга суперконденсатора:

$$V_{SC} = E_{SC} - R_{SC}i_{SC} \quad (4.29)$$

де  $X_{SC}$ ,  $X_{SC \max}$  – енергія та максимальна енергія що міститься в суперконденсаторі, Дж;  $R_{SC}$  – внутрішній опір суперконденсатора, Ом.

#### 4.1.5. Вибір електродвигуна

Для такого компоненту, як електродвигун, підхід полягає в отриманні залежності ефективності двигуна  $\eta_{EM}$  від швидкості обертання ротора  $\omega_{EM}$  та навантаження  $L_{EM}$ :

$$L_{EM} = \frac{T_{EM}(\omega_{EM})}{T_{EM \max}(\omega_{EM})}, \quad (4.30)$$

де  $T_{EM}$  відноситься до крутного моменту електродвигуна.

Важливо враховувати електромагнітний момент інерції (в тому числі колеса та всі обертаючі частини). Якщо ж це не відомо, то прийнято збільшувати конкретний відсоток маси ТЗ близько 5% –  $k_m = 1,05$ .

Модель PMSM може бути виражена як система наступних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_q = R_s i_q + L_q p i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Phi_q \\ V_d = R_s i_d + L_d p i_d - \omega_r L_d i_d \\ \Phi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \\ T_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_q i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \end{array} \right. , \quad (4.31)$$

де швидкість ротора впливає з наступного рівняння:

$$T_{em} = T_L + B \omega_m + J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (4.32)$$

де  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $d$ ,  $q$  – напруги, В;  $i_d$ ,  $i_q$  – струми статора, А;  $L_d$ ,  $L_q$  – індуктивності, Гн;  $\Phi_d$ ,  $\Phi_q$  – магнітні потоки статора, Вб;  $R_s$  – опір обмотки статора, Ом;  $\omega_r$  – швидкість ротора, рад/с;  $T_L$  – навантажувальний момент, Н·м;  $\Omega$  – механічний імпульс ротора, рад/с;  $J$  – загальна інерція направлена до ротора, кг·м<sup>2</sup>.

Коли електричний двигун працює вище номінальної потужності, його температура почне швидко збільшуватись, тому ця функція не може бути непереривною, бо двигун перегріється і це обмежить очікувану тривалість його служби. Час, під час якого ТЗ може витримувати надмірний крутний момент, вважається безкінечним, що в більшості випадків не є проблемою, так як цей тип використання необхідний для коротких часових інтервалів, наприклад, коли автомобіль прискорюється. В ситуації підвищеного ризику, розглядається ефективність така ж, як і при максимальному номінальному значенні. Коефіцієнт надмірності крутного моменту визначається:

$$OT = \frac{T_{EM\ transient}}{T_{EM\ continuous}}, \quad (4.33)$$

де  $T_{EM\ transient}$  – максимальний перехідний крутний момент та  $T_{EM\ continuous}$  – максимальний безперервний крутний момент без перегріву.

Зазвичай виробники не надають інформацію про ефективність, крутний момент або потужність та ефективність в залежності від швидкості електродвигуна. Тому значення  $OT$  також може бути недоступним. У даному випадку така інформація невідома, тому карта програми ADVISOR, що зображена на рис. 4.5., була відповідно масштабована (з включеним інвертором), для досягнення максимальної продуктивності 55 кВт.



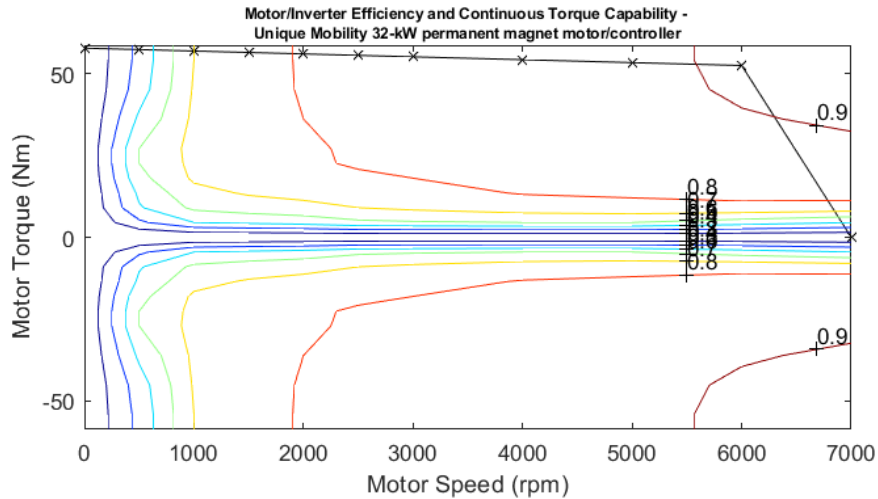


Рис. 4.5. Ефективність та крутний момент двигуна

#### 4.1.6. Моделювання системи зберігання енергії

Для моделювання було обрано нікелеву металогідридну (NiMH), оскільки вони більш підходять для застосування у автомобілях [21].

Рівень заряду акумуляторної батареї оцінюється за наступним виразом:

$$SOC = \frac{Ah_{max} - Ah_{used}(\eta_{Coulomb})}{Ah_{max}}, \quad (4.34)$$

де

$$Ah_{used} = \int_0^t \eta_{Coulomb} A dt, \quad \begin{array}{l} A > 0 \text{ розряд,} \\ A < 0 \text{ заряд.} \end{array} \quad (4.35)$$

На рис. 4.10 зображено як змінюється опір батареї від зміни заряду. З цієї залежності видно, що опір батареї мінімальний в діапазоні 0,2-0,8 рівня заряду батареї, а також втрати енергії менші, чим в інших місцях. Характеристики обраної акумуляторної батареї наведені в табл. 4.4.

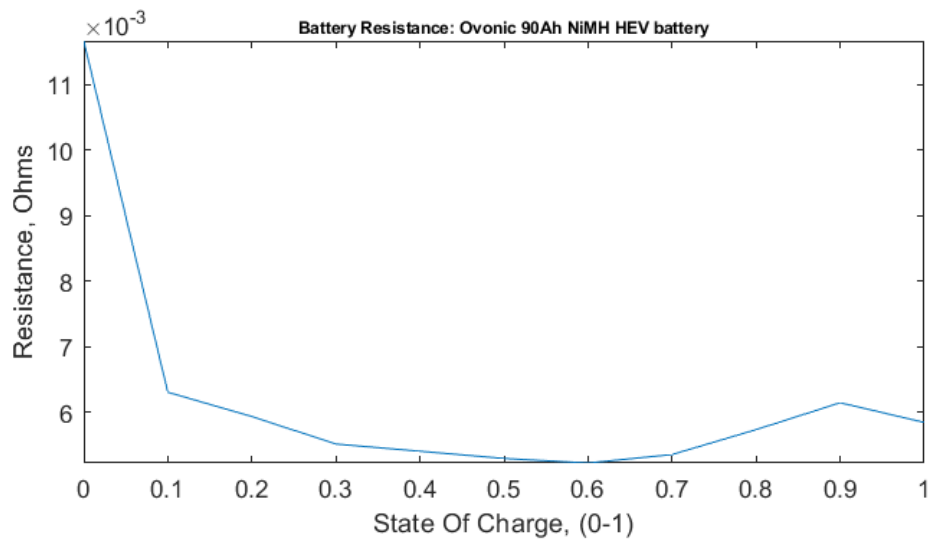


Рис. 4.6. Залежність опору від рівня заряду батареї

Таблиця 4.4

#### Характеристика акумуляторної батареї

Тип	ESS_NIMH90_OVONIC
Номінальна напруга	12 В
Номінальна ємність	90 А·год
Об'єм (лише модулів)	6,1 л
Номінальна енергія	1100 Вт·год
Максимальна потужність	7,0 кВт
Кількість модулів	25

#### 4.1.7. Вибір системи управління енергією

Керування енергією повинно забезпечувати потік енергії між системою зберігання та трансмісією з метою захопити енергію гальмування під час різних фаз керування авто, особливо у міських циклах.

Запропонований алгоритм управління енергією полягає в мінімізації паливних елементів, що відповідає мінімізації споживання водню. Суперконденсатор забезпечує різницю між отриманою потужністю від

паливного елемента і потрібною потужністю від PMSM. Відношення потужності між паливним елементом, суперконденсатором та навантаженням визначається наступним чином:

$$P_{load} = P_{fuel} + P_{sc} \quad (4.36)$$

## ВИСНОВКИ

1. Автомобілі на водневих паливних елементах є достатньо перспективними, оскільки вони мають ряд переваг: незалежність від нафти, відсутність шкідливих викидів та парникових газів, швидка заправка. Більш безпечним методом зберігання водню є зберігання, транспортування та генерація у гідридах металів, на відміну від зберігання під тиском.
2. Виконано комп'ютерне моделювання автомобіля з використанням протонно-обмінних мембранних паливних елементів. Двигун вказаного автомобіля розвиває потужність 50 кВт.
3. Створений програмний код у програмному середовищі ADVISOR дозволяє розробляти та проводити аналіз роботи аналогічних автомобілів з іншими параметрами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Hickman J. Clean vehicles, renewable energy focus. March/april, 2009, 33–34 pp.
2. Li Bing, Li Hui, Ma Jianxin. PEM fuel cells: current status and challenges for electrical vehicle applications. J. Automotive Safety Energy, 2010; 1 (4).
3. Eberle U., Rittmar von Helholt. Fuel cell electric vehicles, battery electric vehicles, and their impact on energy storage technologies, ISBN 978-0-444-53565-8.
4. Tabbi Wilberforce, Zaki El-Hassan, F.N. Khatib, Ahmed Al Makky, Ahmad Baroutaji, James G. Carton, Abdul G. Olabi. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. Hydrogen Energy Publications LLC, 31 August 2017.

5. Tie S.F, Tan C.W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013; 82 – 102 pp.
6. Chan C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. In: *Proceedings of the IEEE*, vol. 95; 2007. 704 – 718 pp.
7. Harrop P., Das R. Hybrid and pure electric cars 2009-2019. 2009. Research report on, [http://www.idtechex.com/research/reports/hybrid\\_and\\_pure\\_electric\\_cars\\_2009\\_2019\\_000227.asp](http://www.idtechex.com/research/reports/hybrid_and_pure_electric_cars_2009_2019_000227.asp)
8. Johnen T., Von Helmlolt R., Eberle U. In: *Conference proceedings volume of the technischer kongress. German Automotive Industry Association VDA*; 2009.
9. Pesaran A.A., Gonder J.D., Keyser M. Ultra-capacitor applications and evaluation for hybrid electric vehicles. *Natl. Renew. Energy Lab*; 2009.
10. Chan C-C., Bouscayrol A., Chen K. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: architectures and modeling. *Veh. Technol. IEEE Trans.* 2010; 59: 589-598 pp.
11. Emadi A., Rajashekara K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron* 2008; 55: 2237 – 2245 pp.
12. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy. Charging Plug-In Electric Vehicles at Home. URL: [https://afdc.energy.gov/fuels/electricity\\_charging\\_home.html](https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_charging_home.html)
13. Moulson G., Moore M. Germany jumps in the race of viable electric car, *Google news*. 2009, dated on 19.08.2009.
14. Mekhilef S., Saidur R., Safari A. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012; 981 – 989 pp.
15. Carton J.G., Olab A.G. Design of experiment study of the parameters that affect performance of three flow plate configurations of a proton exchange membrane fuel cell. *Energy* 2010; 35 (7). 2796 – 2806 pp.
16. Pesaran A.A., Gonder J.D., Keyser M. Ultra-capacitor applications and evaluation for hybrid electric vehicles. *Natl. Renew. Energy Lab*; 2009.

17. Emadi A., Williamson S.S., Khaligh A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. *Power Electron IEEE Trans.* 2006; 21: 567 – 577 pp.
18. Al Sakka M., Van Mierlo J., Gualous H. DC/DC converters for electric vehicles. *Electr. Vehe. Model Simul.* 2011: 309 p.
19. Ahn B., Lim T. Fuel cell vehicle development at Hyundai-Kai Motors. *IEEE*; 2006. 18 – 20th Oct., 199 – 201 pp.
20. John Jostins. *Microcab. Applications in Regional and Municipal transport. Demonstration of Small 4-Wheel fuel cell passenger vehicle*, Brussels, 14 – 15 November, 2018.
21. Mustafa, M.Y.F.A., "Design and manufacturing of a (PEMFC) proton exchange membrane fuel cell," Unpublished PhD Thesis. Coventry University, 2009.

Дані основних компонентів автомобіля до програми Matlab

```
% ADVISOR Data file:  FC_ANL50H2.m
%
% Data source:  Romesh Kumar, Argonne National Lab
%
% Data confidence level:
%
% Notes: Modeling results for a 50kW net fuel cell system operating on hydrogen.
%
% Created on:  08/28/98
% By:  Tony Markel, National Renewable Energy Laboratory, Tony_Markel@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_description='ANL Model - 50kW (net) Ambient Pressure Hydrogen Fuel Cell
System';
fc_version=2003; % version of ADVISOR for which the file was generated
fc_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
fc_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection methods have been verified
disp(['Data loaded: FC_ANL50H2.m - ',fc_description]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FUEL USE AND EMISSIONS MAPS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (g/s), fuel consumption indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_pwr_map=[0 2 5      7.5    10      20      30      40      50]*1000; % kW
(net) including parasitic losses
```

```

fc_eff_map=[10 33 49.2 53.3    55.9    59.6    59.1    56.2    50.8]/100; %
efficiency indexed by fc_pwr
% two low power points are estimated
% create fuel use map (g/s)
fc_fuel_map=[0.012 0.05 0.085 0.117 0.149 0.280 0.423 0.594 0.821]; % used in
block diagram
% create fuel consumption map (g/kWh)
fc_fuel_lhv=120.0*1000; % (J/g), lower heating value of the fuel
fc_fuel_map_gpkWh=(1./fc_eff_map)/fc_fuel_lhv*3600*1000; % used in gui_inpchk
plots
% (g/s), engine out HC emissions indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_hc_map=zeros(size(fc_fuel_map));
% (g/s), engine out HC emissions indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_co_map=zeros(size(fc_fuel_map));

% (g/s), engine out HC emissions indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_nox_map=zeros(size(fc_fuel_map));
% (g/s), engine out PM emissions indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_pm_map=zeros(size(fc_fuel_map));
% (g/s), engine out O2 indexed vertically by fc_map_spd and
% horizontally by fc_map_trq
fc_o2_map=zeros(size(fc_fuel_map));
fc_emis=0;      % boolean 0=no emis data; 1=emis data

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cold Engine Maps
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_cold=0;      % boolean 0=no cold data; 1=cold data exists
fc_cold_tmp=20; %deg C
fc_fuel_map_cold=zeros(size(fc_fuel_map));
fc_hc_map_cold=zeros(size(fc_fuel_map));
fc_co_map_cold=zeros(size(fc_fuel_map));
fc_nox_map_cold=zeros(size(fc_fuel_map));
fc_pm_map_cold=zeros(size(fc_fuel_map));
%Process Cold Maps to generate Correction Factor Maps

```

```

names={'fc_fuel_map','fc_hc_map','fc_co_map','fc_nox_map','fc_pm_map'};
for i=1:length(names)
    %cold to hot raio, e.g. fc_fuel_map_c2h = fc_fuel_map_cold ./ fc_fuel_map
    eval([names{i},'_c2h=',names{i},'_cold./(',names{i},'+eps);'])
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFAULT SCALING
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_pwr_scale=1.0; % -- scale fc power
%the following variable is not used directly in modelling and should always be
equal to one
%it's used for initialization purposes
fc_eff_scale=1.0; % -- scale the efficiency
fc_trq_scale=1.0; % -- required only for autosize and optimization routines
fc_spd_scale=1.0; % -- required only for autosize and optimization routines

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_fuel_cell_model=2; % 1--> polarization curves, 2--> pwr vs. eff, 3--> gctool
model
fc_fuel_type='Hydrogen';
fc_fuel_den=0.018*1000; % (g/l), density of the fuel
fc_fuel_lhv=120.0*1000; % (J/g), lower heating value of the fuel
fc_max_pwr=(max(fc_pwr_map)/1000)*fc_pwr_scale; % kW peak engine power
%fc_base_mass=5.0*fc_max_pwr; % kg mass of the fuel cell stack,
assuming mass penalty of 5 kg/kW (DOE 2000 status)
fc_base_mass=2.5*fc_max_pwr; % kg mass of the fuel cell stack, assuming
mass penalty of 2.5 kg/kW (DOE 2004 target)
fc_acc_mass=0.5*fc_max_pwr; % kg mass of fuel cell accy's, electrics,
cntrl's - assumes mass penalty of 0.5 kg/kW ESTIMATE
target_range=350; % mi
target_fe=80; % mpgge
gas_lhv=42.6*1000; % J/g
gas_dens=0.749*1000; % g/l
target_fuel_storage_spec_energy=2000; % Wh/kg from DOE targets
fc_fuel_mass=target_range/target_fe*3.785*gas_lhv*gas_dens/3600/target_fuel_stor
age_spec_energy;

```



```

% (kg), fuel storage mass assuming specified range and specified fuel economy
fc_mass=fc_base_mass+fc_acc_mass+fc_fuel_mass; % kg total engine/fuel system
mass
%fc_mass=max(fc_map_spd.*fc_max_trq)/132; % (kg), mass of the engine, assuming
specific power of 132 W/kg
clear gas_lhv gas_dens target_range target_fe target_fuel_storage_spec_energy
% variables not applicable to a fuel cell but needed for use of engine block
diagram
fc_tstat=80; % C engine coolant thermostat set temperature
(typically 80 +/- 5 C)
fc_cp=500; % J/kgK ave cp of engine (iron=500, Al or Mg =
1000)
fc_h_cp=500; % J/kgK ave cp of hood & engine compartment
(iron=500, Al or Mg = 1000)
%fc_ext_sarea=0.3; % m^2 exterior surface area of engine
fc_ext_sarea=2*(0.3*0.3)+4*(0.3*0.6); % m^2 exterior surface area
of engine
fc_hood_sarea=1.5; % m^2 surface area of hood/eng compt.
fc_emisv=0.8; % emissivity of engine ext surface/hood int
surface
fc_hood_emisv=0.9; % emissivity hood ext
fc_h_air_flow=0.0; % kg/s heater air flow rate (140 cfm=0.07)
fc_cl2h_eff=0.7; % -- ave cabin heater HX eff (based on air
side)
fc_c2i_th_cond=500; % W/K conductance btwn engine cyl & int
fc_i2x_th_cond=500; % W/K conductance btwn engine int & ext
fc_h2x_th_cond=10; % W/K conductance btwn engine & engine
compartment
%fc_ex_pwr_frac=[0.40 0.30]; % -- frac of waste heat
that goes to exhaust as func of engine speed
fc_ex_pwr_frac=[0.20 0.10]; % -- frac of waste heat
that goes to exhaust as func of power level, (SAE 2000-01-0373)
%fc_exflow_map=fc_fuel_map*(1+14.5); % g/s ex gas flow map: for
SI engines, exflow=(fuel use)*[1 + (stoic A/F ratio)]
fc_exflow_map=fc_fuel_map*(1+91); % g/s ex gas flow map: for
fuel cell exflow=(fuel use)*[1 + (A/F ratio)], where
1.5*H2+2.0*(O2+3.774*N2)==>H2O+0.5H2+0.5O2+2.0*3.774*N2, where 1.5=anode stoich,
and 2.0=cathode stoich

```

```

fc_waste_pwr_map=fc_fuel_map*fc_fuel_lhv - fc_pwr_map; % W tot FC waste
heat = (fuel pwr) - (mech out pwr)
fc_ex_pwr_map=zeros(size(fc_waste_pwr_map)); % W initialize size of ex
pwr map
for i=1:length(fc_pwr_map)
    fc_ex_pwr_map(i)=fc_waste_pwr_map(i)*interp1([min(fc_pwr_map)
max(fc_pwr_map)],fc_ex_pwr_frac,fc_pwr_map(i)); % W pwr map of waste heat to
exh
end
%fc_extmp_map=fc_ex_pwr_map./(fc_exflow_map*1089/1000) + 20; % W EO ex gas
temp = Q/(MF*cp) + Tamb (assumes engine tested ~20 C)
fc_extmp_map=fc_ex_pwr_map./(fc_exflow_map*1145/1000) + 20; % W EO ex gas
temp = Q/(MF*cp) + Tamb (assumes engine tested ~20 C) (cp based on exhaust
composition listed above)
% user definable mass scaling function
fc_mass_scale_fun=inline('(x(1)*fc_trq_scale+x(2))*(x(3)*fc_spd_scale+x(4))*(fc_
base_mass+fc_acc_mass)+fc_fuel_mass','x','fc_spd_scale','fc_trq_scale','fc_base_
mass','fc_acc_mass','fc_fuel_mass');
fc_mass_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients of mass scaling function

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 08/28/98 (tm): file created
% 9/5/98:sam added fc_eff_scale
% 09/15/98:MC set fc_inertia to zero
% 10/9/98 (vh,sb,ss): added pm and removed init conditions and added new exhaust
variables
% 12/17/98 ss,sb: added 12 new variables for engine thermal modelling.
% 03/15/99:MC corrected hydroden typo in fc_description
% 3/15/99:ss updated fc_version to 2.1 (was 2.0)
% 7/6/99:tm cosmetic changes and added fc_fuel_gpkWh variable for plotting
% 7/9/99:ss moved clear command from middle of file and joined it with the clear
command at end of file.
% 7/9/99:tm updated trq definition to avoid divide by zero errors
% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
% 4/10/00:tm updated parameters in thermal section
% 01/31/01: vhj added fc_cold=0, added cold map variables, added +eps to avoid
dividing by zero

```

```

% 02/26/01: vhj added variable definition of fc_o2_map (used in NOx absorber
emis.)

% 7/30/01:tm added user definable mass scaling function
mass=f(fc_spd_scale,fc_trq_scale,fc_base_mass,fc_acc_mass,fc_fuel_mass)
% 4/3/02: kh updated version from 3.2 to 2002, removed a second fc_fuel_lhv,
added Opcon Autorotor Compressor data
% 4/18/02:tm updated cp of exhaust composition from that of gasoline combustion
exhaust
% 4/26/02:tm removed low power estimate point from efficiency and power vectors
- caused interpolation errors
% 4/26/02:tm removed fuel cell system auxiliary system information - not
applicable to this model type with intro of config systems
% 4/29/02:tm updated mass relationships with current target data
% 4/29/02:tm replaced fc_fuel_map calculation with actual data

% ADVISOR data file:  EX_FUELCELL_NULL.m
%
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% File for FUEL CELL runs with ex_calc=0 (no ex sys calculations)
% Sets ex system mass (ex_mass) to zero
%
% Created on: 14-JAN-99
% By:  SDB, NREL, steve_burch@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ex_description='Null exhaust system for fuel cells';
ex_version=2003; % version of ADVISOR for which the file was generated
ex_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
ex_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection methods have been verified

```

```

disp(['Data loaded: EX_FUELCELL_NULL - ',ex_description])

ex_mass=0;          % kg      mass of exhaust system:  assumes reformer ex sys
incl'd in fc_mass

ex_calc=0;          % 0=> skip ex sys calc (if fc has no emis maps or no cat
info avail)

                    % 1=> perform ex sys calcs including tailpipe emis
ex_ornl_bool=0;     %1->Use efficiencies from ORNL data
                    %0->Use basic ADVISOR removal
                    efficiencies

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% EX SYS VARIABLES (Must be defined, but are not used since ex_calc=0)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ex_cat_tmp_range=[0 1]; % C
ex_cat_hc_frac=[0 0]; % (--)
ex_cat_co_frac=[0 0]; % (--)
ex_cat_nox_frac=[0 0]; % (--)
ex_cat_pm_frac=[0 0]; % (--)
ex_cat_lim= [1 1 1 1]'; % g/s  "break-thru" limit of converter (HC, CO, NOx)
ex_cat_mass=1;      % kg      mass of catalytic converter (from 1994 OTA
report, Table 3)
ex_cat_mon_mass=1;  % kg      mass of cat monolith (ceramic)
ex_cat_int_mass=1;  % kg      mass of cat internal SS shell
ex_cat_pipe_mass=1; % kg      mass of cat inlet/outlet pipes
ex_cat_ext_mass=1;  % kg      mass of cat ext shell (shield)
ex_manif_mass=1;    % kg      mass of engine manifold & downpipe
ex_muf_mass=1;      % kg      mass of muffler and other pipes downstream of
cat
ex_cat_pcm_mass=1;  % kg      mass of cat phase change mat'l heat storage
ex_cat_mon_cp=1;    % J/kgK   ave cp of cat int: CERAMIC MON. (SAE #880282)
ex_cat_int_cp=1;    % J/kgK   ave cp of cat int: METAL MON. (SAE #890798)
ex_cat_pipe_cp=1;   % J/kgK   ave sens heat cap of cat i/o pipes (SAE
#890798)
ex_cat_ext_cp=1;    % J/kgK   ave sens heat cap of cat ext (SAE #890798)
ex_manif_cp=1;      % J/kgK   ave sens heat cap of manifold & dwnpipe (SAE
#890798)
ex_gas_cp=1;        % J/kgK   ave sens heat cap of exh gas (SAE #890798)

```

```

ex_cat_pcm_tmp=[0 1];    % C      temp range for cat pcm ecp vec
ex_cat_pcm_ecp=[0 0];    % J/kgK  ave eff heat cap of pcm (latent + sens)
ex_cat_mon_sarea=1;      % m^2    outer surface area of cat monolith
ex_cat_monf_sarea=1;     % m^2    surface area of cat monolith front face
ex_cat_moni_sarea=1;     % m^2    inner (honeycomb) surf area of cat monolith
ex_cat_int_sarea=1;      % m^2    surface area of cat interior
ex_cat_pipe_sarea=1;     % m^2    surface area of cat i/o pipes
ex_cat_ext_sarea=1;      % m^2    surface area of cat ext shield
ex_manif_sarea=1;        % m^2    surface area of manif & downpipe: pi*D*L
ex_cat_m2p_emisv=1;      %        emissivity x view factor from cat monolith to
cat pipes
ex_cat_i2x_emisv=1;      %        emissivity from cat int to cat ext shield
ex_cat_pipe_emisv=1;     %        emissivity of cat i/o pipe
ex_cat_ext_emisv=1;      %        emissivity of cat ext shield
ex_manif_emisv=1;        %        emissivity of manif & dwnpipe
ex_cat_m2i_th_cond=[0 1]; % W/K    cond btwn CERAMIC mono & int (from SAE#880282)
ex_cat_m2i_tmp=[0 1];    % C      corresponding temperature vector
ex_cat_i2x_th_cond=1;    % W/K    conductance btwn cat int & ext
ex_cat_i2p_th_cond=1;    % W/K    conductance btwn cat int & pipe
ex_cat_p2x_th_cond=1;    % W/K    conductance btwn cat pipe & ext
ex_cat_max_tmp=1;        % C      maximum catalyst temperature

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% DEFAULT SCALING

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% user definable mass scaling function

```

```

ex_mass_scale_fun=inline('(x(1)*fc_pwr_scale+x(2))*ex_mass','x','fc_pwr_scale','
ex_mass');

```

```

ex_mass_scale_coef=[1 0]; % mass scaling function coefficients

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% REVISION HISTORY

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0

```

```

% 11/01/99:tm renamed ex_fuelcell_null from ex_fuelcell

```

```

% 11/3/99:ss updated *_version to 2.21 from 2.2

```

```

% 02/26/01: vhj added variable ex_abs_bool

```

```

% 02/28/01: vhj changed ex_abs_bool to ex_ornl_bool

```

```

% 7/30/01:tm added mass scaling relationship mass=f(ex_mass,fc_pwr_scale)

% ADVISOR data file:  ESS_NIMH90_OVONIC.m
%
% Data source:
% Ovonic sales data via UC Davis except VOC (from ESS_NIMH93).
%
% Data confirmation:
%
% Notes: These are designed to be a high power, intermediate energy battery.
% Cell type = M155
% Nominal Voltage = 12V
% Nominal Capacity (C/3) = 90Ah
% Dimensions (L * W * H) = 385mm X 102mm X 168mm
% Weight = 16.7kg
% Volume (modules only) = 6.1L
% Nominal Energy (C/3) = 1100 Wh
% Peak Power (10s pulse @ 50%DOD @ 35 deg. C) = 7.0kW
%
% Created on: 3/24/00
% By:  TM, NREL, tony_markel@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess2_description='Ovonic 90Ah NiMH HEV battery';
ess2_version=2003; % version of ADVISOR for which the file was generated
ess2_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
ess2_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection methods have been verified
disp(['Data loaded: ESS_NIMH90_OVONIC - ',ess2_description])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SOC RANGE over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

ess2_soc=[0:.1:1]; % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Temperature range over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess2_tmp=[0 22 40]; % (C)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSS AND EFFICIENCY parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parameters vary by SOC horizontally, and temperature vertically

ess2_max_ah_cap=[
    90
    90
    90
]; % (A*h), max. capacity at C/5 rate, indexed by ess2_tmp

% average coulombic (a.k.a. amp-hour) efficiency below, indexed by ess2_tmp
ess2_coulombic_eff=[
    1
    1
    1
]*0.975; % (--); unknown

% module's resistance to being discharged, indexed by ess2_soc and ess2_tmp
ess2_r_dis=[1.167 0.631      0.594  0.552  0.541  0.530  0.523  0.536
            0.574  0.615  0.585
            1.167 0.631 0.594  0.552  0.541  0.530  0.523  0.536  0.574  0.615
            0.585
            1.167 0.631 0.594  0.552  0.541  0.530  0.523  0.536  0.574  0.615
            0.585
]*10/1000; % (ohm)

% module's resistance to being charged, indexed by ess2_soc and ess2_tmp
ess2_r_chg=ess2_r_dis;% (ohm), no other data available

% module's open-circuit (a.k.a. no-load) voltage, indexed by ess2_soc and
ess2_tmp

```

```

%ess2_voc=[11.9 12.3 12.6 12.8 12.9 12.9 13 13.1 13.2 13.4 13.7;
% 11.9 12.3 12.6 12.8 12.9 12.9 13 13.1 13.2 13.4 13.7;
% 11.9 12.3 12.6 12.8 12.9 12.9 13 13.1 13.2 13.4 13.7]; % (V), Source: Ovonic
Charge-decreasing
ess2_voc=[12.5 12.8 13.1 13.3 13.4 13.4 13.5 13.6 13.7 13.9 14.2;
12.5 12.8 13.1 13.3 13.4 13.4 13.5 13.6 13.7 13.9 14.2;
12.5 12.8 13.1 13.3 13.4 13.4 13.5 13.6 13.7 13.9 14.2]; % (V), Source:
Ovonic Charge-sustaining
%ess2_voc=[12.8 13.2 13.5 13.7 13.8 13.8 13.9 14 14.1 14.3 14.6;
% 12.8 13.2 13.5 13.7 13.8 13.8 13.9 14 14.1 14.3 14.6;
% 12.8 13.2 13.5 13.7 13.8 13.8 13.9 14 14.1 14.3 14.6]; % (V), Source: Ovonic
Charge-increasing

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LIMITS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess2_min_volts=0.87*1.05*10; % (V), 0.87*105% safety factor volts time 10 cells
ess2_max_volts=1.65*0.95*10;% (V), 1.65*95% safety factor volts times 10 cells

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ess2_module_mass=16.7; % (kg), mass of a single ~12 V module
ess2_module_volume=0.385*0.102*0.168; % (m^3), length X width X height
ess2_module_num=25; %a default value for number of modules

ess2_cap_scale=1; % scale factor for module max ah capacity

% user definable mass scaling relationship
ess2_mass_scale_fun=inline('(x(1)*ess2_module_num+x(2))*(x(3)*ess2_cap_scale+x(4)
)*(ess2_module_mass)', 'x', 'ess2_module_num', 'ess2_cap_scale', 'ess2_module_mass'
);
ess2_mass_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients in ess2_mass_scale_fun

% user definable resistance scaling relationship
ess2_res_scale_fun=inline('(x(1)*ess2_module_num+x(2))/(x(3)*ess2_cap_scale+x(4)
)', 'x', 'ess2_module_num', 'ess2_cap_scale');

```



```

ess2_res_scale_coef=[1 0 1 0]; % coefficients in ess2_res_scale_fun

% battery thermal model
ess2_th_calc=1; % -- 0=no ess thermal
calculations, 1=do calc's
ess2_mod_cp=830; % J/kgK ave heat capacity of module
(estimated for NiMH)
ess2_set_tmp=35; % C thermostat temp of module
when cooling fan comes on
ess2_area_scale=1.6*(ess2_module_mass/11)^0.7; % -- if module dimensions
are unknown, assume rectang shape and scale vs PB25
%tm:3/24/00 ess2_mod_sarea=0.2*ess2_area_scale; % m^2 total module
surface area exposed to cooling air (typ rectang module)
ess2_mod_sarea=2*(0.385*0.168+0.102*0.168); % m^2 total module
surface area exposed to cooling air (typ rectang module)
ess2_mod_airflow=0.01; % kg/s cooling air mass flow rate
across module (20 cfm=0.01 kg/s at 20 C)
%tm:3/24/00 ess2_mod_flow_area=0.005*ess2_area_scale; % m^2 cross-sec flow
area for cooling air per module (assumes 10-mm gap btwn mods)
ess2_mod_flow_area=0.005*2*(0.385+0.102); % m^2 cross-sec flow area for
cooling air per module (assumes 10-mm gap btwn mods)
ess2_mod_case_thk=2/1000; % m thickness of module case
(typ from Optima)
ess2_mod_case_th_cond=0.20; % W/mK thermal conductivity of
module case material (typ polyprop plastic - Optima)
ess2_air_vel=ess2_mod_airflow/(1.16*ess2_mod_flow_area); % m/s ave velocity of
cooling air
ess2_air_htcoef=30*(ess2_air_vel/5)^0.8; % W/m^2K cooling air heat transfer
coef.
ess2_th_res_on=((1/ess2_air_htcoef)+(ess2_mod_case_thk/ess2_mod_case_th_cond))/e
ss2_mod_sarea; % K/W tot thermal res key on
ess2_th_res_off=((1/4)+(ess2_mod_case_thk/ess2_mod_case_th_cond))/ess2_mod_sarea
; % K/W tot thermal res key off (cold soak)
% set bounds on flow rate and thermal resistance
ess2_mod_airflow=max(ess2_mod_airflow,0.001);
ess2_th_res_on=min(ess2_th_res_on,ess2_th_res_off);
clear ess2_mod_sarea ess2_mod_flow_area ess2_mod_case_thk ess2_mod_case_th_cond
ess2_air_vel ess2_air_htcoef ess2_area_scale

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 3/24/00:tm file created
% 9/7/00:tm updated OCV data and removed fliplr from charge resistance
definition
% 7/30/01:tm added user defineable scaling functions for
mass=f(ess2_module_num,ess2_cap_scale,ess2_module_mass)
%           and resistance=f(ess2_module_num,ess2_cap_scale)*base_resistance
```

```

%%%%%%%% ADVISOR data file:  MC_PM32
%
% Data source:
% Unique Mobility specification sheet for the SR180p/CR20-300
% motor/controller combination at 195 V, dated 10/28/94
%
% Data confidence level:
%
% Notes:
% Efficiency/loss data appropriate to a 195-V system.
%
% Created on: 6/30/98
% By: MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mc_version=2003;
mc_description='Unique Mobility 32-kW permanent magnet motor/controller';
mc_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
mc_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection methods have been verified
disp(['Data loaded: MC_PM32 - ',mc_description]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SPEED & TORQUE RANGES over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (N*m), torque range of the motor
mc_map_trq=[-520 -480 -400 -320 -240 -200 -160 -120 -80 -40 ...
    0 40 80 120 160 200 240 320 400 480 520]*4.448/3.281/12;

% (rad/s), speed range of the motor
mc_map_spd=[0 500 1000 1500 2000 2500 3000 4000 5000 6000 7000]*(2*pi)/60;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSSES AND EFFICIENCIES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mc_eff_map = 0.01*[...
20      20      20      20      20      20      20      20      20      20      20
      20      20      20      20      20      20      20      20      20      20      20
43      43      45      52      60      60      57      52      49      38      20
      38      49      52      57      60      60      52      45      43      43      43
70      70      71      72      73      72.5    71.5    67      62      50      20
      50      62      67      71.5    72.5    73      72      71      70      70      70
76.7    76.7    77.5    77.5    77      76.5    74      71      65      52      20
      52      65      71      74      76.5    77      77.5    77.5    76.7    76.7    76.7
80.8    80.8    80.5    80      78      78.5    77      73      67      54      20
      54      67      73      77      78.5    78      80      80.5    80.8    80.8    80.8
83      83      83.5    83      82      81      78.5    76      70      58      20
      58      70      76      78.5    81      82      83      83.5    83      83      83
84.6    84.6    84.7    84.5    83.5    82.5    80      77      72      59      20
      59      72      77      80      82.5    83.5    84.5    84.7    84.6    84.6    84.6
86.8    86.8    86.6    86.5    85.4    84.5    83      80.5    75.5    60      20
      60      75.5    80.5    83      84.5    85.4    86.5    86.6    86.8    86.8    86.8
88.7    88.7    88.8    88.3    86.7    86      84      81.5    77      60      20
      60      77      81.5    84      86      86.7    88.3    88.8    88.7    88.7    88.7
91      91      90.5    89.7    88.4    87      86      83      77.5    55      20
      55      77.5    83      86      87      88.4    89.7    90.5    91      91      91
92      92      91.5    90.5    89.3    88.5    87      84      76      50      20
      50      76      84      87      88.5    89.3    90.5    91.5    92      92      92
];

% CONVERT EFFICIENCY MAP TO INPUT POWER MAP
%% find indices of well-defined efficiencies (where speed and torque > 0)
pos_trqs=find(mc_map_trq>0);
pos_spds=find(mc_map_spd>0);

% compute losses in well-defined efficiency area
[T1,w1]=meshgrid(mc_map_trq(pos_trqs),mc_map_spd(pos_spds));
mc_outpwr1_map=T1.*w1;
mc_losspwr_map=(1./mc_eff_map(pos_spds,pos_trqs)-1).*mc_outpwr1_map;

% to compute losses in entire operating range

```

```

%% ASSUME that losses are symmetric about zero-torque axis, and
%% ASSUME that losses at zero torque are the same as those at the lowest
%% positive torque, and
%% ASSUME that losses at zero speed are the same as those at the lowest positive
%% speed
mc_losspwr_map=[fliplr(mc_losspwr_map) mc_losspwr_map(:,1) mc_losspwr_map];
mc_losspwr_map=[mc_losspwr_map(1,:);mc_losspwr_map];

%% compute input power (power req'd at electrical side of motor/inverter set)
[T,w]=meshgrid(mc_map_trq,mc_map_spd);
mc_outpwr_map=T.*w;
mc_inpwr_map=mc_outpwr_map+mc_losspwr_map;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LIMITS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mc_max_crrnt=300;      % maximum current draw for motor/controller set, A
% UQM's max current is 'adjustable,' above is an estimate
mc_min_volts=60;      % minimum voltage for motor/controller set, V

% maximum continuous torque corresponding to speeds in mc_map_spd
mc_max_trq=[512 508.1 504.2 500.3 496.3      492.4 488.5 480.7 472.8 465 0]...
*4.448/3.281/12; % (N*m)

mc_max_gen_trq=-1*[512 508.1 504.2 500.3 496.3      492.4 488.5 480.7 472.8 465
0]...
*4.448/3.281/12; % (N*m), estimate

% maximum overtorque (beyond continuous, intermittent operation only)
% below is quoted (peak intermittent stall)/(peak continuous stall)
mc_overtrq_factor=320/220; % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DEFAULT SCALING
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (--), used to scale mc_map_spd to simulate a faster or slower running motor
mc_spd_scale=1.0;

```

```

% (--), used to scale mc_map_trq to simulate a higher or lower torque motor
mc_trq_scale=1.0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mc_inertia=0.0226; % (kg*m^2), rotor's rotational
inertia

mc_mass=23.6+14.5; % (kg), mass of motor and controller

% motor/controller thermal model
mc_th_calc=1; % -- 0=no mc thermal calculations,
1=do calc's
mc_cp=430; % J/kgK ave heat capacity of
motor/controller (estimate: ave of SS & Cu)
mc_tstat=45; % C thermostat temp of
motor/controller when cooling pump comes on
mc_area_scale=(mc_mass/91)^0.7; % -- if motor dimensions are
unknown, assume rectang shape and scale vs AC75
mc_sarea=0.4*mc_area_scale; % m^2 total module surface area
exposed to cooling fluid (typ rectang module)

%the following variable is not used directly in modelling and should always be
equal to one
%it's used for initialization purposes
mc_eff_scale=1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CLEAN UP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear T w mc_outpwr_map mc_outpwr1_map mc_losspwr_map T1 w1 pos_spds pos_trqs

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% REVISION HISTORY

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 7/3/98 (MC): corrected mc_max_trq (added elements) and mc_map_spd (conversion)
% 2/3/99 (SB): added thermal model variables
% 3/15/99:ss updated *_version to 2.1 from 2.0

% 11/03/99:ss updated version from 2.2 to 2.21
% 11/1/00:tm added max gen trq placeholder data
% Begin added by ADVISOR 3.2 converter: 30-Jul-2001
mc_mass_scale_coef=[1 0 1 0];

mc_mass_scale_fun=inline('(x(1)*mc_trq_scale+x(2))*(x(3)*mc_spd_scale+x(4))*mc_m
ass','x','mc_spd_scale','mc_trq_scale','mc_mass');

% End added by ADVISOR 3.2 converter: 30-Jul-2001
```