

ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ

Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А.,
Гнатов А.В., Колесніков А.В.



Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сєріков С.А.,
Гнатов А.В., Колєсніков А.В.**

ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ

Харків
«Крок»
2008

УДК 629.3+504

ББК 39.35

ISBN 966-652-160-5

Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В.
Гібридні автомобілі. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.

Рекомендовано до видання вченої радою ХНАДУ, протокол № 6 від 29.02.08

Розглядаються схемні рішення та особливості побудови автомобілів з гібридною силовою установкою, електричні системи та комплекси гібридного автомобіля.

Монографія призначена для науковців, пов'язаних із проектуванням, експлуатацією і ремонтом машин, докторантів та аспірантів, які займаються дослідженням та розробкою сучасних екологічно чистих транспортних засобів, студентів автомобільного, механічного, електричного та комп'ютерного профілю, а також може бути корисної для спеціалістів з продажу, ремонту та технічного обслуговування автомобілів.

Іл. 218

Табл. 53

Бібліогр. найм. 33

Рассматриваются схемные решения и особенности построения автомобилей с гибридной силовой установкой, электрические системы и комплексы гибридного автомобиля.

Монография предназначена для научных работников, связанных с проектированием, эксплуатацией и ремонтом машин, докторантов и аспирантов, которые занимаются исследованием и разработкой современных экологически чистых транспортных средств, студентов автомобильного, механического, электрического и компьютерного профиля, а также может быть полезной для специалистов по продаже, ремонту и техническому обслуживанию автомобилей.

Ил. 218

Табл. 53

Библиогр. назв. 33

Рецензенти:

Александров О.О., проф., д.т.н., проф. кафедри Колісних та гусеничних транспортних засобів НТУ «ХПІ», заслужений діяч науки і техніки України

Алексієв О.П., проф., д.т.н., завідувач кафедри Мехатроніки автотранспортних засобів ХНАДУ

ХНАДУ, 2008

УДК 629.3+504

ББК 39.35

ISBN 966-652-160-5

Автори: д.т.н, проф. Бажинів О.В. (вступ, розділи 1.4, 2.4, 3.3, 4.10 - 4.13, редакція), к.т.н., доц. Смирнов О.П. (розділи 2,3,4,5,6), к.т.н., доц. Серіков С.А. (розділи 7,8), к.т.н., доц. Гнатов А.В. (розділ 9), асп. Колесніков А.В. (розділ 1).

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ...	9
1.1. Сутність та історичний огляд проблеми.....	9
1.2. Тенденція створення екологічно чистого автомобіля.....	14
1.3. Основний принцип побудови гібридних автомобілів.....	22
1.4. Переваги гібридних автомобілів.....	37
2. СХЕМНІ РІШЕННЯ ПОБУДОВИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК.....	39
2.1. Аналіз схем побудови гібридних силових установок	39
2.2. Класифікація електротрансмій.....	44
2.3. Характерні режими роботи гібридної силової установки.....	48
2.4. Концепція побудови гібридної силової установки.....	53
3. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ	62
3.1. Основні компоненти гібридної силової установки.....	62
3.2. Компоненти гібридної силової установки Toyota Hybrid System....	68
3.3. Перспективи розвитку систем живлення автомобілів.....	78
4. ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ.....	99
4.1. Загальні відомості про системи керування гібридного автомобіля	99
4.2. Сумісна робота системи об'єднаного керування динамічними параметрами VDIM з системами рульового керування	104
4.3. Система електронного розподілу гальмівного зусилля (EBD).....	109
4.4. Система екстреного гальмування.....	111
4.5. Протибуксовальна система (TRC).....	113
4.6. Система підтримки курсової стійкості (VSC).....	120
4.7. Система зупинки скочування під ухил (HAC).....	129
4.8. Система керування гальмівною системою при адаптивному круїз-контролі.....	131
4.9. Спільна робота антиблокувальної системи (ABS) з електронною системою розподілу гальмівного зусилля (EBD).....	133
4.10. Система керування гібридним силовим агрегатом.....	135

4.11. Система контролю тиску повітря в шинах	158
4.12. Робота індикаторів і попереджувальних сигналізаторів.....	165
4.13. Діагностика та самодіагностика.....	168
5. ГІБРИДНА ТРАНСМІСІЯ.....	170
5.1. Загальні відомості.....	170
5.2. Електричні машини	172
5.1. Перетворювач напруги.....	175
5.4. Система керування.....	177
5.5. Гібридна коробка передач.....	185
5.6. Джерела електричної енергії.....	208
6. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ	215
6.1. Вибір раціональної схеми гібридної силової установки и постановка задачі моделювання.....	215
6.2. Початкові дані для розрахунку.....	217
6.3. Математична модель гібридної силової установки.....	219
6.4. Результати моделювання.....	235
7. КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ.....	239
7.1. Силова установка гібридного автомобіля як об'єкт керування.....	239
7.2. Постановка задачі синтезу системи керування.....	242
7.3 Принципи побудови САК гібридною силовою установкою....	244
7.4 Нечітка модель системи керування.....	246
7.5 Визначення потрібного прирощення моменту обертання гібридної силової установки.....	249
7.6 Визначення бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ..	253
7.7 Оцінка запасу енергії в контурі рекуперації	255
7.8 Ідентифікація стану контуру рекуперації енергії.....	258
7.9 Визначення прирощень керуючих впливів.....	262
7.10 Моделювання нечіткої системи керування.....	268
8 ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ	272
8.1 Модель об'єкту управління.....	273
8.2 Регулятор частоти обертання колінчастого валу.....	275
8.3 Модель пневмодвигуна.....	281
8.4 Приведений сумарний момент опору.....	283

8.5 Моделювання системи управління пневмодвигуном.....	286
9. АНАЛІЗ ЕМС ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	
ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ	292
9.1. Класифікація електромагнітних завад	292
9.2. Загальні відомості ЕМС електрообладнання гібридного автомобіля	299
9.3. Визначення параметрів електромагнітних завад від провідника.....	310
9.4 Приклади оцінки ЕМС елементів системи електрообладнання гібридного автомобіля	313
Список літератури.....	325

ВСТУП

В автомобілебудуванні на сьогоднішній час приділяється дуже серйозна увага питанням створення ресурсозберігаючих, ефективних та екологічно чистих транспортних засобів [1-3]. Найзначнішу роль у цьому призване зіграти гармонічне з'єднання новітніх комп'ютерних технологій, автомобільної електроніки, сучасних мехатронних систем. Сучасні електронні автомобільні системи дійсно сприяють значному зниженню шкідливих речовин у відпрацьованих газах, але без зміни конструкції самого автомобіля, значного прогресу в цьому напрямку практично не передбачається. Першим кроком до розробки екологічно чистого транспортного засобу є застосування на ньому так званої гібридної силової установки, яка гармонічно об'єднує позитивні властивості двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електричних машин (тягових двигунів та генератора).

Гібридна силова установка автомобіля – система ефективної взаємодії двигуна внутрішнього згоряння та електричних машин. Завдяки синергетичному (від грецького synergos – сукупно діючий) комбінованому використанню ДВЗ та електричних машин гібридні автомобілі мають підвищений енергетичний та динамічний потенціал і відповідають найжорсткішим екологічним нормам. Саме тому силові енергетичні установки автомобілів Toyota Prius, Lexus RX400h, Lexus GS450h, Toyota Highlander Hybrid та інші мають фірмову назву Hybrid Synergy Drive, що в дослівному перекладі з англійської означає “гібридний синергетичний привод”. В подальшому таку силову енергоустановку будемо називати гібридною силовою установкою, а сам автомобіль з такою установкою – гібридним.

В даній монографії розглянуто сучасні та перспективні напрямки розвитку автомобільного транспорту, проаналізовано тенденція створення екологічно чистих транспортних засобів, проведено аналіз схемних рішень та конструктивних особливостей побудови автомобілів з гібридною силовою установкою, досліджено електричні системи та комплекси гібридного автомобіля, його діагностика та технічне обслуговування, а також

запропоновано концепція створення екологічно чистого автомобіля на Україні.

Дослідження, які наведені в монографії можуть використовуватися викладачами, студентами зі спеціальності 7.092201 «Електричні системи та комплекси транспортних засобів», а також студентів зі спеціальностей 7.091401 «Гнучкі комп'ютеризовані системи та робототехніка», 7.092501 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 7.090211 «Колісні та гусеничні транспортні засоби», 7.090228 «Автомобілі та автомобільне господарство», 7.090210 «Двигуни внутрішнього згоряння», 7.090214 «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини і обладнання» та інших спеціальностей автомобільного, механічного, електричного та комп'ютерного профілю при вивченні, наприклад, таких дисциплін, як «Електричні системи АТЗ», «Автомобільна електроніка», «Електричні машини», «Теорія електропривода», «Спецпитання автоматизованого електропривода АТЗ», «Бортові обчислювальні системи АТЗ», «Силова електроніка», «Моделювання електромеханічних систем», «Інформаційно-вимірювальні системи АТЗ», «Діагностика ЕСКТЗ», «Комп'ютерне управління робочими процесами АТЗ», «Комп'ютерна діагностика і моніторинг стану АТЗ» та інших дисциплін. Монографія може бути корисної для науковців і аспірантів, які займаються дослідженням та розробкою сучасних екологічно чистих транспортних засобів, а також – для спеціалістів з продажу, ремонту та технічного обслуговування автомобілів.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ

1.1. Сутність та історичний огляд проблеми

Технологія використання на автономному транспортному засобі гібридної силової установки має давню історію. Автором першого в світі автомобіля такого типу був відомий німецький конструктор Фердинанд Порше, який ще у 1899 році отримав перший патент на гібридний двигун та встановив на самохідний електричний екіпаж допоміжний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) для безпосереднього живлення тягових електричних двигунів та заряду блока акумуляторних батарей. Шов йому тоді 23 рік та працював він у кузовного майстра Людвіга Лонера, який володів фабрикою «K & K Hofwagenfabrik Jakob Lohner & Co». Фердинанд Порше хотів побити рекорд швидкості, який встановив 29 квітня цього ж 1899 року бельгієць Каміл Женатці на електромобілі «Завжди незадовільна». Вперше транспортний засіб рухався зі швидкістю більш ніж 100 км за годину. На таке тоді жоден автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння не був здатний.

Фердинанд Порше і Людвіг Лонер теж будували електричний автомобіль зі всіма ведучими колесами. Отже це був перший повнопривідний автомобіль. Значна частина маси машини (1800 з 2300 кілограмів) доводилася на акумуляторні батареї. Важкі батареї і малий радіус дії новинки так і залишилися непереборними недоліками електромобілів. Вимагалось якось вирішити цю тупикову ситуацію.

Як альтернативу Порше запропонував Лонеру встановити на електричний екіпаж допоміжний двигун внутрішнього згоряння. ДВЗ працював би в парі з генератором, який виробляв струм для електричних двигунів. Також Порше задумав розмістити електричні двигуни в ступицях коліс. В цьому випадку відпадала необхідність в трансмісії, у тому числі найскладнішому її вузлі – диференціалі. Ведучі колеса не мали між собою механічного зв'язку. Про негативний вплив великої безпружинної маси тоді просто не замислювалися. Потужність кожного електричного двигуна складала близько 2,5 л.с. (1,84 кВт) при 120 об/хв, а робоча напруга – 90 В. Швидкість регулювалася спеціальним контролером:

електромобіль міг рухатися в трьох режимах: до 17, до 37 і до 50 км/год.

Пройшло більш ста років, і проблема створення гібридних транспортних засобів та електромобілів повертається, але тільки на іншому вітку еволюції автомобілебудування. Але цього разу це пов'язано вже не зі встановленням нового рекорду швидкості, а з розробкою екологічно чистих транспортних засобів та їх паливною економічністю.

Але чому саме в даний час стало можливим створення таких автомобілів? Це обумовлено стрімким науково-технічним прогресом, як мінімум, в чотирьох напрямках:

- силова електроніка, завдяки якій з'явилася можливість комутувати великі струми і напруги, необхідні для керування вентильними електричними машинами;
- акумуляторні батареї, які стають більш енергоємними та безпечними;
- вентильні електричні машини, які мають невеликі розміри та масу при достатньо високої потужності;
- комп'ютерні та програмні технології, які дозволяють з високою точністю керувати всіма системами та процесами гібридної силової установки автомобіля.

У сучасній автомобільній історії гібридна технологія стала фігурувати з 1995 року з появою перших виставкових моделей – Honda Insight (рис. 1.1) й Toyota Prius. Prius в перекладі з латинської означає “іти попереду”. Концепт-кар Toyota Prius вперше демонструвався на міжнародній автомобільній виставці у Франкфурті у вересні 1995 року. Інформація тоді була вельми розпливчатою: передньоприводний автомобіль, у якого силова установка, оснащена стартер-генератором і безступеневим варіатором замість звичайної коробки передач.

Гібридна силова установка працює в парі з високовольтною акумуляторною батареєю, що накопичує рекуперативну енергію гальмування. На зупинках, для економії палива, ДВЗ автоматично вимикається. Хоча об'єм двигуна внутрішнього згоряння був 1.5 літри, витрата палива була неправдоподібно мала - всього 3.6 л на 100 км пробігу.

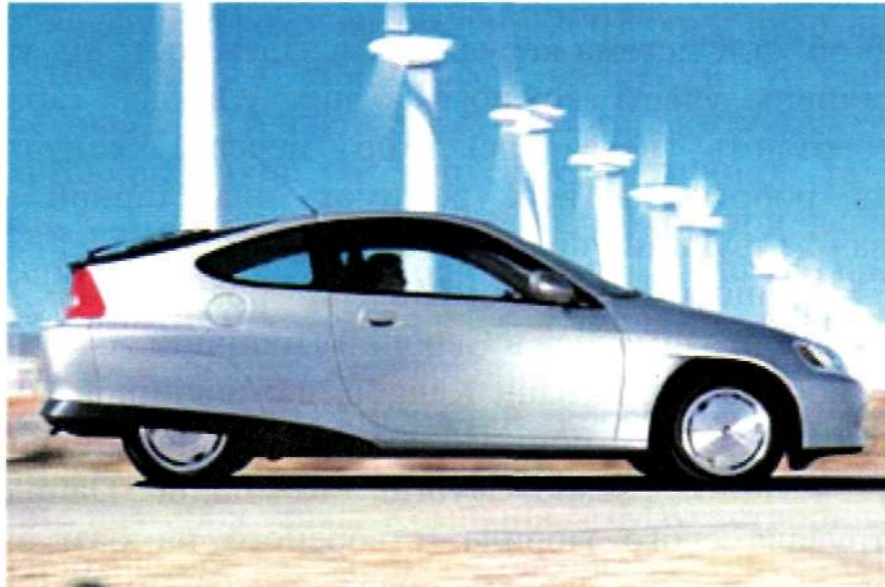


Рис. 1.1. Гібридний двомісний автомобіль Honda Insight

Перший серійний легковий автомобіль Toyota Prius (рис. 1.2, а) з гібридною силовою установкою випустила корпорація “Toyota Motor Corporation” в грудні 1997 року. В 2000 році почалися його експортні продажі, в основному, на ринку США. В 2003 році випущена нова модель Toyota Prius II (рис. 1.2, б), яка почала з'являтися в салонах Українських дилерів компанії Toyota наприкінці 2007 року.

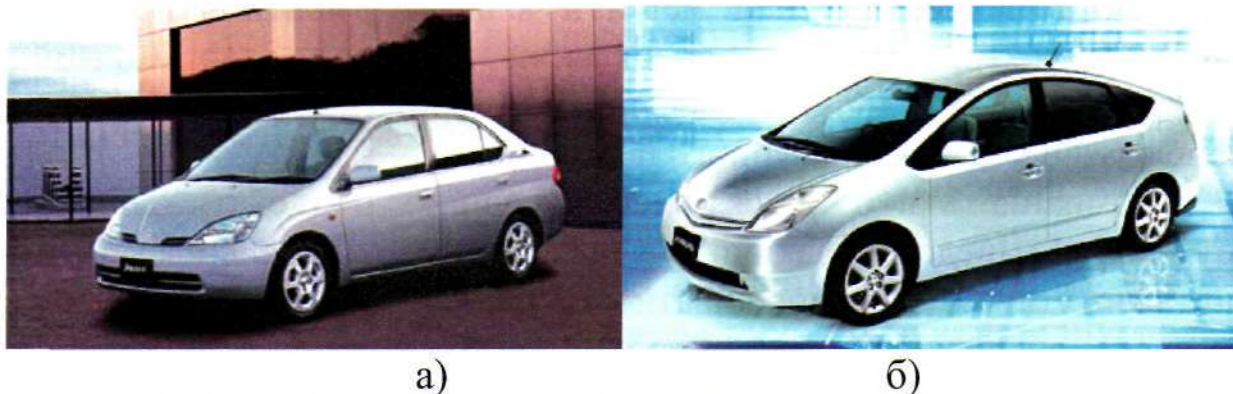


Рис. 1.2. Перший серійний автомобіль з гібридною силовою установкою Toyota Prius (а) і його наступна модифікація Toyota Prius II (б)

Гібридна силова установка автомобіля Toyota Prius II складається з двигуна внутрішнього згоряння об'ємом 1496 см^3 , потужністю 57 кВт при частоті 5000 об/хв, тягового електричного двигуна вентильного типу потужністю 50 кВт при частоті

1200 ... 1540 об/хв. Система керування, в залежності від умов руху, визначає ступень участі кожного з них. Обидва (або кожний окремо) обертають через редуктор передні ведучі колеса. Погоджують роботу на всіх режимах планетарний механізм, перетворювач напруги та управляючий комп'ютер.

Вслід за японськими компаніями розробками гібридних автомобілів почали займатися в Європі й Північній Америці. Одним з таких автомобілів був Renault Kangoo, що надійшов до масового продажу у Франції в 2003 році. В 2004 році з'явився перший гібрид від Форду – Ford Escape Hybrid. Компанія DaimlerChrysler продемонструвала свого гібрида, створеного на базі автомобіля Sprinter. Компанія Toyota, яка у цей час займає лідируючі позиції на ниві виробництва гібридних автомобілів, в 2005-06 роках випустила нові гібридні моделі для зовнішнього ринку Toyota Highlander, Lexus RX400h, Lexus GS450h. Honda також випустила гібридні версії моделей автомобілів Accord й Civic.

Такі Європейські компанії як Opel, Saab і Volvo теж мають намір почати виробництво автомобілів з гібридними силовими установками. Глава німецької компанії Opel Ганс Демант (Hans Demant) пообіцяв, що серійний бензиново-електричний автомобіль буде представлений до кінця 2009 року. В компанії Saab не називають точних строків появи гібридних автомобілів, проте виражають надію, що такі машини можуть з'явитися протягом найближчих трьох років. Генеральний директор Saab Жан-Ейк Джонсон (Jan-Ake Jonsson) заявив, що гібридні версії отримають моделі Saab 9-3 і 9-5 наступного покоління.

Компанія Volvo Truck планує серійно випускати гібридні грузовики. Шведські фахівці стверджують, що дизель-електричні вантажні Volvo будуть споживати на 35 відсотків менше палива ніж дизельні аналоги. За інформацією офіційного сайту компанії, грузовики-гібриди Volvo повинні поступити в продаж вже через декілька років. Спеціалісти шведської компанії переконані, що при нинішніх високих цінах на нафту транспортні компанії будуть економічно зацікавлені в експлуатації гібридних вантажних автомобілів. Причому економити вони зможуть не тільки за рахунок низької витрати палива, але і за рахунок збільшення терміну служби гальмівних механізмів.

На франкфуртському автосалоні 2007 року було представлено чимало автомобілів з гібридними силовими установками, що демонструє основну тенденцію сучасного автомобілебудування – перехід автовиробників на випуск економічних та екологічно чистих транспортних засобів. Хоча на сьогоднішній час лише Honda й Toyota серійно виробляють гібридні автомобілі, але практично усі світові автогіганти презентували у Німеччині свої стратегії по захисту навколишнього середовища. Так наприклад компанія Mercedes запропонувала гібридний кроссовер ML45 Hybrid з розходом палива 7.6 л. на 100 км, продажі якого в Європі заплановані на 2009 рік. Компанія BMW створила гібридну варіацію спортивного автомобіля Concept X6 Active Hybrid, а Opel оснастив гібридною силовою установкою модель Corsa Hybrid, яка споживає 3.75 л. дизельного пального на 100 км путі.

На сьогоднішній час практично всі прогресивні виробники автомобільного транспорту проводять науково-дослідні роботи по розробці та вдосконаленню гібридних силових установок, тому що попит на економічні та екологічні гібридні автомобілі настільки перевищує пропозиції, що під гібриди приходиться перепрофілювати цілі заводи. Але здається, що у виробників гібридних автомобілів немає єдиного погляду на концепцію його створення. А деякі автомобільні концерни, які відстали у своїх науково-технічних розробках, розгортують у пресі “антигібридні” компанії, але при цьому продовжують інтенсивні роботи по розробці та випуску автомобілів з гібридними силовими установками. Так, фахівці корпорації General Motors вважають, що гібридний привод економічно доцільний тільки на пікапах та автомобілях підвищеної прохідності. Nissan вторить своїм американським колегам: “в гібридних автомобілях немає комерційного сенсу”, але випускає на ринок свою гібридну модель Altima, створену по технології фірми Toyota.

Корейські автобудівники Hyundai і Kia ухвалили рішення відкласти виробництво гібридних автомобілів до 2009 року. Хоча початок виробництва моделей Hyundai Verna (Accord) і Kia Pride з гібридними силовими установками компанії планували на 2007 рік. За словами керівників корейських компаній, дане рішення ухвалене по фінансовим міркуванням. Зараз Hyundai і Kia володіють

технологіями для створення машин з гібридними двигунами, проте вони упевнені, що їх виробництво не буде прибутковим.

Фахівці компанії Mutsibishi Motors, основний упор у розвитку екологічно чистих автомобілів роблять на електромобілі, які на їх думку простіше та дешевше, ніж гібридні силові установки, або на силові установки, які працюють на паливних елементах. Масове виробництво електромобілів Misubishi Motors планує почати у 2010 році. Ціна електромобіля, по оцінкам експертів, не буде перевищувати 13 000 доларів.

Альтернативою традиційного автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння у майбутньому стане екологічно чистий автомобіль з нульовими викидами шкідливих речовин (Zero Emission Vehicle). Аналіз перспективних напрямків розвитку екологічно чистих технологій показав, що існує декілька підходів до створення екологічно чистого транспортного засобу. Альтернативними джерелами енергії автомобіля можуть бути паливні елементи на водню, кріогенні установки, інерційні накопичувачі енергії, пневматичні установки, різноманітні електромобілі, у тому числі і на сонячних батареях, але найбільш конкурентоспроможним та ефективним схемним рішенням побудови екологічно чистого автомобіля на даний час є використання на ньому гібридної силової установки.

1.2. Тенденція створення екологічно чистого автомобіля

Існує декілька підходів до створення екологічно чистих транспортних засобів. Це і удосконалювання традиційного двигуна внутрішнього згоряння, але за свою більш чим 100-річну історію він практично вичерпав путі кардинальної модернізації. Це і використання альтернативних джерел енергії, наприклад, водневих паливних елементів, але дуже висока вартість цих елементів стримує їх використання в автомобілебудуванні. Проводяться також розробки кріогенних двигунів на рідинному азоті. Але основним джерелом механічної енергії на автомобілі, до цього часу, є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Однак по-перше, викиди відпрацьованих газів ДВЗ завдають навколишньому середовищу непоправну шкоду. Забруднення

шкідливими речовинами повітря великих міст викликає дуже серйозну тривогу не тільки екологів, але й всього людства. По-друге, зменшення запасів нафти та газу, постійне подорожчання автомобільного палива змушує виробників транспортних засобів вести активні пошуки альтернативних екологічно чистих джерел енергії.

Аналіз перспективних напрямків розвитку екологічно чистих транспортних засобів показав, що відомі автомобільні виробники проводять дослідження та розробляють декілька варіантів автомобілів з альтернативними джерелами енергії:

- автомобілі на водневих паливних елементах,
- кріогенні автомобілі на рідинному азоті,
- пневмомобілі,
- електромобілі на сонячних батареях,
- електромобілі з різними типами акумуляторних батарей,
- автомобілі з використанням інерційних накопичувачів енергії,
- автомобілі з використанням інших альтернативних видів палива.

Кожен з цих напрямків має як свої переваги, так і суттєві недоліки, тому жоден з них не знайшов своє широке використання у сучасному автомобілебудуванні. На нашу думку, перспективним напрямком розвитку екологічно чистих транспортних засобів на даний час є створення автомобіля з гібридною силовою установкою, який здатний виконати найжорсткіші екологічні вимоги, на 40-80 % знизити витрати моторного палива й на 50-90 % – викиди вуглекислого газу в атмосферу.

Для визначення тенденції розвитку та концепції створення екологічно чистого автомобіля уважно поглянемо на етапи життєвого циклу автономного транспортного засобу та його складових частин, сформулюємо для кожного етапу окремо свій робочий принцип.

Перший етап розвитку автомобілебудування почався у 1769 році, коли французький інженер Микола Жозеф Кюньо сконструював перший паровий дорожній “візок”. Для цього етапу можна визначити такий робочий принцип: використання енергії пари в силівній установці автомобіля. Автомобілі з паросиловою

установкою успішно конкурували з електричними екіпажами, а на початку 20 сторіччя - з автомобілями, в яких використовувались двигуни внутрішнього згоряння. Однак автомобілі з ДВЗ витиснули парові “візки” з автомобільного ринку по деяким причинам. У парових автономних транспортних засобів був низький показник відношення енергії до маси, малий діапазон робочих швидкостей, велика тривалість прогріву двигуна, складна система керування паросилових установок.

Як це не дивно звучить, але й сьогодні деякі проектувальники екологічно чистого транспорту не втратили надію використовувати енергію пара в автомобілебудуванні. Справа в тому, що паросилові двигуни можуть бути ефективнішими та екологічно безпечнішими, ніж двигуни внутрішнього згоряння. Саме тому більшість агрегатів стаціонарної енергетики побудовані за принципом паросилових установок.

Другий етап життєвого циклу автомобіля пов'язаний з побудовою в Англії у 1838 році електричного екіпажу на самохідній тязі, електродвигун якого отримував живлення від акумуляторної батареї. Стосовно електромобілів можна визначити наступний робочий принцип: використання електричної енергії в силовій установці транспортного засобу.

Слід визначити, що цей принцип сформульовано достатньо широко: він охоплює не тільки електромобілі, а також і гібридні автомобілі, в яких для руху використовуються як двигун внутрішнього згоряння, так і електричні двигуни, і традиційні автомобілі з ДВЗ, в яких електрична енергія використовується практично на всіх системах автомобіля (пуску, запалювання, керування, освітлення та інших), і різноманітні сучасні автомобілі на електротязі. Але другий етап життєвого циклу автомобіля ми будемо зв'язувати лише з автономним транспортним засобом, в якому для руху використовується електродвигун, живлення для якого виробляють акумуляторні батареї, тому що ні паливні елементи, ні сонячні батареї тоді ще не використовували для руху автомобіля.

Але саме такий електромобіль поки ще не може бути серйозним конкурентом автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння через такі основні недоліки:

- велика маса, низька ємність та відносно малий строк експлуатації акумуляторних батарей,
- невеликий запас руху та незадовільна динаміка руху,
- відсутність розгорнутої мережі електричних заправних станцій.

Ці недоліки, у зв'язку з розвитком новітніх технологій, з кожним роком стають менш значними.

Увага конструкторів до транспортних засобів з електричною тягою підтримується тим, що електричні машини мають важливу перевагу – відсутність шкідливих викидів в зовнішнє середовище.

По-друге, коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасного вентильного електричного двигуна досягає 90...95 %. Наприклад, ККД бензинового двигуна в оптимальному режимі складає 30 %, у дизельного – 40 %, криогенних установок – 30...35 %, паливних елементів с конвектором – 50 %, паливних елементів на водню – 70 % [3]. Тому електромобілі відрізняються низької собівартістю експлуатації.

Так електромобіль Ford Ranger споживає 0.4 кВт*годин за одну милю (близько 1.6 км), а електромобіль Toyota Rav-4 витрачає на одну милю тільки 0.3 кВт*годин. У останній час світовим лідером виробництва електричних транспортних засобів стає Китай, який в Пекіні під час Олімпійських Ігор 2008 року введе в експлуатацію тисячу електричних автобусів на повітряно-цинкових (zinc-air) акумуляторних батареях.

По-третє, сучасні технології дозволяють зробити, так зване, мотор-колесо, в якому тяговий електричний двигун монтується безпосередньо в маточину коліс. При цьому відкриваються широкі перспективи по електронному управлінню кожного із коліс окремо. На рис. 1.3 представлено мотор-колесо електромобіля Colt EV, побудованого на базі автомобіля Mitsubishi Colt.

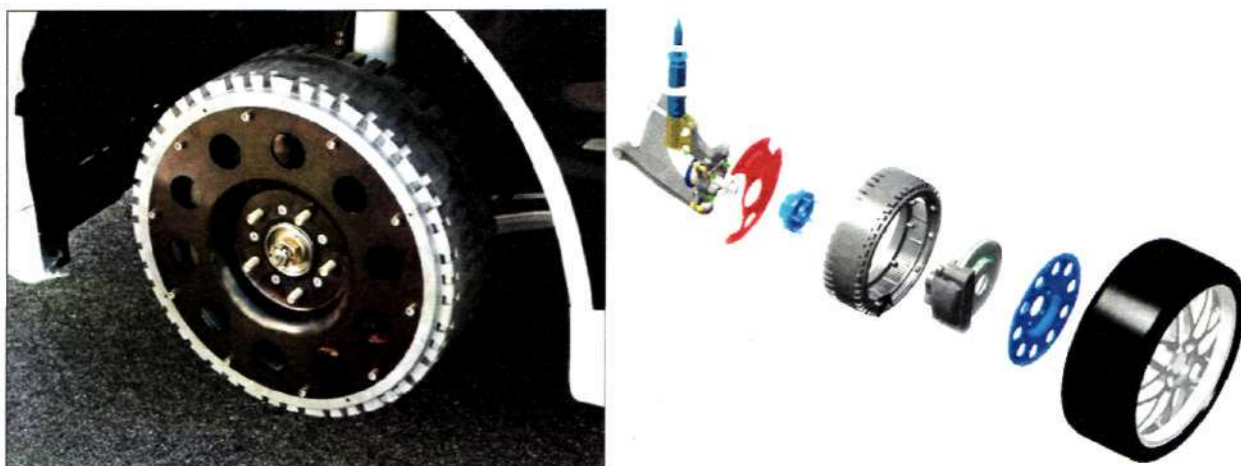


Рис. 1.3. Мотор-колесо електромобіля Mitsubishi Colt EV

Компактний вентильний електричний двигун Toyo Denki Seizo (рис. 1.3) потужністю 50 кВт, обертовий моментом 518 Нм і максимальної швидкістю 1500 обертів на хвилину вмонтований у маточину коліс.

Слід відмітити, що 80 % автотранспортних засобів представлених на Токійському автосалоні у 2006 році здійснювали рух як раз за рахунок мотор-колес. Один з таких електромобілів, побудований студентами університету Кейо має максимальну швидкість 370 км на год., а швидкість 100 км/год набирає за 4.1 секунду (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Мотор-колесо та електромобіль представлений на Токійському автосалоні у 2006 році

Третій етап життєвого циклу автомобіля зв'язаний, безумовно, з комплектацією автомобіля двигунами внутрішнього згоряння. Робочий принцип цього етапу: використання в якості силової установки автомобіля двигуна внутрішнього згоряння. Цій етап розтягнувся більш чим на 100 років, та скоріш за всього буде продовжуватися ще не одне десятиріччя.

Для того щоб визначитись з тенденцією створення екологічно чистого транспортного засобу та перспективними напрямками розвитку автомобільного транспорту потрібно протестувати за процесами сучасності, які розгортаються навколо автомобіля. Уряди прогресивних країн занепокоєні станом зовнішнього середовища, тому такі проекти, як зменшення шкідливих викидів автомобілів, зниження розходу нафтових та газових палив, стимулювання розвитку електромобілів, використання альтернативних екологічно чистих видів палива, мають національне значення.

На основі вищенаведеного необхідно визначити, що ми стаємо свідками народження нового, четвертого етапу, життєвого циклу автомобіля, робочий принцип якого можна сформулювати таким чином: використання екологічно чистих технологій в силовій установці автомобіля. При цьому сама силова установка піддається значним конструктивним змінам, бо в межах старого принципу, новий принцип виконати практично неможливо.

Те, що ми знаходимось на перехідному етапі до створення екологічно чистого транспорту, підтверджують сучасні розробки гібридних автомобілів, які гармонічно об'єднують в собі два підходи, дві концепції, дві філософії розвитку, стару та нову. Безумовно автомобіль з гібридною силовою установкою не можна назвати на 100 % екологічно чистим. Встановлення на автомобіль гібридної силової установки – це лише початковий етап створення екологічно чистого транспортного засобу. Але й такі зміни в конструкції автомобіля вже сьогодні дозволяють з меншими витратами забезпечити вимоги найжорсткіших екологічних норм, знизити на 10...80 % витрати моторного палива та викиди вуглекислого газу в атмосферу, що створюють “парниковий ефект”, який сприяє глобальному потеплінню.

Сформулюємо робочий принцип гібридних автомобілів: комбіноване використання енергії від елементів гібридної силової установки автомобіля. Світовий досвід створення гібридних транспортних засобів свідчить про те, що на автомобіль з традиційним двигуном внутрішнього згоряння встановлюють додаткову енергетичну установку, яка включає, як правило, один або декілька тягових електричних двигунів. При цьому ДВЗ налагоджується спеціально під економічний та екологічно чистий режим роботи. Наприклад, у автомобіля Lexus RX400h гібридна силова установка (рис. 1.5) включає бензиновий двигун об'ємом 3.3 літра, потужністю 158 кВт (211 к.с.) та два електричних двигуна: один потужністю 125 кВт (167 к.с.) включений послідовно з ДВЗ на передньому приводі, другий 50 кВт (67 к.с.) – на задньому.

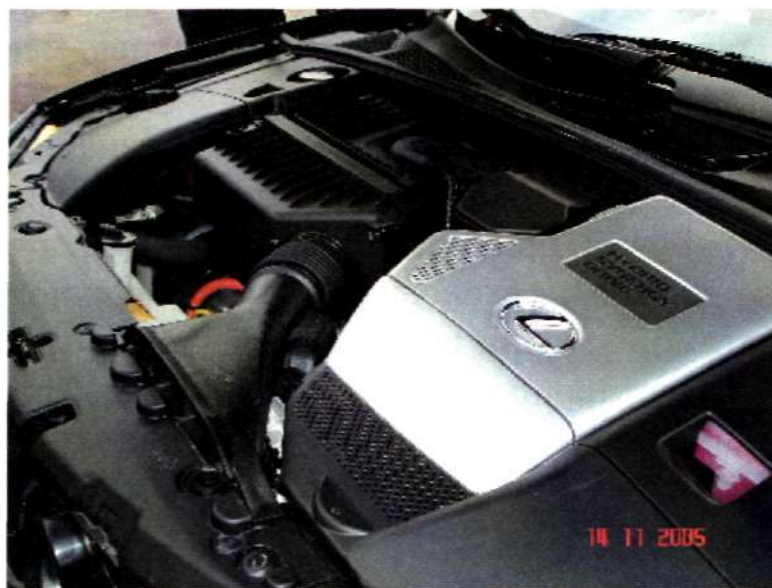


Рис. 1.5. Зовнішній вигляд гібридної силової установки автомобіля Lexus RX400h (фото автора)

На автомобілі Lexus RX400h відсутні традиційна трансмісія, стартер і генераторна установка, але встановлені блок керування та перетворення напруги, 240 нікель-металгідридних елементів, з'єднаних послідовно, які забезпечують номінальну напругу 288 В ($240 \cdot 1.2 = 288$ В), електромеханічна трансмісія, стартер-генератор. И при таких характеристиках та повної масі майже 2000 кг автомобіль Lexus RX400h в міському режимі руху витрачає близько 8 літрів палива на 100 км, а до швидкості 100 км/год розганяється за 7.6 с.

Рішення екологічних проблем автотранспортних засобів, на нашу думку, полягає в розробці гібридних силових установок автомобілів, які гармонічно об'єднують два принципово різних джерела механічної енергії: двигун внутрішнього згоряння та електричний двигун (один або декілька). Синергетика такого гібрида складається в використанні сильних сторін та позитивних якостей як електричного двигуна, так і двигуна внутрішнього згоряння.

Крім впровадження гібридних силових установок в сучасному автомобілебудуванні з'являється ще ряд перспективних напрямів розвитку електричних систем та комплексів транспортних засобів:

- значне зростання напруги живлення (в автомобілі Lexus RX400h напруга живлення зросла до 650 В) та впровадження дворівневої напруги живлення електричних систем та комплексів транспортних засобів;
- використання високовольтих акумуляторних батарей (в автомобілі Lexus RX400h напруга акумуляторних батарей складає 288 В);
- обладнання автомобілів новими більш енергоємними акумуляторними батареями, а саме нікель-металгідридними (Ni-MH), літій-іонними (Li-Ion), рідко нікель-кадмієвими (NiCd);
- використання сучасних силових електронних компонентів для керування та розподілу великих потоків енергії (напругі, струму, потужності);
- використання для приводу автомобіля вентильних електричних машин, які мають високій ККД, підвищенні енергетичні властивості та невеликі габаритно-масові характеристики;
- застосування новітніх комп'ютерних технологій для оптимального керування процесами та системами автомобіля, а також сучасних технологій передачі даних, у тому числі бездротових;
- застосування штучного інтелекту для керування процесами та системами автомобіля.

Таким чином, на основі аналізу загальних закономірностей розвитку екологічно чистих транспортних засобів можна зробити

висновок, що найбільш перспективним напрямком розвитку автомобілебудування на даний час є автомобіль з гібридною силовою установкою, який здатний виконати найжорсткіші екологічні вимоги, на 10-80 % знизити витрати моторного палива й на 50-90 % – викиди вуглекислого газу в атмосферу.

Образно перехід від сучасного автомобіля до перспективного екологічно чистого транспортного засобу наведено на рис. 1.6.

1.3. Основний принцип побудови гібридних автомобілів

Основний принцип гібридної технології транспортних засобів полягає в використанні комбінованої силової енергоустановки, яка включає в себе двигун внутрішнього згоряння та додаткову економічну, екологічно чисту силову енергоустановку (як правило, електричні двигуни), що дозволяє виконати екологічні вимоги норм "Євро-4", "Євро-5" і навіть більш жорстких норм, знизити витрати моторного палива та підвищити тягово-швидкісні характеристики автомобіля. Додаткова силова установка хоча й працює на абсолютно іншому принципі дії, ніж ДВЗ, але органічно його доповнює.

Основна мета такої гібридизації – це зниження токсичності вихлопних газів, підвищення ККД, економія палива, з одночасним підвищенням потужності. Секрет поліпшення екологічних, паливно-економічних та тягово-швидкісних характеристик автомобіля з гібридною силовою установкою полягає в тому, що в тяжких режимах роботи двигуна внутрішнього згоряння, коли споживання палива та токсичність вихлопу максимальна, додаткова силова установка допомагає, або повністю заміняє ДВЗ. Крім того, традиційна система керування самого двигуна внутрішнього згоряння налагоджується спеціально під економічний та екологічно чистий режим роботи. Розглянемо для порівняння енергетичні та економічні показники роботи ДВЗ та синхронного двигуна вентильного типу [4,5]. Саме такий тип тягових електричних двигунів знайшов своє використання в гібридних силових установках автомобілів та в мотор-колесах.

Перспективний екологічно чистий автомобіль



Гібридний автомобіль



Сучасний автомобіль



Рис. 1.6. Тенденція створення екологічно чистого автомобіля

Одним з основних показників ДВЗ є його ефективна потужність N_e (кВт) [4], яка розраховується за формулою

$$N_e = \frac{p_e V_h n i_{\text{ц}}}{30\tau},$$

де p_e – середній ефективний тиск в циліндрах, МПа,
 V_h – робочий об'єм циліндра, л,
 n – частота обертання колінчатого вала, хв^{-1} ,
 $i_{\text{ц}}$ – число циліндрів у двигуні,
 τ – число ходів поршня за цикл.

Коли відома ефективна потужність N_e та відповідна до неї частота n вала ДВЗ, то ефективний момент на валу M_e (Нм) дорівнює

$$M_e = \left[\frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \right] \frac{N_e}{n}.$$

Паливна економічність роботи двигуна оцінюється питомою ефективною витратою палива g_e (г/кВт·год)

$$g_e = 10^3 \frac{G_{\text{пал}}}{N_e},$$

де $G_{\text{пал}}$ – годинна витрата палива, кг/год.

Ефективний ККД ДВЗ – це відношення роботи, здобутої на валу двигуна, до енергії, що містилась у витраченому паливі

$$\eta_e = \frac{3600 N_e}{H_u G_{\text{пал}}},$$

де H_u – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Граничні значення ефективних показників автомобільних ДВЗ наведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Ефективні показники ДВЗ

Тип ДВЗ	p_e , МПа	g_e , г/кВт·год	η_e
Бензиновий	0.6...0.95	250...330	0.2...0.35
Дизельний без наддуву	0.55...0.85	210...260	0.33...0.40
Дизельний з наддувом	0.7...2.2	200...242	0.35...0.42

Для оцінки енергетичних та економічних показників двигуна внутрішнього згоряння використовують зовнішні швидкісні характеристики (рис. 1.7).

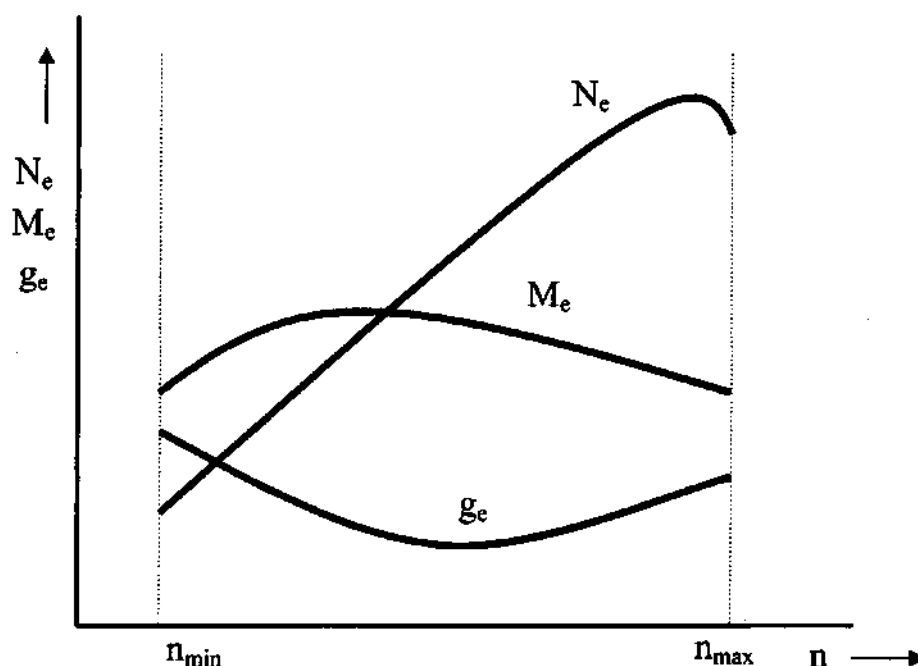


Рис. 1.7. Зовнішня швидкісна характеристика бензинового двигуна

Наведемо для порівняння основні рівняння та характеристики вентильного синхронного електричного двигуна, принцип дії якого та характеристики подібні колекторним двигунам постійного струму [5].

Електрорушійна сила якоря $E_{\text{я}}$ виражається залежністю

$$E_{\text{я}} = cK_i\Phi\omega, \quad (1.1)$$

де c – конструктивний коефіцієнт,
 K_i – коефіцієнт інвертування,
 Φ – повний магнітний потік,
 ω – кутова швидкість колінчастого вала.
 Момент M електричного двигуна

$$M = cK_i\Phi I_{\text{я}}, \quad (1.2)$$

де $I_{\text{я}}$ – струм, який споживає якірна обмотка.
 Потужність двигуна отримуємо з формул (1.1) і (1.2)

$$P = E_{\text{я}}I_{\text{я}} = M\omega$$

На рисунку 1.8 наведено порівняльні механічні характеристики тягових вентильних електричних двигунів автомобілів Toyota Prius і Toyota Prius II, які функціонують відповідно у складі гібридних силових установок Toyota Hybrid System (THS) і THS II [6].

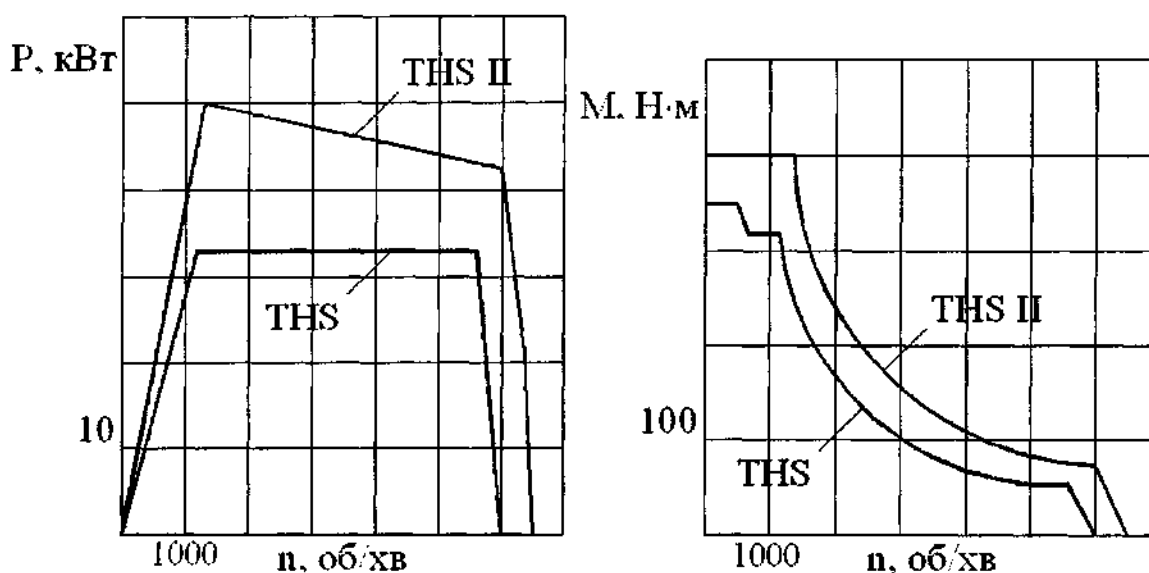


Рис. 1.8. Порівняльні механічні характеристики тягових електричних двигунів автомобілів Toyota Prius і Toyota Prius II

Механічна характеристика (см. рис. 1.8) показує, що вентильні двигуни автомобілів Toyota Prius и Toyota Prius II реалізують максимальний обертовий момент як раз на старті (на невеликої частоті обертання), на відміну від двигунів внутрішнього згоряння, які здатні генерувати максимальний обертовий момент лише на підвищеної частоті обертання (см. рис. 1.7). Тому навіть відносно невисока додаткова потужність електричного двигуна дозволить значно покращити динамічні характеристики автомобіля.

Слід відмітити, що система керування вентильним двигуном здатна запрограмувати практично любий від механічної характеристики, в залежності від необхідних потреб. Коефіцієнт корисної дії сучасних вентильних двигунів досягає майже 95 %. Крім відносно високого ККД вентильні двигуни мають такі позитивні властивості, як високу надійність, термін служби, хорошу якість регулювання.

Вентильні двигуни у сучасному автомобілебудуванні є самими перспективними із всіх типів електродвигунів, які застосовуються у сучасних регульованих електроприводах. Це пояснюється їх конструктивними й техніко-експлуатаційними перевагами в порівнянні з існуючими типами електричних машин. Застосування вентильних машин для приводу електромобілів або в складі гібридних силових установках автомобілів обумовлені тим, що вони мають високий пусковий момент, високу завадостійкість та надійність, невелику масу, можливість роботи в широкому діапазоні температур, вологості, тиску, крім того, мають практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання й можливість регулювання частоти обертання за різними законами [7,8]. Тому вони знайшли своє широке застосування у мотор-колесах автомобілів.

У цей час виготовленням вентильних електричних машин займаються практично всі ведучі електромашинобудівні компанії ("Siemens", "Bosch", "General Electric" і багато хто інші). Спеціально для потреб автомобільного транспорту розробляють і виготовляють вентильні машини компанії "Toyota", "Honda", "Mitsubishi", у тому числі й для встановлення в маточину коліс електромобілів.

Принцип дії вентильних машин заснований на тих же електромагнітних явищах, які використовуються в традиційних електричних машинах. По фізичним процесам, які в них протікають, вони близькі до колекторних машин постійного струму [8]. Електромеханічна частина вентильного двигуна, тобто самого тягового електричного двигуна, аналогічна відомим конструктивним модифікаціям синхронних машин. Конструктивно трифазну обмотку якоря розміщують на нерухомому статорі, а на роторі - магнітні полюси (постійні магніти), які здійснюють магнітоелектричне збудження. Завдяки застосуванню висококоерцитивних постійних магнітів з матеріалів «залізо-неодим-бор» і використанню спеціальних конструктивних рішень в активних частинах магнітної системи ці двигуни мають оптимальні масо-габаритні параметри й значну перевантажувальну здатність.

При подачі на трифазну обмотку статора змінної трифазної напруги у вентильному електродвигуні виникає обертове магнітне поле, яке, взаємодіючи з полюсами постійних магнітів ротора, створює обертовий момент (рис. 1.9).

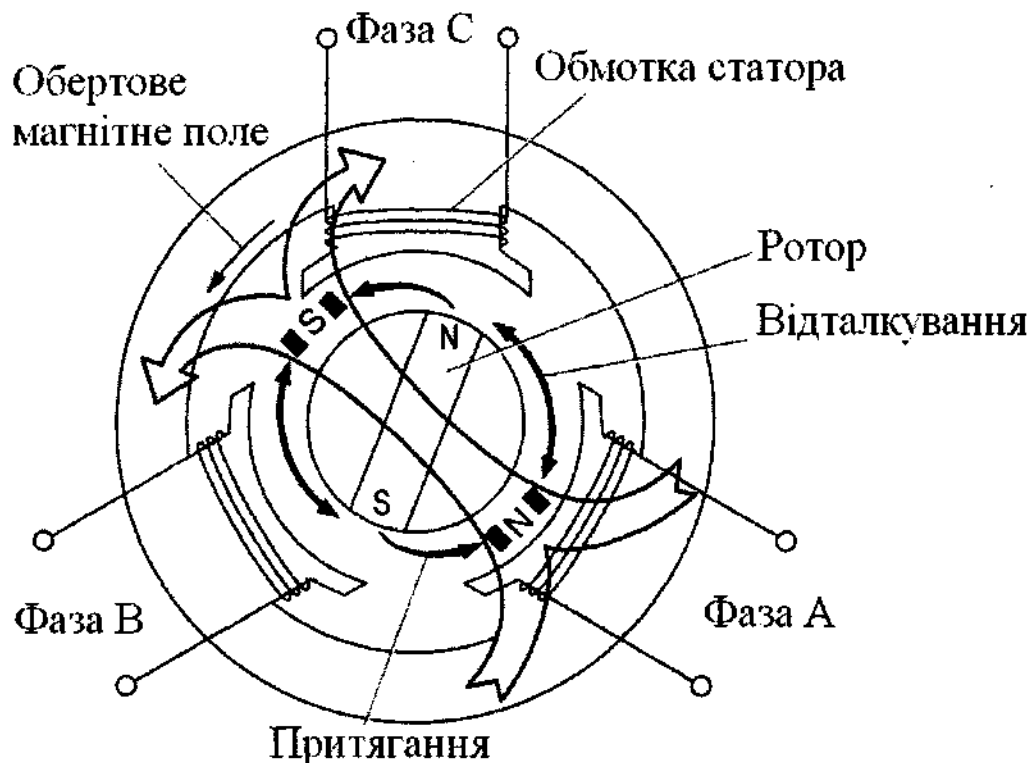


Рис. 1.9. Конструкція вентильного двигуна

Обертовий момент практично пропорційний силі струму, а швидкість обертання ротора регулюється частотою змінного струму. Оптимальне керування кутовим зсувом осі магнітів ротора й обертовим магнітним полем статора дозволяє одержати на валу двигуна високий корисний обертовий момент на всіх швидкісних режимах. У режимі генератора обертове магнітне поле ротора наводить струм в обмотці статора.

Система вентильної комутації складається з датчика синхронізуючих сигналів, системи керування й перетворювача напруги (рис. 1.10).

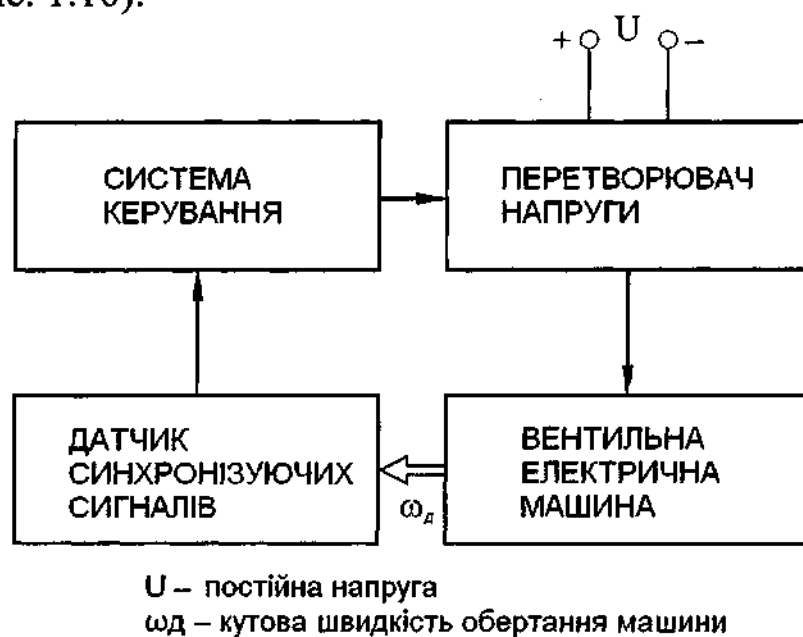


Рис. 1.10. Функціональна схема електропривода вентильного двигуна

Датчик синхронізуючих сигналів, визначаючи порядок і частоту перемикання елементів комутатора, являє собою або датчик положення ротора (при позиційному керуванні), або датчик фази напруги (при фазовому керуванні). Система керування забезпечує формування й посилення синхронізуючих сигналів, а перетворювач напруги реалізує безконтактне перемикання в силових колах вентильного двигуна.

Наприклад, датчик синхронізуючих сигналів (рис. 1.11, а) автомобіля Lexus RX400h має три котушки: котушку збудження А та дві котушки виявлення S і C (рис. 1.11, б).

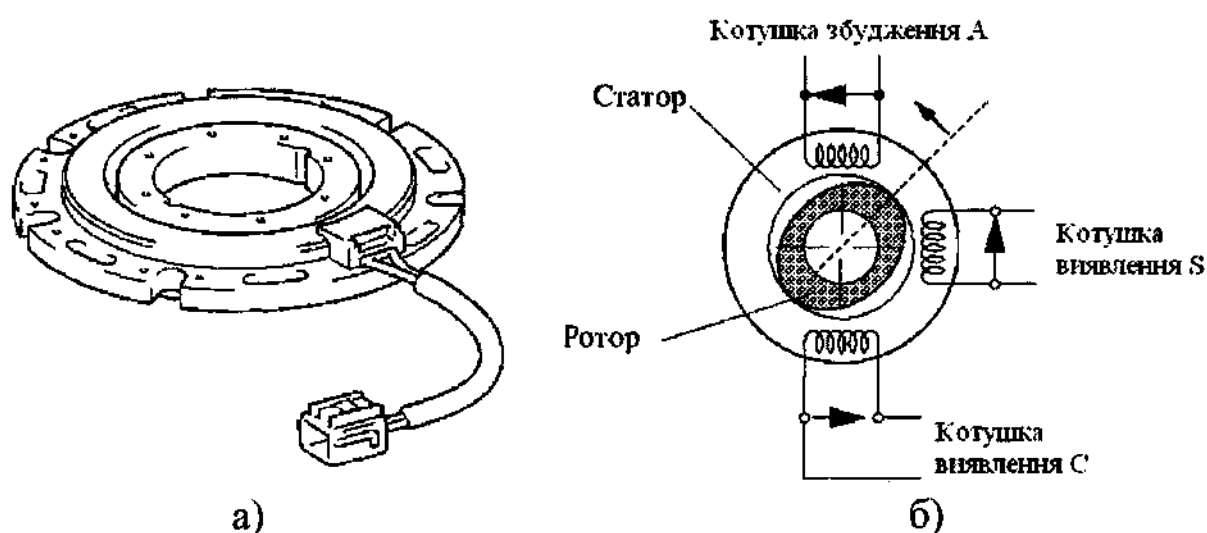


Рис. 1.11. Датчик синхронізуючих сигналів (а)
та його електрична схема (б)

В котушці збудження А протікає змінний струм з постійною частотою, тому вихідні сигнали котушок S і C також мають постійну частоту, незалежно від частоти обертання ротора. Ротор має овальну форму, і при його обертанні зазор між статором і ротором змінюється. Відповідно, максимальні значення вихідних сигналів котушок S і C змінюються відповідно до положення ротора (рис. 1.12).

Електронний блок керування розраховує абсолютне положення ротора вентильної електричної машини на підставі різниці між значеннями сигналів котушок S і C. Він визначає напрям обертання ротора, виходячи з різниці фаз між сигналами котушок S і C, та частоту обертання на підставі зміни положення ротора за певний інтервал часу.

Наведемо далі функціональні залежності між основними усередненими електромагнітними й механічними показниками вентильного електричного двигуна. Ці залежності можуть бути представлені формулами, аналогічними формулам для опису колекторних машин постійного струму, а саме:

- середнє значення проти-ЕРС двигуна

$$E_n = K_e \cdot K_u \cdot \Phi \cdot \omega_d, \quad (1.3)$$

де K_e – конструктивний коефіцієнт ЕДС;
 $K_{\text{и}}$ – коефіцієнт інвертування комутатора;
 Φ – повний магнітний потік з урахуванням реакції якоря й розсіювання;
 ω_d – кутова частота обертання двигуна;

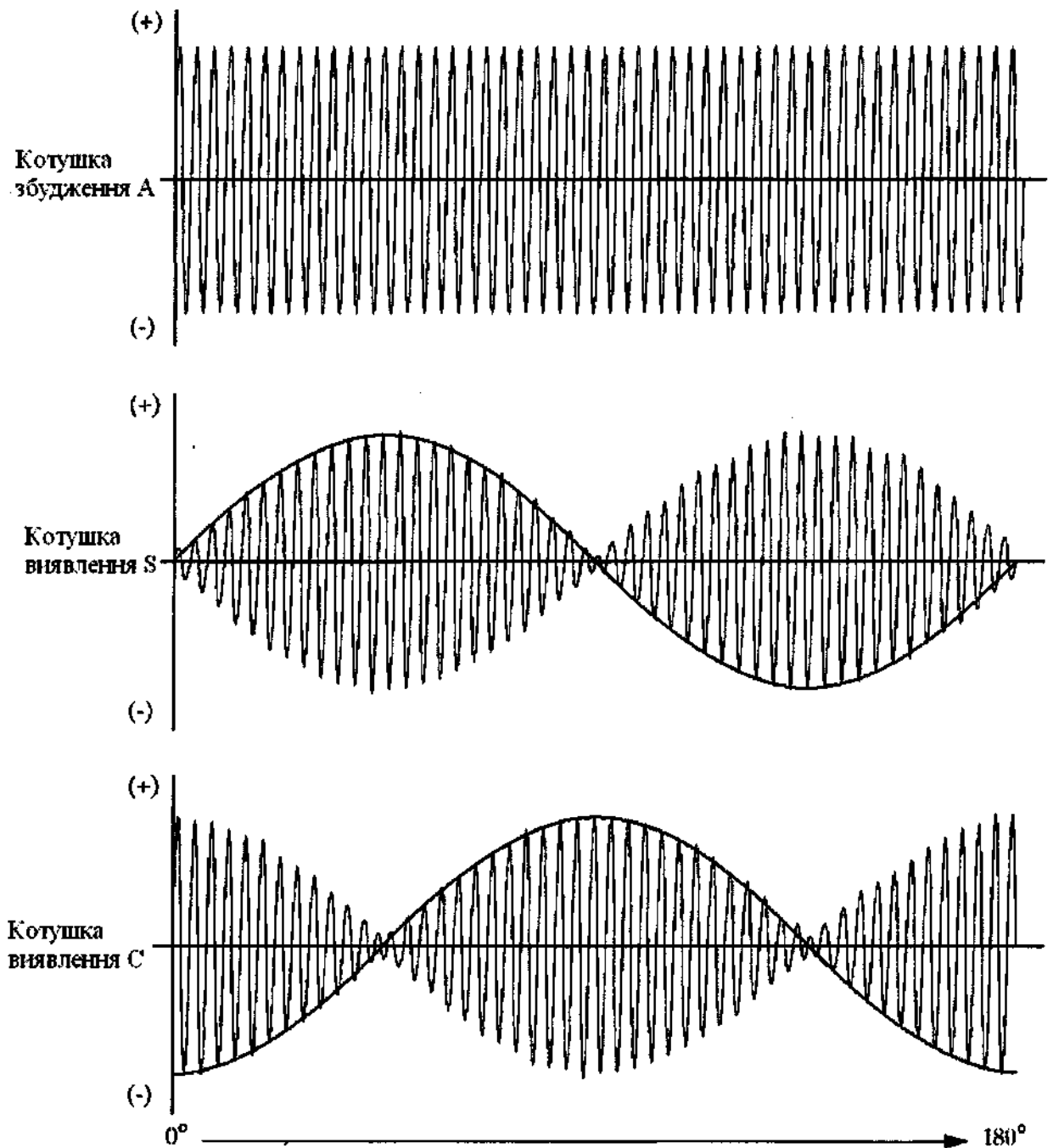


Рис. 1.12. Діаграма вихідних сигналів котушок при повороті ротора на 180°

- середнє значення напруги, прикладеної до двигуна

$$U = E_n + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}, \quad (1.4)$$

де $I_{\text{я}}$ – середнє значення струму споживаного двигуном;

$R_{\text{я}}$ – еквівалентний активний опір ланцюга якоря двигуна;

- кутова частота обертання двигуна з урахуванням виразів (1.3) і (1.4)

$$\omega_{\text{д}} = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{K_e \cdot K_u \cdot \Phi}; \quad (1.5)$$

– електромагнітна потужність двигуна

$$P_{\text{д}} = E_n \cdot I_{\text{я}}; \quad (1.6)$$

– електромагнітний момент двигуна з урахуванням виразу (1.5)

$$M = \frac{P_{\text{д}}}{\omega_{\text{д}}} = K_m \cdot K_u \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (1.7)$$

де K_m – конструктивний коефіцієнт моменту.

Специфіка вентильних двигунів для наведених виразів проявляється в наявності коефіцієнта K_u й використанні повного потоку Φ з урахуванням реакції якоря. Якщо реакція якоря проявляється слабо, то вентильні двигуни по процесах, що протікають у них, ближче до двигунів постійного струму, чим до синхронних двигунів [7].

Відповідно до виразів (1.3 – 1.7), швидкість обертання вентильного двигуна можна регулювати, змінюючи напругу живлення, активний опір у колі якоря, струм збудження при електромагнітному збудженні й коефіцієнт інвертування. Останній спосіб є специфічним для вентильного двигуна. Крім того, визначивши залежність напруги, прикладеної до двигуна, від струму якоря двигуна, тобто $U = f(I_{\text{я}})$, неважко визначити зовнішню характеристику джерела електроенергії, яку він повинен мати

відповідно до заданої характеристики АТЗ, з урахуванням балансу потужності, необхідної для руху, і потужності вентильного електропривода.

Стійка робота такого тягового двигуна можлива за умови, що

$$M = M_c, \quad (1.8)$$

де M_c – момент опору на валу, обумовлений приводом, на який працює двигун.

Залежність $M_c = f(\omega_d)$ часто називають статичною характеристикою або характеристикою опору. При зміні швидкості електродвигуна ω_d у загальному випадку змінюються як момент M , так і M_c . Від того, як відбувається така зміна, залежить ступінь стійкості роботи тягового електродвигуна.

Відомо [4], що характеристика опору АТЗ, яка обумовлена в основному дорожніми умовами й режимом роботи тягового двигуна, близька до квадратичної параболи зі зміщеної відносно початку координат вершиною. Суміщення в одній системі координат узагальненої механічної характеристики тягового вентильного двигуна й характеристики опору АТЗ (рис. 1.13), показує, що рівноважний режим роботи двигуна може підтримуватися протягом тривалого інтервалу часу тільки при виконанні умови (1.8).

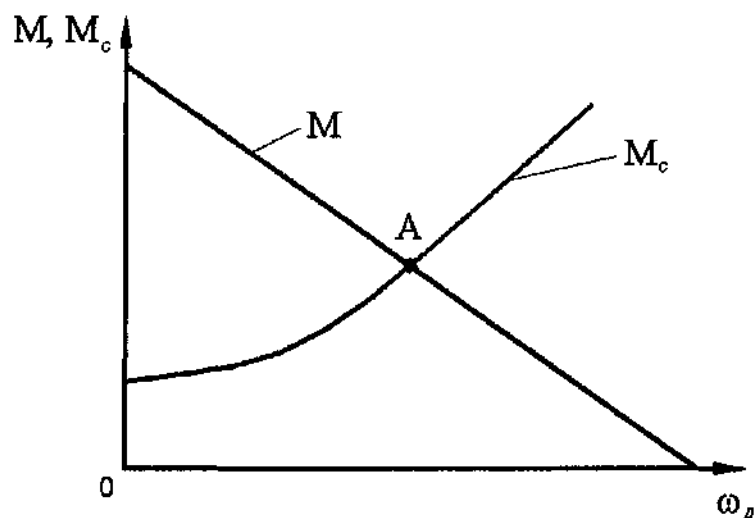


Рис. 1.13. Умови стійкої роботи тягового електродвигуна

Отже, положення стійкої роботи тягового електропривода визначається крапкою А, у якій перетинаються зазначені характеристики.

Якщо швидкість обертання електродвигуна під дією яких-небудь впливів зміниться, то виникне відповідний динамічний момент M_j (позитивний або негативний) під впливом якого швидкість обертання повернеться до попереднього значення.

$$M_j = M - M_c,$$

Таким чином, для стійкої роботи тягового електродвигуна необхідно, щоб при зменшенні швидкості обертання на величину $d\omega_d$ обертовий момент одержував позитивне зростання $+dM$, а момент опору M_c одержував негативне зростання $-dM_c$, і навпаки. Отже, стійка робота тягового електропривода автомобіля буде забезпечена у всіх випадках, коли

$$\frac{dM}{d\omega_d} < \frac{dM_c}{d\omega_d},$$

а нестійка робота буде мати місце у всіх випадках, коли

$$\frac{dM}{d\omega_d} > \frac{dM_c}{d\omega_d}.$$

Тоді оцінкою стійкості режиму роботи електродвигуна може служити відношення

$$F_d = \frac{dM_c - dM}{d\omega_d},$$

яке називається фактором стійкості двигуна [7].

Якщо $F_d > 0$, то тяговий вентильний двигун має позитивне самовирівнювання й режим роботи буде стійким, а якщо $F_d < 0$, то двигун має негативне самовирівнювання й режим роботи буде нестійким.

Сучасні електронні системи керування й досягнення в галузі енергетичної електроніки дозволяють синтезувати мікропроцесорний силовий комутатор, що здатний здійснювати регулювання швидкості обертання вентильних електродвигунів за різними законами в дуже широкому діапазоні. Це забезпечує одержання необхідної кратності швидкості обертання й електромагнітного моменту, а також необхідних електромеханічних і регулювальних характеристик.

Отже, відповідно до виконаних теоретичних досліджень основного рівняння руху тягового електропривода з вентильним електродвигуном встановлено, що він має достатній запас стійкості й має більше гнучкі регулювальні характеристики, що дозволяє при відповідній системі керування одержати потрібні тягові характеристики АТЗ.

Тяговий електропривод АТЗ з гібридною силовою установкою можна побудувати на постійному, постійно-змінному, змінно-постійному або на змінному струмі згідно роду струму джерела електроенергії та тягового електричного двигуна. Наприклад, схема живлення тягового електропривода автомобіля Lexus GS450h має високовольтну акумуляторну батарею напругою 288 В, перетворювач напруги з інвертором, який інвертує постійну напругу акумуляторної батареї в трифазну напругу 650 В для живлення тягового вентильного електричного двигуна (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Схема живлення тягового електропривода автомобіля Lexus GS450h

Для початку розглянемо комбіновану дію електричного двигуна невеликої потужності в складі гібридної силової установки на прикладі двомісного спорткара Honda Insight (див. рис. 1.1), який має 1.0 літровий 3-ох циліндровий бензиновий двигун внутрішнього згоряння із безпосереднім уприскуванням палива, змінювальними фазами газорозподілення та поршнями з віхревою камерою згоряння потужністю 50 кВт та вентильний електричний двигун потужністю 6 кВт. Електричний двигун в цьому автомобілі працює тільки паралельно з ДВЗ. При гальмуванні електричний двигун переходить у режим генератора для заряду рекуперативною енергією нікель-металгідридної акумуляторної батареї напругою 144 В та ємністю 6,5 А-годин.

На рис. 1.15 наведені зовнішні швидкісні характеристики двигуна внутрішнього згоряння (пунктирна лінія) $M_{\text{ДВЗ}}=f(n)$, $P_{\text{ДВЗ}}=f(n)$ та сумарна зовнішня швидкісна характеристика всієї гібридної силової установки (безперервна лінія) $M_{\text{Г}}=f(n)$, $P_{\text{Г}}=f(n)$ [9].

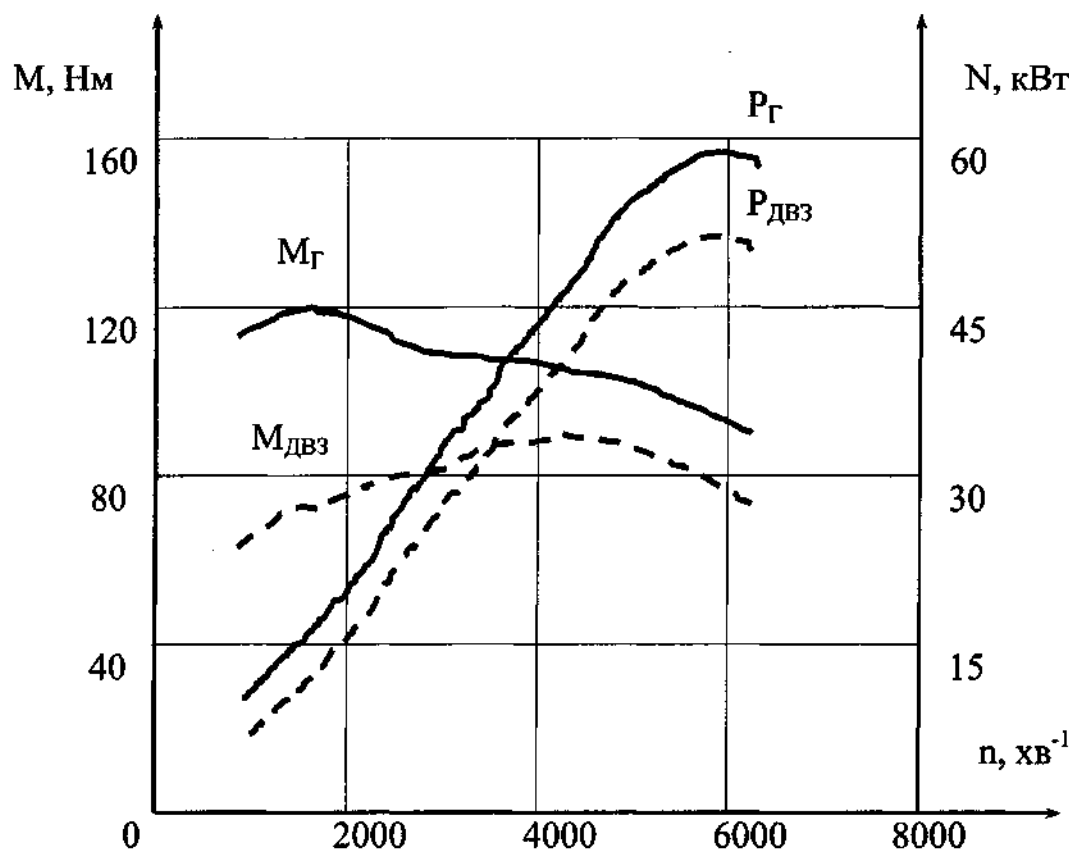


Рис. 1.15. Порівняльні швидкісні характеристики ДВЗ та гібридної силової установки автомобіля Honda Insight

Максимальний обертовий момент гібридної силової установки автомобіля Honda Insight збільшився з 91 Нм до 121 Нм, а на малій частоті обертання момент зріс майже удвічі, що особливо важливо при початку руху та інтенсивному розгоні автомобіля. Потужність на всьому діапазоні частот зросла практично на величину потужності електричного двигуна.

Розглянемо для порівняння комбіновану дію гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive II, яка встановлюється на автомобілі Toyota Prius II (див. рис. 1.2, б). Вентильний електричний двигун має таку ж потужність, як і ДВЗ розглянутої вище Honda Insight, але його обертовий момент майже у 4.5 разі більше ніж у цього ДВЗ та дорівнює 400 Нм. Для порівняння, саме такий обертовий момент (400 Нм) має восьмициліндровий ДВЗ автомобіля Mercedes E 430 потужністю 200 кВт.

Таким чином, в гібридних автомобілях можна використовувати ДВЗ меншої потужності та робочого об'єму, що також сприяє зменшенню токсичності вихлопних газів, з одночасним підвищенням ККД та зниженням розходу палива. Крім того двигуні внутрішнього згоряння налагоджують на оптимальну витрату палива (див. рис. 1.7) та екологічну чистоту. Оптимальне керування потоками механічної та електричної енергії на різних режимах руху автомобіля дозволило підвищити ККД гібридних автомобілів до 40 %. Такий високий ККД обумовлений також тим, що при гальмуванні та русі під ухил за інерцією тягові електричні двигуни перетворюються у генератори та заряджають акумуляторну батарею рекуперативною енергією, а ДВЗ при цьому автоматично відключається.

1.4. Переваги гібридних автомобілів

Автомобіль з гібридною силовою установкою має наступні переваги в порівнянні з традиційними автомобілями:

- підвищення екологічної чистоти транспортного засобу. Екологічні показники поліпшуються за рахунок використання екологічно чистої тягової установки – електричного двигуна (одного або декількох), а також за рахунок настройки ДВЗ на екологічно чистий і економічний режим роботи;

- скорочення енергетичних втрат за рахунок економії палива. Система керування автоматично зупиняє двигун внутрішнього згоряння на холостому ході, при русі за інерцією і гальмуванні, не витрачаючи при цьому паливні ресурси, як в звичайному випадку;

- скорочення енергетичних втрат за рахунок рекуперації енергії. Енергія, яка в звичайному випадку втрачається у вигляді теплоти при гальмуванні і при русі накатом (при холостому ході ДВЗ) в гібридному автомобілі перетворюється за допомогою тягової електричної машини, яка переходить у режим генератора, та перетворювача напруги в електричну енергію високовольтної акумуляторної батареї, яка потім використовується для електропривода автомобіля або роботи стартер-генератора;

- поліпшення динамічних характеристик автомобіля. Тяговий електричний двигун допомагає ДВЗ під час набору швидкості (див. рис. 1.15);

- оптимізація керування енергетичними потоками. Система керування автоматично управляє енергетичними потоками, збільшуючи коефіцієнт корисної дії транспортного засобу. Наприклад, тяговий електричний двигун приводить в рух автомобіль при режимах ДВЗ, на яких його ефективність низька. ДВЗ, у свою чергу, зайву потужність перетворює в електричну енергію на високоефективному режимі роботи.

Таким чином, світовий досвід створення екологічно чистих транспортних засобів свідчить про те, що найбільш вдалим та конкурентоспроможним конструктивним рішенням на сьогоднішній час є використання в автомобілі гібридної силової установки. Автомобілі з гібридною силовою установкою здатні виконати найжорсткіші екологічні вимоги, на 10...80 % знизити витрати моторного палива й на 20...90 % - викиди вуглекислого газу в атмосферу. Гібридна силова установка автомобіля – система ефективної взаємодії двигуна внутрішнього згоряння та тягового електричного двигуна.

2. СХЕМНІ РІШЕННЯ ПОБУДОВИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛІВ

2.1. Аналіз схем побудови гібридних силових установок

В гібридних автомобілях для більш економної витрати палива та підвищення екологічної чистоти використовуються спеціальні високовольтні акумуляторні батареї та тягові електричні двигуни, які повністю замінюють, або частково допомагають двигунам внутрішнього згоряння при різних режимах роботи автомобіля. При гальмуванні та русі по інерції відбувається зворотній процес: електричні машини починають працювати в генераторному режимі та заряджати акумуляторну батарею через спеціальний пристрій – перетворювач напруги (інвертор). Крім того, замість стандартного генератора встановлюють високовольтний стартер-генератор, який під час роботи ДВЗ заряджає акумуляторну батарею через перетворювач напруги, а при необхідності призводить автоматичний запуск ДВЗ.

Але єдиної концепції до створення схемних рішень побудови гібридного автомобіля, поки що немає. Кожен виробник гібридних автомобілів має свою думку на процес виробництва гібридних силових установок для автомобілів. Тому розглянемо декілька концептуальних підходів та схемних рішень до побудови гібридних силових установок автомобілів. Конструктивно гібридні силові установки можна поділити на чотири структурних схеми, які відрізняються як схемними рішеннями, так і потужністю використаних тягових електричних машин.

Перша структура побудови гібридних силових установок засновано на використанні оберненої електромашини малої потужності (від 2 до 4 кВт), яка виконує функції стартер-генератора. Такі автомобілі компонуються системою Stop&Start, яка автоматично відключає ДВЗ при зупинці, а при гальмуванні або при русі за інерцією здійснюється заряд акумуляторної батареї при відключеному ДВЗ. Структурна схема такої системи наведена на рис. 2.1. На схемі потоки механічної енергії позначені подвійною стрілкою, а потоки електричної енергії – одинарною.

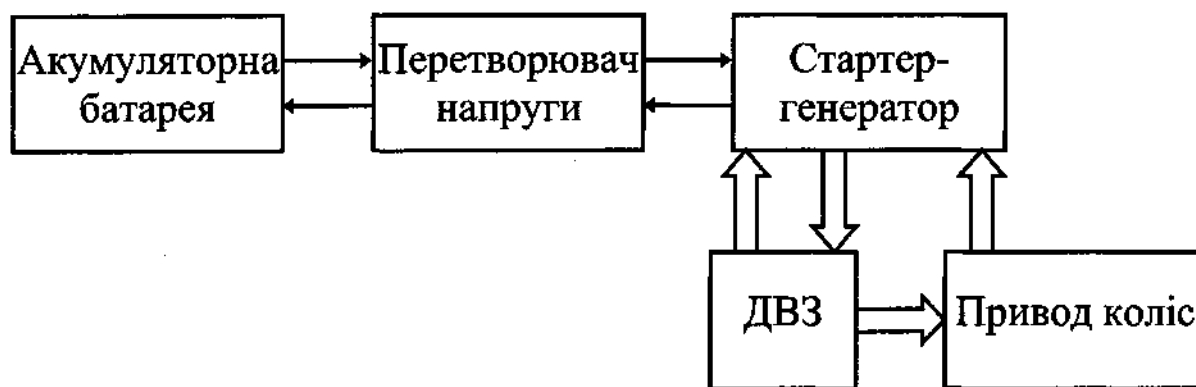


Рис. 2.1. Структурна схема гібридної силової установки зі стартер-генератором потужністю від 2 до 4 кВт

Прикладом таких гібридних автомобілів можуть служити автомобілі Toyota Crown, Citroen C3, Ford Fiesta, Fiat Panda Aria економія палива в яких складає не більш 10 %.

Силова установка створена за другою структурною схемою гібридизації використовує тяговий електричний двигун потужністю до 25 кВт, який генерує механічну енергію паралельно з ДВЗ таким чином, що еквівалентна потужність формується з потужності ДВЗ та електродвигуна. Ця схема побудови гібридної силової установки найбільш ефективна на старті та при інтенсивному розгоні транспортного засобу, коли обертовий момент електродвигуна максимальний. Такі електричні машини також можуть замінити стартер і генератор, а гібридна силова установка може працювати у режимі Stop&Start. Структурна схема побудови гібридної технології за другим принципом дії наведена на рис. 2.2.

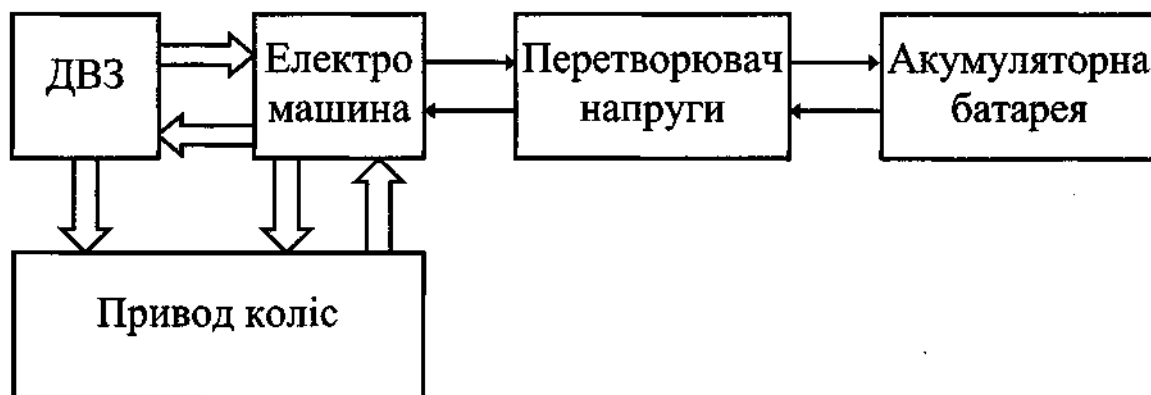


Рис. 2.2. Структурна схема гібридної установки з електромашиною потужністю до 25 кВт

Корпорація Honda випускає серійні гібридні автомобілі саме по такому принципу дії. Наприклад, нова модель Honda Civic обладнана тяговим електричним двигуном потужністю 15 кВт. Компанія Mercedes представила на автомобільному салоні у Франкфурті у 2006 році два гібридних автомобіля S-класу – бензиновий S350 та дизельний S320TDI, в яких додаткові електродвигуни потужністю всього 6 кВт заощаджують 25 % палива, та на 80 % зменшують викиди шкідливих речовин в атмосферу у порівнянні з базовими аналогами.

Третій принцип побудови гібридних автомобілів засновано на використанні тягових електричних двигунів з ще більшою потужністю (від 30 кВт). Такі транспортні засоби відрізняються тим, що можуть рухатися у комбінованих режимах: тільки на ДВЗ, тільки на електротязі, або сумісно на ДВЗ і електродвигуні. Автомобілі комплектуються, як правило, одною, двома або чотирма вентильними електричними машинами, а розподіл механічної енергії серед споживачів виконується або механічно за допомогою планетарного механізму, або електричним шляхом. Погоджують роботу на всіх режимах перетворювач напруги і керуючий комп'ютер. Структурна схема комбінованої силової установки з двома тяговими електричними машинами наведено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Структурна схема гібридної силової установки з двома тяговими електричними машинами

Така схема гібридної силової установки використовується корпорацією Toyota при створенні автомобілів модельного ряду Toyota Prius, Lexus RX400h, Lexus GS450h та інших. Такі гібридні автомобілі менше ніж на 90 % забруднюють зовнішнє середовище, в порівнянні з автомобілями аналогічного класу з ДВЗ. Економія палива теж дуже висока: модель 2003 року Toyota Prius II на 100 км витрачає лише 2.8 літра.

До четвертого принципу побудови гібридної силової установки віднесемо схемні рішення, в яких двигун внутрішнього згоряння не має кінематичного зв'язку з ведучими колесами. Механічна енергія з ДВЗ через генератор перетворюється в електричну енергію, яка подається в тяговий електромеханічний привод коліс та витрачається для заряду акумуляторної батареї. Структурна схема гібридної установки без кінематичного зв'язку ДВЗ з ведучими колесами наведена на рис. 2.4.

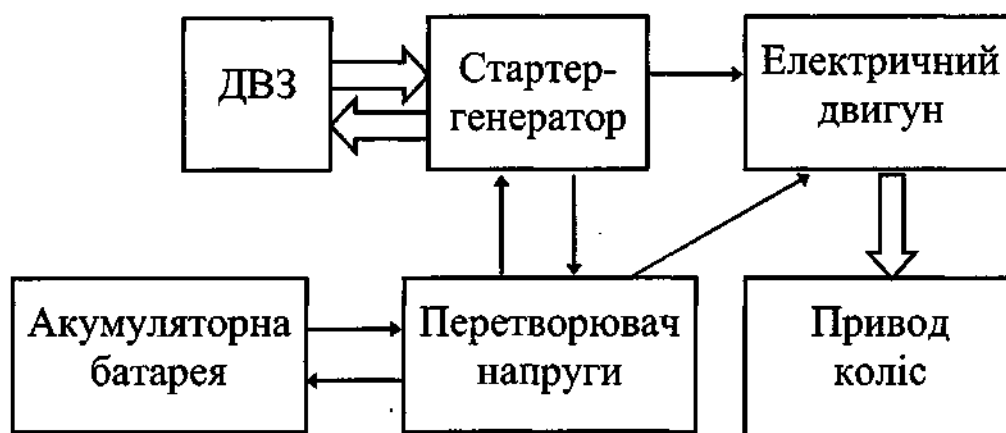


Рис. 2.4. Структурна схема гібридної установки без кінематичного зв'язку ДВЗ з ведучими колесами

Інженери компанії Toyota сконструювали за такою гібридною технологією легковий спортивний автомобіль. Новий концепт-кар назвали на честь відомого вченого-електротехніка Alessandro Volta. Бензиновий двигун об'ємом 3.3 літра, механічно не зв'язаний з колесами, обертає електричний генератор. Два тягових електричних двигуна загальної потужністю 300 кВт використовуються для приводу переднього та заднього мосту.

Характеристики автомобіля Alessandro Volta вразливі: максимальна швидкість – більш 250 км за годину, середній розхід

палива – 7.4 літра на 100 км, швидкість 100 км на годину автомобіль набирає за 4.03 секунди.

До цієї схеми відносяться також конструкції гібридних силових установок з мотор-колесами. Така схема знайшла своє використання в кар'єрних великовантажних самоскидах, наприклад, “БелАЗах”, в яких потужний дизель-генератор постачає електроенергію в мотор-колеса.

Позитивні сторони такого принципу гібридизації – це відсутність механічної трансмісії, зниження удільної витрати палива та токсичності відпрацьованих газів за рахунок стабілізації режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння за потужністю та частотою обертання, можливість електронного керування кожного колеса окремо.

Негативні сторони такої електротрансмісії – зменшення ККД за рахунок подвійного перетворення енергії: механічна енергія ДВЗ – електрична енергія генератора – механічна енергія електродвигуна, збільшення непідресорної маси автомобіля за рахунок вбудованих у колеса електродвигунів, що призводить до погіршення керування та комфорту.

Таким чином, на основі аналізу структурних принципів побудови гібридних силових установок автомобіля можна зробити наступні висновки:

- конструкцію гібридних силових установок можна структурно поділити на чотири типи, які відрізняються як схемними рішеннями, так і потужністю використаних електричних машин,
- автомобіль з будь-яким типом гібридної технології є більш ефективним, економічним та екологічним, ніж аналогічний автомобіль з традиційною силовою установкою,
- недоліком конструкції першого принципу гібридизації є те, що електричні двигуни малої потужності 2...4 кВт не використовують свою енергію для додаткової тяги в комбінованому режимі з ДВЗ,
- недоліком конструкцій другого принципу побудови гібридної силової установки є те, що електричні двигуни відносно великої потужності (до 25 кВт) не використовуються для автономного приводу автомобіля, що покращило би економічні та екологічні показники, особливо в міських умовах руху,

- третій принцип побудови гібридних автомобілів, на наш погляд, на даний час є більш перспективним, тому що він має найвищі показники економічності та екологічності, а при цьому потужність та динаміка розгону кращі ніж у аналогічних автомобілів з традиційною силовою установкою,

- четвертий принцип побудови гібридної силової установки теж є перспективним, як з точки зору електронного керування та розподілу енергетичних потоків, так і у разі економічних та екологічних характеристик.

2.2. Класифікація електротрансмій

Проаналізуємо варіанти конструкцій електротрансмій в гібридних силових установках автотранспортних засобів та проведемо класифікацію можливих варіантів схем підключення електротрансмій гібридних силових установок автомобілів. Відомі три варіанти побудови електротрансмій гібридних силових установок автомобіля: послідовна, паралельна і послідовно-паралельна схеми. Розглянемо принцип роботи кожній з цих схем, можливість застосування кожній з них, а також вимоги до їх використання.

2.2.1. Послідовна схема трансмісії. При послідовній схемі двигун внутрішнього згоряння не має кінематичного зв'язку з ведучими колесами, тому механічна енергія з ДВЗ не використовується для приводу коліс автомобіля, а подається тільки до генератора за схемою електричної трансмісії: ДВЗ – електричний генератор – тяговий електричний двигун. При цьому ДВЗ налагоджений на екологічно чистий режим роботи та витрачає мінімальну кількість палива.

Послідовна схема електротрансмій гібридної силової установки автомобіля наведена на рис. 2.5. Енергія, що виробляється генератором, подається на тяговий електричний двигун і в накопичувач енергії - акумуляторну батарею. Тяговий електродвигун забезпечує весь необхідний силовий і швидкісний діапазони транспортного засобу, а при гальмуванні та русі під ухил за інерцією працює в режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію механічної енергії гальмування.

Механічна енергія → Електрична енергія

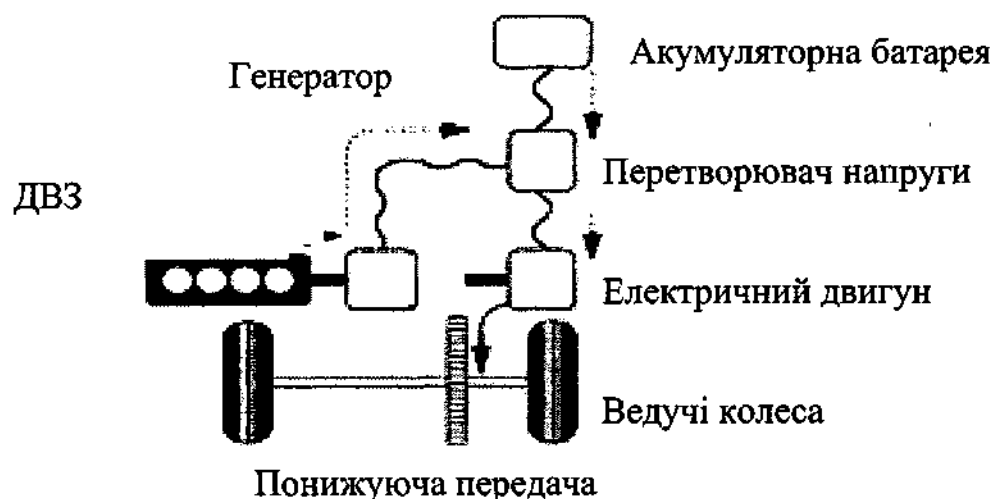


Рис. 2.5. Послідовна схема електротрансмисії гібридної силової установки автомобіля

Достоїнствами послідовної схеми є відсутність механічної трансмісії, зниження питомої витрати палива і токсичності відпрацьованих газів за рахунок стабілізації режимів роботи двигуна внутрішнього згоряння по потужності і частоті обертання.

Недоліки послідовної схеми – це зменшення ефективності і ККД за рахунок подвійного перетворення енергії: механічна енергія ДВЗ – електрична енергія генератора або акумулятора – механічна енергія електродвигуна.

2.2.2. Паралельна схема трансмісії. В паралельній схемі ДВЗ і тяговий електричний двигун, який одержує енергію від акумуляторної батареї, передають сумарний момент, ведучім колесам. Можливий також варіант паралельної схеми, при якому обернена електрична машина встановлюється в приводі іншого ведучого моста, ніж ведучий міст трансмісії ДВЗ. Наприклад, при передньопривідній схемі трансмісії ДВЗ тяговий електричний двигун встановлюється в приводі заднього моста.

Паралельна схема електротрансмисії гібридної силової установки автомобіля наведена на рис. 2.6.

Перевагою такого варіанту слід визначити певне спрощення трансмісії двигуна внутрішнього згоряння, а також більш високий

ККД передачі енергії від ДВЗ до ведучих коліс, в порівнянні з послідовною схемою, і можливість застосування одного тягового електричного двигуна замість двох або чотирьох.

Механічна енергія → Електрична енергія

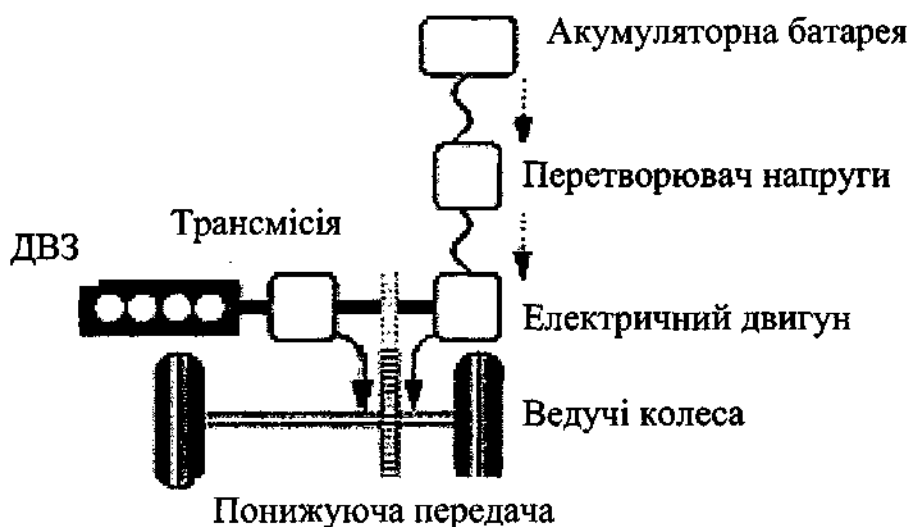


Рис. 2.6. Паралельна схема електротрансмісії гібридної силової установки автомобіля

Недолік – обов'язкове ускладнення електричної трансмісії для забезпечення підведення потужності від тягової електричної машини, яка при гальмуванні та русі під ухил за інерцією теж переходить у генераторний режим генератора, забезпечуючи рекуперацію механічної енергії гальмування.

2.2.3. Послідовно-паралельна схема трансмісії. Ця система поєднує в собі послідовну гібридну технологію з паралельною для отримання максимальних переваг обох систем. Вона використовує комбінацію двох (і більш) джерел механічної енергії. Залежно від умов руху використовується або тільки тяговий електричний двигун, або автомобіль приводиться в рух ДВЗ спільно з тяговим електричним двигуном для досягнення більш високого рівня ефективності. Надалі, коли це необхідно, система здійснює привід коліс з одночасним зарядом акумуляторної батареї за допомогою електричного генератора.

Послідовно-паралельна схема побудови гібридної силової установки наведена на рис. 2.7.

Механічна енергія → Електрична енергія

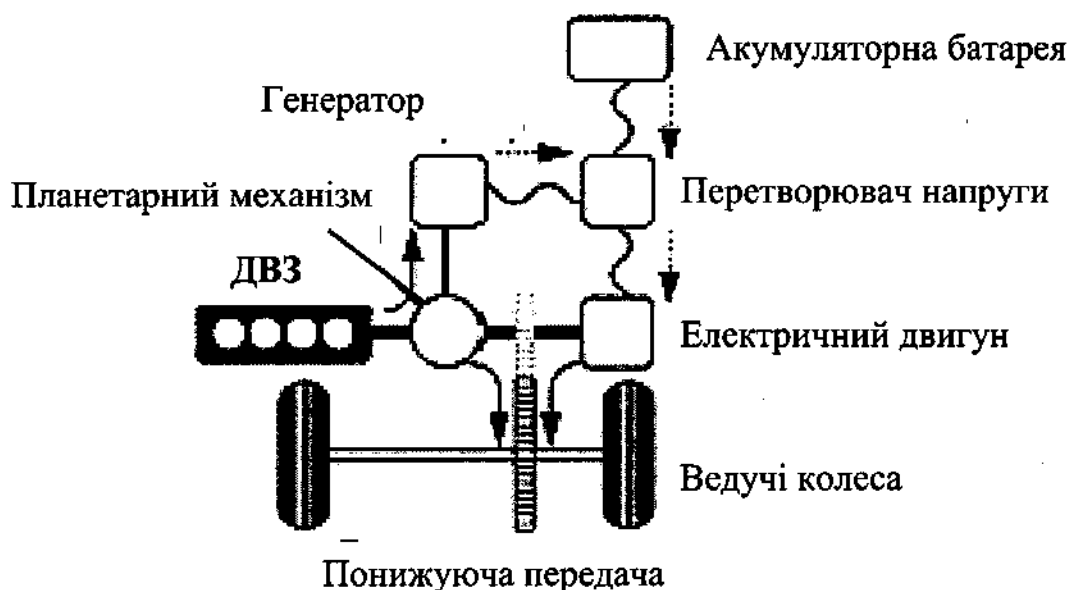


Рис. 2.7. Послідовно-паралельна схема трансмісії гібридної силової установки автомобіля

В послідовно-паралельній схемі гібрида планетарний механізм розділяє потік потужності, що йде від двигуна внутрішнього згоряння так, що співвідношення потужності, що поступає безпосередньо на колеса, і що йде на генератор може плавно змінюватися. Автомобілі комплектуються, як правило, двома електромашинами вентильного типу. Погоджують роботу на всіх режимах перетворювач напруги і управляючий комп'ютер.

Гібридні автомобілі, зібрані по послідовно-паралельній схемі, комплектуються, як правило, більш потужними електричними двигунами, тому здатні здійснювати рух, як в комбінованому режимі, так і тільки на електричній тязі, що істотно підвищує екологічну чистоту автомобіля, особливо в міському циклі.

Таким чином, ми проаналізували три альтернативні варіанти побудови трансмісій в гібридних силових установках автомобіля: послідовну, паралельну і послідовно-паралельну схеми. Якщо вибрати послідовно-паралельну схеми побудови, то економію палива і екологічну частоту автомобіля можна підвищити ще за рахунок періодичного виключення ДВЗ, наприклад, на зупинках,

при гальмуванні, русі на малих швидкостях і русі за інерцією. Іншими словами, при відключеному ДВЗ гібридний автомобіль може працювати в режимі електромобіля. Це можна здійснити при достатньо високій потужності і ємності акумуляторних батарей.

2.3. Характерні режими роботи гібридної силової установки.

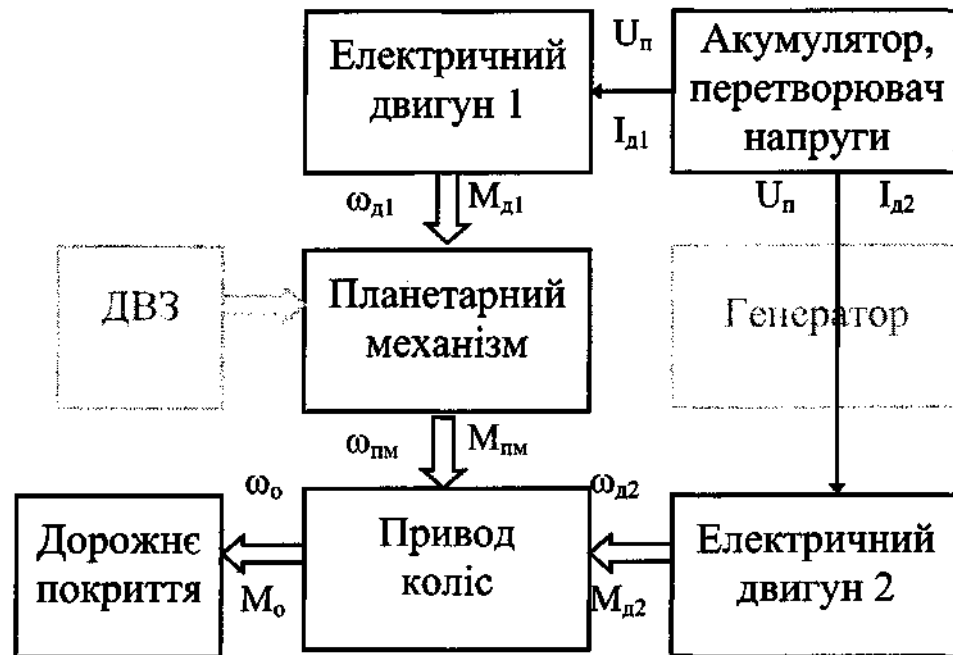
Дослідження схемних рішень побудови структури гібридних силових установок показало, що найбільш перспективними розробками є такі транспортні засоби, що можуть рухатися як у комбінованому режимі, так і тільки на електротязі [10]. Такий принцип роботи гібридної силової установки використовує корпорація Toyota при створенні автомобілів модельного ряду Toyota Prius II, Lexus RX400h, Lexus GS450h та ін. У таких автомобілів найвищі показники економічності та екологічності, а при цьому потужність та динаміка руху кращі, у в порівнянні з автомобілями аналогічного класу з ДВЗ.

Проведемо аналіз протікання силових потоків в електротрансмісії гібридної силової установці такого автомобіля. Визначимось, що гібридна силова установка використовує різні джерела механічної енергії: двигун внутрішнього згоряння та два тягових електричних двигуна на передньому та задньому мосту. Крім того, в схемі гібридної силової установки присутні акумуляторна батарея, перетворювач напруги та електричний генератор, який виконує також функції стартера. Така схема побудови гібридної силової установки (див. рис. 2.3, 2.7) аналогічна електротрансмісії автомобіля Lexus RX400h та Lexus GS450h і є на даний час найбільш перспективною та ефективною.

Як видно з рис. 2.3 енергетичні потоки з ДВЗ, стартер-генератора та електричної машини 1 з'єднані в єдиний блок за допомогою спеціального планетарного редуктора. Це дозволяє (в залежності від швидкості та навантаження) комбіновано здійснювати привод автомобіля: або тільки електродвигунами, або сумісно електродвигунами та ДВЗ, або тільки ДВЗ. При цьому зайва механічна енергія двигуна внутрішнього згоряння за допомогою генератора та перетворювача напруги здійснює заряд акумуляторної батареї.

Розглянемо деякі характерні режими роботи гібридної силової установки й проведемо аналіз протікання механічних і електричних потоків енергії на цих режимах з відповідним формалізованим описом [11].

Початок руху або рух з невеликим навантаженням на малих швидкостях здійснюється тільки за рахунок потужності електричних двигунів (рис. 2.8).



U_p – напруга з перетворювача, $I_{д1}$, $I_{д2}$ – струм, який споживають електричні двигуни 1 та 2, $M_{д1}$, $M_{д2}$ – обертовий момент електричних двигунів 1 та 2, $\omega_{д1}$, $\omega_{д2}$ – кутова частота обертання електричних двигунів 1 та 2, $M_{пм}$ – обертовий момент планетарного механізму, $\omega_{пм}$ – кутова частота планетарного механізму, M_o – момент опору коліс з дорожнім покриттям, ω_o – кутова частота обертання коліс.

Рис. 2.8. Схема розподілу енергетичних потоків в електротрансмісії при русі з невеликим навантаженням

Саме такий режим характерний для міського циклу, в якому витрата пального у гібридних автомобілів значно нижче, ніж при безперервному русі на великих швидкостях. Передачу потужності від акумуляторної батареї P_{AB} до агрегатів гібридної силової

установки у цьому режимі можна представити у вигляді формули перетворення енергії.

$$P_{AB} = \begin{cases} U_n I_{\partial 1} \rightarrow M_{\partial 1} \omega_{\partial 1} \rightarrow M_{nm} \omega_{nm} \leftrightarrow M_o \omega_o \\ U_n I_{\partial 2} \rightarrow M_{\partial 2} \omega_{\partial 2} \quad \quad \quad \leftarrow \quad \quad \quad \uparrow \end{cases} \quad (2.1)$$

Позначка $\leftrightarrow$ у формулі (2.1) відповідає тому, що момент електричних двигунів урівноважуються моментом опору коліс з дорожнім покриттям.

При динамічному прискоренні та безперервному русі на великих швидкостях у роботу періодично включається двигун внутрішнього згоряння. Планетарний механізм один потік механічної енергії прямує до приводу коліс, другий – до генератора, який виробляє електричну енергію для електродвигунів та заряду акумуляторної батареї (рис. 2.9).

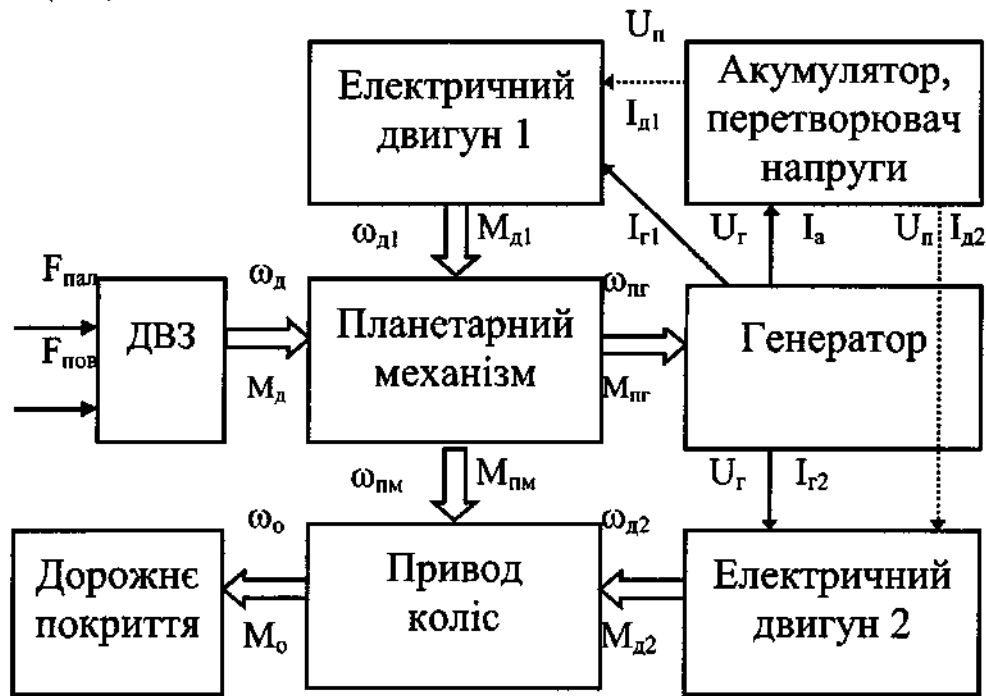
Передачу потужності від двигуна внутрішнього згоряння $P_{ДВЗ}$ до агрегатів гібридної силової установки автомобіля у цьому режимі можна представити у вигляді формул перетворення енергії

$$P_{ДВЗ} = f(F_{нал}, F_{нов}) = M_{ДВЗ} \omega_{ДВЗ} \rightarrow \begin{cases} M_{nz} \omega_{nz} \\ M_{nm} \omega_{nm} \rightarrow M_o \omega_o \end{cases} \quad (2.2)$$

$$M_{nz} \omega_{nz} \rightarrow \begin{cases} U_z I_{z1} \rightarrow M_{\partial 1} \omega_{\partial 1} \rightarrow M_{nm} \omega_{nm} \leftrightarrow M_o \omega_o \\ U_z I_{z2} \rightarrow M_{\partial 2} \omega_{\partial 2} \quad \quad \quad \leftarrow \quad \quad \quad \uparrow \\ U_z I_a \end{cases}$$

При динамічному прискоренні та русі з великим навантаженням, акумуляторна батарея може додавати електричну енергію для приводу електричних двигунів (ці потоки енергії умовно показані на рис. 2.9 пунктирними лініями), що збільшує загальну потужність гібридної силової установки та покращує динамічні характеристики транспортного засобу.

Передача додаткової потужності від акумуляторної батареї до агрегатів гібридної силової установки автомобіля аналогічна формулі (2.1).



$F_{\text{пал}}$, $F_{\text{пов}}$ – витрата палива та повітря ДВЗ, M_d , ω_d – обертовий момент та кутова частота ДВЗ, U_r – напруга генератора, $I_{\text{д1}}$, $I_{\text{д2}}$, I_a – струм, який споживають електричні двигуни 1 і 2 та акумуляторна батарея, $M_{\text{пл}}$, $\omega_{\text{пл}}$ – обертовий момент і кутова частота планетарного механізму, яка надається генератору.

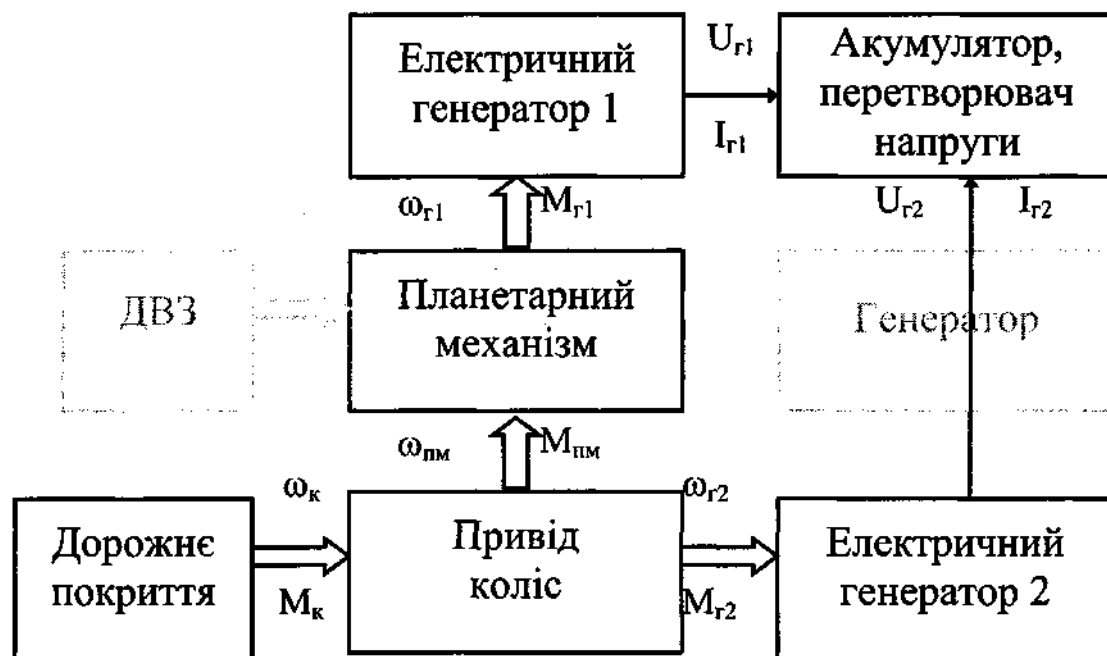
Рис. 2.9. Схема розподілу енергетичних потоків в електротрансмісії при динамічному прискоренні

При русі під ухил за інерцією та гальмуванні тягові електричні двигуни перетворюються у генератори. Рекуперативна енергія через спеціальний перетворювач напруги, який змінну напругу перетворює у постійну, заряджує акумуляторну батарею. Двигун внутрішнього згоряння при цьому автоматично відключається. Напрямок потоків електричної та механічної енергії на цих режимах показано на рис. 2.10.

Передачу рекуперативної потужності від агрегату до агрегату гібридної силової установки автомобіля при русі за інерцією та гальмуванні можна представити у вигляді наступної формули перетворення енергії:

$$P_K = M_K \omega_K = \left\{ \begin{array}{l} M_{nm} \omega_{nm} \rightarrow M_{z1} \omega_{z1} \rightarrow U_{z1} I_{z1} \\ M_{z2} \omega_{z2} \rightarrow U_{z2} I_{z2} \rightarrow U_a I_a \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

де U_a, I_a – напруга та струм заряду акумуляторної батареї.



M_K, ω_K – обертовий момент та кутова частота обертання коліс, $M_{пм}, \omega_{пм}$ – обертовий момент і кутова частота планетарного механізму, яка надається генератору 1, $M_{г1}, M_{г2}, \omega_{г1}, \omega_{г2}$ – обертові моменти та кутові частоти генераторів 1 та 2, $U_{г1}, U_{г2}, I_{г1}, I_{г2}$ – напруга та струм, який виробляють генератори 1 та 2 для заряду акумуляторної батареї.

Рис. 2.10. Схема розподілу енергетичних потоків у електротрансмісії при русі за інерцією та гальмуванні

Автоматичне керування роботою електротрансмісії гібридної силової установки на всіх режимах здійснює бортовий комп'ютер, який постійно регулює напрям та потужність кожного потоку енергії. На всіх зупинках та русі за інерцією двигун внутрішнього згорання автоматично відключається, що особливо актуально в міському циклу руху.

Таким чином, аналіз протікання енергетичних потоків в гібридної силової установці при характерних режимах роботи автомобіля показав, що основна перевага таких систем у порівнянні

з традиційною схемою автомобіля, полягає у використанні для привода автомобіля тягових електричних двигунів, які реалізують максимальний обертовий момент при невисокій частоті обертання. Саме за рахунок того, що ДВЗ працює лише в оптимальному режимі або взагалі не працює, здійснюється значна економія палива та зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. Крім того, при гальмуванні та русі за інерцією з заглушеним двигуном внутрішнього згоряння обернені електричні машини переходять у генераторний режим і перетворюють рекуперативну механічну енергію в електричну, що використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї. Це ще один спосіб економії палива та підвищення екологічної чистоти автотранспортного засобу.

2.4. Концепція побудови гібридної силової установки

Вектор наукового інтересу провідних фахівців Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) направлений на розробку інтелектуальних екологічно чистих транспортних засобів. Одним з науково-технічних напрямів є розробка автомобілів з гібридними силовими установками [12]. Дослідження, що проводяться в ХНАДУ, пов'язані як з теоретичним і практичним вивченням кращих розробок гібридних автомобілів, так і з розробкою теорії керування енергетичними потоками в гібридній силовій установці автомобіля, проведенням математичного моделювання роботи всіх процесів і систем, і, найголовніше, з конструюванням та розробкою дослідних зразків таких автомобілів.

Нові конструкторські рішення побудови гібридних силових установок в корені міняють традиційні підходи і концепції до створення не тільки силових установок, але і автомобілів в цілому. Це зв'язано як із зміною принципів керування гібридною силовою установкою, так із значним підвищенням живлячої напруги, кардинальною зміною схемно-конструкторських рішень силової установки автомобіля в цілому, так і з тим, що автомобіль стає більш інтелектуальним, інформативним і доброзичливим по відношенню до водія і пасажирів.

Метою даного науково-технічного дослідження є розробка стратегічних напрямів розвитку і концептуальних рішень по створенню екологічно чистого транспортного засобу на Україні. Підвищення екологічної чистоти, паливної економічності і тягово-швидкісних характеристик автомобіля можлива завдяки застосуванню на ньому гібридної силової установки. Такий комплексний позитивний ефект досягається завдяки комбінації сильних сторін електричного двигуна і двигуна внутрішнього згоряння при різних режимах руху автомобіля. Задача дослідження присвячена аналізу побудови сучасних гібридних силових установок і синтезу принципових рішень по створенню Українського екологічно чистого автомобіля.

Гібридна силова установка автомобіля включає наступні основні компоненти: тягові двигуни, джерела енергії, перетворювачі енергії, системи керування, а при необхідності пристрої відображення інформації, перетворювачі напруги, дільник механічної потужності. Розглянемо кожен з цих компонентів окремо.

Тягові двигуни. Як правило, це двигун внутрішнього згоряння в поєднанні з одним або декількома оберненими електричними машинами, пневмодвигунами, або з іншими джерелами механічної енергії.

Джерела енергії на автомобілях можуть бути самими різноманітними. Наведемо декілька з них. Хімічна енергія палива (бензин, дизельне паливо, пропан, бутан або інші альтернативні види палива) в ДВЗ перетворюється в механічну енергію руху автомобіля. Хімічна енергія накопичувачів електричної енергії (аккумуляторні батареї конденсатори, молекулярні накопичувачі енергії, паливні елементи і інші джерела) в електричних двигунах перетворюється в механічну енергію руху автомобіля. Механічна енергія, яка накопичена у балонах високого тиску, в пневматичних двигунах перетворюється в механічну енергію руху автомобіля. Механічна енергія маховика, який розганяється електричним двигуном, перетворюється в механічну енергію руху автомобіля. Теплова енергія сонця у сонячних батареях перетворюється в електричну енергію для живлення різних споживачів. Теплова

енергія вихлопних газів автомобіля теж може перетворюватися в електричну енергію.

Перетворювачі енергії перетворюють енергію з одного виду до другого. Наприклад генераторна установка призначена для перетворення механічної енергії ДВЗ в електричну енергію для живлення тягових електричних двигунів і (або) заряду акумуляторної батареї. Стартер-генератор використовується також для автоматичного пуску ДВЗ, тобто перетворює електричну енергію в механічну.

Система керування. Система керування погоджує роботу всіх компонентів гібридної силової установки. Система керування включає джерела інформації (датчики) про внутрішній і зовнішній стан гібридної силової установки, виконавчі пристрої і безпосередньо пристрій керування з відповідними алгоритмами і програмами обробки інформації.

Пристрої відображення інформації використовуються для повідомлення водія про режими і стан гібридної силової установки, а також для рекомендації управляючих дій. Пристрій відображення інформації включає монітор, енергетичних потоків, панель приладів (наприклад, показчик миттєвої витрати потужності), світлові індикатори, звукові сигналізатори, і тому подібне.

Перетворювач напруги включає конвертор і інвертор. Конвертор перетворює (звичайно знижує) змінну напругу в постійну напругу для узгодження змінної напруги генератора з постійною напругою акумуляторної батареї. Інвертор перетворює (звичайно підвищує) постійну напругу акумулятора в напругу живлення електричного двигуна і генератора, який використовується в якості стартера.

Дільник механічної потужності представляє собою, як правило, планетарний механізм, застосовується для узгодження роботи ДВЗ, генератора і електричного двигуна на різних режимах роботи гібридної силової установки.

Структурна схема одного з варіантів побудови гібридної силової установки наведена на рис. 2.11. Потоки механічної енергії на рис. 2.11 позначені подвійною стрілкою, потоки електричної енергії – одинарної, а потоки інформаційних і керуючих сигналів – пунктирними лініями.

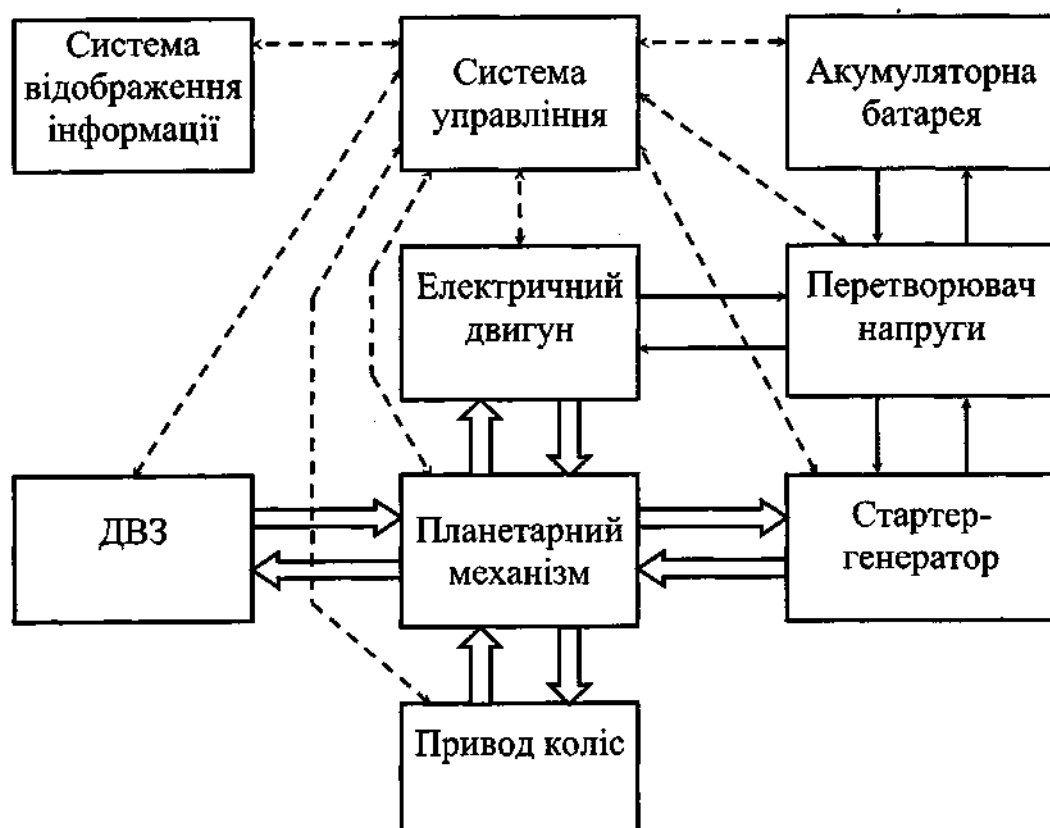


Рис. 2.11. Схема структурна гібридної силової установки автомобіля

Система керування (рис. 2.11) пов'язана зі всіма компонентами гібридної силової установки інформаційними і управляючими потоками. Інформаційні потоки передають системі керування інформацію з датчиків про стан гібридної силової установки та зовнішнього середовища, а управляючі потоки за програмою, закладеною в пам'ять комп'ютера, керують і погоджують роботу виконавчих пристроїв, тим самим обирають оптимальні режими роботи кожного з компонентів.

Слід зазначити, що система керування гібридною силовою установкою включає як традиційні автомобільні датчики, так і спеціалізовані, передаючі інформацію про стан додаткових параметрів установки. Наприклад, датчик положення педалі гальма може об'єднувати дещо управляючих функцій. Так, при легкому натисненні на педаль гальма включається режим рекуперації енергії за допомогою обернених електричних машин. При більш сильному натисненні вступає в дію традиційна система гальмування.

Система керування пов'язана зі всіма компонентами гібридної силової установки інформаційними і управляючими потоками. Інформаційні потоки передають системі керування інформацію з датчиків про стан гібридної силової установки та зовнішнього середовища, а управляючі потоки за програмою, закладеною в пам'ять комп'ютера, керують і погоджують роботу виконавчих пристроїв, тим самим обирають оптимальні режими роботи кожного з компонентів. В гібридних силових установках можуть використовуватися додаткові датчики, які передають поточні параметри і режими тягового електричного двигуна і генератора (частоти, моменту, потужності, температури і ін.), параметри акумуляторної батареї (напруга, струм розряду-заряду, остатня ємність, температура і ін.) і т.д.

При створенні екологічно чистого автомобіля в ХНАДУ за базовий транспортний засіб був вибраний вітчизняний автомобіль ЗАЗ-110550 з типом кузова «пикап». Вибір вантажно-пасажирського варіанту кузова автомобіля пов'язано з тим, що в кузові зручно розташовувати додаткове обладнання та вимірювальну апаратуру. Структурна схема запропонованої першого варіанта конструкції гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ представлена на рис. 2.12.

Згідно виробленої концепції створення гібридної силової установки, конструкція першого варіанту автомобіля ХНАДУ складається з наступних основних компонентів (рис. 2.12): блок акумуляторних батарей, тяговий електричний двигун постійного струму (ДПС) з приводом на задні колеса, генераторна установка, система керування та контролю, пристрій відображення інформації (монітор комп'ютера).

Система керування і контролю діагностує стан гібридної силової установки, керує режимами роботи електричних двигунів і ДВЗ в залежності від показників датчиків, виробляє відповідні рекомендації водію по керуванню транспортного засобу, які відображуються на моніторі (на рис. 2.12 не показаний). На моніторі відображуються поточні режими руху транспортного засобу і інші параметри автомобіля (режим руху транспортного засобу, стан акумуляторної батареї та ДВЗ, поточна і повна витрата палива, пройдена відстань і т.п.)

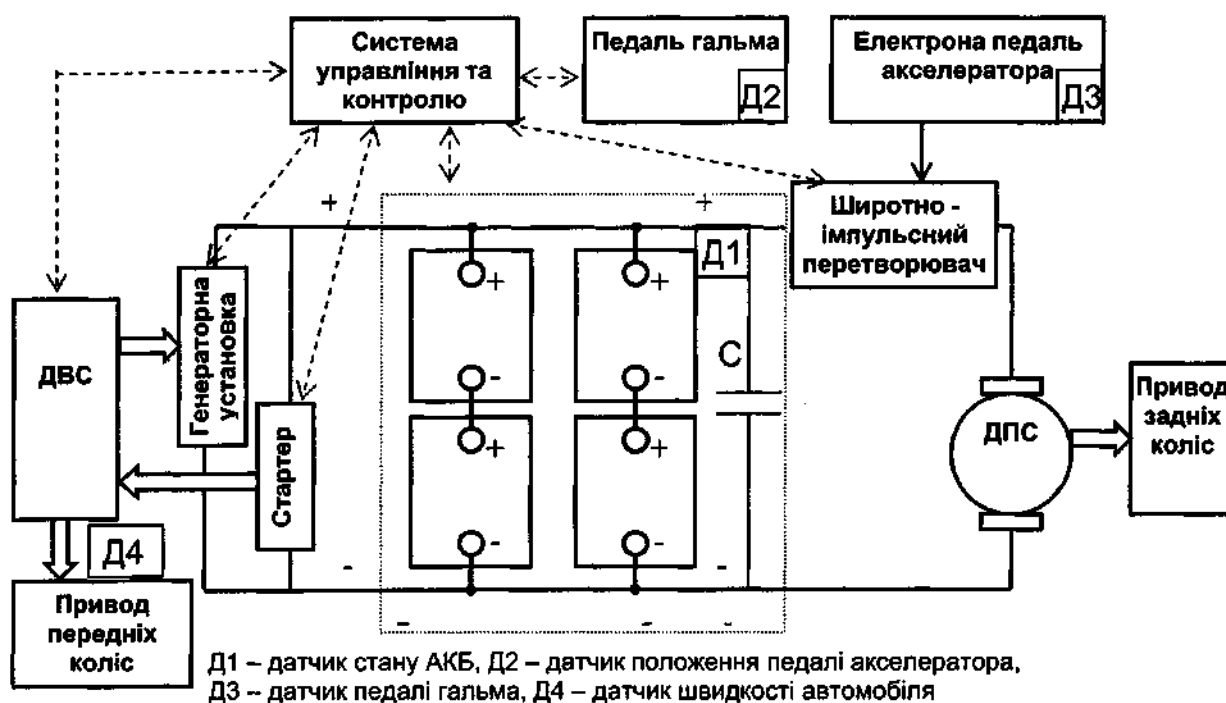


Рис. 2.12. Схема структурна гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ

У першому варіанті гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ в якості акумуляторних батарей використовуються звичайні автомобільні свинцево-кислотні акумулятори ємністю 100 А*годин кожна. Для підвищення відносної напруги живлення та ємності включені вони послідовно-паралельно. Також для підвищення потужностних та масо-габаритних характеристик блоку акумуляторних батарей паралельно акумуляторам підключений імпульсний конденсатор С великої ємності ІКЕ 40-28.

Конденсатор великої ємності ІКЕ 40-28 використовується для полегшення пуску ДВЗ великовантажних автомобілів в тяжких умовах використання (наприклад, при сильних морозах або при розрядженій акумуляторної батареї). В нашому випадку конденсатор дозволяє при пуску ДПС знизити початковий струм акумуляторних батарей, тем самим збільшити термін їх служби в декілька разів. Крім того, конденсатор, як швидко віддає накопичену енергію, так швидко її і поглинає (в відмінності від акумуляторної батареї), що дозволяє найбільш ефективно використовувати рекуперативну енергію гальмування автомобіля. Основні технічні характеристики конденсатора ІКЕ 40-28 наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні технічні характеристики конденсатора ІКЕ 40-28

Технічні характеристики	Одиниця вимірювання	Величина параметра
Номінальна напруга заряду	В	28
Номінальна місткість	Ф	100
Енергія, що запасасться	кДж	40
Номінальна питома енергія	кДж/кг	1,33
Внутрішньо опір	Ом	0,005
Час заряду від напруги акумулятора до напруги, що видає генератор	с	10
Кількість циклів заряд/розряд до втрати 30% ємності	циклів	1000000
Робочий діапазон температур	С ⁰	- 50 ... + 60
Вага	кг	30
Діаметр,	мм	230
Довжина, мм	мм	360
Термін служби, років	років	10

Акумуляторні батареї, конденсатор та блок керування силовою частиною розташовуються в салоні автомобіля ЗАЗ-110550 за сидінням водія та пасажирів (рис. 2.13).

Згідно розробленому алгоритму (рис. 2.14), автомобіль до швидкості 30 км/год здійснює рух на електротязі. При подальшому збільшенні швидкості, або розрядженні блока акумуляторних батарей примусово включається ДВЗ, а електродвигун автоматично відключається. При цьому йде заряд акумуляторних батарей та конденсатора. При натисненні на педаль гальма автоматично відключається ДВЗ. Далі алгоритм повторюється.

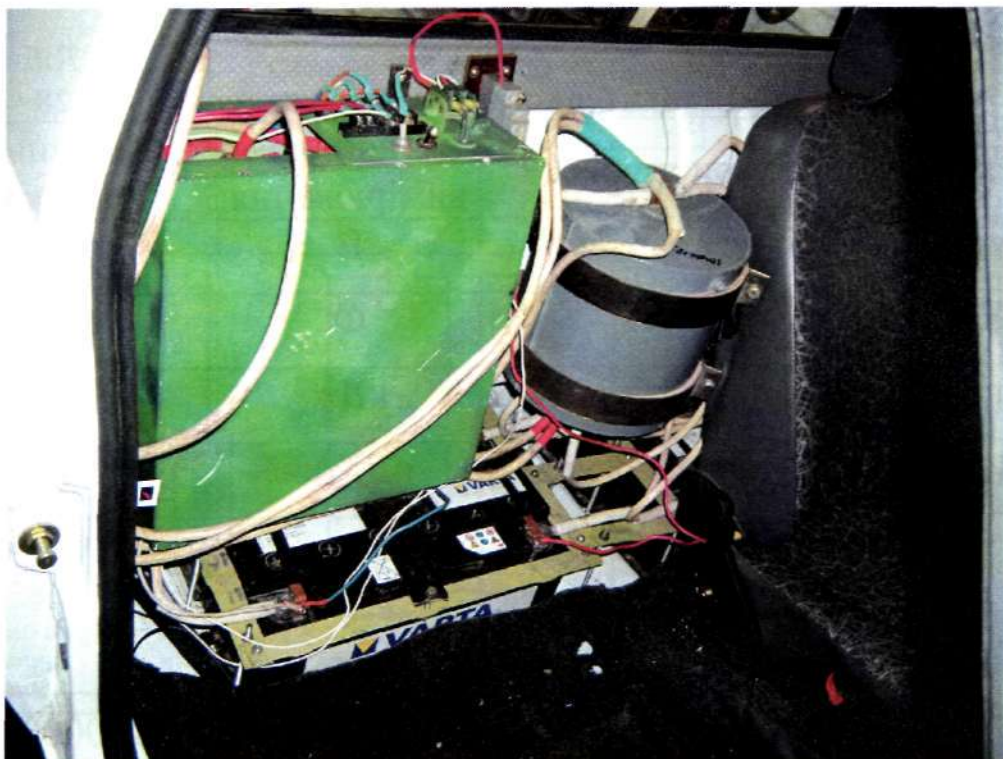


Рис. 2.13. Розташовування силових елементів гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ

Таким чином, аналіз схемних рішень, конструкцій і технічних характеристик гібридних силових установок показав, що найперспективнішим напрямом автомобілебудування в даний час є розробка автомобілів, які в своїх силових установках об'єднують як спеціально побудований двигун внутрішнього згоряння, так і тяговий електричний двигун, як правило вентильного типу. Об'єднання позитивних якостей ДВЗ і електричного двигуна дозволяє отримати наступні переваги в порівнянні з традиційною конструкцією автомобіля:

- підвищення екологічної чистоти
- економія палива
- поліпшення динамічних властивостей
- підвищення ККД.

На основі аналізу існуючих гібридних силових установок нами вироблена концепція побудови гібридної силової установки автомобіля, на основі якій спроектовано та виготовлено дослідний зразок гібридного автомобіля ХНАДУ.

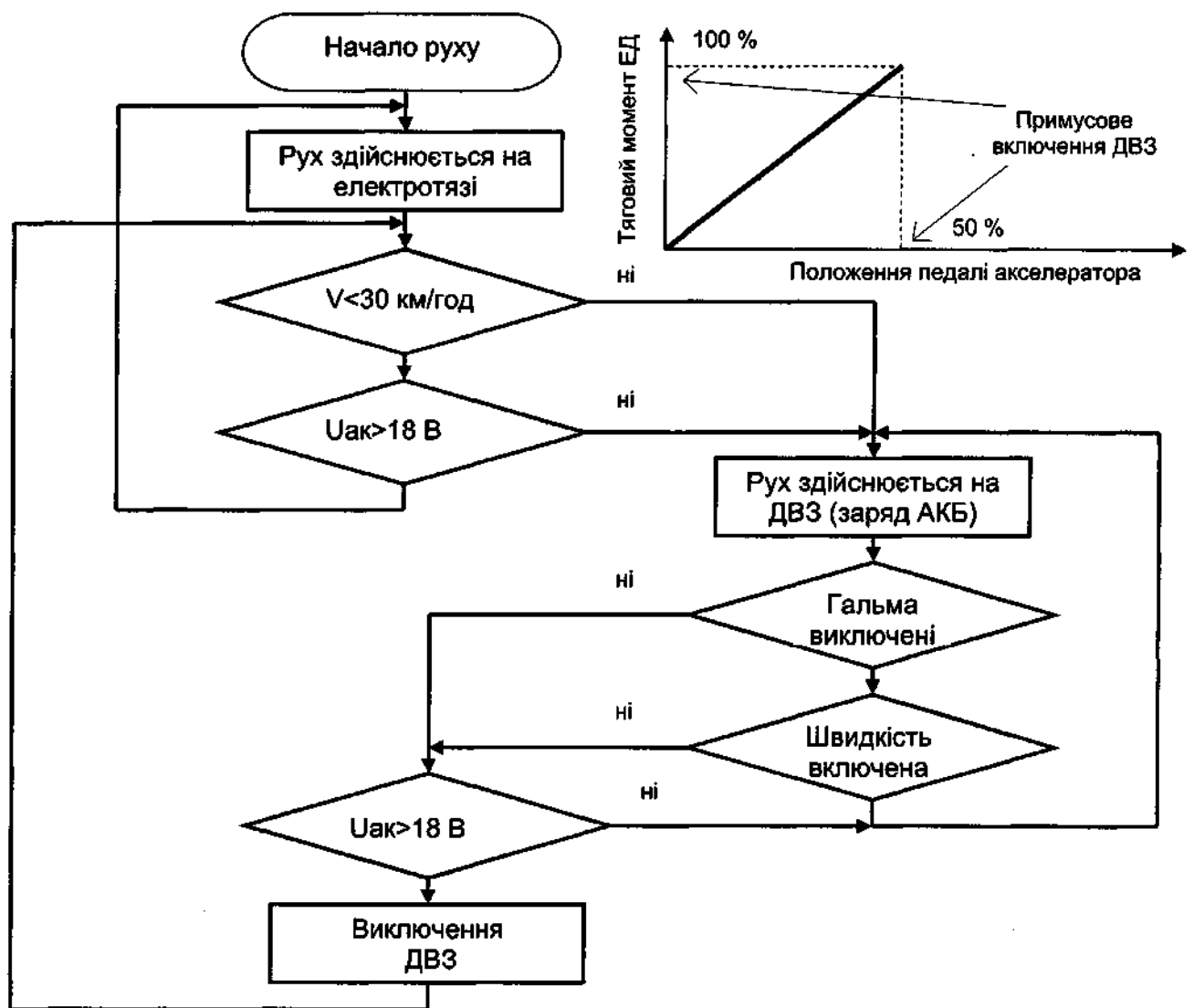


Рис. 2.14. Алгоритм роботи гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ

3. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

3.1. Основні компоненти гібридної силової установки

Основні компоненти гібридної силової установки автомобіля наведені на рис. 3.1. Саме цими компонентами гібридний автомобіль відрізняється від звичайного.

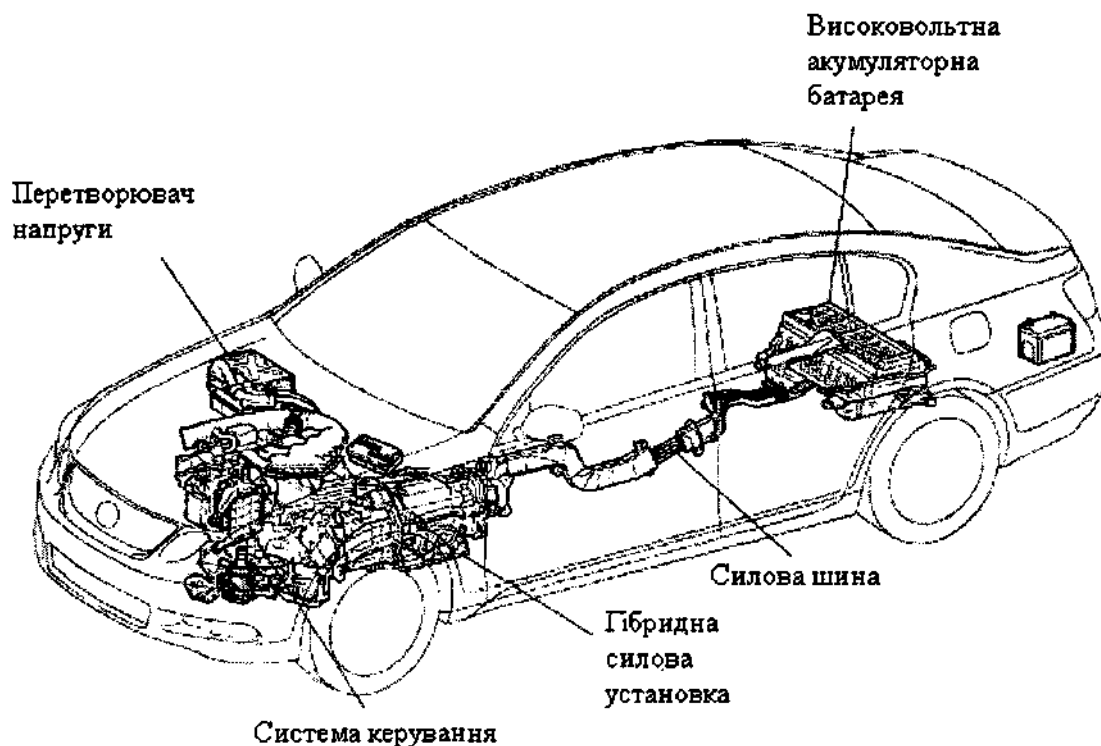


Рис. 3.1. Основні компоненти гібридної силової установки

Гібридна силова установка (рис. 3.1) включає в себе такі компоненти як ДВЗ, електричний стартер-генератор, тяговий електричний двигун, безступенева коробка передач.

Перетворювач напруги є інвертором змінно-постійної напруги для узгодження змінної напруги генератора з постійною напругою високовольтної акумуляторної батареї, й навпаки для узгодження постійної напруги високовольтної акумуляторної батареї зі змінною напругою тягового електричного двигуна. Крім цього цей блок може мати в своєму складі високовольтний перетворювач для

підвищення напруги, що йде від блоку акумуляторних батарей до електричних машин.

Високовольтна акумуляторна батарея є джерелом енергії для тягового електричного двигуна. Крім неї, як правило, встановлюється допоміжна акумуляторна батарея на 12 В для живлення стандартних споживачів енергії.

Система керування керує та погоджує роботу всіх систем та компонентів гібридної силової установки.

Конструкція автомобіля з гібридною силовою установкою націлена одночасно на підвищення потужності і на поліпшення показників роботи трансмісії, яка має переваги в керуванні і контролі над енергією в порівнянні з традиційною схемою автомобіля.

За оцінками експертів корпорації “Toyota Motor Corporation” економічна ефективність гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius II виявляється щонайвищою з існуючих на сьогоднішній день систем, якщо порівнювати їх за принципом свердловина-колесо, що відображає загальну енергетичну ефективність, починаючи з процесу виробництва палива до роботи, проведеної автомобілем. Загальний ККД (свердловина-колесо) гібридної силової установки THS II складає 32 %, що в два рази вище за ККД автомобіля з традиційним двигуном внутрішнього згоряння. Енергетична ефективність гібридної силової установки Toyota Hybrid System II на сьогоднішній час також вище, ніж у системи працюючої на водневих паливних елементах, яка вважається на один крок ближче до ідеального екологічно чистого автомобіля.

Порівняльна енергетична ефективність автомобілів з різними типами силових установок, наведено у табл. 3.1.

Більш докладно компоненти гібридних силових установок розглянемо та проаналізуємо на прикладі таких автомобілів як Toyota Prius, Lexus RX400h, Lexus GS450h. Гібридна силова установка Toyota Hybrid System цих автомобілів помітно покращує показники потужності, характеристики розгону, і в той же час гібридні автомобілі досягають щонайвищого рівня екологічної чистоти в світі серед автомобілів з ДВЗ.

Таблиця 3.1

**Порівняльна енергетична ефективність
силових установок автомобілів**

Автомобілі з різними типами силових установок	ККД палива (свердловина – бак), %	ККД автомобіля (бак – колесо), %	Загальний ККД (свердловина – колесо), %
Сучасні автомобілі з бензиновими двигунами	88	16	14
Toyota Prius	88	32	28
Toyota Prius II	88	37	32
Експериментальні автомобілі на водневих паливних елементах	58 (водень)	50	29
Перспективні автомобілі на водневих паливних елементах	70 (водень)	60	42

Для початку проведемо порівняльний аналіз гібридних силових установок автомобілів Toyota Prius та Toyota Prius II. Основні технічні характеристики гібридних силових установок THS II и THS цих автомобілів наведено у табл. 3.2.

Гібридна силова установка автомобіля Toyota Prius II складається з двох джерел механічної енергії, а саме: високоекономічного ДВЗ об'ємом 1496 см³, потужністю 57 кВт, працюючого по циклу Аткінсона із збільшеними фазами розширення і синхронного електричного двигуна вентильного типу потужністю 50 кВт, електричного генератора та планетарного механізму, який розподіляє і поєднує потоки потужності від двигуна внутрішнього згоряння, електричного двигуна і генератора та передає рушійну силу на колеса. Система керування, залежно від умов руху, автоматично визначає ступінь участі кожного з них. Обидва двигуна (або кожний окремо) обертають через редуктор передні ведучі колеса.

Таблиця 3.2

**Порівняльні технічні характеристики систем THS II и THS
автомобілів Toyota Prius**

Силовая установка	Показник	THS II	THS
ДВЗ	Тип	1.5 L бензиновий	1.5 L бензиновий
	Максимальна потужність, кВт (к.с.) при n (об/хв.)	57 (78) 5000	53 (72) 4500
	Максимальний момент, Нм (кгм) при n (об/хв.)	115 (11.7) 4200	115 (11.7) 4200
Тяговый электрический двигун	Тип	Вентильний двигун	Вентильний двигун
	Максимальна потужність, кВт (к.с.) при n (об/хв.)	50 (68) 1200...1540	33 (45) 1040...5600
	Максимальний момент, Нм (кгм) при n (об/хв.)	400 (40.8) 0...1200	350 (35.7) 0...400
Гібридна силова установка	Максимальна потужність, кВт (к.с.) при швидкості руху, км/год	82 (113) вище 85	74 (101) вище 120
	Потужність кВт (л.с.) при 85 км/ч	82 (113)	65 (88)
	Максимальний момент, Нм (кгм) при швидкості руху, км/год	478 (48.7) нижче 22	421 (42.9) нижче 11
	Момент, Нм (кгм) при 22 км/год	478 (48.7)	378 (38.5)
Акумулятор на батарея	Тип	нікельметал гідридна	нікельметал гідридна

Зовнішній вигляд гібридної силової установки THS II автомобіля Toyota Prius II представлений на рис. 3.2.

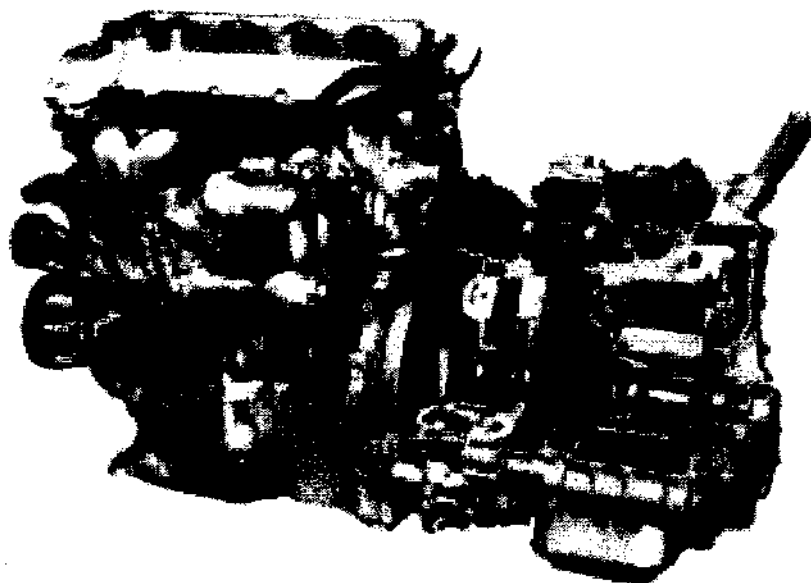


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд гібридної силової установки THS II

Схема подовжнього розрізу гібридної силової установки з вказівкою всіх компонентів представлена на рис. 3.3.

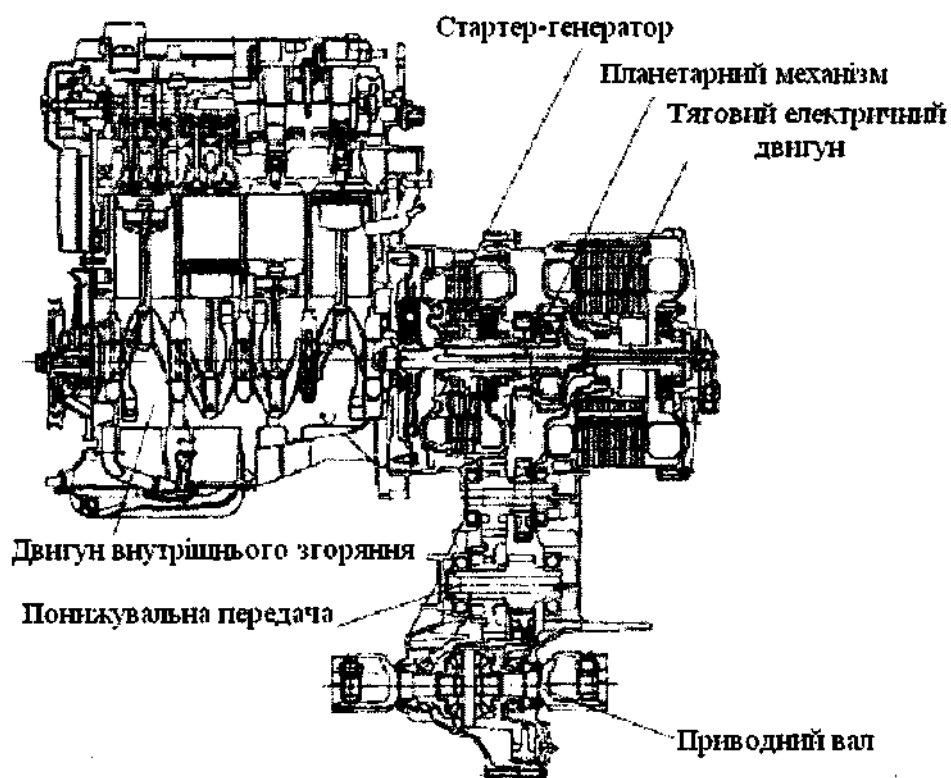


Рис. 3.3. Схема подовжнього розрізу гібридної силової установки THS II

Встановлений за двигуном внутрішнього згорання (рис. 3.2, 3.3) планетарний механізм розділяє потік потужності на дві гілки: одна йде до редуктора головної передачі, інша – до електричного генератора змінного струму, який заряджає через перетворювач напруги високовольтну акумуляторну батарею. Крім цього, від генератора при необхідності поступає енергія (через перетворювач напруги) в тяговий електричний двигун.

При гальмуванні автомобіля або руху під ухил тяговий електричний двигун працює в режимі генератора і за допомогою перетворювача напруги поповнює запас енергії в високовольтній акумуляторній батареї. При пуску двигуна внутрішнього згорання електричний генератор переходить у режим двигуна та виконує функції стартера. Всі ці вузли, що працюють з різними оборотами, узгоджуються системою керування, по командах якої гальмуються різні шестерні планетарного механізму і включається перетворювач напруги.

В системі THS II тяговий електричний двигун використовується в режимах, при яких ДВЗ має низький ККД. В таких режимах ДВЗ відключається, і автомобіль здійснює рух тільки на електротязі. В решті випадків ДВЗ налаштовується на економічний режим роботи, при якому механічна енергія перетворюється генератором в електричну енергію для живлення тягового електричного двигуна і заряду акумуляторної батареї. Також досягнута велика ефективність регенерації енергії під час скидання оборотів ДВЗ і гальмування. Крім цього, гібридна силова установка стала більш ефективною за рахунок поліпшеного енергетичного контролю і вдосконаленій системі рекуперації.

Для збільшення ефективності система THS II отримала коло високої напруги (до 500 В), що дозволяє зменшити масово-габаритні характеристики електричної трансмісії. Коло високої напруги є новою технологією, яка вперше була впроваджено в гібридному автомобілі Toyota Prius. Підвищення напруги живлення дозволило застосовувати електричний двигун великої потужності, і при цьому майже удвічі зменшити струм, що означає зменшення теплових втрат в 4 рази. Це вносить додатковий внесок в підвищення ефективності системи THS II.

3.2. Компоненти гібридної силової установки Toyota Hybrid System

Розглянемо більш детально кожний з компонентів гібридної силової установки Toyota Hybrid System II.

Тяговий електричний двигун. Електродвигун був розроблений на основі технологій, використаних компанією Toyota у виробництві електромобілів. В THS II використовується синхронний двигун змінного струму, подібний високопродуктивному безколекторному електричному двигуну постійного струму. Такий тип електричних двигунів в сучасній літературі називають вентильними електричними двигунами. Постійні неодимові магніти і ротор, складений із сталевих електромагнітних пластин, утворюють високопродуктивний електродвигун. Уклавши постійні магніти в V-образну форму, вдалося поліпшити обертовий момент і збільшити потужність в порівнянні з двигуном встановленим на першу модифікацію автомобіля Toyota Prius (див. табл. 3.2).

Схема подовжнього розрізу тягового електричного двигуна, встановленого на автомобіль Toyota Prius II представлена на рис. 3.4.

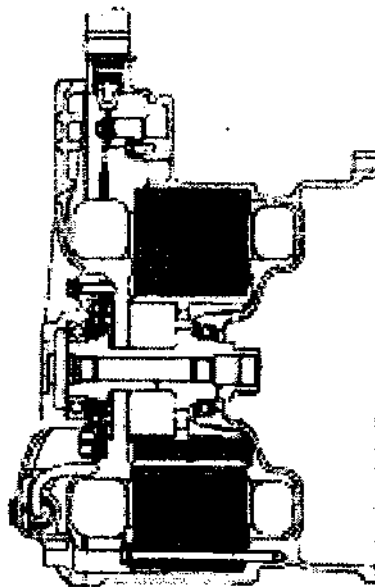


Рис. 3.4. Схема подовжнього розрізу тягового електричного двигуна
автомобіля Toyota Prius II

В поєднанні з розширеними можливостями від збільшення напруги живлення була збільшена ефективна потужність приблизно в 1,5 рази, тобто з 33 до 50 кВт, зберігши при цьому колишні розміри двигуна, він виявився найпродуктивнішим в світі по питомій масі. Порівняльні механічні характеристики тягових вентильних електричних двигунів автомобілів Toyota Prius и Toyota Prius II, які функціонують відповідно у складі гібридних силових установок Toyota Hybrid System (THS) и THS II наведені на рис. 1.8.

Генератор. Як і електричний двигун, генератор є синхронним вентильного типу. Конструкторами гібридної силової установки Toyota Hybrid System II для підвищення максимально можливих оборотів до 10000 з 6500 об/хв (у першій модифікації Toyota Prius) були вжиті певні заходи, наприклад, підвищена міцність ротора. Це підвищення оборотів значно збільшило енергопостачання в діапазоні середніх і малих швидкостей руху автомобіля, поліпшивши тим самим характеристики розгону при малих і середніх швидкостях. В результаті було досягнуте оптимальне співвідношення роботи високопродуктивного електричного двигуна і ДВЗ.

Схема подовжнього розрізу генератора, встановленого на автомобіль Toyota Prius II представлена на рис. 3.5.

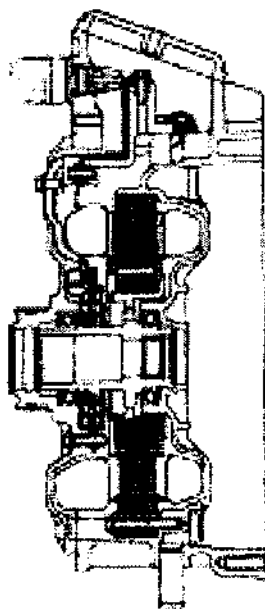


Рис. 3.5. Схема подовжнього розрізу генератора автомобіля Toyota Prius II

Перетворювач напруги є інвертором і конвертером. Інвертування перетворює постійну напругу акумуляторної батареї в змінну, яке використовується для приводу тягового електричного двигуна. Конвертер перетворює змінну напругу в постійну, яке використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї гібридної силової установки і, крім того, знижує його до 12 В для живлення стандартного електрообладнання автомобіля та додаткової акумуляторної батареї. Зовнішній вигляд перетворювача напруги представлений на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Перетворювач напруги автомобіля Toyota Prius II

Акумуляторна батарея. Замість звичного свинцево-кислотного акумулятора в гібридній силовій установці автомобіля Toyota Prius II використовується нікель - металгідридна батарея з 40 банок ємністю 260 ампер-годин напругою 7.2 В (6 елементів по 1.2 В) кожна. Зовнішній вигляд високовольтної акумуляторної батареї представлений на рис. 3.7.

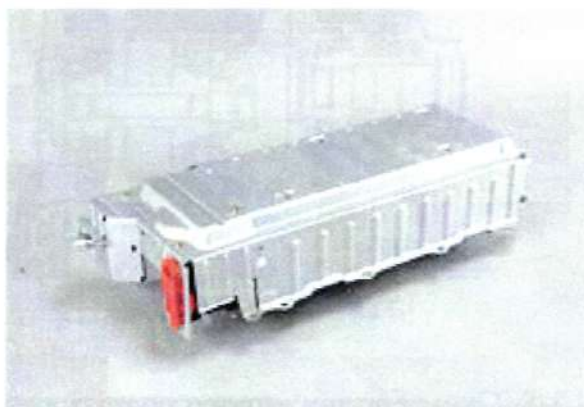


Рис. 3.7. Акумуляторна батарея автомобіля Toyota Prius II

Ця акумуляторна батарея – плід багаторічних експериментів і досліджень фахівців фірми Panasonic. Розташовується акумуляторна батарея за пасажирськими сидіннями в багажному відсіку автомобіля.

Гібридна трансмісія. Основними компонентами гібридної трансмісії автомобіля Toyota Prius II є: генератор, електричний двигун, перетворювач напруги, акумуляторна батарея, ДВЗ, планетарний механізм и понижуюча передача (рис. 3.8).

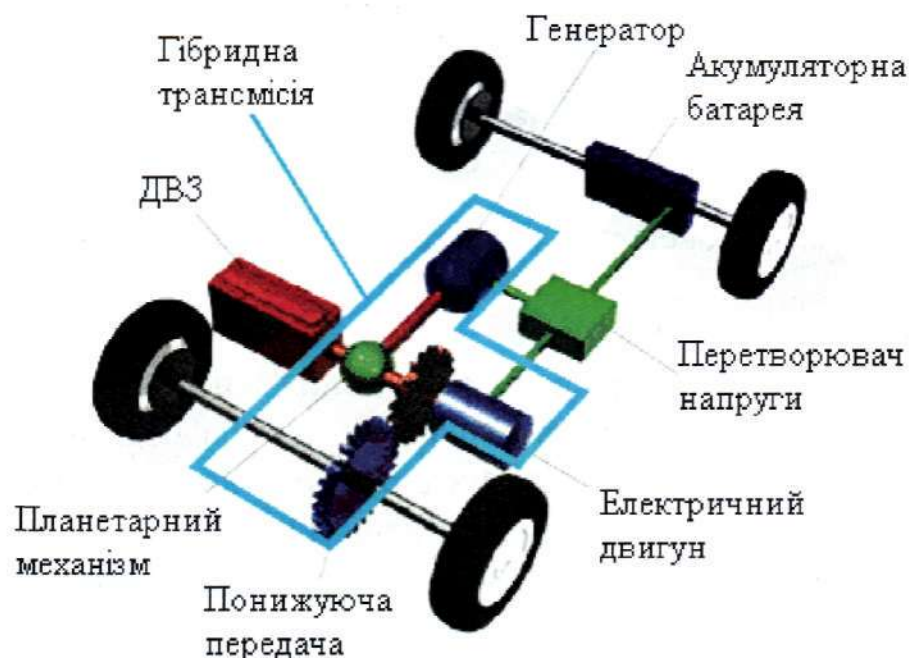


Рис. 3.8. Гібридна трансмісія автомобіля Toyota Prius II

Сила тяги від ДВЗ розділяється на два потоки планетарним механізмом, один з вихідних валів якого пов'язаний з електричним двигуном і колесами, а інший з генератором. Тому рушійна сила від ДВЗ передається по двох потоках: механічному і електричному. Система зберігає дію варіаторної трансмісії, коли можливо зміна швидкості руху при довільному варіюванні оборотами двигуна внутрішнього згоряння, генератора і електричного двигуна (залежно від швидкості автомобіля). В трансмісії THS II також зменшені на 30% втрати на тертя, завдяки використуванню шарикопідшипників і матеріалів зниженого тертя. Принцип роботи планетарного механізму розглянутий на рис. 3.9.

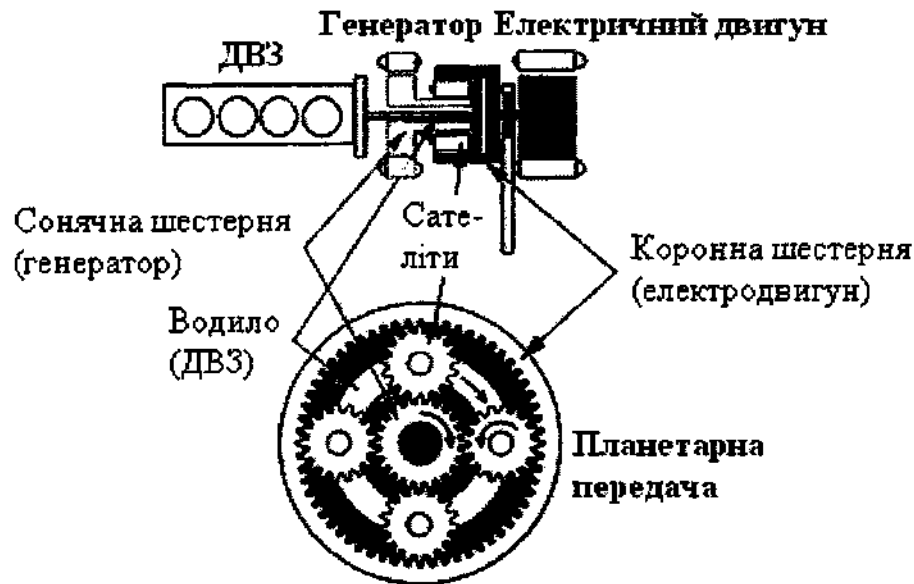
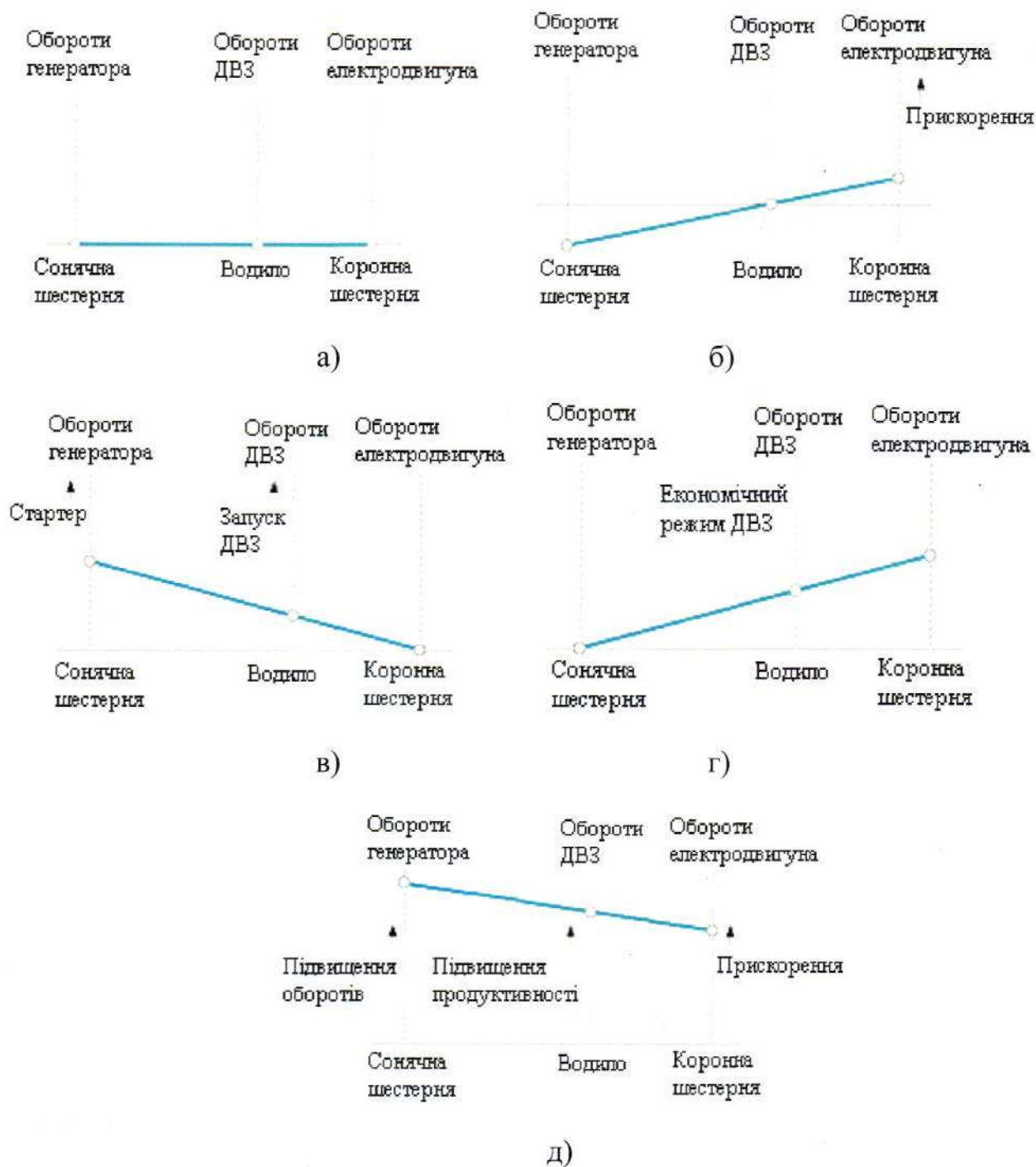


Рис. 3.9. Планетарний механізм автомобіля Toyota Prius II

Планетарний механізм - це своєрідний розподільник потужності (рис. 3.9), регулюючий напрям потоків потужності. В даному випадку з сонячною шестернею пов'язаний генератор, з водилом - двигун внутрішнього згоряння і з коронною шестернею - тяговий електричний двигун. При необхідності кожен ланку можна зробити або нерухомою (зупинивши стрічковим гальмом по команді системи управління) або ведучим. Таким чином, завдяки застосуванню такого діляника потужності відкриваються широкі можливості для комбінацій найрізноманітніших кінематичних варіантів.

Ілюстрація деяких режимів роботи планетарного механізму наведено на рис. 3.10. У першому режимі (рис. 3.10, а) всі деталі планетарного механізму нерухомі. При началі руху (рис. 3.10, б) використовується тільки електропривод. При прискореному старті (рис. 3.10, в) генератор, що має також функцію стартера, запускає двигун внутрішнього згоряння. Коли ДВЗ запущений, то генератор починає виробляти електричну енергію, яка використовується для заряду акумуляторної батареї і живлення електричного двигуна, який рухає автомобіль. В режимі нормального руху (рис. 3.10, г) ДВЗ використовується для руху транспортного засобу, при цьому система практично не потребує в виробництві електричної енергії.



а – автомобіль нерухомий, б – начало руху, в – прискорений старт, г – нормальний рух, д – прискорення.

Рис. 3.10. Ілюстрація режимів роботи планетарного механізму

При динамічному прискоренні (рис. 3.10, д) зростають обороти двигуна внутрішнього згоряння, і в той же час генератор починає виробляти електричну енергію. Електричний двигун використовує цю енергію і енергію з акумуляторної батареї, чим додає рушійну

силу автомобілю, покращуючи прискорення та динамічні характеристики. Підвищення продуктивності засновано на високих оборотах генератора. Оскільки максимально можливі обороти генератора зросли, то це відобразилося на підвищенні оборотів ДВЗ, який зміг завдавати більшу ефективну потужність. В результаті збільшилась кількість енергії, що виробляється генератором, що привело до збільшення вихідний потужності установки.

Двигун внутрішнього згоряння. Схема поперечного розрізу ДВЗ представлена на рис. 3.11.

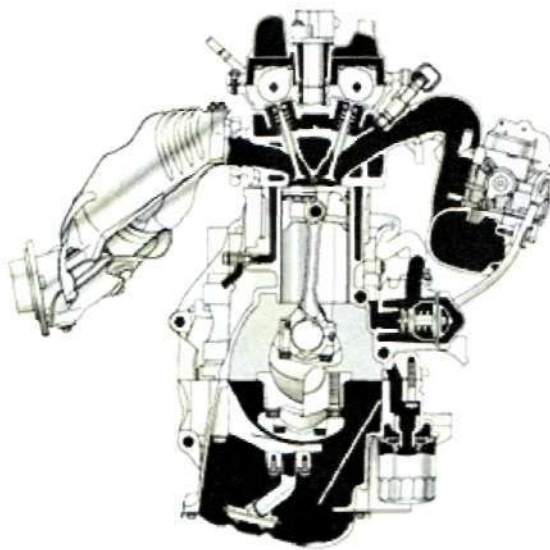


Рис. 3.11. Схема поперечного розрізу ДВЗ автомобіля Toyota Prius II

ДВЗ працює по так званому робочому циклу Аткинсона, при якому ступінь стиснення і ступінь розширення мають різні значення, що і сприяє економії палива. Реалізувати цикл Аткинсона допомагають змінні фази відкриття і закриття клапанів. Теоретична індикаторна діаграма робочого циклу ДВЗ представлена на рис. 3.12.

Система змінних фаз газорозподілу VVT-i, використовується для точної настройки часу відкриття клапана впускання залежно від умов роботи двигуна, що завжди дозволяє добитися максимальної ефективності. Додатково використана, напівроздільна камера згоряння кривої форми, оберігає від швидкого розповсюдження полум'я по всьому об'єму камери згоряння.

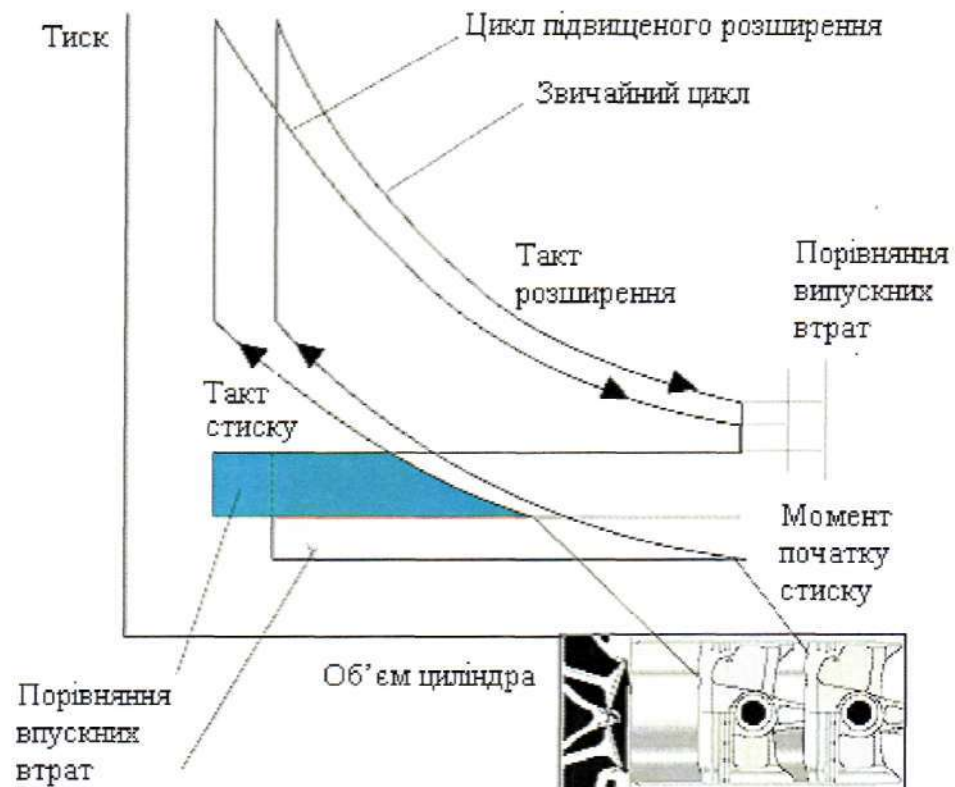


Рис. 3.12. Теоретична індикаторна діаграма робочого циклу ДВЗ автомобіля Toyota Prius II

Висока теплова ефективність, спільно із зменшенням як розміру, так і ваги, за рахунок застосування блоку циліндрів з алюмінієвого сплаву, компактного патрубку впускання і т.п. зрештою покращують паливну економічність.

Максимальні обороти двигуна внутрішнього згоряння зросли з 4500 (в гібридній установці першого покоління THS) до 5000 об/хв. (в гібридній установці другого покоління THS II), покращуючи показники продуктивності гібридної силової установки. Рухомі деталі стали легше, поршневі кільця зазнають менші напруги, менш жорсткі пружини клапанів дають можливість зменшити втрати на тертя. Більш того, підвищення обертів на 500 об/хв., збільшує обороти електричного генератора, що веде до зростання сили тяги під час розгону і, отже, більшої економічності.

Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ автомобіля Toyota Prius II представлена на рис. 3.13.

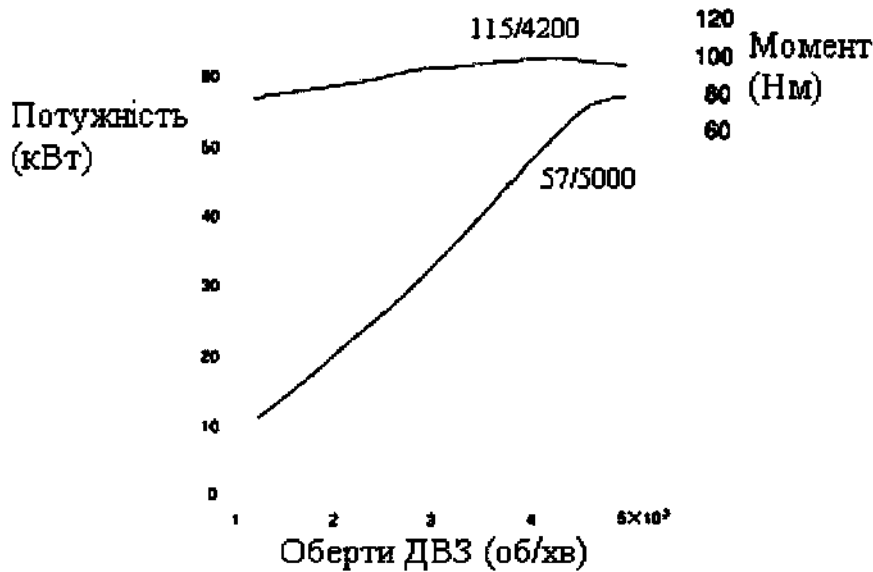


Рис. 3.13. Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ

Система енергетичного контролю. Система енергетичного контролю двигуна внутрішнього згоряння це важливий механізм, що служить для мінімізації витрати палива. Згідно даним про режим руху, ступінь натиснення педалі акселератора і стан зарядженої батареї, система автоматично приймає рішення: чи варто заглушити двигун внутрішнього згоряння і їхати на електротязі, або продовжувати рух з працюючим ДВЗ. При пуску системи автомобіль починає рухатися тільки на електродвигуні, безумовно, якщо акумуляторна батарея заряджена. При необхідності система енергетичного контролю запускає ДВЗ з допомогою стартер-генератора, і в той же самий час система підраховує загальну кількість енергії, яка необхідна для руху автомобіля. Потім вона визначає оптимально-економічний режим роботи і задає необхідну частоту обертання для двигуна внутрішнього згоряння.

В розрахунках необхідної кількості енергії обчислюють необхідну силу тяги на колесах, потужність, що генерується для живлення електричного двигуна, енергетичні потреби бортового електричного та електронного обладнання, а так само необхідний рівень заряду високовольтової акумуляторної батареї. В системі THS II був поліпшений контроль за споживанням і керуванням енергією автомобіля, внаслідок чого поліпшена паливна економічність і екологічна чистота автомобіля.

Система тягового контролю. Сила тяги автомобіля з системою THS II складається з співвідношенням безпосередньої сили тяги від двигуна внутрішнього згоряння і потужності тягового електричного двигуна. Чим менше швидкість автомобіля, тим більше задіяна рушійна сила від електричного двигуна. Збільшення максимальної частоти обертання генератора дозволило використовувати максимум ефективної потужності ДВЗ на менших швидкостях, ніж це було можливо в системі попереднього покоління THS.

Оскільки за двигуном внутрішнього згоряння немає трансмісії, і використовується прямий привід в поєднанні з силою тяги від електричного двигуна, то це дає можливість постійно контролювати силу тяги на колесах, без ривків забезпечуючи гарні характеристики необхідного руху у всіх діапазонах, від високих швидкостей до низьких і від рівномірного економічного режиму до різкого прискорення, який назвали режимом резервного моменту.

Система рекуперативного гальмування. В установці THS II використана недавно розроблена система гальмування контрольованого електронікою (ECB), яка координує діями системи рекуперації і гідравлічного гальма. При цьому в основному використовується рекуперативне гальмування, яке стало можливим завдяки поліпшеним характеристикам батареї, здатної регенерувати більший об'єм енергії широкого діапазону потужності.

Система індикації. На панелі приладів у автомобілів PRIUS встановлений багатофункціональний рідкокристалічний дисплей (рис. 3.14), на якому можна бачити, звідки в кожний момент часу на ведучі колеса подається тягове зусилля.



Рис. 3.14. Дисплей на панелі приладів автомобіля PRIUS

3.3. Перспективи розвитку систем живлення автомобілів

3.3.1. Загальні відомості. На думку фахівців німецького концерну VARTA, розвиток джерел електричної енергії на автомобілі в середньостроковій перспективі відбуватиметься відразу по декількох напрямках:

- зростання напруги живлення автомобілів,
- розвиток електричних систем та комплексів автомобілів,
- розвиток і видозміна самих джерел електричної енергії,
- зростання питомої потужності джерел електричної енергії.

Стартовим плацдармом для розвитку систем живлення автомобілів є звична свинцево-кислотна акумуляторна батарея з рідким електролітом.

Першим кроком, який дозволив в 3 рази збільшити силову віддачу, добитися більшої необслугованості, стійкості до вібраційних навантажень і глибокого циклічного заряду-розряду стало застосування акумуляторів з електролітом в зв'язаному стані (так звані VLRA-батареї). Подібні АКБ використовуються сьогодні як на автотранспорті, так і як резервні джерела живлення для електронної та радіотехніки.

Одночасно перебудовується сама схема живлення автомобіля. Наприклад, система з двома акумуляторними батареями, що успішно пройшла всі тести і реалізована в серійних моделях класу «люкс» Mercedes SL і VW Phaeton. Батарея стартера в новій системі призначена тільки для пуску ДВЗ. Її пластини коротше і менше, оскільки неефективні з погляду формування струму стартера площі прибрані. Завдяки цьому акумуляторна батарея вийшла компактною і легкою, а її питома потужність і стартерна характеристика неймовірно висока для ємності в 35 А*год – це 315 А за стандартом DIN, або 520 А – згідно вимогам EN (рис. 3.15). Подібні показники можна було чекати від традиційної батареї удвічі більшої ємності. Заряд акумулятора при новій схемі роботи завжди підтримується на заданому рівні і не може знизитися унаслідок яких-небудь несправностей електрообладнання, оскільки акумуляторна батарея не має прямого зв'язку з бортовою сіттю.



Рис. 3.15. Батарея VARTA призначена тільки для пуску ДВЗ

Всіх споживачів обслуговує другий акумулятор великої ємності, винесений з-під капота і розміщений в зоні із стабільними температурними умовами. Другий акумулятор теж розрахований на напругу 12 В. Його ємність складає 60 А*год.

Система з двома АКБ майже не вимагає додаткових витрат, дозволяє стабілізувати тепловий режим роботи АКБ великої ємності і забезпечити постійний заряд батареї стартера. Проте електропостачання, як і раніше обмежені рівнем напруги в 12 В. Саме тому, можливо, ця схема буде трансформована в дворівневу, а батарея, винесена з підкапотного простору, матиме напругу 36 В (рис. 3.16). Таке рішення вимагає повного перегляду всіх підходів до побудови бортової сіті і дасть поштовх до нових її змін.



Рис. 3.16. Акумуляторна батарея VARTA на напругу 36 В

Поступовий перехід споживачів на підвищене електричне живлення і зростання сумарного споживання енергії через деякий час зажадають нових технологій і матеріалів для акумуляторних батарей. Як перспективні джерела електричної енергії для автомобілебудування вже сьогодні розглядаються і нікель-металгідридні, і літій-іонні акумулятори. Це дозволить піднятися на якісно нову сходинку не тільки у віддачі потужності (більш ніж в 50 разів в порівнянні з базовою свинцево-кислотою батареєю), але і в питомій енергоємності (більш ніж в два рази для літій-іонних акумуляторів).

Перші автомобілі з гібридним приводом вже почали використовувати в своїх установках дворівневу напругу, тільки напруга тепер зростає в десятки разів. Так, наприклад, Honda Insight вибрало за другий рівень напруги – напругу величиною 144 В. Це 120 стандартних нікель-металгідридних елементів по 1.2 В і ємністю 6 Агод кожна. Для збільшення ефективності фахівці компанії Toyota також підвищують напругу живлення гібридної силової установки своїх автомобілів. Наприклад, в системі THS II автомобіля Lexus GS450h напруга живлення зросла до 650 В (див. рис. 1.11).

Підвищення напруги живлення дозволяє зменшити масово-габаритні параметри тягового двигуна і перетворювача напруги. Проте здійснення подібних глобальних змін в напрузі бортової сіті автомобіля вимагає крупних капіталовкладень, отже, зацікавленості крупних виробників автомобілів, їх готовності прийняти і реалізувати абсолютно нову логіку в масовому виробництві. Може бути тому, експерти VARTA прогнозують, що в найближчі 8 ... 10 років навряд чи всі автомобілі перейдуть на два рівні напруги, а прихильність свинцево-кислої технології залишиться практично абсолютною. Проте це останні роки панування низької напруги і свинцю. Їх епоха йде в минуле. Вже в другому десятиріччі цього століття все різко зміниться. Виробники комплектуючих, завдяки поступовому зростанню об'єму замовлень на компоненти для електричних та електронних систем автомобілів з рівнями напруги 36 В і більш високому рівні, зможуть запропонувати цікаві ціни і сформулюють передумови для масового збуту конкурентноздатних за ціною автомобілів з дворівневою бортовою сіттю. Каталізатором

цього процесу послужать якраз автомобілі з гібридними силовими установками.

К 2020-му року звичні нам свинцево-кислотні акумуляторні батареї на 12 В стануть рідкістю на конвеєрах ведучих автомобільних виробників, їх практично повністю витіснять дворівневі системи живлення. Проте, очевидно, енергоспоживання ростиме одночасно з розвитком електричних систем та комплексів автомобілів, і перспективна на сьогоднішній час напруга в 36 В може з часом стати недостатньою. Це, перш за все, актуально для міст, де питання екології стоять на першому місці, і розвитку гібридного і електричного приводу надається вся більша увага. Отже після 2020 року можна прогнозувати новий виток еволюції бортових систем живлення, вже до рівня напруги 144 В.

А зараз про перспективи розвитку самих акумуляторних батарей. Американська компанія Sion Power розробила і побудувала дослідні зразки літій-сірчаних (Li-S) батарей, що мають щільність енергії 300...350 Вт*год / кг, тобто удвічі більшої, ніж у поширених в даний час літій-іонних (Li-ion) і приблизно стільки ж, як у метанолових паливних елементів, що недавно з'явилися, з вбудованим риформером. Дослідний зразок літій - сірчаної батареї від Sion Power має розмір 11x35x55 мм, який вміщає 2.2 А*год енергії при напрузі 2.1 В на елемент. Акумулятор має рідкий катод із змістом сірки, відокремлений від електроліту спеціальною мембраною. Фахівці компанії прогнозують, що ці батареї, в серійному виробництві, будуть помітно дешевшими за існуючих літій-іонних і літій-полімерних, а також - більш екологічно чисті після завершення життєвого циклу оскільки не містять важких металів. Акумулятори здатні віддавати 65 % вихідної потужності при температурі – 40° С, що підходить для електромобілів і гібридних автомобілів. Єдиний, але вельми істотний недолік нової розробки – життєвий цикл батареї складає всього 60 зарядок від сіті. На ринок такі елементи, за планом компанії, належні вийти на початку 2008 року. В найближчому майбутньому розробники з Sion Power сподіваються довести ємність акумуляторів до 600 Вт*год / кг. Проте, саме відсутність компактних високоефективних джерел енергії є однією з головних чинників, гальмуючих розвиток екологічно чистого автомобіля.

3.3.2. Альтернативні та перспективні види акумуляторних батарей. Основними типами акумуляторних батарей, які в даний час доцільно застосовувати у складі гібридних силових установок та електромобілях, є нікель-металгідридні (NiMH), нікель-кадмієві (NiCd), свинцево-кислотні і літій-іонні (Li-Ion) акумуляторні батареї. Розглянемо області застосування, переваги і недоліки цих акумуляторних батарей. Класикою серед акумуляторних батарей вважаються нікель-кадмієві батареї [13]. Тому прийнемо їх за еталон, щодо якого розглянемо плюси і мінуси батарей інших типів.

Нікель-кадмієві акумуляторні батареї використовуються достатньо давно, але вони мають відносно низьку силову щільність. Нікель-кадмієві акумуляторні батареї забезпечують тривалий термін служби, високі значення струму розряду, допускають великий струм навантаження і мають якнайменшим співвідношенням ціна / термін служби, але в теж час вони найбільш критичні до точного дотримання вимог по правильній експлуатації. Нікель-кадмієві батареї втрачають 10% своєї ємності протягом 24 годин після заряду, потім зниження ємності складає близько 10 % кожні 30 діб. Саморозряд збільшується із зростанням температур. Основна область їх застосування - радіостанції, біологічне і медичне устаткування, авіаційна техніка, професійні відеокамери і електроінструмент. Нікель-кадмієві батареї містять токсичні речовини і є небезпечними для навколишнього середовища.

Нікель-металгідридні акумуляторні батареї мають більш високу в порівнянні з нікель-кадмієвими батареями силову щільність, але і менший термін служби. Вони не містять токсичних речовин. Застосовуються в мобільних телефонах і ноутбуках, в гібридних автомобілях.

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (SLA, VRLA, SLI) найбільш вигідні при використуванні в енергоємних системах, де питання їх ваги істотного значення не має. Вони найкращим чином підходять для використування в лікарняному устаткуванні, кріслах-каталках, в системах аварійного освітлення і джерелах безперебійного живлення (ДБЖ), в автомобільній техніці.

Літій-іонні акумуляторні батареї більш підходять для тих систем, в яких необхідна висока ємність батарей і одночасно пред'являються жорсткі вимоги до їх ваги. Вони мають дуже високу

силову щільність і малу вагу – це найважливіші переваги будь-яких акумуляторних батарей. Проте при цьому вимагають строгого дотримання правил експлуатації і техніки безпеки. Літій-іонні акумуляторні батареї застосовуються в ноутбуках і мобільних телефонах, в електромобілях.

Літій-полімерні акумуляторні батареї представляють більш дешеву версію літій-іонних батарей: принцип їх дії заснований на тих же процесах. Вони можуть мати тонкий корпус і частіше за все застосовуються в мобільних телефонах. В табл. 3.3 приведені основні характеристики і області застосування розглянутих вище акумуляторів. Слід зазначити, що в характеристики акумуляторів постійно поліпшуються, тому в таблиці 3.3 приведені основні характеристики реальних акумуляторних батарей, які можна придбати в даний час в торговій сіті і перевірити істинне значення деякі з цих характеристик.

Стосовно табл. 3.3 слід зазначити наступне:

- внутрішній опір батареї залежить від внутрішнього опору кожного її елемента, типу схеми захисту і кількості елементів в батареї. Схема захисту літій-іонних і літій-полімерних батарей збільшує їх внутрішній опір в середньому на 50 мОм (0,05 Ом);

- термін служби акумуляторної батареї залежить від регулярності її обслуговування. Повний періодичний розряд може привести до його зменшення майже в три рази за короткий строк. Термін служби залежить також і від ступеня розряду - при часткових розрядах він більше, ніж при повних;

- найбільший струм розряду нікель-кадмієвих і нікель-металгідридних батарей допустимий зразу ж після заряду, потім його значення зменшується,

- схема захисту, встановлювана усередині літій-іонних і літій-полімерних акумуляторних батарей, споживає близько 3 % їх енергії в місяць;

- типові значення напруги на елементі нікель-кадмієвих і нікель-металгідридних складає 1.25 В у режимі холостого ходу, а під навантаженням - 1.2 В.

Таблиця 3.3

Основні характеристики і області застосування акумуляторних батарей

Характеристики	Типи акумуляторних батарей			
	Ni-Cd	Ni-MH	SLA, VRLA, SLI	Li-Ion
Напруга на елемент, В	1.2	1.2	2.2	3.6
Потужна щільність, Вт/кг	50...400	100...600	50...300	150...800
Внутрішній опір, мОм	100...200 (АКБ на 6 В)	100...300 (АКБ на 6 В)	< 100 (АКБ на 12 В)	100...250 (АКБ на 7.2 В)
Число циклів заряд/розряд до зниження ємності до 80%	1500	300...1000	200...400	500...1200
Час швидкого заряду, год.	1	1...4	8...16	1...4
Струм навантаження щодо ємності (С): - піковий - номінальний	20С 1С	5С < 0.5С	5С 0.2С	> 2С < 1С
Саморозряд за місяць $T=20^{\circ}$, %	20	30	5	10
Діапазон робочих температур	- 40...60	- 20...60	- 20...60	0...60
Область застосування	Авіаційна техніка, радіостанції, мед. устаткування, електроінструменти, відеорекамери	Мобільні телефони, ноутбук, гібридні силові установки	Автомобільна техніка, мед. устаткування, системи аварійного освітлення, ДБЖ	Мобільні телефони, ноутбук, електромобілі
Початок виробництва, рік	1950	1990	1900 (1970)	1991
				1999

Перспективним типом акумуляторних батарей є також так звані біполярні батареї. Біполярна технологія заснована на технологічному прориві в області розробки керамічних матеріалів і на новітніх технологіях виробництва акумуляторів. У основі батареї лежить свинцево-кислотна хімічна технологія і свинцево-відфільтровані керамічні (LICTM) біполярні пластини, які служать як розділові стінки між елементами. У біполярній концепції елементи батарей з'єднані в серії, а напруга батареї складає 2 В на серію з'єднаних елементів.

Відмінною рисою біполярних батарей є модульне проектування з економною методикою формування при виробництві батарей з високою напругою. Маленька відстань між електродами (рис. 3.17) з низьким внутрішнім опором забезпечує високу ємність під час заряду і розряду з обмеженим тепловиділенням. Рівномірний розподіл струмів на пластині і по всій батареї в цілому забезпечує високий рівень використання активної маси, а також значну довговічність батареї з повторним використанням енергії.

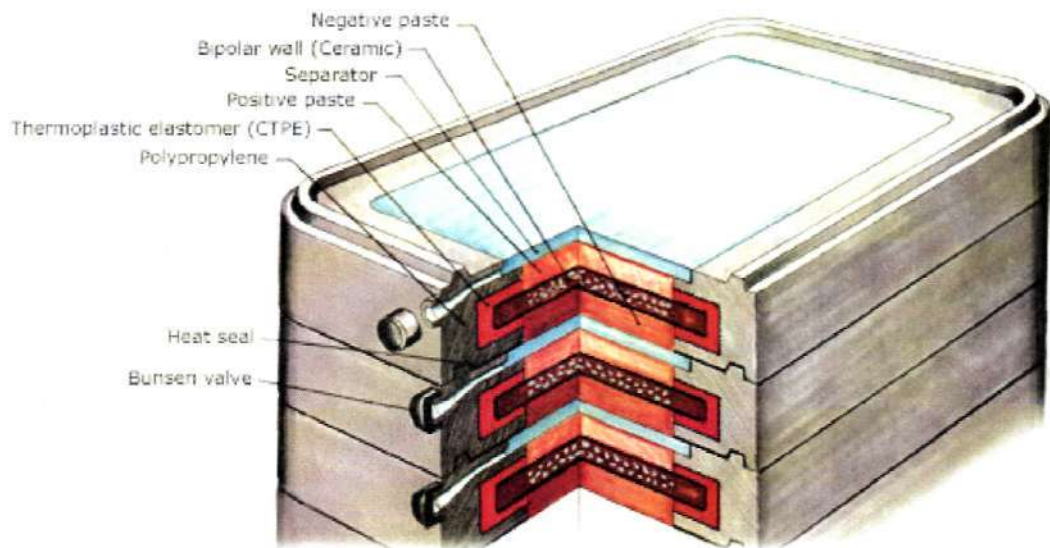


Рис. 3.17. Біполярна технологія у виробництві акумуляторів

Біполярна батарея заснована на технології свинцево-кислотної батареї в біполярному виконанні. Фактично всі свинцево-кислотні батареї на сьогодні є однополюсними. У кожен елемент

однополюсної батареї можна помістити велику кількість пластин, що підвищує ємність батареї, а елементи з'єднуються попарно для підвищення напруги. Оскільки струм в однополюсній батареї підводиться до однієї клеми, розташованої з верхньої сторони батареї, а виходить через іншу клему, суміжну з першою, струми високої напруги нерівномірно розподіляються по електродах, а максимальні струми будуть сконцентровані біля клем.

Біполярна свинцево-кислотна батарея складається з безлічі попарно з'єднаних біполярних електродів. Одна сторона провідної розділової стінки кожного з таких електродів, за винятком крайніх електродів, покрита пористим свинцем, що утворює негативну сторону біполярного електроду, а інша сторона (позитивна) покрита пористим діоксидом свинцю (рис. 3.18). Оскільки струм може проходити тільки через крайні електроди, то він протікає перпендикулярно до всіх поверхонь електродів, а активна маса може бути ефективно використана при мінімальному внутрішньому опорі.

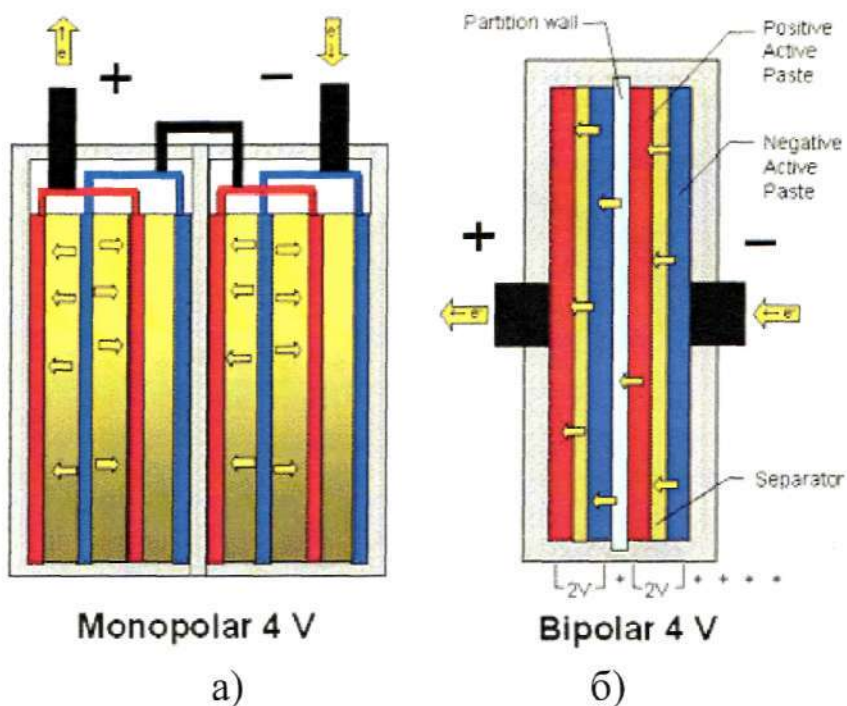


Рис. 3.18. Конфігурація однополюсного (а) і біполярного (б) елементу на 4 В

3.3.3. Аналіз акумуляторних батарей для застосування в гібридній силовій установці ХНАДУ. Розглянемо для початку нікель-металгідридні акумуляторні батареї. Тому що саме вони застосовуються в гібридних силових установках фірм Toyota і Honda як основне джерело електричної енергії. Для гібридних автомобілів Toyota Prius, Toyota Highlander, Lexus RX400h, Lexus GS450h і інших застосовуються нікель-металгідридні акумуляторні батареї, які виконані за спеціальним замовленням корпорацією Panasonic. Слід зазначити, що це не просто набір акумуляторних батарей, а цілий комплекс, що складається з контролера стану акумуляторної батареї, датчиків температури і струмів, системи охолодження та ін.

Розглянемо, як прилад, основні характеристики нікель-металгідридної акумуляторної батареї NHP 10-340, 12 В, 34 А*год (рис. 3.19) французької фірми Saft, яка знайшли своє застосування в джерелах резервного живлення міського електричного транспорту багатьох міст Західної Європи.



Рис. 3.19. Нікель - металгідридна акумуляторна батарея NHP 10-340

З рисунка 3.19 видно, що 12 Вольтова батарея NHP 10-340 складається з 10 послідовно з'єднаних батарей. Як відомо, для того, щоб отримати необхідну напругу акумулятори або акумуляторні батареї сполучають послідовно. Всі акумулятори при з'єднанні в батарею повинні бути однотипними, мати однакову ємність і, бажано, дату випуску.

На рис. 3.20 показано послідовне з'єднання шести акумуляторів в батарею.

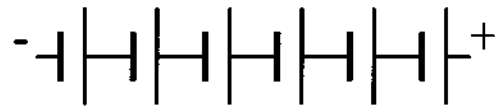


Рис. 3.20. Послідовне з'єднання акумуляторів в батарею

При послідовному з'єднанні напруга батареї дорівнює сумі напруг всіх її елементів, а ємність відповідає ємності одного акумулятора або батареї:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 \quad (3.1)$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 \quad (3.2)$$

Необхідна напруга акумуляторної батареї повинна відповідати напрузі живлення навантаження. Кількість елементів батареї розраховують по формулі:

$$N = \frac{U_H}{U_{ЕЛ}} \quad (3.3)$$

де U_H - напруга навантаження;

$U_{ЕЛ}$ – напруга зарядженого елемента батареї складає 1,2 В для нікель-кадмієвих і нікель-металгідридних, 2,1 В - для свинцево-кислотних і 3,6 В - для літій-іонних акумуляторів.

При необхідності добитися необхідної ємності, акумулятори або батареї акумуляторів сполучають в батарею паралельно (рис. 3.21).

При паралельному з'єднанні загальна ємність рівна сумі ємностей всіх паралельних гілок, а напруга при цьому дорівнює напрузі на одному акумуляторі:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (3.4)$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6 \quad (3.5)$$

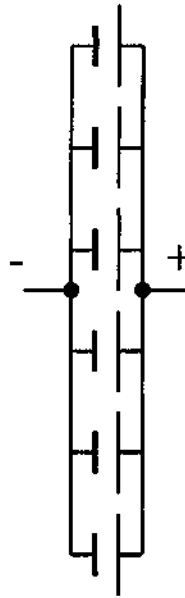


Рис. 3.21. Паралельне з'єднання акумуляторів в батарею

При виборі ємності батареї слід враховувати тип навантаження, режим роботи батареї і час безперервної роботи при живленні навантаження від повністю зарядженої батареї. Основні характеристики нікель-металгідридної акумуляторної батареї NHP 10-340 зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4.

Характеристики акумуляторної батареї NHP 10-340

Характеристики	NHP 10-340
Номінальна напруга, В	12
Ємність, Агод	34
Силовa щільність, Втч/кг	90
Потужна щільність, Вт/кг	520
Максимальний струм розряду за 5 хвилин, А	200
Максимальний струм розряду за 2 с, А	750
Маса, кг	9

Проте, не дивлячись на добрі енергетичні і габаритно-масові показники нікель-металгідридних акумуляторних батарей, вартість їх залишається досить високої, тому застосування їх в економічному варіанті автомобіля «Таврія» залишається досить проблематичним.

Компанія Mitsubishi Motors в своїй новій експериментальній розробці електромобіля, побудований на базі моделі Mitsubishi Colt використовує літій-іонні батареї із збільшеним терміном служби і швидкою зарядкою. Новий Colt EV, за даними розробника, на цих батареях може проїхати 150 кілометрів без заряджання. Ця новинка відрізняється по конструкції від звичайних електромобілів тим, що вона оснащена чотирма компактними вентильними електричними двигунами Toyo Denki Seizo (максимальна швидкість – 500 об/мин, потужність – 50 кВт, обертовий момент – 518 Нм) розміщеними в маточинах коліс. Подібне рішення дозволяє побудувати якісну систему повного приводу, тому що момент на кожне колесо в цьому випадку легко контролювати за допомогою електроніки і без використання складної механічної повноприводної електротрансмісії. Блок високовольтних літій-іонних акумуляторних батарей електромобіля Mitsubishi Colt EV розташовується під підлогою пасажирського салону. Розташування всіх електромеханічних компонентів електромобіля Mitsubishi Colt EV представлено на рис. 3.22.

Проте основним недоліком літій-іонних батарей як і раніше залишається їх вибухонебезпека (особливо при аварії), разом з високою ціною. При попаданні кулі літій-іонний акумулятор вибухає, при свердленні – вириваються язички полум'я, при проходженні по ньому великих струмів він нагрівається і може запалати. Бували випадки, коли літій-іонні акумулятори запалили під час розмови по мобільному телефону. Тому літій-іонні акумулятори поки не отримали широкого розповсюдження на транспорті, а серійні гібридні автомобілі частіше використовують нікель-металгідридні батареї. Вони хоча і несуть менше енергії на одиницю ваги, та зате не вибухонебезпечні. Проте, стрімке зростання виробництва цих батарей, особливо для живлення мобільних телефонів і ноутбуків, може в найближчому майбутньому привести до різкого зниження цін.

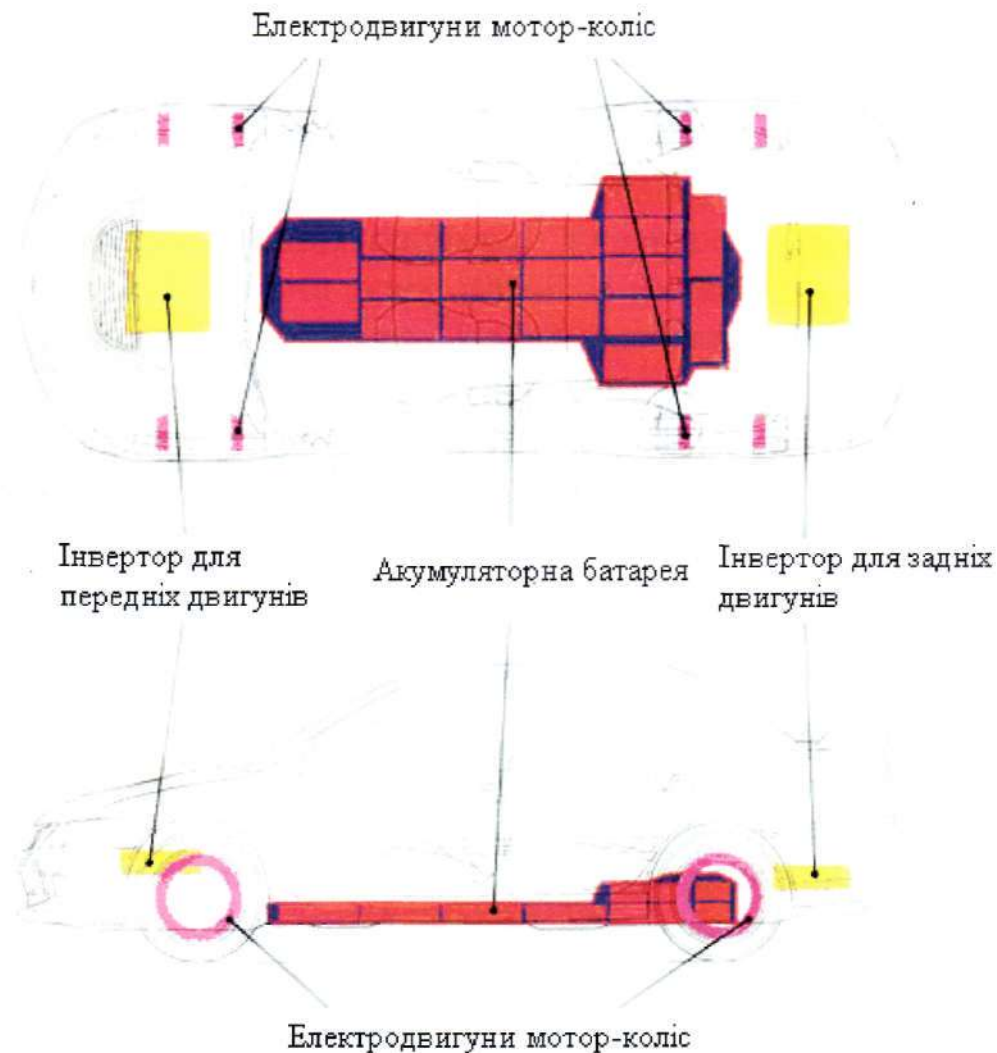


Рис. 3.22. Розташування електромеханічних компонентів на електромобілі Mitsubishi Colt EV

До того ж багато виробників літій-іонних акумуляторів проводять активні дослідження по зменшенню їх вибухонебезпеки. Так, наприклад, Техаська компанія Valence Technologies вважає, що прийшла пора масового застосування в автомобілях великих літєвих акумуляторів. Ключ до їх безпеки – розроблена компанією технологія застосування фосфатів. Фосфати надзвичайно стійкі, вони не спалахують і не розкладаються ні при короткому замиканні, ні при високих струмах заряду, ні при високому нагріванні, ні при сильних ударах, ні при пошкодженні корпусу батареї. Компанія Valence Technologies почала випуск цілої лінійки літєвих акумуляторів з технологією Saphion. Вони дещо поступаються звичайним літєвим батареям в ємності (але перевершують

кадмієві), вони більш дорогі, ніж продукція конкурентів, та зате – не вибухонебезпечні.

3.3.4. Свинцево-кислотні акумуляторні батареї.

3.3.4.1. Короткі історичні відомості. Саме свинцево-кислотні батареї першими в світі з акумуляторних батарей знайшли комерційне застосування. К 1890 року в багатьох промислово розвинутих країнах був освоєний їх серійний випуск. В 1900 році німецька фірма VARTA випустила перші акумуляторні батареї, які призначені для стартерів автомобілів. До речі рекорд швидкості автомобіля 100 км/год встановлений 29 квітня 1899 року бельгійцем Каміллом Женатци на електромобілі «Завжди незадоволена» завдяки застосуванню свинцево-кислотних акумуляторних батарей.

Але повернемося до еволюції розвитку свинцево-кислотних акумуляторних батарей. В 70-х роках минулого ХХ століття були створено необслуговані свинцево-кислотні батареї, здатні працювати в будь-якому положенні (саме тому другим роком «народження» свинцево-кислотних батарей в табл. 3.4 приведено 1970 рік). Рідкий електроліт в них замінили сепараторами гелю або абсорбованим електролітом, батареї герметизували, а для відведення газів, що виділяються при заряді або розряді, встановили безпечні клапани. Були розроблені нові конструкції пластин на основі мідно-кальцієвих сплавів, покритих оксидом свинцю, на основі титанових, алюмінієвих і мідних пластин. Активні речовини акумулятора зосереджені в електроліті, а також в позитивних і негативних електродах, а сукупність цих речовин називають електрохімічною системою.

В свинцево-кислотних акумуляторних батареях електролітом є розчин сірчаної кислоти, активною речовиною позитивних пластин - двоокис свинцю PbO_2 , негативних пластин - свинець Pb .

3.3.4.2. Класифікація акумуляторних батарей. Для того, щоб було легше розібратися в різноманітності свинцево-кислотних акумуляторних батарей слід знати про їх розподіл на групи по режиму їх експлуатації і по технології виготовлення. Це допоможе зрозуміти, як правильно вибрати акумуляторну батарею для гібридної силової установки автомобіля, як правильно вибрати режими заряду і розряду, які зовнішні фактори і як впливатимуть на її роботу в процесі експлуатації.

Проведемо класифікацію свинцево-кислотних батарей по режиму експлуатації. По режиму експлуатації акумуляторні батареї діляться на три групи:

- акумуляторні батареї для роботи в буферному режимі, коли батарея працює в буфері з основним джерелом напруги, наприклад, блоком живлення. При цьому основне її призначення – резервне джерело живлення. Періоди розряду батареї в порівнянні з періодами заряду не тривалі. Велику частину часу вона постійно заряджена. В буферному режимі працюють батареї резервного живлення базових станцій мобільного зв'язку, АТС комутатори провайдерів Інтернет, джерела безперебійного живлення персональних комп'ютерів і серверів (UPS) і т.д.

- акумуляторні батареї для роботи в циклічному режимі, який характерний їх розрядом протягом якогось часу і подальшим зарядом. Циклічний режим роботи акумуляторних батарей використовується набагато рідше, ніж буферний. Прикладом такого режиму можна назвати роботу електротранспорту і пристроїв з автономним живленням: протягом робочого дня відбувається розряд тягових батарей або батарей живлення, а після закінчення роботи ці батареї ставлять на заряд.

- акумуляторні батареї для роботи в змішаному режимі, наприклад автомобільні батареї. Акумуляторні батареї у складі гібридної силової установки автомобіля також працюють в змішаному режимі, подібно стартерним акумуляторним батареям.

Проведемо класифікацію свинцево-кислотних батарей за технологією виготовлення. По конструкції свинцево-кислотні акумуляторні батареї можна розділити на батареї з рідким електролітом, батареї з регульованими клапанами (VRLA – Valve Regulated Lead Acid batteries), із зволоженими сепараторами і з гелевим електролітом. В різній технічній літературі можна зустріти такі назви батарей, як SLA – Sealed Lead Acid batteries – герметичні свинцево-кислотні батареї, що відносяться до VRLA батарей. Зустрічається також назва Gelcell – торгова марка батарей гелів. Батареї стартерів іноді скорочено називають SLI, що розшифровується як Start, Light, Ignition – пуск, освітлення, запалення.

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї дотепер залишаються надійними, довговічними і не вимагають високих експлуатаційних витрат. В даний час проводяться і активно експлуатуються акумуляторні батареї трьох поколінь:

- акумуляторні батареї першого покоління – батареї з рідким електролітом відкритого або закритого типу, мають ємність від 36 до 5328 Агод і термін служби від 10 до 20 і більше років. Батареї відкритого типу не мають кришок. Основні витрати при їх експлуатації – це витрати на обслуговування, зв'язані з необхідністю частого доливання дистильованої води і витрати на утримування добре вентильованих приміщень, в яких їх встановлюють. Батареї закритого типу мають спеціальні пробки, що забезпечують затримку аерозолі сірчаної кислоти. Пробки для заливки електроліту і додавання води при експлуатації вигвинчуються. Батареї закритого типу можуть бути і необслугованими: від виробника вони поставляються залитими і зарядженими і протягом терміну служби немає необхідності доливання води, оскільки конструкція пробок таких батарей забезпечує утримання її пари у вигляді конденсату. Окрім використання в стаціонарних умовах, батареї закритого типу є основним типом батарей що використовуються в автотракторній техніці як стартерні і тягові.

- акумуляторні батареї другого покоління – герметичні батареї гелів. В них замість рідкого електроліту використовується гелеобразний електроліт – желе, отримане в результаті змішування розчину сірчаної кислоти із загусником (звичайно це двоокис кремнію SiO_2 – силікагель). Технологія виробництва батарей гелів отримала назву Gel. Батареї гелів протягом всього терміну експлуатації не потребують обслуговування, їх не можна розкривати.

- акумуляторні батареї третього покоління – це батареї, що герметизуються, з абсорбованим сепараторами електролітом. Часто їх називають батареями, зібраними по AGM-технології. AGM – Absorbed in Glass Mat, тобто технологія, при якій електроліт абсорбований в сепараторах з скловолокна, розміщених між електродами. Такий сепаратор є пористою системою, в якій капілярні сили утримують електроліт. При цьому кількість

електроліту дозується так, щоб дрібні пори були заповнені, а крупні залишалися вільними для вільної циркуляції газів, що виділяються. По своїх властивостях AGM батареї подібні гелям, за винятком того, що газоутворення в них істотно менше, і менший вплив на їх роботу надає температура навколишнього середовища. Як і для акумуляторних батарей гелів, для них потрібні зарядні пристрої, що забезпечують нестабільність напруги заряду не гірше $\pm 1 \%$.

3.3.4.3. Особливості експлуатації, переваги і недоліки. На відміну від нікель-кадмієвих свинцево-кислотні батареї не люблять глибоких циклів заряд/розряд. Повний розряд може стати причиною деформації пластин, і кожний цикл заряду/розряду батареї згодом веде до зниження її ємності. Такі втрати відносно невеликі, поки батарея працює в нормальних умовах, але навіть єдиний випадок її перевантаження і, як результат, глибокого розряду приведе до втрати ємності приблизно на 80 %. Для попередження таких випадків рекомендується використовувати батареї підвищеної ємності.

Залежно від глибини розряду і робочої температури ресурс або термін служби свинцево-кислотної батареї в автомобільній техніці може складати від 1 року до 20 років (як правило з 3 до 7 років). Крім того, значною мірою термін служби визначається конструкцією елементів батареї.

Існує декілька способів збільшення ємності і терміну служби свинцево-кислотних батарей. Оптимальна робоча температура для таких батарей складає 25°C , і її збільшення на кожні 10°C скорочує термін служби батареї наполовину. Наприклад, VRLA батарея при температурі 25°C може працювати 10 років, а при температурі 33°C – тільки 5 років, ну а при температурі 42°C – всього лише 1 рік.

Переваги свинцево-кислотних батарей:

- дешевизна і простота виробництва – по вартості на 1 Втч енергії ці батареї є найдешевшими;
- відпрацьована, надійна і добре зрозуміла технологія обслуговування;
- малий саморозряд – найнижчий в порівнянні з акумуляторними батареями інших типів;
- низькі вимоги по обслуговуванню – відсутній «ефект пам'яті», не вимагається доливання електроліту;

- допустимі високі струми розряду.
- Недоліки свинцево-кислотних батарей:
- не допускається зберігання в розрядженому стані;
 - низька силова щільність – велика вага акумуляторних батарей обмежує їх застосування в стаціонарних і рухомих об'єктах;
 - допустимо лише обмежене число циклів повного розряду;
 - при неправильному заряді можливий перегрів;
 - кислотний електроліт і свинець надають шкідливу дію на оточуючу середовище.

При виборі акумуляторних батарей для живлення гібридної силової установки ХНАДУ нами проведені маркетингові дослідження кращих в Європі автомобільних свинцево-кислотних акумуляторних батарей високої ємності. Для аналізу були вибрані акумуляторні батареї, які виготовлені провідними виробниками різних країн світу, у тому числі на Україні і в Росії. Результати маркетингових досліджень приведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

**Результати маркетингових досліджень по вибору
акумуляторних батарей**

Фірма, Акумулятор	Модель	Виробник	Ємність, Агод	Орієнтовна ціна, Є
VARTA	610 042 080	Німеччина	110	115
Buffalo Bull SHD, Power Bull	P100 32	Бельгія	100	110
Пауэр Інтернэшнл Gold	100LE520	Росія	100	100
Centra S.A., Futura	095434	Польща, завод «Centra S.A.»	95	90
«ТАВ», Topla	СТС100R	Словенія	100	85
SZNAJDER Silver	600 38	Польща, завод ZAP	100	70
НАК «Ista», Oberon	6СТ-100А	Україна	100	60

Лабораторні дослідження цих акумуляторів показав якнайкращі характеристики у акумуляторів VARTA, Power Bull, SZNAJDER Silver. Саме цими АКБ доцільно комплектувати автомобіль з гібридною силовою установкою.

Таким чином, аналіз перспективних напрямків розвитку екологічно чистих транспортних засобів показав, що відомі автомобільні виробники проводять дослідження та розробляють декілька варіантів автомобілів з альтернативними джерелами енергії:

- на паливних елементах,
- кріогенні на рідкому азоті,
- на пневмодвигунах,
- електромобілі на сонячних батареях,
- з використанням інерційних накопичувачами енергії,
- електромобілі с різними типами акумуляторних батарей.

Перспективним напрямком розвитку екологічно чистих транспортних засобів є створення автомобіля з гібридною силовою установкою, який здатний виконати найжорсткіші екологічні вимоги, на 40 ... 80 % знизити витрати моторного палива й на 50 ... 90 % – викиди вуглекислого газу в атмосферу.

В гібридних автомобілях для більш економної витрати палива та підвищення екологічної чистоти використовуються спеціальні акумуляторні батареї та електричні двигуни, які замінюють, або допомагають двигунам внутрішнього згоряння при різних режимах роботи автомобіля. А при гальмуванні та руху по інерції відбувається зворотній процес: електричні машини починають працювати в генераторному режимі та заряджати акумуляторну батарею. Як джерело живлення гібридних силових установок можуть застосовуватися нікель-металгідридні (Ni-MH), свинцево-кислотні, нікель-кадмієві (Ni-Cd) або літій-іонні (Li-Ion) акумуляторні батареї.

Найбільш економічно доцільним варіантом, в даний час, для живлення гібридної силової установки є свинцево-кислотна акумуляторна батарея, завдяки таким позитивним властивостям:

- широкий спектр акумуляторних батарей різного призначення і їх доступність,
- задовільні характеристики (ємність, пускові струми),

- невисока вартість,
- адаптація до умов роботи на автомобілі,
- термін служби (до 20 років).

Основними недоліками свинцево-кислотних акумуляторних батарей, вживаних для живлення гібридних силових установок, є:

- невисокий зарядний струм, завдяки чому необхідно схему гібридної установки будувати так, щоб здійснювати заряд АКБ практично в безперервному режимі,
- відносно висока маса акумуляторних батарей.

Перспективними напрямками розвитку систем живлення автомобілів є:

- зростання напруги систем живлення автомобілів,
- розвиток електричних бортових систем,
- розвиток і видозміна самих джерел електричної енергії,
- зростання їх питомої потужності.

4. ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

4.1. Загальні відомості про системи керування динамікою гібридного автомобіля

Останнім часом відомі автомобільні виробники пильну увагу приділяють безпеці руху та комфорту водія та пасажирів. Одночасно з тим розвивається нові напрямки автобудування, пов'язані зі створенням інтелектуального, економічного, екологічно чистого та дружельюбного автотранспортного засобу. Він повинен відповідати найжорсткішим нормам щодо екології, безпеки руху, комфорту та простоти керування. Тому у даному розділі розглянемо найсучасніші системи керування динамікою автомобіля, що призначенні вирішувати критичні ситуації під час руху та полегшувати процес керування автомобілем за допомогою регулювання обертового моменту двигуна внутрішнього згоряння й керування робочими гальмовими циліндрами окремо на кожному з коліс.

Наведемо деякі з них:

- Система електропідсилювача рульового керування (EPS) та система керування рульовим механізмом (VGRS) полегшують рульове керування для підтримки стійкості руху та маневреності на різних режимах руху автомобіля;
- Електронна система розподілу гальмівного зусилля (EBD) використовує антиблокувальну / протибуксовальну систему для оптимального розподілу гальмівного зусилля між передніми та задніми колесами для ефективного гальмування у поточних в заданих умовах руху. Крім того, при гальмуванні на поворотах система регулює гальмові зусилля на правому та лівому колесах, забезпечуючи стійкість автомобіля;
- Система екстреного гальмування забезпечує додаткове гальмівне зусилля для водія, який не здатен досягти необхідне гальмівне зусилля при екстреному гальмуванні. В результаті підвищується гальмова потужність автомобіля;
- Антиблокувальна система (ABS) запобігає блокуванню коліс при різкому натисканні на педаль гальма, а також при гальмуванні на слизькій поверхні;

- Протибуксовальна система (TRC) запобігає буксуванню ведучих коліс при надмірному натисканні на педаль акселератора при початку руху або розгоні на слизькій поверхні;

- Система підтримки курсової стійкості (VSC) призначена для підвищення керованості автомобіля при втраті зчеплення передніми колесами (передній занос) і при втраті зчеплення задніми колесами (задній занос);

- Система допомоги при русі автомобіля з місця на підйомі або система зупинки скочування під ухил (HAC);

- Система керування гальмівною системою при адаптивному круїз-контролі;

- Система електронного керування гальмами (ECB) здійснює гідравлічне керування вище зазначеними системами згідно з даними, які надходять з датчиків та електронних блоків керування;

- Контролер кола високої напруги (HV ECU) (тільки в автомобілях з гібридною силовою установкою) керує роботою гібридної трансмісії. Контролер на підставі даних, що отримані з блока керування ДВЗ, датчика стану акумуляторної батареї, антиблокувальної / протибуксовальної системи та контролера електропідсилювача рульового керування, розраховує необхідне тягове зусилля та направляє результати обчислення на блок керування двигуном, перетворювач напруги і на блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою;

- Система об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля (VDIM) забезпечує координоване керування всіма гідравлічними та електричними системами й комплексами автомобіля. Якщо окремі системи ABS, TRC, VSC, EPS, VGRS, EBD, HAC звичайної гальмівної системи керувались роздільно, то VDIM реалізує спільне керування всіма перерахованими системами. Крім того, VDIM реалізує спільне керування гібридною трансмісією (у тому числі рекуперативним гальмуванням), що дозволяє поліпшити динамічні, економічні та екологічні характеристики автомобіля в різних режимах руху: при крейсерському русі по прямій, при виконанні повороту, при гальмуванні та розгоні автомобіля, при русі на підйом та на спуску та в інших ситуаціях.

Особливість автомобілів з гібридною силовою установкою складається не тільки в двох різних джерелах механічної енергії

(ДВЗ та електродвигуни), а ще в тому, що у ньому діють дві різні системи гальмування: рекуперативна та звичайна гідравлічна (рис. 4.1).

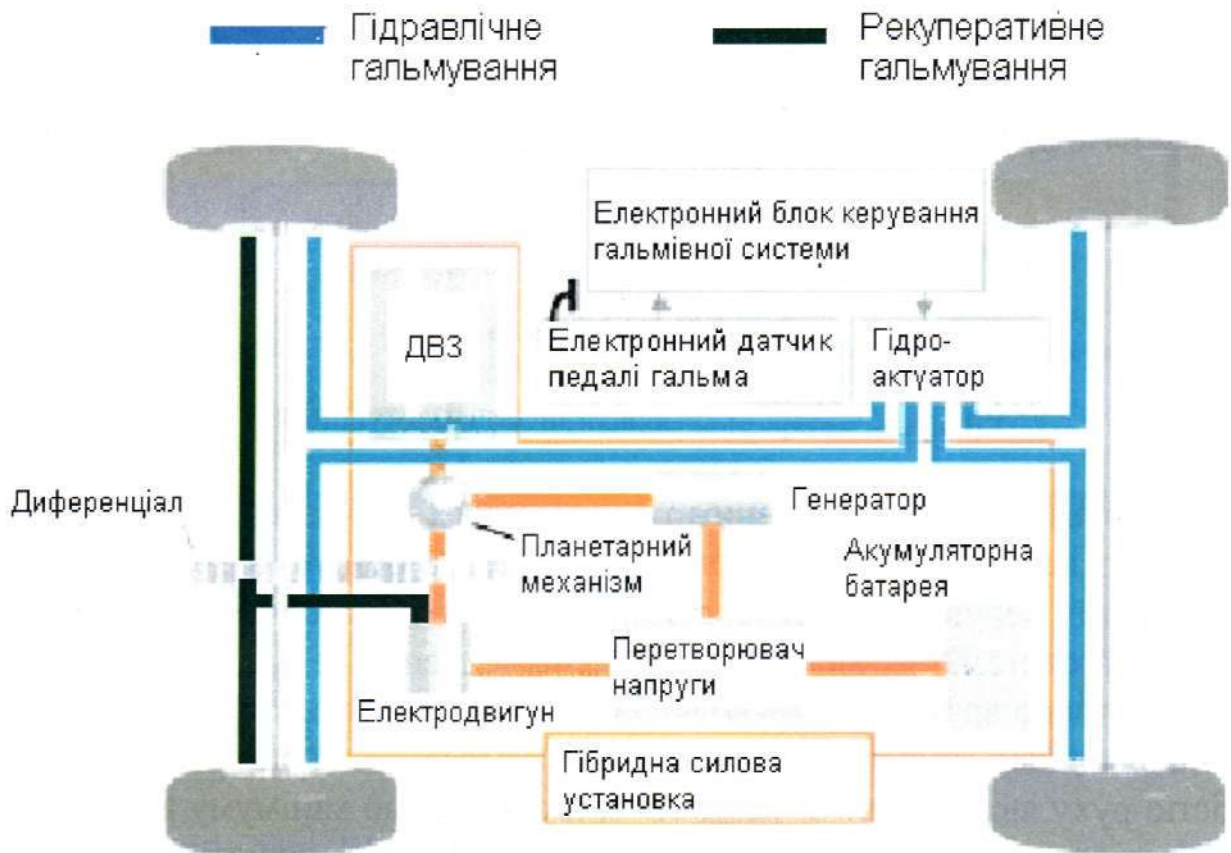


Рис. 4.1. Схема гальмівної системи автомобіля Toyota Prius II

При повільному руху або легкому натисненні на педаль гальма вступає в дію система рекуперативного гальмування, яка перетворює електродвигун в генератор (обернена електрична машина), та здійснює через перетворювач напруги заряд високовольтної акумуляторної батареї (рис. 4.2).

Рекуперативне гальмування здійснюється за рахунок моменту опору обертання електричного генератора. Чим вище сила струму заряду високовольтної акумуляторної батареї, що виробляється оберненою електричною машиною, тим більше гальмівне зусилля.

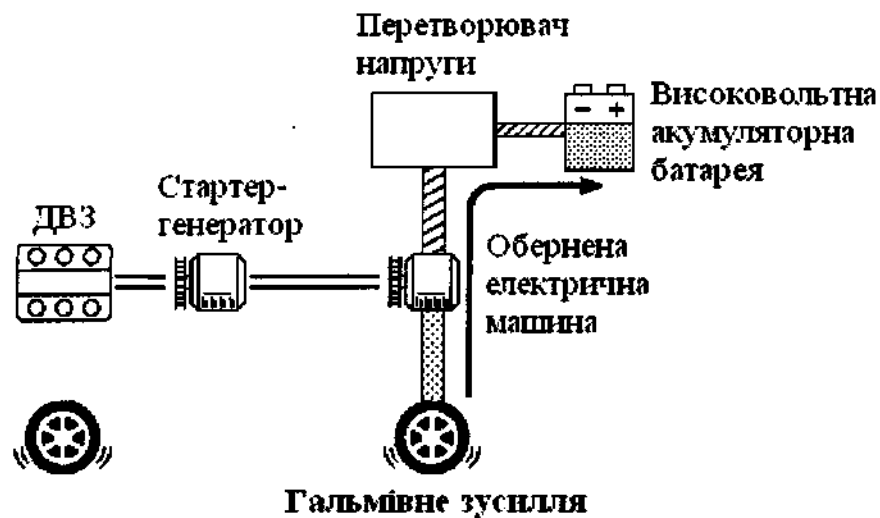


Рис. 4.2. Схема рекуперативного гальмування

Керування рекуперативним гальмуванням досягається за рахунок спільного керування гальмівною системою й гібридною трансмісією. При такому керуванні рекуперативна гальмівна система й гідравлічна гальмівна система забезпечують сумарне значення гальмівного зусилля. Одночасно враховуються коливання параметрів рекуперативної системи, викликані ступенем зарядженості акумуляторної батареї або швидкістю руху автомобіля. У результаті, зводиться до мінімуму втрата кінетичної енергії, що, замість розсіювання в простір, перетворюється в електричну енергію.

Основні компоненти рекуперативної гальмівної системи наведені на рис. 4.3.

В звичайних автомобілях кожна система керування динамічними параметрами відповідає за свою окрему область впливу й функціонує незалежно одна від одної (рис. 4.4). При цьому гідравлічна гальмівна система вступає в дію на грані необхідності для негайного виправлення ситуації.

Система об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля реалізує спільну взаємодію всіх систем між собою без функціональних розривів. А тормозна система вступає в дію до настання критичного моменту, чим забезпечує плавність руху автомобіля, високий рівень керованості й безпеки руху автомобіля (рис. 4.5).

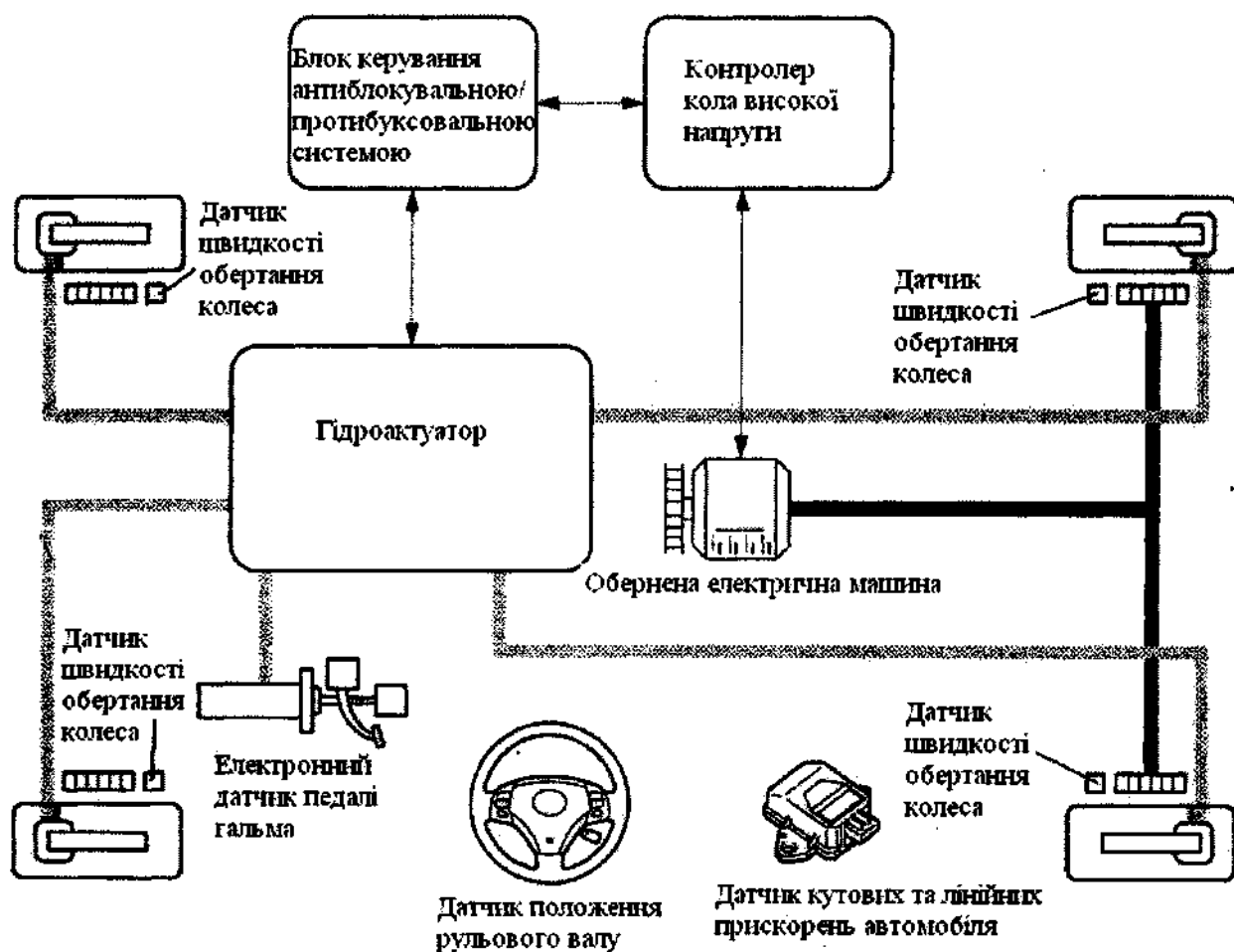


Рис. 4.3. Основні компоненти рекуперативної гальмівної системи гібридного автомобіля

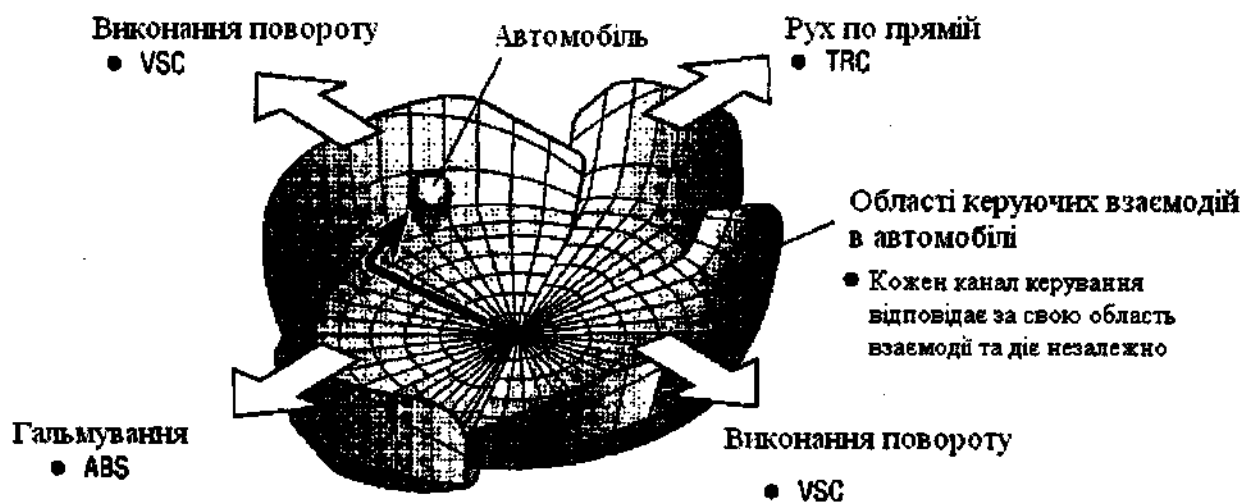


Рис. 4.4. Схема взаємодії звичайних систем керування динамікою автомобіля

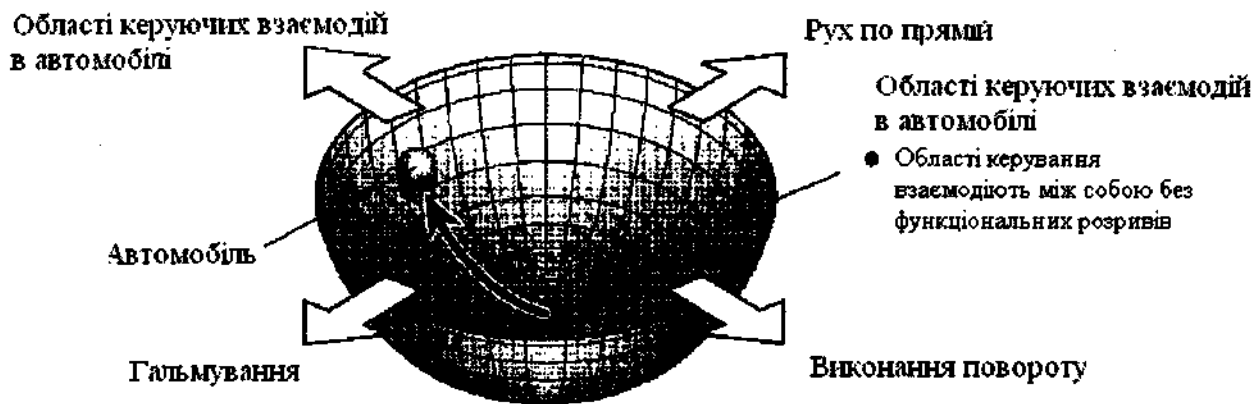


Рис. 4.5. Схема взаємодії об'єднаною системою керування динамікою автомобіля

Розглянемо докладно сумісну роботу системи об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля VDIM з різними електричними системами та комплексами транспортного засобу на прикладі гібридного автомобіля Lexus GS450h.

4.2. Сумісна робота системи об'єднаного керування динамічними параметрами VDIM з системами рульового керування

Системи об'єднаного керування динамічними параметрами (VDIM) автомобіля з підсилювачем рульового керування реалізує сумісне керування з контролером кола високої напруги (HV ECU), електропідсилювачем рульового керування (EPS), системою керування рульовим механізмом (VGRS) та системою електронного керування гальмами (ECB) (рис. 4.6).

У результаті об'єднання наведених вище систем забезпечується добра стійкість руху та маневреність автомобіля на різних режимах руху: при крейсерському русі, при гальмуванні, при виконанні повороту. Особливо ефективно система VDIM координує роботу всіх цих систем на небезпечних ділянках дороги: при гальмуванні на дорозі з нерівномірно розподіленим коефіцієнтом зчеплення покриття, а також – в умовах виникнення переднього або заднього заносу автомобіля.

Якщо автомобіль втрачає стійкість внаслідок буксування, дана система впливає на гальмівне керування шляхом створення гідравлічного тиску в колісних гальмівних механізмах.

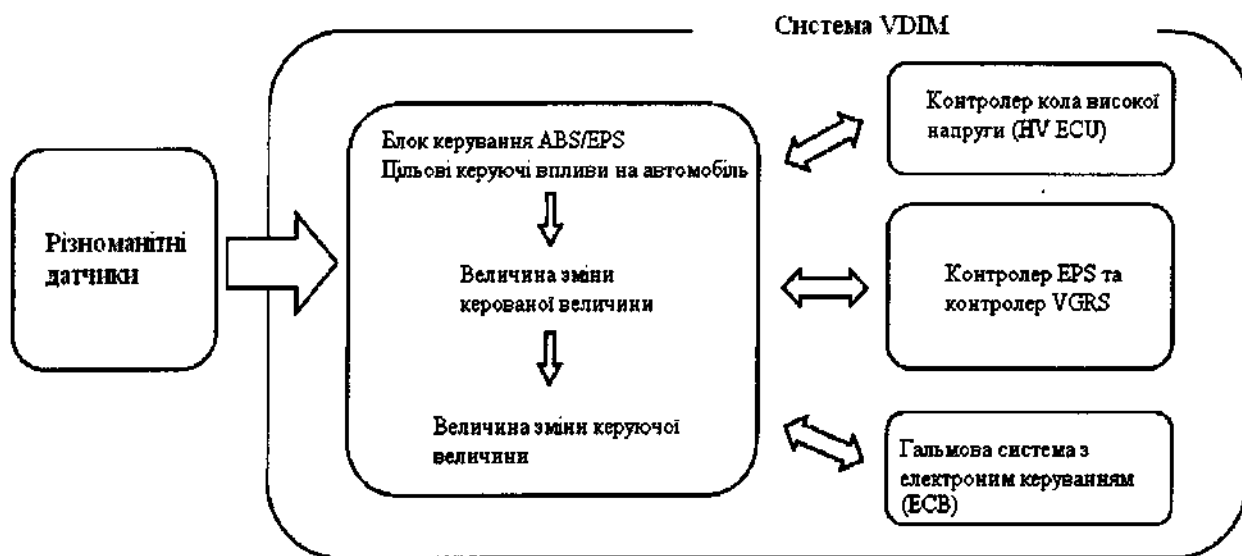


Рис. 4.6. Схема керування системою VDIM з підсилювачем рульового керування

Блок керування EPS забезпечує додаткове регулювання моменту або кута повороту рульового колеса, а в рульовому керуванні зі змінним передаточним числом змінюється передаточне число, щоб допомогти водієві в обертанні рульового колеса (рис. 4.7).

Розглянемо більш докладно роботу системи VDIM при гальмуванні на дорозі з нерівномірно розподіленим коефіцієнтом зчеплення покриття в різних режимах руху автомобіля: при гальмуванні, при прискоренні, при заносі передніх і при заносі задніх коліс автомобіля.

При гальмуванні на дорозі з нерівномірно розподіленим («плямистим») коефіцієнтом зчеплення автомобіль може відхилитися убік ділянки дороги з більш високим коефіцієнтом зчеплення. При наявності системи VDIM контролер системи керування рульовим механізмом VGRS одержує сигнали від блоку керування антиблокувальної / протибуксовальної системи. На підставі цих сигналів контролер VGRS пускає в хід привід VGRS, який зменшує наслідки різниці гальмівних сил на правій і лівій стороні автомобіля. У результаті система підтримує необхідне значення гальмівної сили, забезпечуючи високу стійкість автомобіля на слизькій дорозі (рис. 4.8).

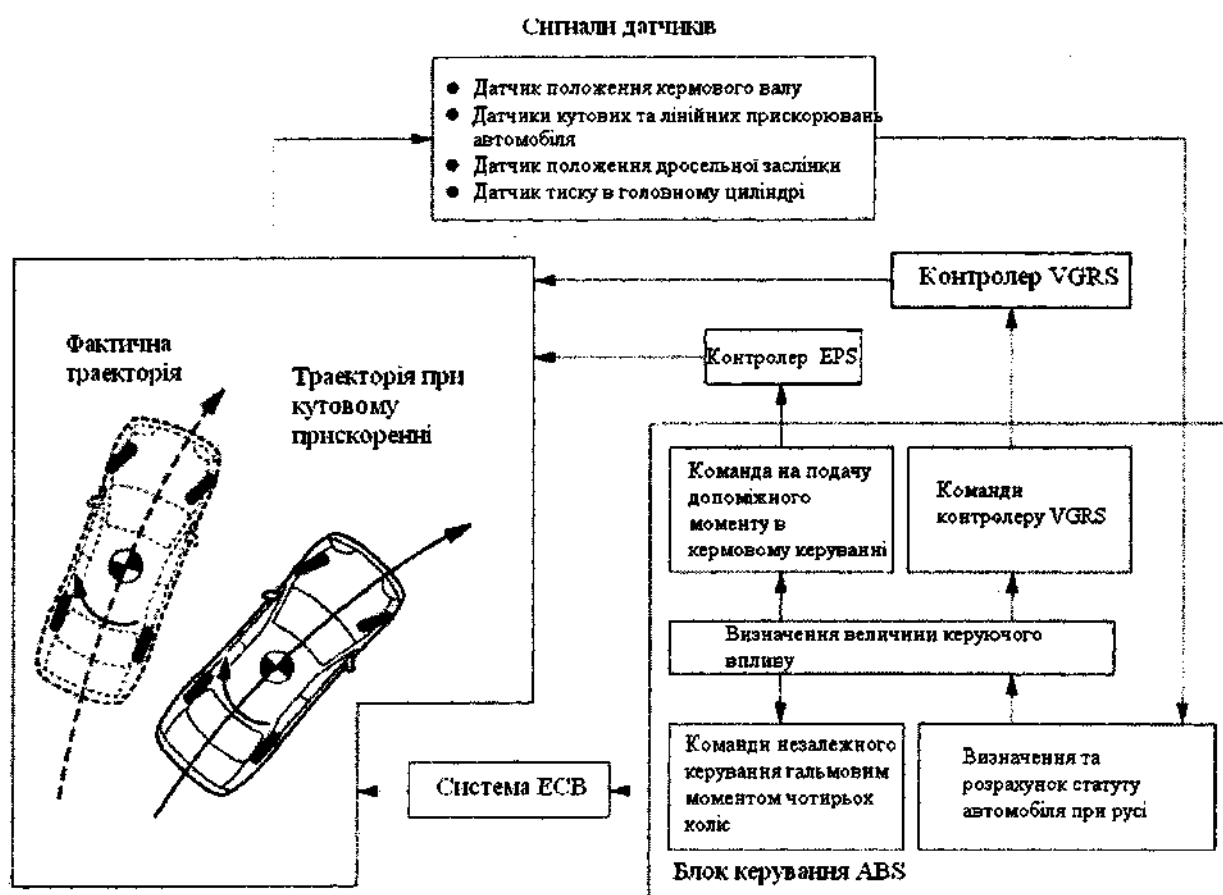


Рис. 4.7. Схема керування кутом повороту рульового колеса

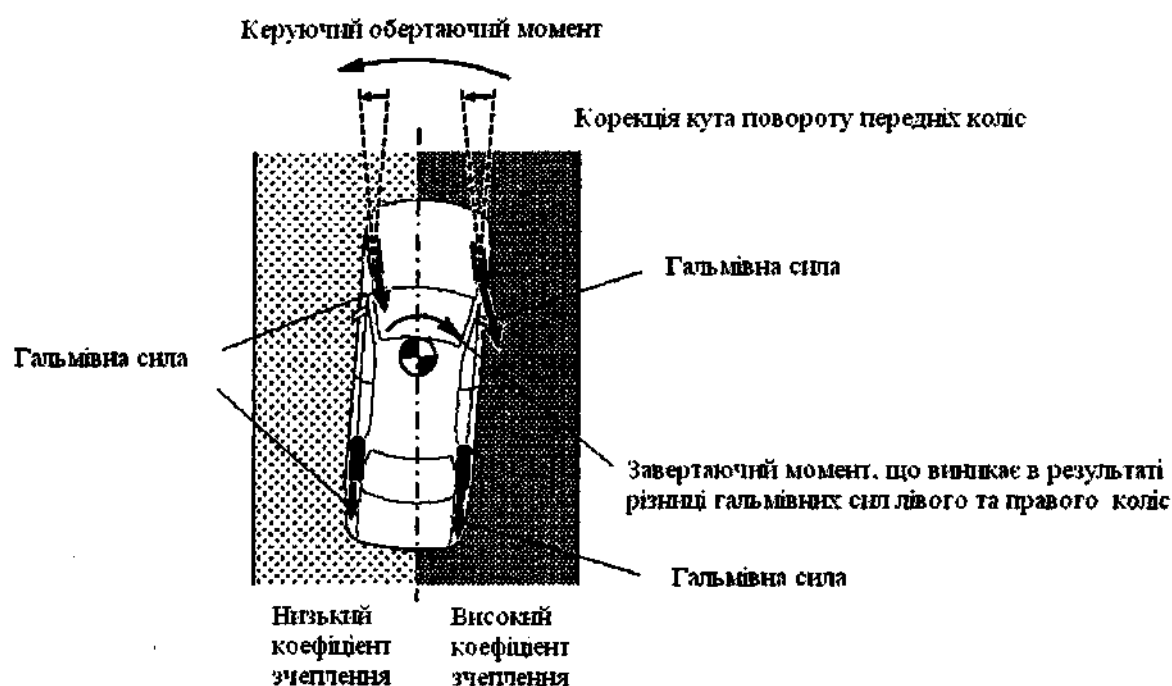


Рис. 4.8. Робота системи VDIM при гальмуванні на дорозі з нерівномірно розподіленим коефіцієнтом зчеплення

При прискоренні на дорозі з нерівномірно розподіленим («плямистим») коефіцієнтом зчеплення автомобіль може відхилитися убік ділянки дороги з більш низьким коефіцієнтом зчеплення. При наявності системи об'єднаного керування динамічними параметрами VDIM автомобіля контролер VGRS одержує сигнали від блоку керування антиблокувальною / протибуксовальною системою. На підставі цих сигналів контролер VGRS пускає в хід привід VGRS, що зменшує наслідки різниці тягових зусиль на правій і лівій стороні автомобіля.

У результаті система об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля забезпечує потрібне тягове зусилля й стійкість автомобіля на слизькій дорозі (рис. 4.9).

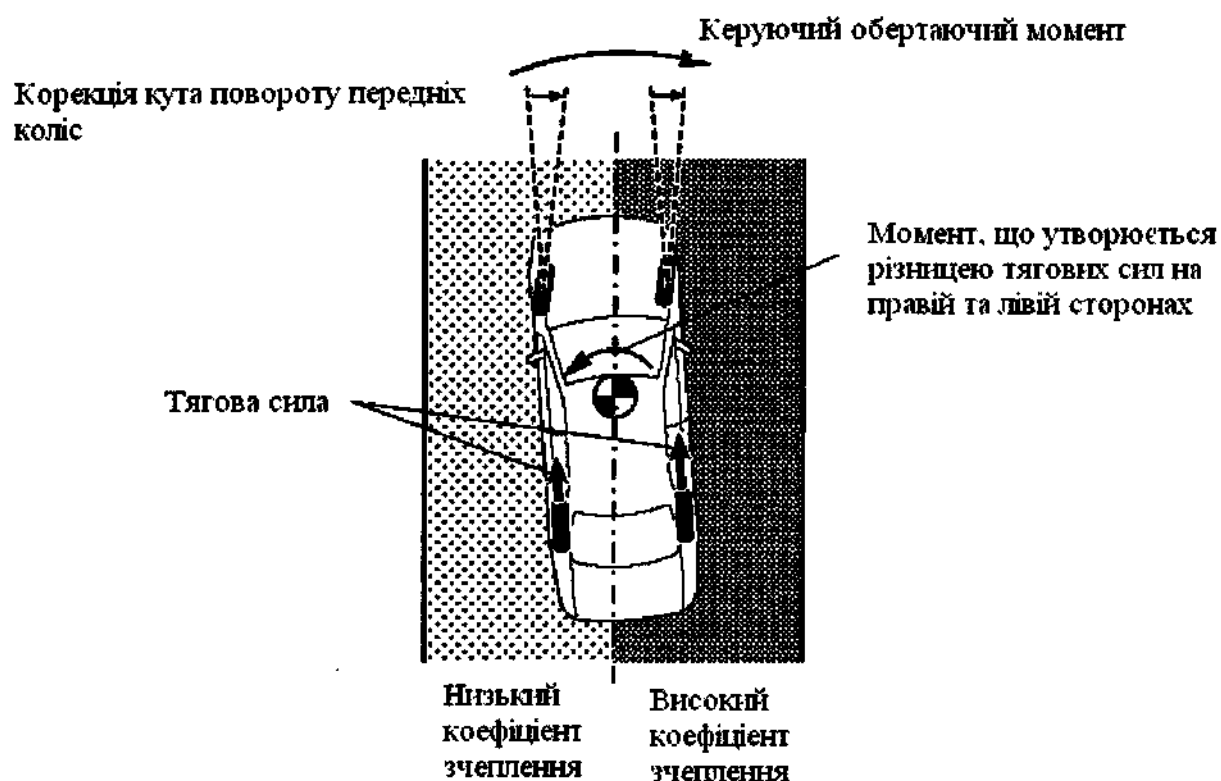


Рис. 4.9. Робота системи VDIM при прискоренні на дорозі з нерівномірно розподіленим коефіцієнтом зчеплення

Розглянемо далі роботу системи VDIM при заносі передніх та задніх коліс. Аналізуючи вплив водія на рульове керування, в залежності від швидкості руху, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою визначає намічений водієм кут повороту. Одночасно, блок керування антиблокувальною / протибуксо-

вальною системою, порівнюючи обчислене значення з дійсним значенням, встановлює схильність автомобіля до переднього заносу.

За отриманим даними блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою пригнічує схильність автомобіля до переднього заносу, використовуючи рекуперативне гальмування й гідравлічну гальмівну систему з електронним керуванням (ECB). Одночасно, для зменшення зайвих обертань рульового колеса, система VDIM, через контролер VGRS, збільшує передатне відношення рульового механізму й прикладає до рульового вала стабілізуючий момент у зворотному виконуваному повороту напрямку (рис. 4.10), для чого використовується контролер EPS.

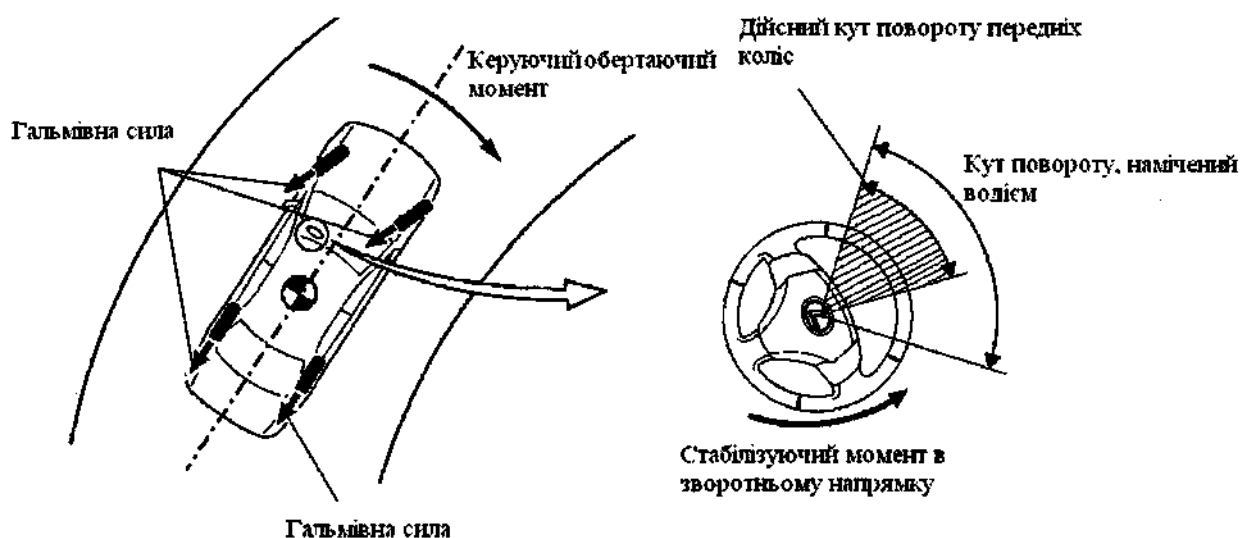


Рис. 4.10. Робота системи VDIM при заносі передніх коліс

Для пригнічення схильності до заднього заносу гальмівна система з електронним керуванням (ECB) використовує гідравлічну гальмівну систему, вмикаючи робочий гальмівний циліндр на зовнішній стороні повороту (рис. 4.11).

Одночасно, система VDIM, через контролер VGRS, регулює передатне відношення рульового механізму. У результаті, система регулює кут повороту керуючих коліс і забезпечує стійкість автомобіля в повороті.

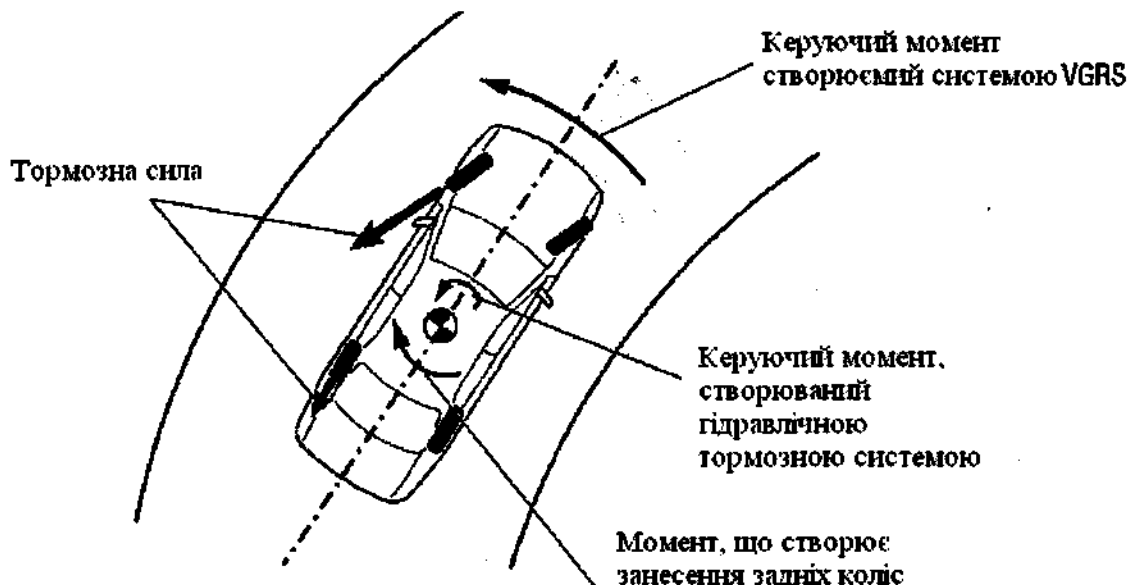


Рис. 4.11. Робота системи VDIM при заносі задніх коліс

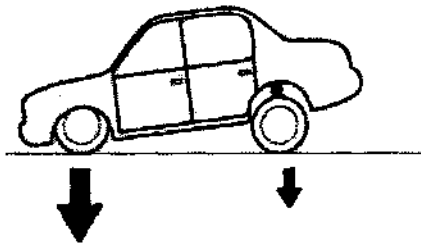
4.3. Система електронного розподілу гальмівного зусилля (EBD)

Механічне керування, що раніше застосовувалося розподілом гальмівних зусиль, тепер виконується за допомогою блоку керування антиблокувальною / протибуксовальною системою, яка з високою точністю розподіляє гальмівні зусилля відповідно до параметрів руху автомобіля.

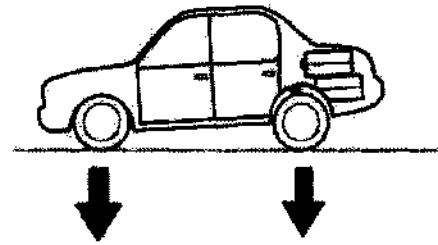
Розглянемо докладніше розподіл гальмівних зусиль між колесами на різних режимах руху автомобіля: при гальмуванні під час прямолінійного руху та при гальмуванні під час виконання повороту.

При гальмуванні під час прямолінійного руху перерозподіляється навантаження між мостами, внаслідок чого навантаження на задні колеса зменшується. Блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою фіксує даний стан на підставі сигналів датчиків швидкості обертання коліс, а модулятор тиску оптимізує розподіл гальмівних зусиль. Наприклад, величина гальмівного зусилля, що може бути прикладена до задніх коліс, міняється залежно від завантаження автомобіля. Крім того, величина гальмівного зусилля, прикладеного до задніх коліс, залежить від величини вповільнення автомобіля.

Схема розподілу гальмівних зусиль між передніми й задніми колесами автомобіля з різним завантаженням при гальмуванні під час прямолінійного руху наведена на рис. 4.12.



а) без навантаження на задні колеса



б) з навантаженням на задні колеса

Рис. 4.12. Розподіл гальмівних зусиль між передніми й задніми колесами при гальмуванні під час прямолінійного руху

Таким чином, відбувається облік всіх цих факторів і гальмівне зусилля на задніх колесах регулюється так, щоб досягти найвищої ефективності гальмування задніми колесами.

Розглянемо розподіл гальмівних зусиль між колесами правої й лівої сторони при гальмуванні в повороті. При гальмуванні під час виконання повороту навантаження на внутрішнє колесо зменшується, а на зовнішнє – збільшується. Блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою фіксує даний стан на підставі сигналів датчиків швидкості обертання коліс, а модулятор тиску оптимізує гальмівні зусилля між внутрішніми й зовнішніми колесами. Схема розподілу гальмівних зусиль між колесами правої й лівої сторони при гальмуванні в повороті показана на рис. 4.13.

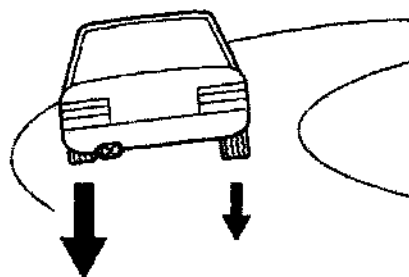


Рис. 4.13. Розподіл гальмівних зусиль між колесами правої й лівої сторони при гальмуванні в повороті

Таким чином, відбувається обрахунок всіх зовнішніх і внутрішніх факторів, що сприяє найвищій ефективності гальмування задніми колесами.

4.4. Система екстреного гальмування

Підсилювач екстреного гальмування інтерпретує різке натискання на педаль, як ознаку екстреного гальмування й заповнює не долік того зусилля, з яким водій натискає на педаль гальма. В аварійній ситуації багато водіїв, особливо недосвідчених, натискають педаль гальма з недостатньою силою.

На підставі сигналів датчика тиску в головному циліндрі й датчика ходу педалі гальма блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою оцінює швидкість і силу натискання педалі гальма й інтерпретує намір водія. Якщо блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою інтерпретує намір водія, як бажання терміново зупинити автомобіль, то він активує модулятор тиску в приводі гальм з метою підняття тиску у робочих циліндрах і збільшення гальмівного зусилля (рис. 4.14, 4.15).

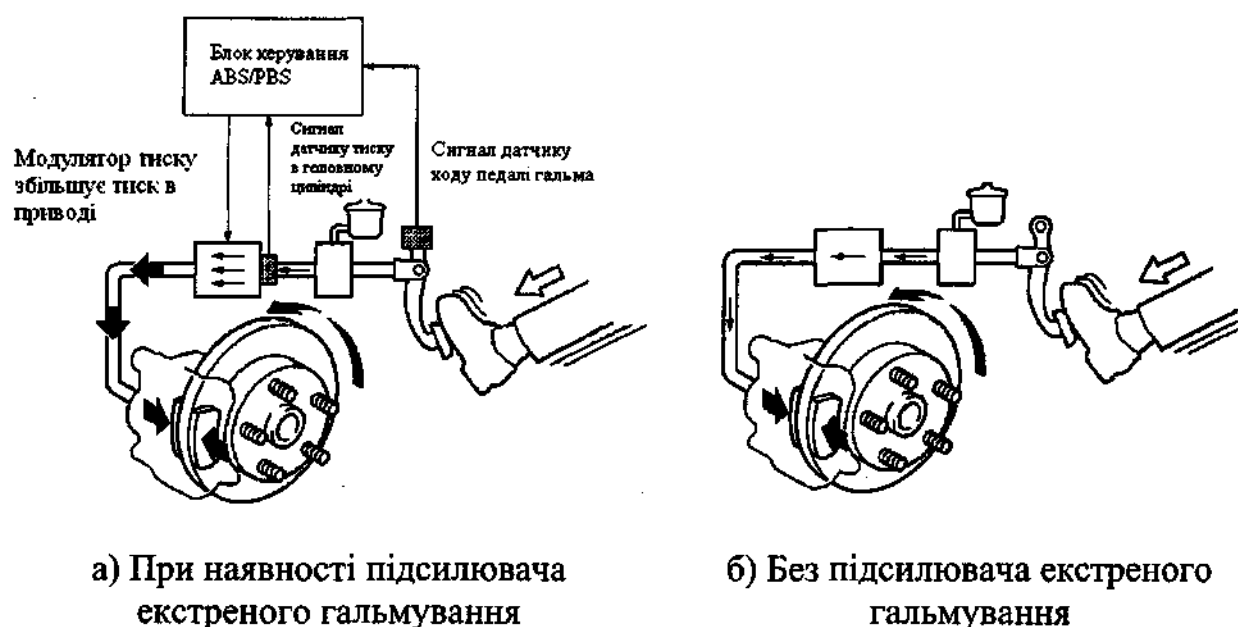


Рис. 4.14.Схема роботи підсилювача екстреного гальмування

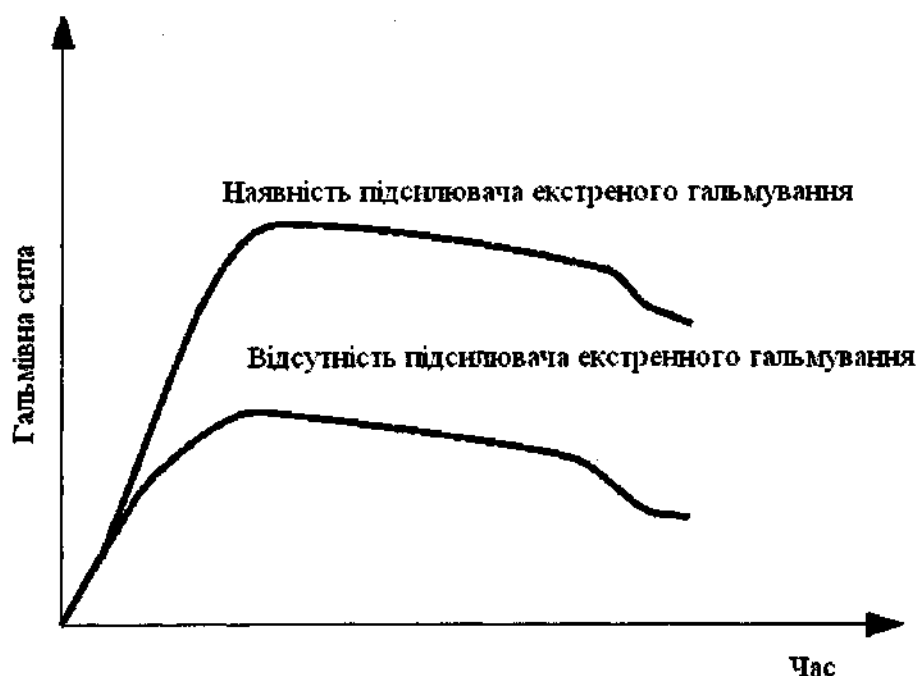


Рис. 4.15. Графік збільшення гальмівного зусилля

Разом з ABS, підсилювач екстреного гальмування виконує функцію підвищення ефективності гальмування. Важливою властивістю підсилювача екстреного гальмування є таке споріднення часу гальмування і його інтенсивності, що водій не помічає нічого незвичайного. Коли водій навмисно послабляє натискання педалі гальма, підсилювач екстреного гальмування зменшує додаткове зусилля, що він надавав. Величина максимальної гальмівної сили при наявності підсилювача екстреного гальмування або без нього однакова.

Розглянемо більш докладно роботу системи екстреного гальмування гібридного автомобіля, структурна схема якої зображена на рис. 4.16.

Намір водія виконати екстрене гальмування блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою розпізнає по швидкості наростання тиску в головному гальмівному циліндрі (тиск вимірюється розташованим у головному циліндрі датчиком тиску). Якщо блок керування визнає за необхідне збільшити гальмівний момент, то включається насос у модуляторі тиску й тиск у робочих циліндрах збільшується.

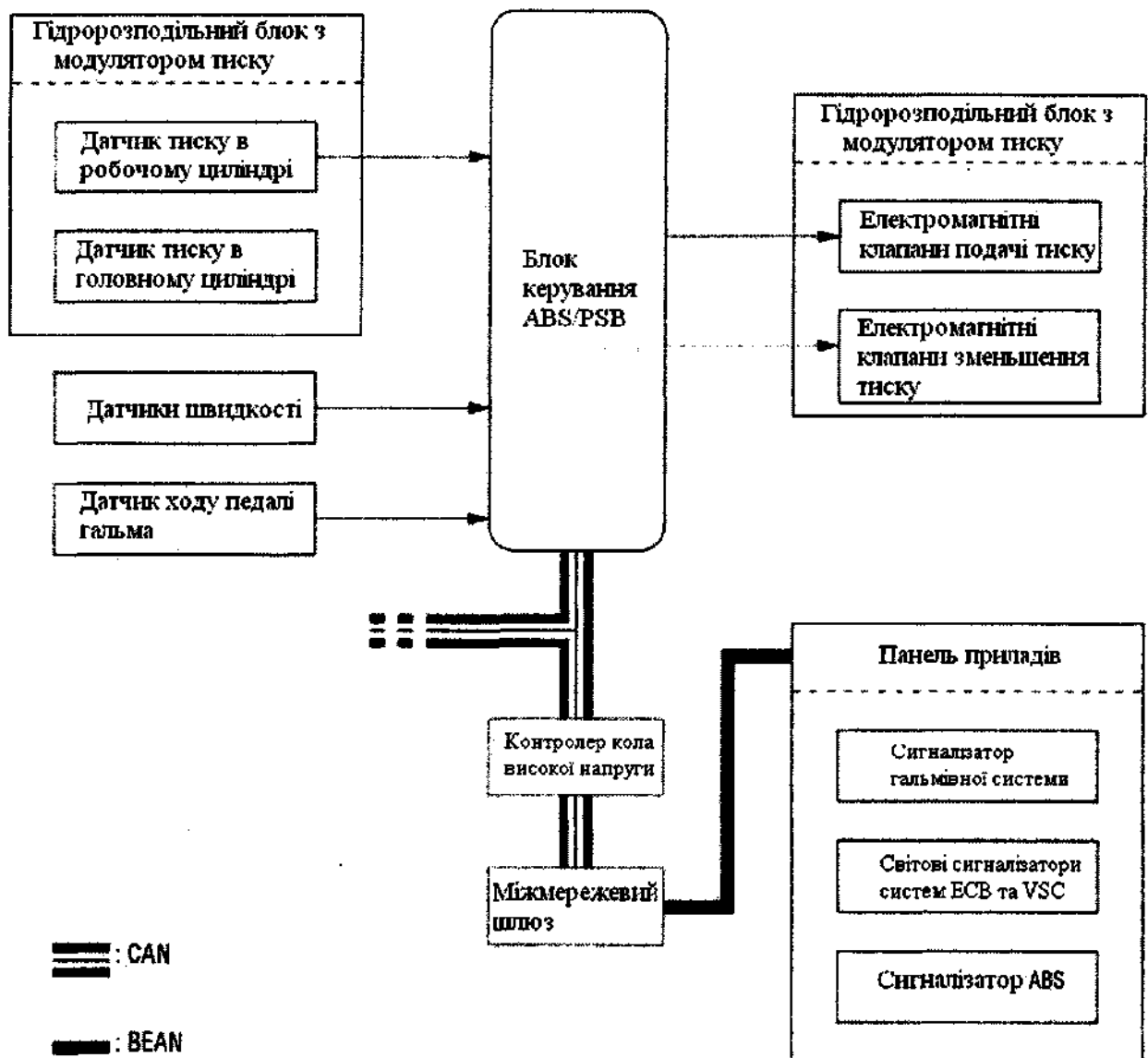


Рис. 4.16. Структурна схема системи екстреного гальмування

Функціональна схема системи екстреного гальмування зображена на рис. 4.17, а у табл. 4.1 наведена робота всіх компонентів цієї системи.

4.5. Протибуксовальна система (TRC)

При різкому натисканні педалі акселератора або з початком руху на слизькій дорозі ведучі колеса, через надмірний обертовий момент, можуть пробуксовувати.

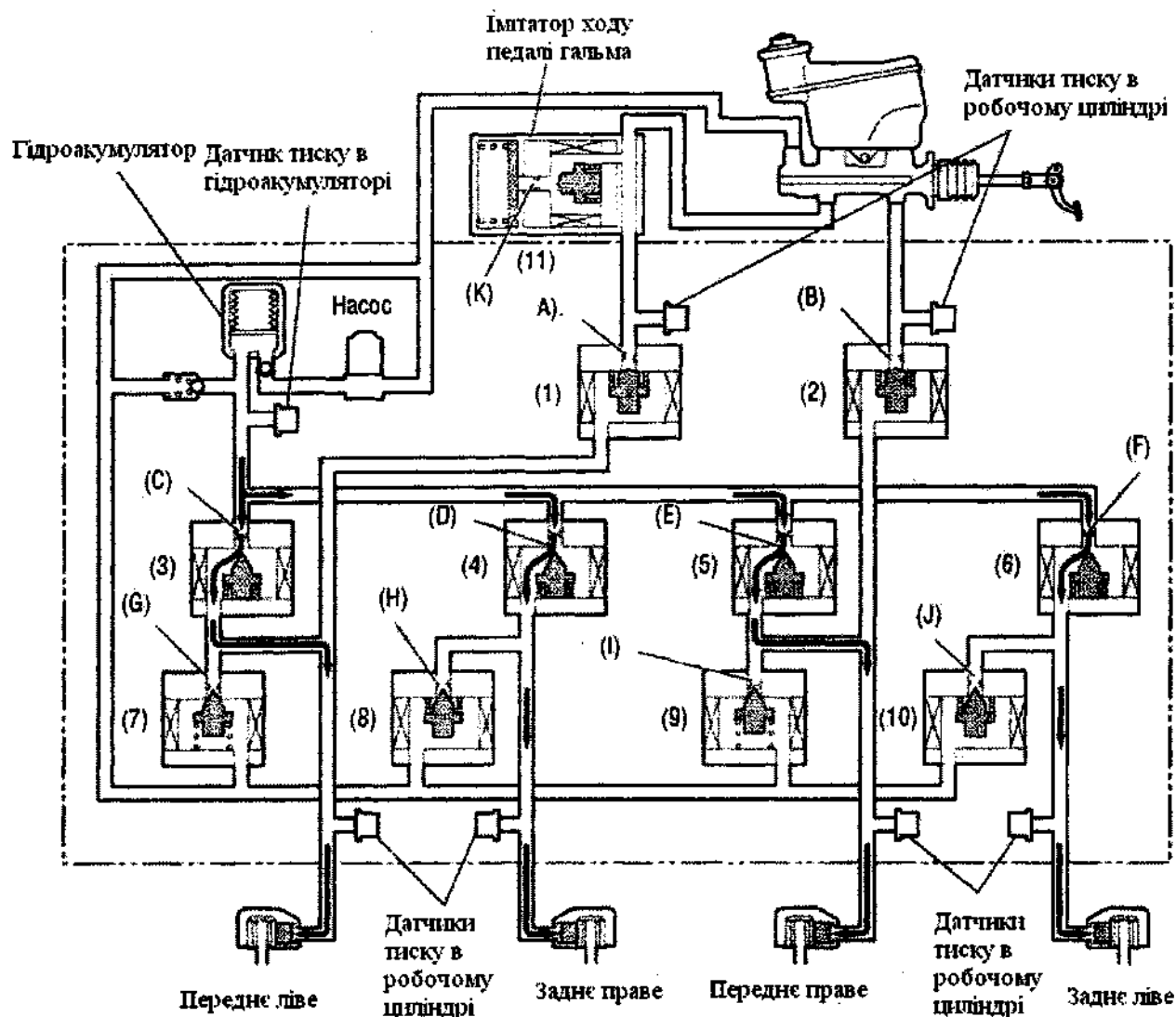


Рис. 4.17. Функціональна схема системи екстреного гальмування

Таблиця 4.1

Робота компонентів системи екстреного гальмування

Компонент	Електро-магнітний клапан N	Канал N	Режим збільшення тиску при нормальному гальмуванні	Підсилювач екстреного гальмування включений
1	2	3	4	5
Електромагнітний клапан відсічення головного циліндра	(1)	(A)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
	(2)	(B)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)

1	2	3	4	5
Електромагнітні клапани подачі тиску	(3)	(C)	Включений (Відкритий наполовину)	Включений (Відкритий наполовину)
	(4)	(D)	Включений (Відкритий наполовину)	Включений (Відкритий наполовину)
	(5)	(E)	Включений (Відкритий наполовину)	Включений (Відкритий наполовину)
	(6)	(F)	Включений (Відкритий наполовину)	Включений (Відкритий наполовину)
Електромагнітні клапани зменшення тиску	(7)	(G)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(8)	(H)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
	(9)	(I)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(10)	(J)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
Відсічної клапан імітатора ходу педалі гальма	(11)	(K)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)

Блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою регулює тиск у гальмівних циліндрах ведучих коліс і направляє відповідний запит гібридної трансмісії на регулювання обертового моменту. Таким чином, протибуксовальна система зводить до мінімуму буксування ведучих коліс і регулює обертовий момент на колесах відповідно до стану дорожнього покриття.

Порівняємо для прикладу два автомобіля: із системою TRC і без неї. Якщо водій автомобіля на дорозі з нерівномірним коефіцієнтом зчеплення, різко натисне педаль акселератора, то ведуче колесо, розташоване на більш слизькій ділянці дороги, може почати прослизати (буксувати). У результаті автомобіль втрачає стійкість. Принцип роботи блоку керування антиблокувальною / протибуксовальною системою автомобіля на дорозі з ділянками, що мають різні коефіцієнти зчеплення, зображені на рис. 4.18.

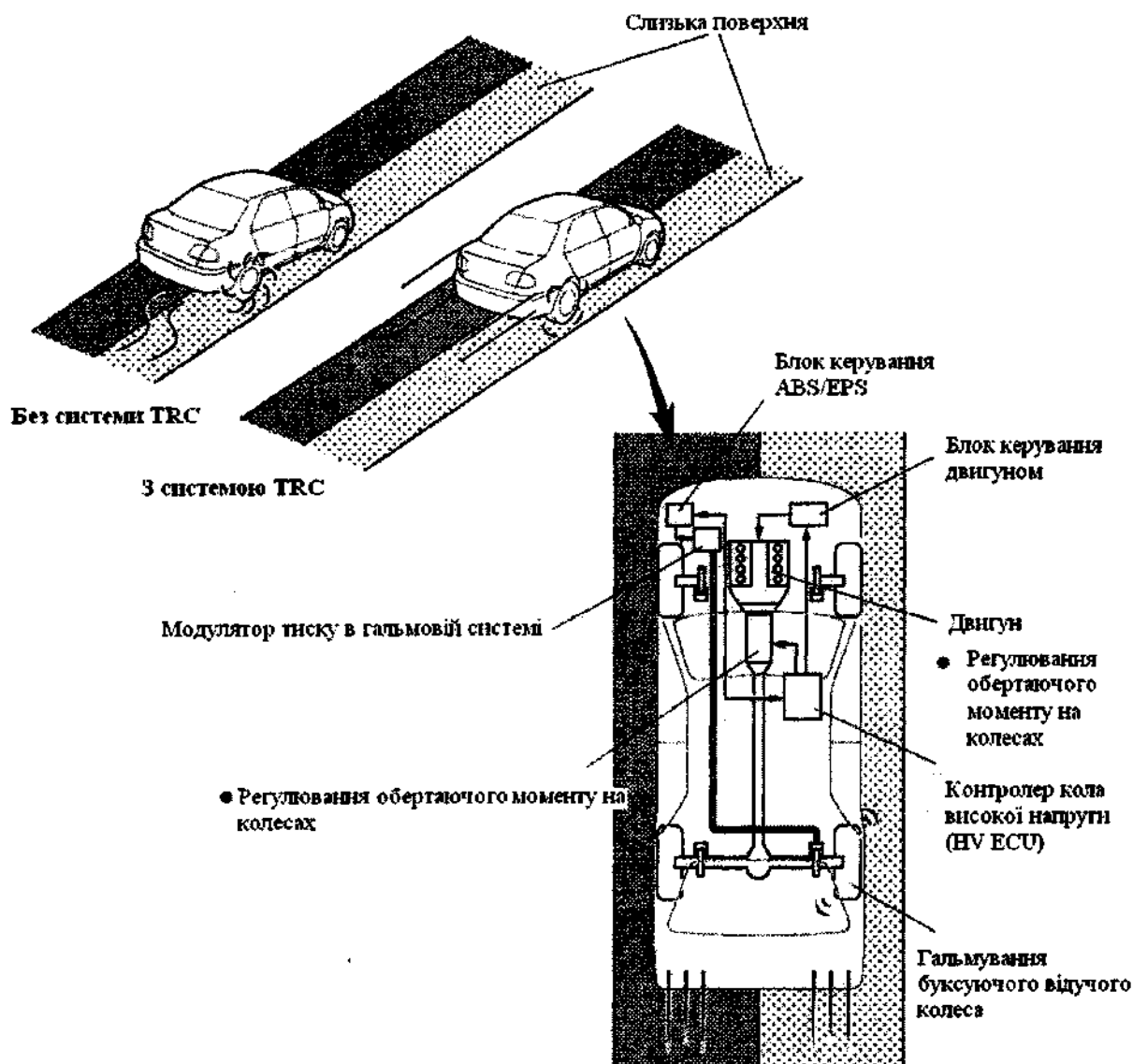


Рис. 4.18. Принцип роботи протибуксовальної системи

Однак, якщо автомобіль оснащений системою TRC, то блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою миттєво «помічає» стан автомобіля й, за допомогою модулятора тиску, прикладає тиск до робочого циліндра ведучого колеса, що буксує. Одночасно, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою здійснює спільне з контролером кола високої напруги керування з метою зменшення переданого обертового моменту. Таким чином, даний канал керування постійно підтримує стійкість напрямку руху.

Розглянемо більш докладно роботу протибуксовальної системи (TRC), структурна схема якої зображена на рис. 4.19.

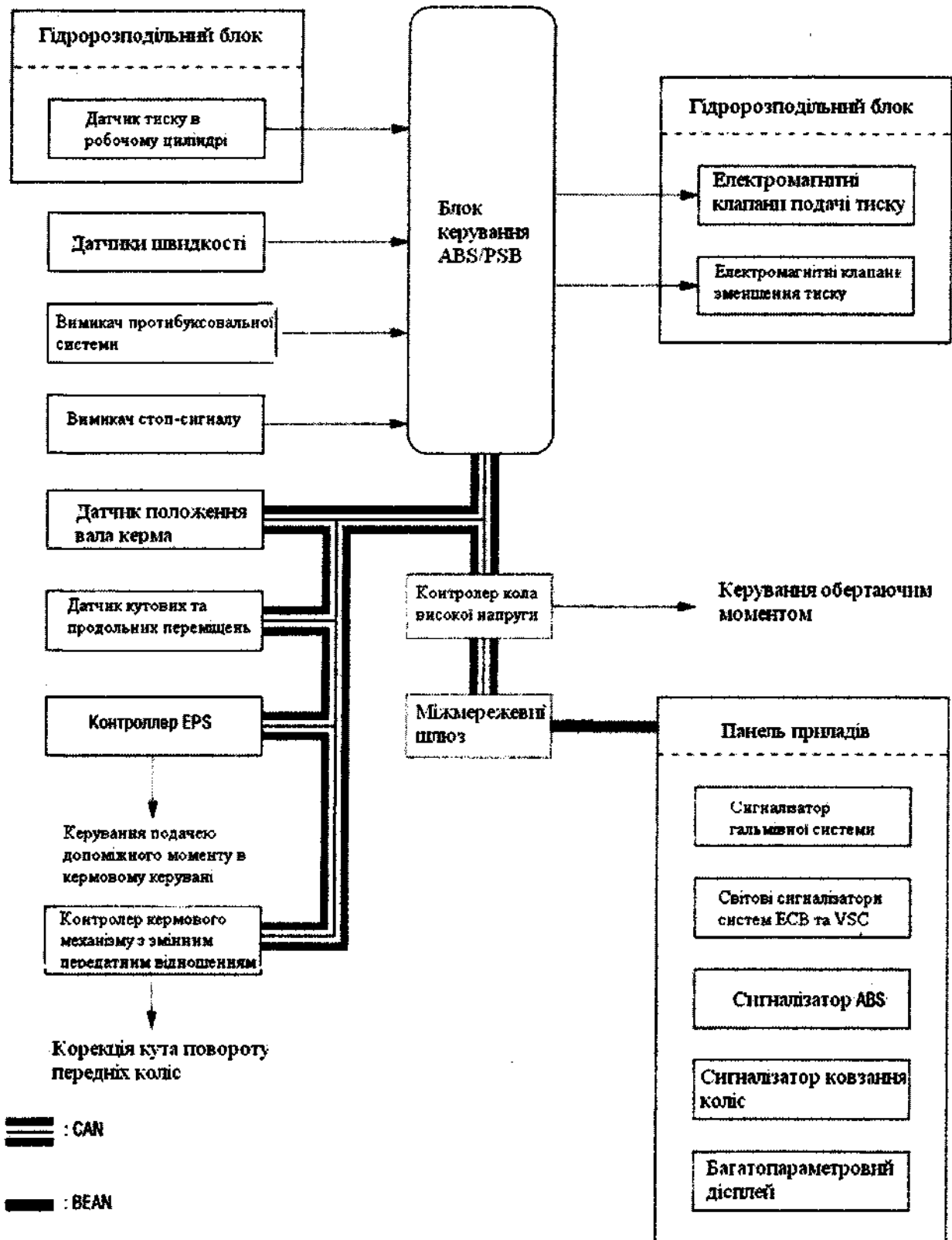


Рис. 4.19. Структурна схема протибуксовальної системи

Тиск, що нагнічується гідравлічним насосом, досягає потрібного значення за допомогою клапанів подачі або зменшення тиску. Регулювання тиску в робочих циліндрах ведучих коліс може виконуватися в одному із трьох режимів – зменшення тиску, стабілізація тиску й збільшення тиску. Тиск рідини безупинно регулюється відповідно до умов застосування гальмівної системи, шляхом регулювання прохідного перерізу клапана.

Функціональна схема гідравлічного контуру протибуксовальної системи в режимі збільшення тиску зображена на рис. 4.20, а у табл. 4.2 наведена робота всіх компонентів цієї системи в різних режимах роботи.

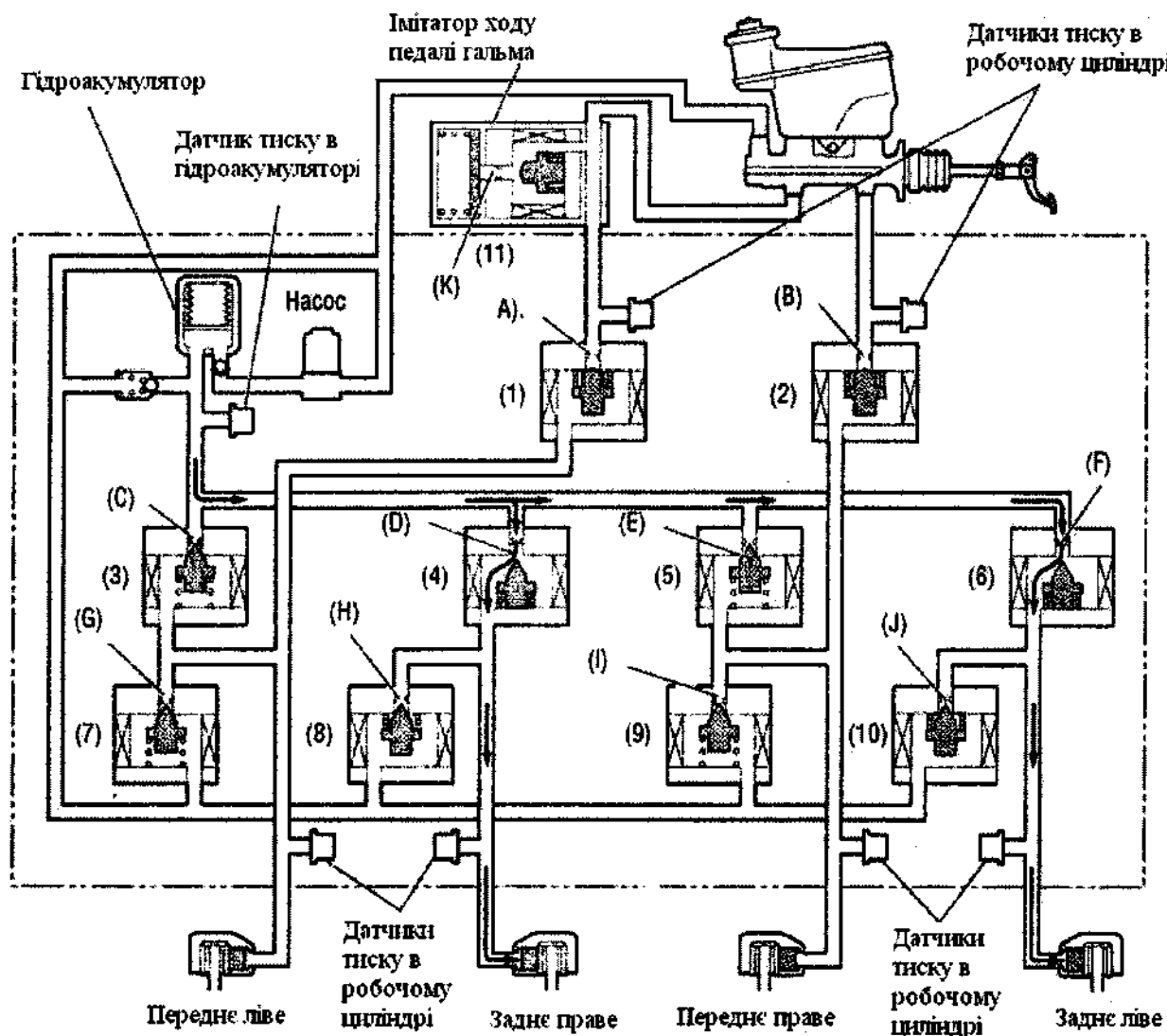


Рис. 4.20. Функціональна схема протибуксовальної системи

Таблиця 4.2

Робота компонентів протибуксовальної системи

Компонент	Елект- ромагні- тний клапан N	Ка- нал N	TRC не активована	TRC активована		
				Режим збільшення тиску	Режим стабілізації тиску	Режим зменшення тиску
1	2	3	4	5	6	7
Електро- магнітні клапани відсічення головного циліндра	(1)	(A)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
	(2)	(B)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
Електро- магнітні клапани подачі ти- ску	(3)	(C)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(4)	(D)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(5)	(E)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(6)	(F)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
Електро- магнітні клапани зменшення тиску	(7)	(G)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(8)	(H)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)
	(9)	(I)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(10)	(J)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)

1	2	3	4	5	6	7
Відсічної клапан імі- татора хо- ду педалі гальма	(11)	(К)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)

4.6. Система підтримки курсової стійкості (VSC)

Система підтримки курсової стійкості VSC призначена для підвищення керованості автомобіля при втраті зчеплення передніми колесами (передній занос) і при втраті зчеплення задніми колесами (задній занос) за допомогою регулювання обертового моменту двигуна й керування робочими гальмовими циліндрами окремо на кожному з коліс. На рис. 4.21 розглянуті ці дві ситуації, коли шини автомобіля втрачають зчеплення в поперечному напрямку при заносі передніх (рис. 4.21, а) та задніх коліс (рис. 4.21, б).

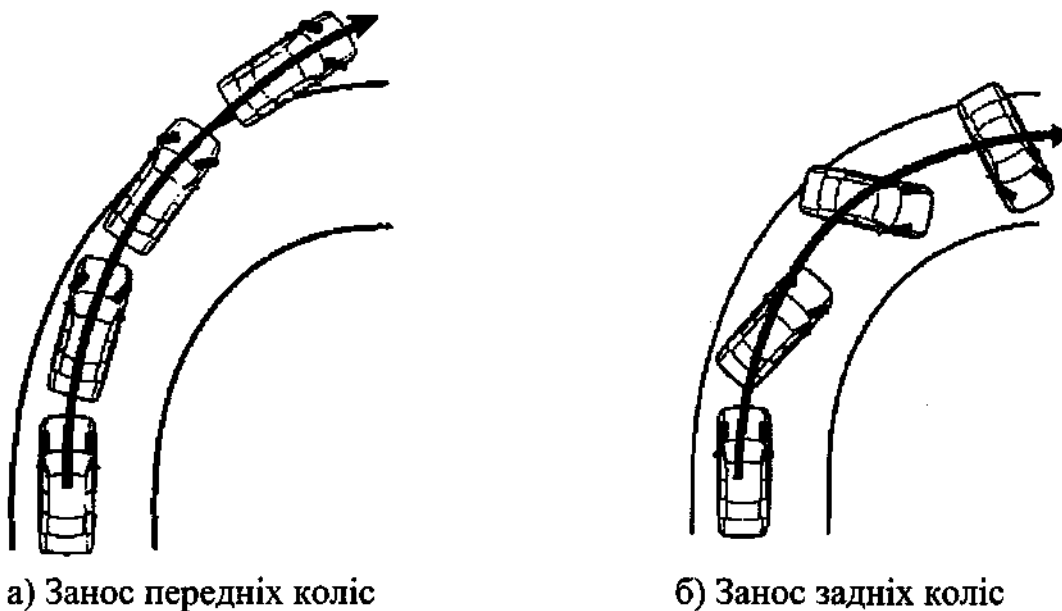


Рис. 4.21. Ілюстрація переднього й заднього заносу

Для визначення положення автомобіля потрібні дані про стан рульового валу, швидкість руху, величину кутового прискорення щодо вертикальної осі, величину поперечного прискорення, які обробляються блоком керування антиблокувальної / протибуксваль-

ної системи. Втратили передні колеса зчеплення із дорогою чи ні, визначається по різниці між розрахунковим кутовим прискоренням і його обмірюваним значенням. Коли дійсна зміна курсу менше розрахункового (обчислюється по швидкості руху автомобіля й по положенню рульового вала), яким повинен рухатися автомобіль, це означає, що радіус виконуваного повороту більше розрахункового (рис. 4.22, а).

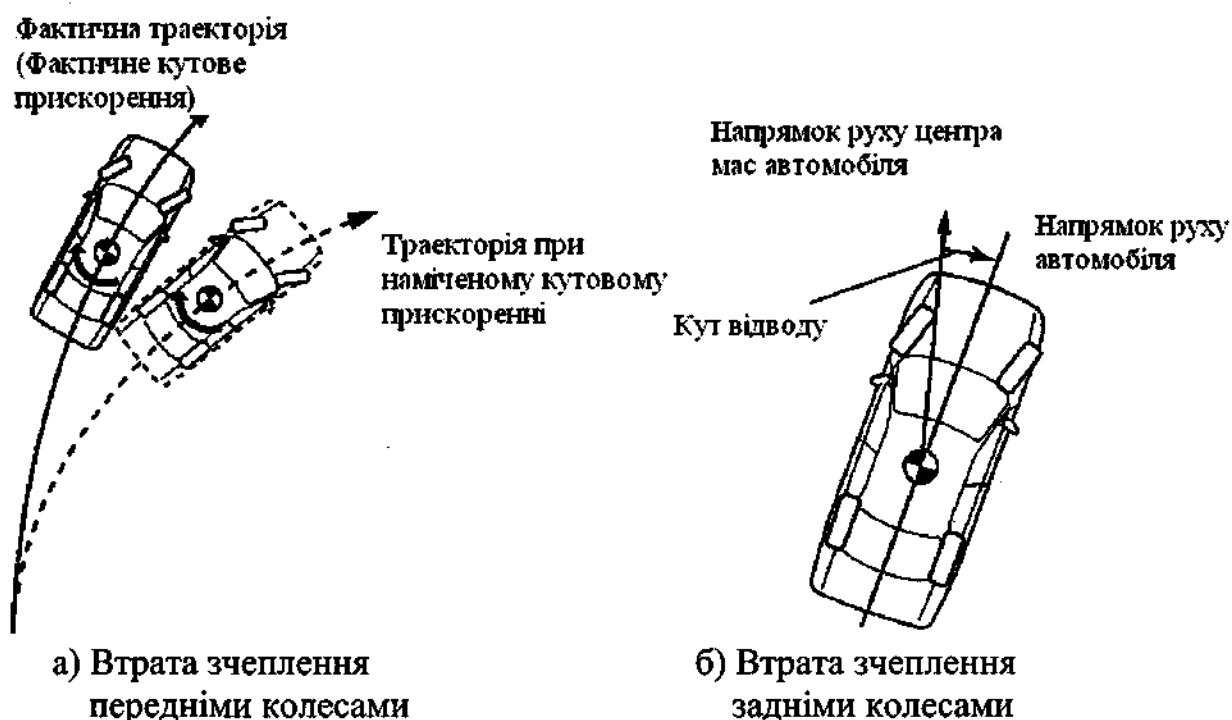


Рис. 4.22. Ілюстрація втрати зчеплення передніми й задніми колесами

Таким чином, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою визначає погіршення зчеплення передніх коліс з дорогою.

Втрата зчеплення задніми колесами визначається за величинами бокового уводу й кутової швидкості автомобіля (рис. 4.22, б). При більших значеннях кута уводу й кутової швидкості блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою вважає, що задні колеса автомобіля йдуть у занос.

Коли блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою вважає, що передні або задні колеса починають схилятися до заносу (див. рис. 4.22), він зменшує обертовий момент двигуна й

прикладає гальмівний момент до переднього або до заднього коліс для зменшення обертового моменту щодо вертикальної осі. Набір впливів на динаміку автомобіля залежить від його положення й умов руху.

При пригніченні заносу передніх коліс блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою визначає початок значного заносу передніх коліс, та протидіє йому в адекватній мері. Для зменшення сили заносу передніх коліс блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою знижує обертовий момент, переданий на колеса, та прикладає гальмівний момент до зовнішнього колеса повороту й до обох задніх коліс (рис. 4.23, а).

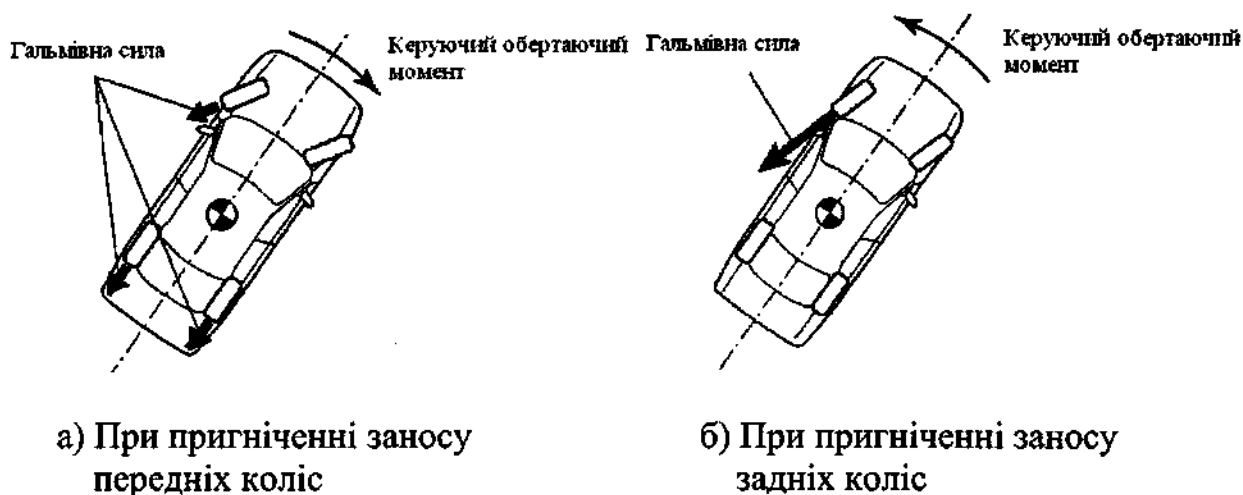


Рис. 4.23. Ілюстрація пригнічення заносу передніх і задніх коліс при виконанні правого повороту

При пригніченні заносу задніх коліс блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою визначає початок значного заносу задніх коліс, та протидіє йому в адекватній мірі.

Для пригнічення заносу задніх коліс при повороті блок керування прикладає гальмівний момент до переднього зовнішнього колеса, щоб створити спрямований назовні момент інерції щодо вертикальної осі. Одночасно зі зниженням швидкості в результаті підгальмовування, забезпечується курсова стабілізація автомобіля (рис. 4.23, б). При необхідності блок керування прикладає обертовий момент до обох задніх коліс.

Розглянемо більш докладно роботу системи підтримки курсової стійкості (VSC). Система VSC керує роботою електромагнітних клапанів, для направлення тиску з гідроаккумулятора до робочих циліндрів відповідних коліс, однак розподіл тиску відрізняється від того, що відбувається при нормальному гальмуванні. Реалізація функцій VSC відбувається з використанням трьох режимів: режим зниження тиску, режим стабілізації тиску й режим підвищення тиску. Наслідком роботи системи VSC є зменшення схильності передніх і задніх коліс до заносу.

Структурна схема системи підтримки курсової стійкості зображена на рис. 4.24.

Розглянемо принцип роботи системи підтримки курсової стійкості (VSC) VSC при пригніченні заносу передніх коліс (при виконанні правого повороту). З появою ознак заносу передніх коліс вмикаються робочі циліндри задніх коліс і робочий циліндр переднього зовнішнього колеса. Однак, в окремих випадках, залежно від того задіяне гальмо чи ні й від поточного положення автомобіля, гальмівний момент, до наміченого для цього колесам, може й не прикладатися.

Функціональна схема гідравлічного контуру системи підтримки курсової стійкості при пригніченні заносу передніх коліс при виконанні правого повороту у режимі збільшення тиску зображена на рис. 4.25. Клапани подачі й зменшення тиску вмикаються й вимикаються, як при роботі антиблокувальної / протибуксовальної системи.

У таблиці 4.3 наведена робота всіх компонентів системи підтримки курсової стійкості при пригніченні заносу передніх коліс при виконанні правого повороту на різних режимах роботи.

Розглянемо тепер принцип роботи системи VSC при пригніченні заносу задніх коліс при виконанні правого повороту. З появою ознак заносу задніх коліс вмикаються робочі циліндри зовнішніх передніх і задніх коліс.

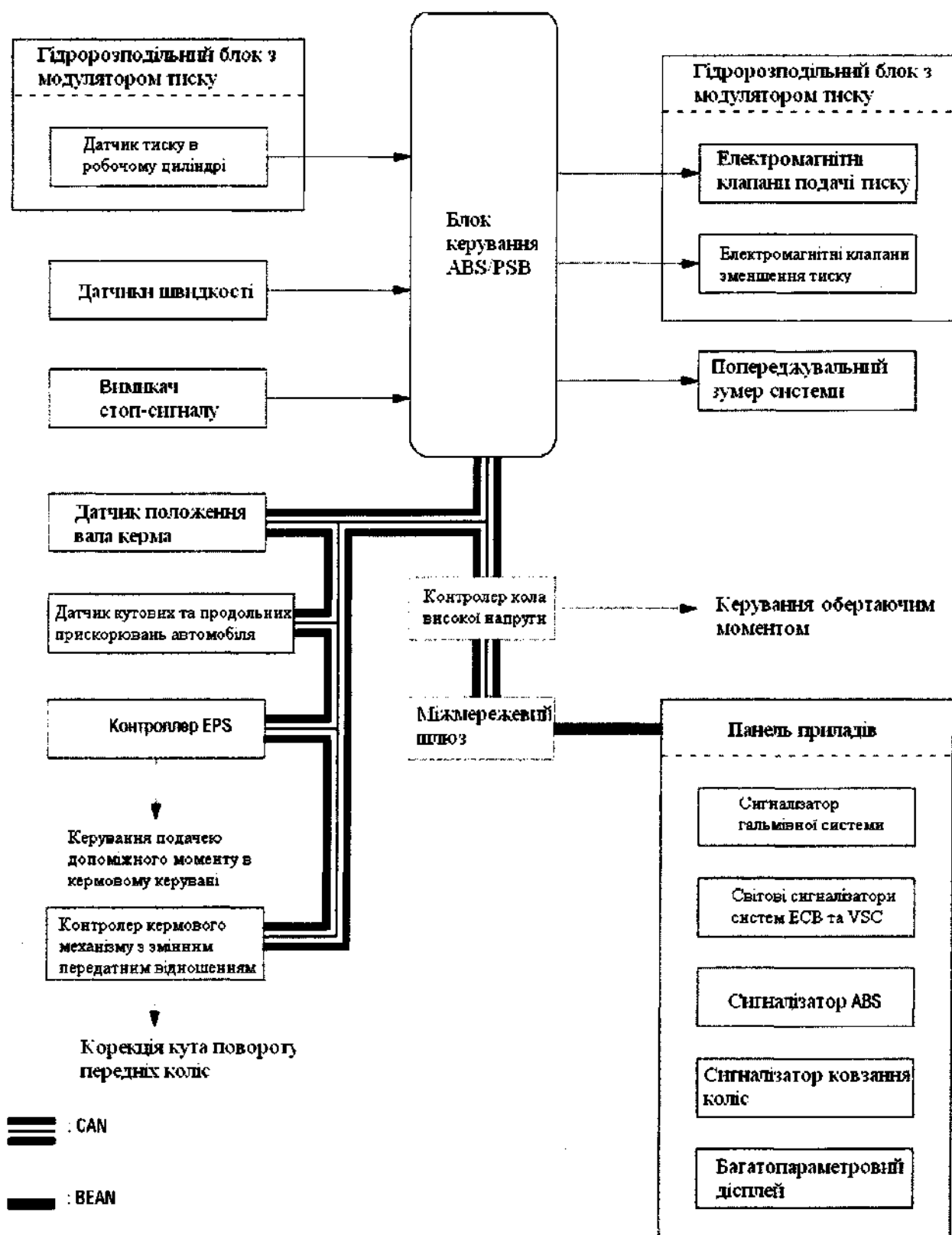


Рис. 4.24. Структурна схема системи підтримки курсової стійкості (VSC)

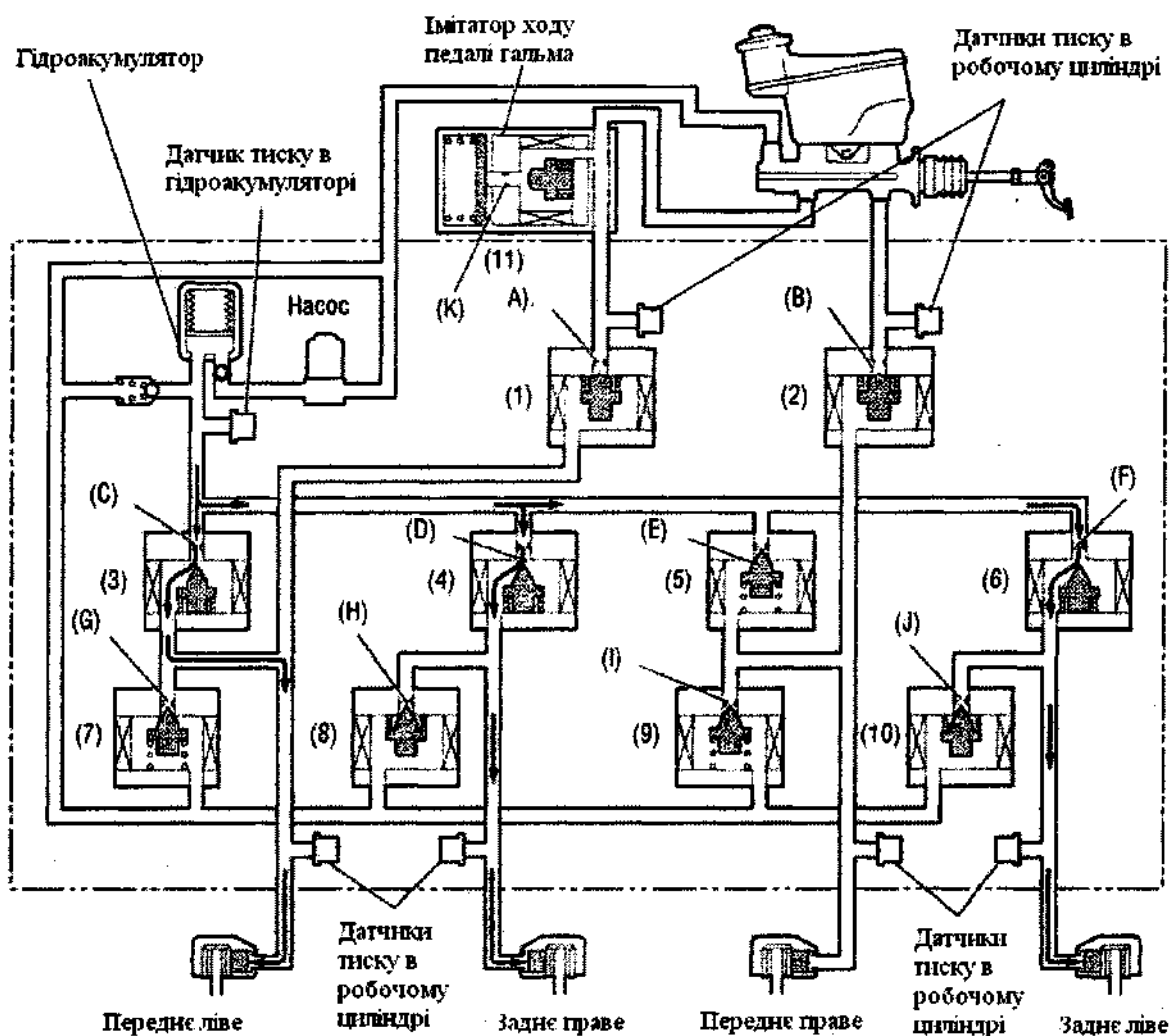


Рис. 4.25. Функціональна схема системи VSC при пригніченні заносу передніх коліс

Таблиця 4.3

**Робота компонентів системи VSC
при пригніченні заносу передніх коліс**

Компонент	Елект- ромагні- тний клапан N	Канал N	VSC не активована	VSC активована		
				Режим збільшення тиску	Режим стабілізації тиску	Режим зменшення тиску
1	2	3	4	5	6	7
Електро- магнітні клапани відсічення головного циліндра	(1)	(A)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
	(2)	(B)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7
Електро- магнітні клапани подачі тиску	(3)	(C)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(4)	(D)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(5)	(E)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(6)	(F)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
Електро- магнітні клапани змен- шення тиску	(7)	(G)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)
	(8)	(H)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)
	(9)	(I)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(10)	(J)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)
Відсічної клапан імітатора ходу педалі гальма	(11)	(K)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)

На функціональній схемі (рис. 4.26) зображений гідравлічний контур системи VSC у режимі збільшення тиску для запобігання заносу задніх коліс при виконанні правого повороту.

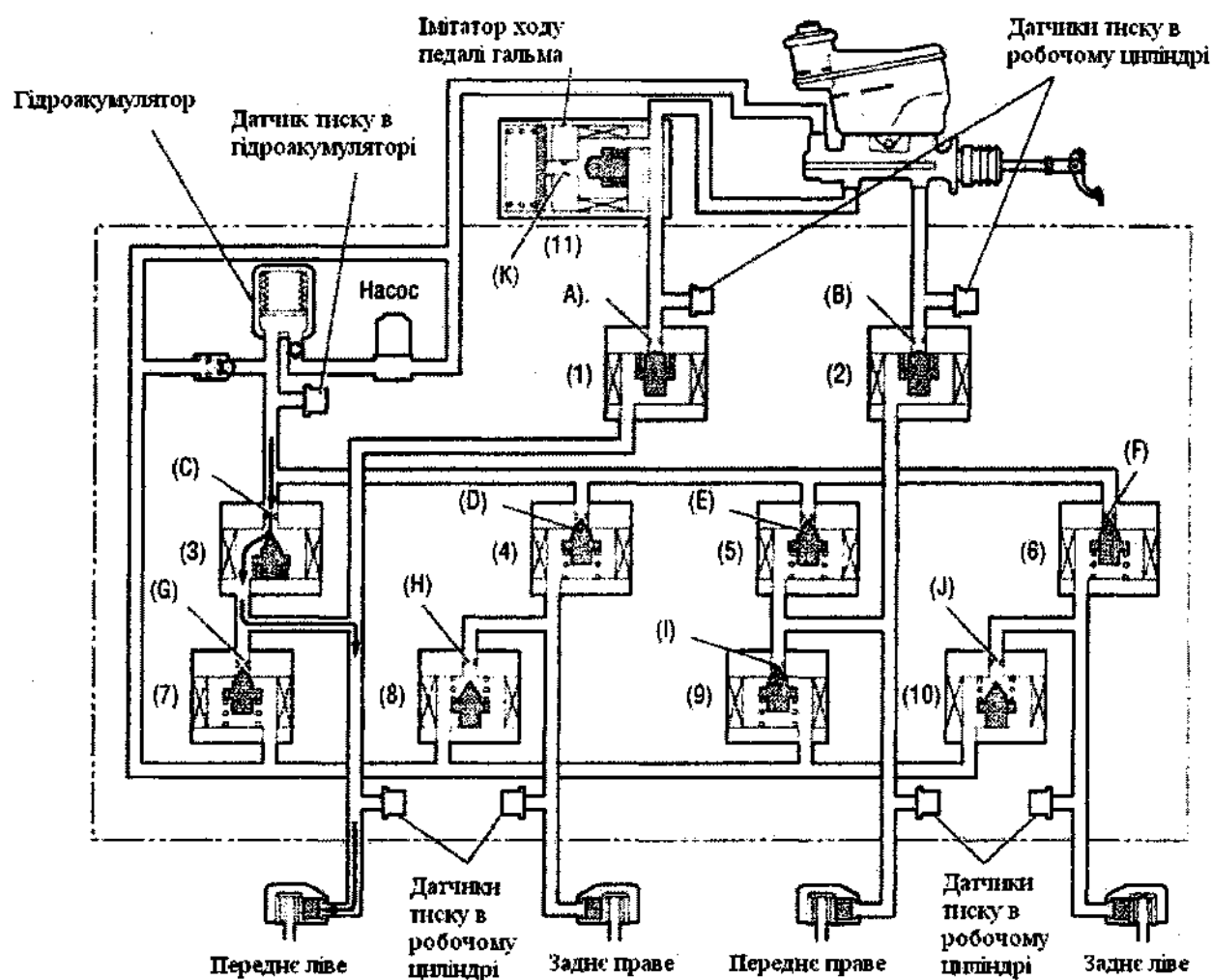


Рис. 4.26. Функціональна схема системи VSC при пригніченні заносу задніх коліс

Аналогічно пригніченню заносу передніх коліс, клапани збільшення й зменшення тиску вмикаються й вимикаються, як при роботі антиблокувальної / протибуксовальної системи. Тиск рідини безупинно регулюється відповідно до умов застосування гальмівної системи шляхом регулювання прохідного перерізу клапана.

У таблиці 4.4 наведена робота всіх компонентів системи підтримки курсової стійкості при пригніченні заносу задніх коліс при виконанні правого повороту на різних режимах роботи.

Таблиця 4.4

**Робота компонентів системи VSC
при пригніченні заносу задніх коліс**

Компонент	Елект- ромаг- нітний клапан N	Ка- нал N	VSC не активована	VSC активована		
				Режим збільшення тиску	Режим стабілізації тиску	Режим зменшення тиску
1	2	3	4	5	6	7
Електрома- гнітні клапани ві- дсічення головного циліндра	(1)	(A)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
	(2)	(B)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Закритий)
Електрома- гнітні кла- пани подачі тиску	(3)	(C)	Виключений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(4)	(D)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
				Включений (Відкритий наполовину)		
	(5)	(E)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
	(6)	(F)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)
				Включений (Відкритий наполовину)		
Електрома- гнітні клапани зменшення тиску	(7)	(G)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Включений (Закритий)	Включений (Відкритий наполовину)
	(8)	(H)	Виключений (Відкритий)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Виключений (Відкритий)
						Включений (Відкритий наполовину)
	(9)	(I)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)	Виключений (Закритий)

1	2	3	4	5	6	7
Електромагнітні клапани зменшення тиску	(10)	(J)	Виключений (Відкритий)	Виключений (Відкритий)	Включений (Закритий)	Виключений (Відкритий)
						Включений (Відкритий наполовину)
Відсічної клапан імітатора ходу педалі гальма	(11)	(K)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)	Включений (Відкритий)

4.7. Система зупинки скочування під ухил (НАС)

Систему зупинки скочування під ухил (НАС) допомагає водію здійснювати рух з місця на крутому або слизькому ухилі, нагору. Без системи НАС при перестановці ноги з педалі гальма на педаль акселератора автомобіль може почати скачуватися назад, затруднюючи початок руху (рис. 4.27, а). Для запобігання цього система НАС, короткочасно (не довше 5 секунд), пригальмовує всі колеса й утримує автомобіль від скочування назад (рис. 4.27, б).



Рис. 4.27. Ілюстрація роботи системи НАС

Якщо автомобіль не оснащений подібною системою, то водій повинен вміти швидко й точно переставити ногу з педалі гальма на педаль акселератора. Наявність системи НАС значно спрощує завдання водія, звільняючи його від необхідності маніпуляції педалями, оскільки автомобіль надійно втримується від скочування.

Система НАС починає працювати при наявності сукупності перерахованих нижче умов:

- селектор перебуває в положенні D або S;
- педаль гальма відпущена;
- блок керування виявив рух назад при підготовці руху вперед.

Розглянемо більш докладно роботу системи НАС, структурна схема якої представлена на рис. 4.28.

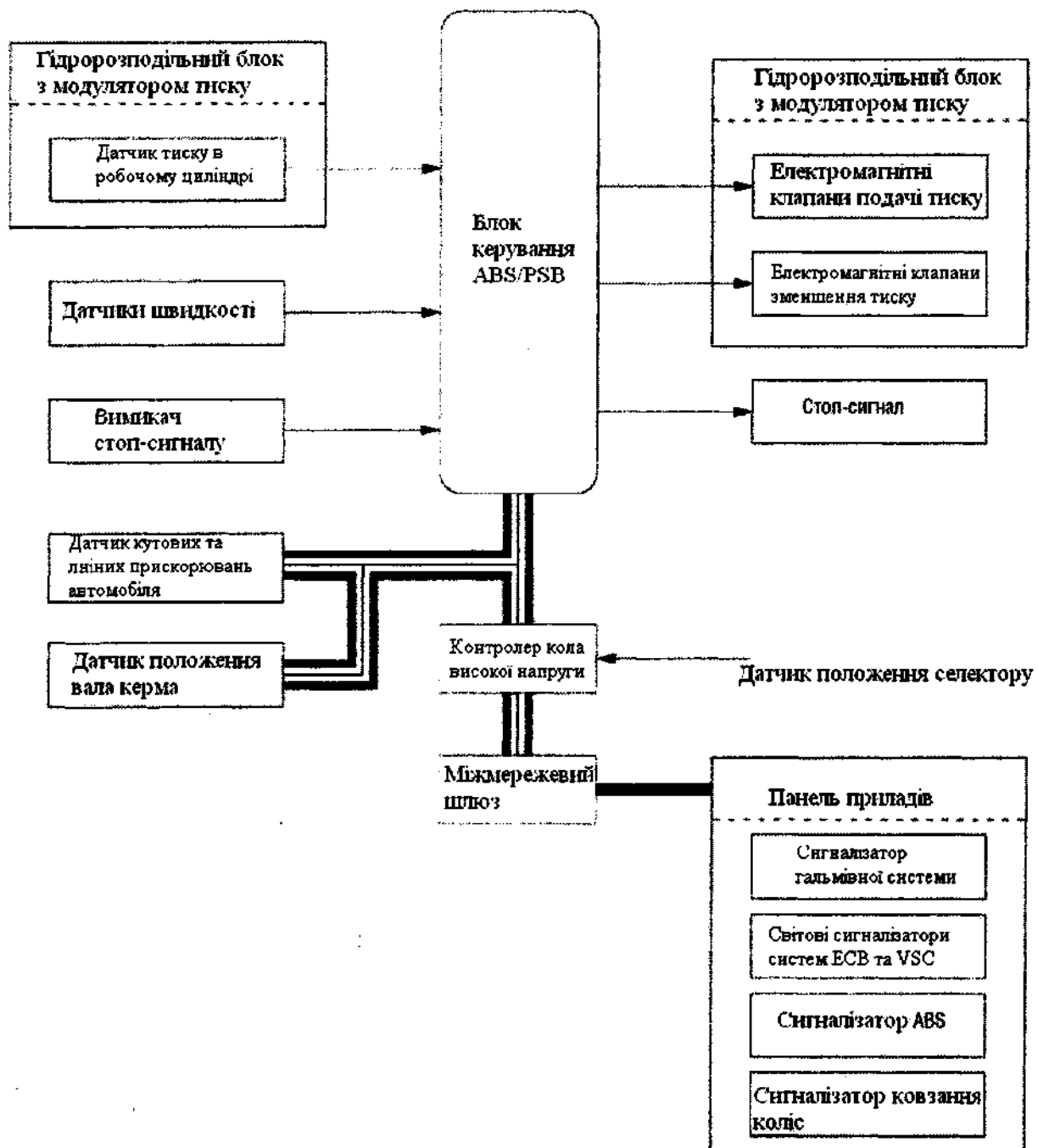


Рис. 4.28. Структурна схема системи НАС

Коли блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою, завдяки сигналам датчиків швидкості обертання коліс, датчика прискорення й датчика положення селектора, виявляє момент скочування автомобіля назад, блок керування починає регулювати тиск у робочих циліндрах у відповідності зі статусом кожного з коліс.

Під час роботи даного каналу керування починає миготіти сигналізатор ковзання на панелі приладів і вмикаються стоп-сигнали. Тиск гальмівної рідини, що нагнітається насосом модулятора, розподіляється по робочих циліндрах.

4.8. Система керування гальмівною системою при адаптивному круїз-контролі

Якщо адаптивний круїз-контроль реєструє скорочення дистанції до транспортного засобу що рухається попереду, то одного лише обмеження обертового моменту двигуна може виявитися недостатньо для потрібного вповільнення.

У цьому випадку, навіть якщо водій не натискає педаль гальма, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою активує модулятор тиску й починає гальмування для досягнення потрібної величини вповільнення. При цьому вмикаються стоп-сигнали.

Наприкінці гальмування блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою поступово зменшує величину гальмівного моменту до нуля, що забезпечує плавність вповільнення. Якщо виникає необхідність у подальшому вповільненні, то вмикається попереджувальний зумер системи VSC, що сповіщає водія про те, що потрібно нажати педаль гальма. Цей попереджувальний зумер використовується одночасно із зумером системи VSC. Ілюстрація принципу роботи гальмівної системи з адаптивним круїзом-контролем і використанням радіолокаційного далекоміра зображена на рис. 4.29.

Структурна схема гальмівної системи при включеному адаптивному круїз-контролі з радіолокаційним далекоміром представлена на рис. 4.30. Тиск гальмівної рідини, що нагнічується насосом модулятора, розподіляється по робочих циліндрах.

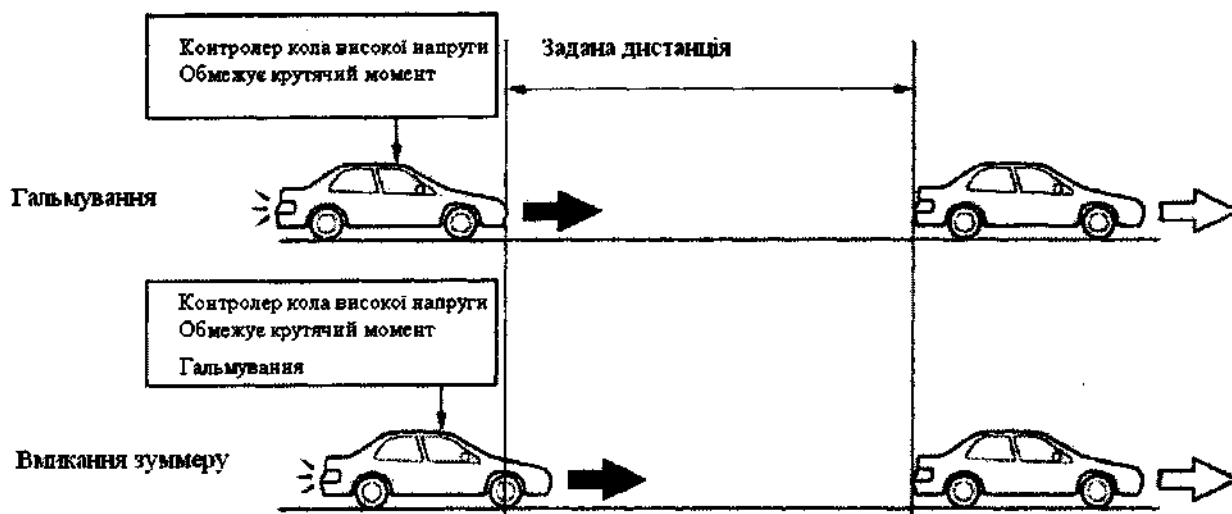


Рис. 4.29. Ілюстрація принципу роботи адаптивного круїз-контролю

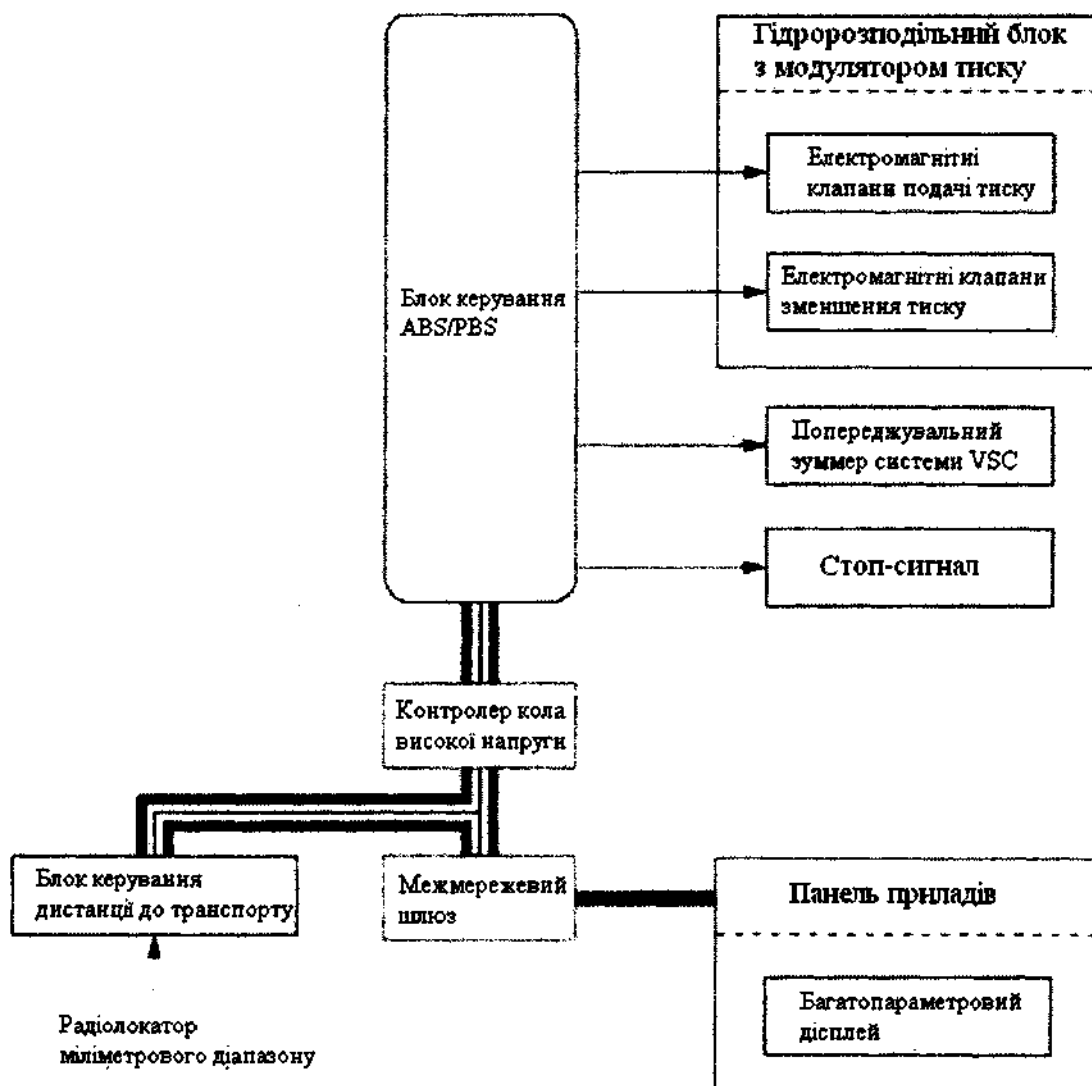


Рис. 4.30. Структурна схема гальмівної системи при включеному круїз-контролі з радіолокаційним далекоміром

4.9. Спільна робота антиблокувальної системи (ABS) з електронною системою розподілу гальмівного зусилля (EBD)

Структурна схема системи спільної роботи ABS з EBD представлена на рис. 4.31.

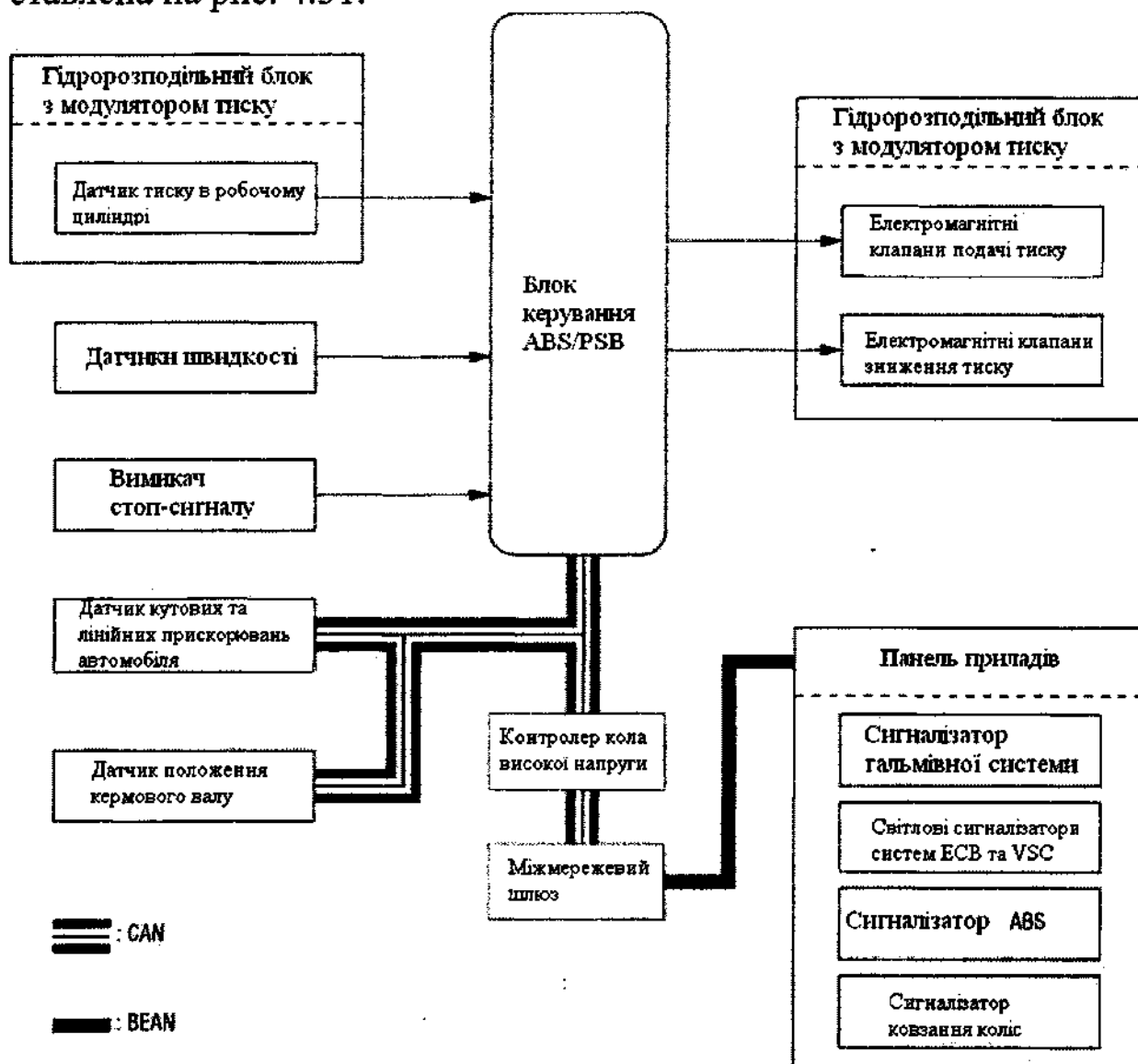


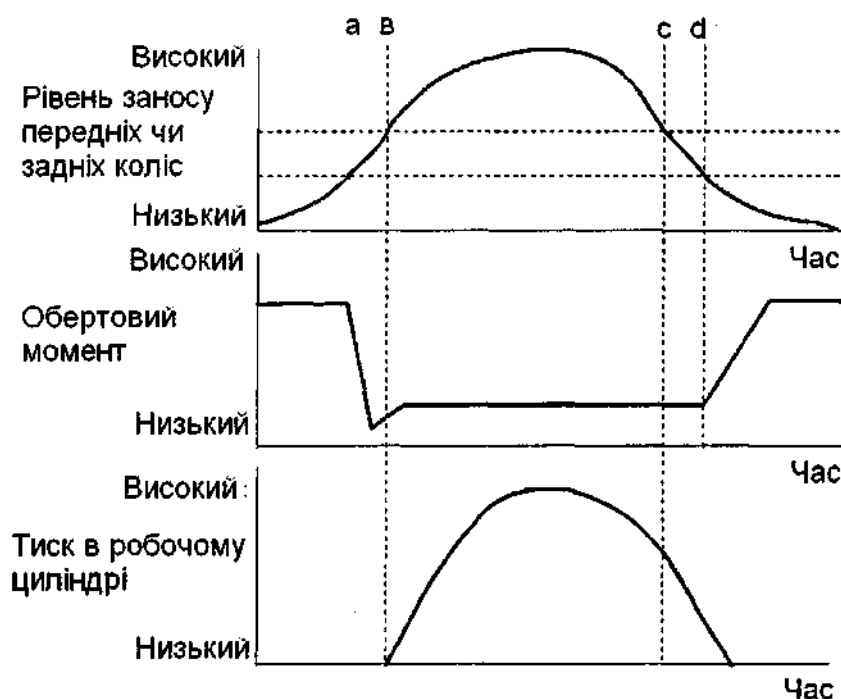
Рис. 4.31. Структурна схема системи спільної роботи ABS з EBD

На підставі сигналів від чотирьох датчиків швидкості обертання коліс, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою обчислює значення швидкості обертання й уповільнення швидкості обертання кожного з коліс і виявляє схильність коліс до ковзання.

Блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою, використовуючи клапани збільшення й зменшення тиску, роздільно регулює тиск у робочому циліндрі кожного колеса, діючи адекватно інтенсивності ковзання колеса, і використовуючи для цього три різних режими:

- режим зниження тиску;
- режим стабілізації тиску;
- режим підвищення тиску.

Сигнали від датчиків швидкості обертання коліс, датчиків кутового й лінійного прискорення й датчика положення рульового вала обробляються блоком керування антиблокувальною/ протибуксовальною системою для визначення положення автомобіля. У тому випадку, коли виникає загроза сильного заносу передніх або задніх коліс, або в результаті екстреного об'їзду перешкоди, або при виконанні повороту, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою вирішує, що динамічні параметри автомобіля вийшли за встановлені межі, він починає регулювати переданий на колеса обертовий момент і тиск у робочих циліндрах (рис. 4.32).



- а – Початок регулювання переданого обертового моменту;
- в – Початок регулювання моменту гальмування;
- с – Завершення регулювання моменту гальмування;
- д – Завершення регулювання переданого обертового моменту.

Рис. 4.32. Ілюстрація тиску у робочих циліндрах у режимі заносу

4.10. Система керування гібридним силовим агрегатом

У табл. 4.5 перераховані основні компоненти системи керування гібридним силовим агрегатом автомобіля GS450h.

Таблиця 4.5

**Основні компоненти системи керування
гібридним силовим агрегатом автомобіля GS450h**

Найменування	Опис
1	2
Контролер кола високої напруги	По положенню селектора, педалі акселератора і по значенню швидкості руху контролер кола високої напруги обчислює потрібне значення обертового моменту для руху транспортного засобу. Контролер кола високої напруги створює сумарний обертовий момент, найкращим чином поєднуючи можливості електричних машин MG1, MG2 і двигуна внутрішнього згорання.
	Обертовий момент двигуна внутрішнього згорання обчислюється на підставі дій водія і стану автомобіля. Для створення необхідного обертового моменту контролер кола високої напруги направляє дані на блок керування ДВЗ.
	Контролер кола високої напруги відстежує рівень зарядки високовольтної батареї, а також температуру батареї і електричних машин MG1 і MG2.
	Контролер кола високої напруги відстежує стан високовольтної батареї і керує вентилятором системи охолодження батареї, щоб підтримувати її температуру на потрібному рівні.
	Коли селектор знаходиться у стані N, контролер кола високої напруги перериває силове коло електричних машин MG1 і MG2.

1	2
Контролер кола високої напруги	Якщо ведучі колеса втрачають зчеплення з дорогою (буксують), контролер кола високої напруги обмежує обертовий момент MG2, щоб не перенавантажувати планетарний редуктор і не примушувати генератор MG1 виробляти зайву електроенергію.
	Для захисту кола від високої напруги і для надійного відключення кола контролер кола високої напруги використовує три реле SMR.
	Контролер кола високої напруги визначає рівень зарядки високовольтної батареї по значенню сили струму зарядки і розрядки батареї.
	За допомогою датчика температури високовольтної батареї контролер кола високої напруги відстежує її температуру і керує вентилятором системи охолодження батареї.
	Контролер кола високої напруги керує зарядкою допоміжної батареї відповідно до її температури, використовуючи перетворювач постійної напруги.
Блок керування двигуном внутрішнього згоряння	Від контролера кола високої напруги блок керування двигуном внутрішнього згоряння одержує запит на необхідну частоту обертання колінчастого валу і значення обертового моменту і виконує керування системою ETCS-i, системою WT-i, регулює величину циклової подачі палива і момент випередження запалю-
Керування живленням електричних машин MG1 і MG2	Електричний генератор MG1, що приводиться двигуном внутрішнього згоряння, виробляє струм високої напруги для живлення електричного двигуна MG2 і для зарядки високовольтної батареї. Крім того генератор MG1 використовується як стартер для двигуна внутрішнього згоряння.

1	2
Керування живленням електричних машин MG1 і MG2	Електричний двигун MG2 одержує живлення від генератора MG1 або від високовольтної батареї і призначений для приводу ведучих коліс. Крім того електрична машина MG2 виробляє енергію для зарядки високовольтної батареї в режимі рекуперативного гальмування або в режимі руху накатом.
	Датчики швидкості обертання визначають швидкість обертання і кутове положення роторів електричних машин MG1 і MG2 і передають ці дані на контролер кола високої напруги через контролер електричних машин.
	Датчики температури MG1 і MG2 передають дані про їх температуру на контролер кола високої напруги.
Перетворювач напруги	Перетворювач напруги перетворює постійну напругу високовольтної батареї в змінну напругу для живлення електричних машин MG1 і MG2 або змінну напругу в постійну для зарядки батареї. Перетворювачем напруги керує контролер кола високої напруги через контролер електричних машин MG.
	Контролер кола високої напруги, через контролер електричних машин MG, керує силовими транзисторами для включення фаз А, В, і С електричних машин MG1 і MG2.
	При отриманні сигналу про перегрів перетворювача напруги або про збій напруги контролер кола високої напруги вимикає перетворювач напруги.
	Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин MG, підвищує напругу високовольтної акумуляторної батареї з 288 В до 650 В.

1	2
Перетворювач напруги	Перетворювач напруги перетворить змінну напругу, що виробляється MG1 або MG2, у постійну напругу. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин MG, знижує напругу з 650 В до 288 В (для заряду високовольної батареї).
Перетворювач постійної напруги	Знижує постійну напругу 288 В до 12 В, щоб забезпечити живлення бортового електричного обладнання автомобіля і для зарядження допоміжної акумуляторної батареї (12 В). Перетворювач підтримує незмінність напруги допоміжної акумуляторної батареї.
Блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою (ABS)	Під час гальмування блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою обчислює значення необхідного рекуперативного гальмівного моменту і передає це значення на контролер кола високої напруги. Отримавши цей сигнал, контролер кола високої напруги передає на блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою дійсне значення рекуперативного гальмівного моменту. На підставі набутого значення блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою обчислює необхідне значення тиску в робочих циліндрах і приводить в дію гідравлічну гальмівну систему.
Датчик стану високовольної батареї	Датчик відстежує стан високовольної батареї і вентилятора охолодження батареї (ці данні потрібні контролеру кола високої напруги для керування вентилятором). Датчик стану високовольної батареї передає ці данні на контролер кола високої напруги.

1	2
Механізм керування коробкою передач	Контролер кола високої напруги одержує від датчика положення селектора сигнал положення ("P", "R", "N", "D", або "S") і відповідно до одержаного сигналу керує роботою електричних машин MG1, MG2, двигуна внутрішнього згоряння і гібридною коробкою передач для реалізації необхідного режиму руху, визначеного положенням селектора.
Перемикач режимів роботи коробки передач	Переключає режим керування електро машинами MG1, MG2 і двигуном внутрішнього згоряння відповідно до одного з вибраних режимів: нормальний спортивний або зимовий.
Система керування при зіткненні	Якщо під час зіткнення контролер кола високої напруги отримає від блоку датчиків подушок безпеки сигнал розкриття подушок безпеки, то він відключить головне реле системи (SMR), щоб повністю припинити подачу жив-
Робота контролю круїзу	Коли блок керування контролем круїзу, який знаходиться в контролері кола високої напруги, одержує сигнал вимикача контролю круїзу, він постійно визначає оптимальне поєднання обертових моментів двигуна внутрішнього згоряння і електричних машин MG1 і MG2, щоб підтримувати вибраний водієм режим руху автомобіля.
Робота адаптивного контролю круїзу з радіолокаційним далекоміром	Коли блок керування контролем круїзу, який знаходиться в контролері кола високої напруги, одержує сигнал вимикача контролю круїзу, сигнал далекоміра, радіолокації, і контролера дистанції. Блок керування контролем круїзу постійно визначає оптимальне поєднання обертових моментів двигуна внутрішнього згоряння і електричних машин MG1 і MG2, щоб підтримувати вибраний водієм режим руху автомобіля.

Продовження табл. 4.5

1	2
Індикатори і попереджувальні сигналізатори	Система сповіщає водія про статус автомобіля і про виникаючі несправності постійним включенням або миганням попереджувальних сигналізаторів.
Діагностика	При виявленні несправності контролер кола високої напруги проводить діагностику і запам'ятовує пов'язані з несправністю параметри.
Робота в аварійному режимі	При виявленні несправності контролер кола високої напруги вимикає або переводить виконавчий орган або електронний блок в аварійний режим роботи поданим, записаним в пам'ять.

На приведеній схемі (рис. 4.33) показана конфігурація системи керування гібридного силового агрегату THS II гібридного автомобіля GS450h.

Розглянемо більш докладно роботу контролера кола високої напруги. Від датчика положення педалі акселератора контролер кола високої напруги одержує данні про те, наскільки натиснута педаль акселератора. Через контролер електричних машин контролер кола високої напруги одержує сигнали від датчиків швидкості обертання електричних машин MG1 і MG2. Від датчика положення селектора контролер кола високої напруги одержує сигнал положення селектора. На підставі перерахованих вище даних контролер кола високої напруги визначає їздовий статус автомобіля і здійснює регулювання моментів двигуна внутрішнього згоряння і електричних машин MG1 і MG2. Регулювання значень обертового моменту і швидкості обертання ведеться таким образом щоб витрата палива і викид токсичних речовин була зведена до мінімуму.

Контролер кола високої напруги обчислює потрібну потужність двигуна внутрішнього згоряння на підставі потрібної потужності руху з урахуванням рівня зарядки батареї і її температури. Різниця між потрібною потужністю руху та потужністю ДВЗ і є потужність електричного двигуна MG2 (рис. 4.34).

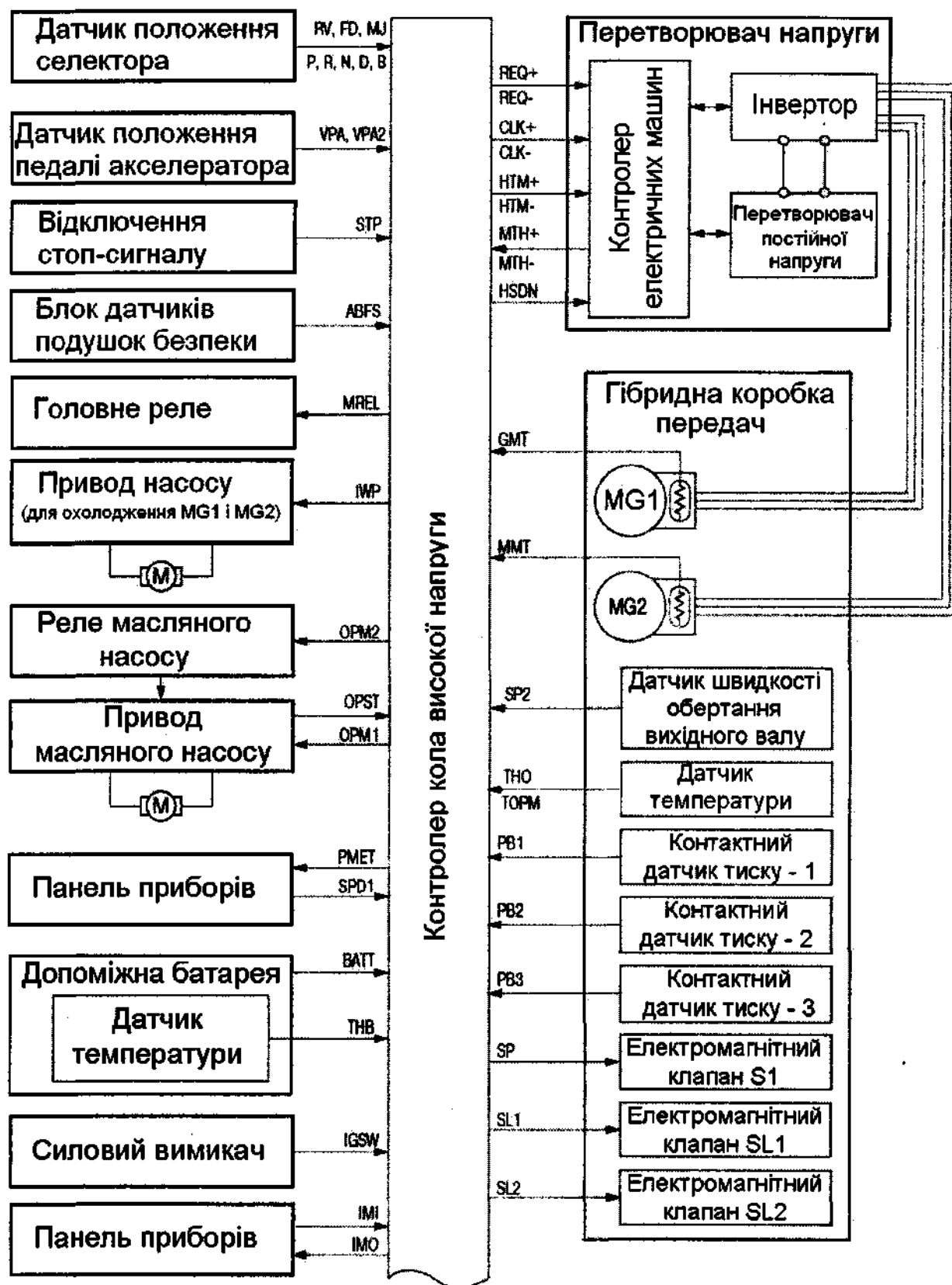


Рис. 4.33.1. Конфігурація системи керування гібридного силового агрегату THS II нового автомобіля GS450h

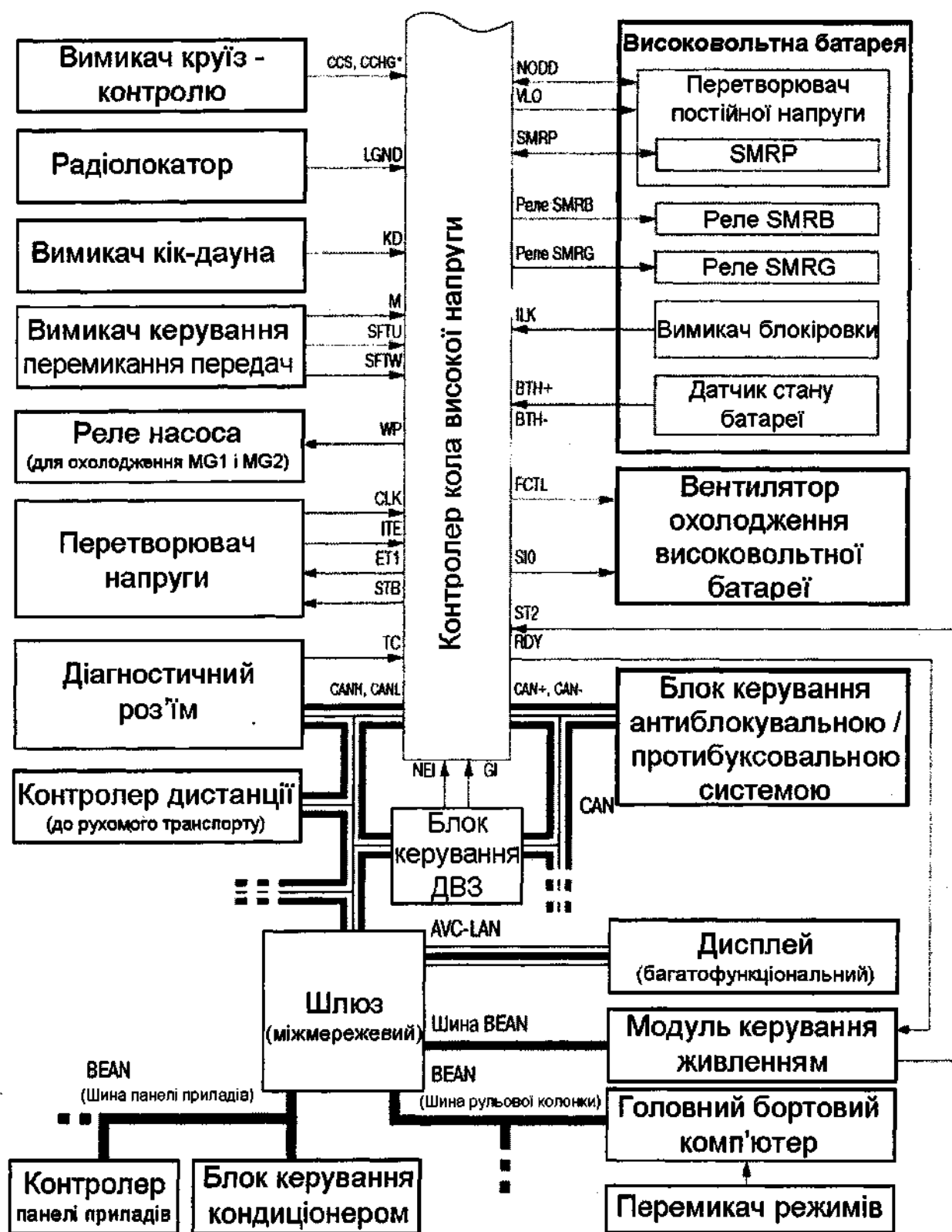


Рис. 4.33.2. Конфігурація системи керування гібридного силового агрегату THS II нового автомобіля GS450h

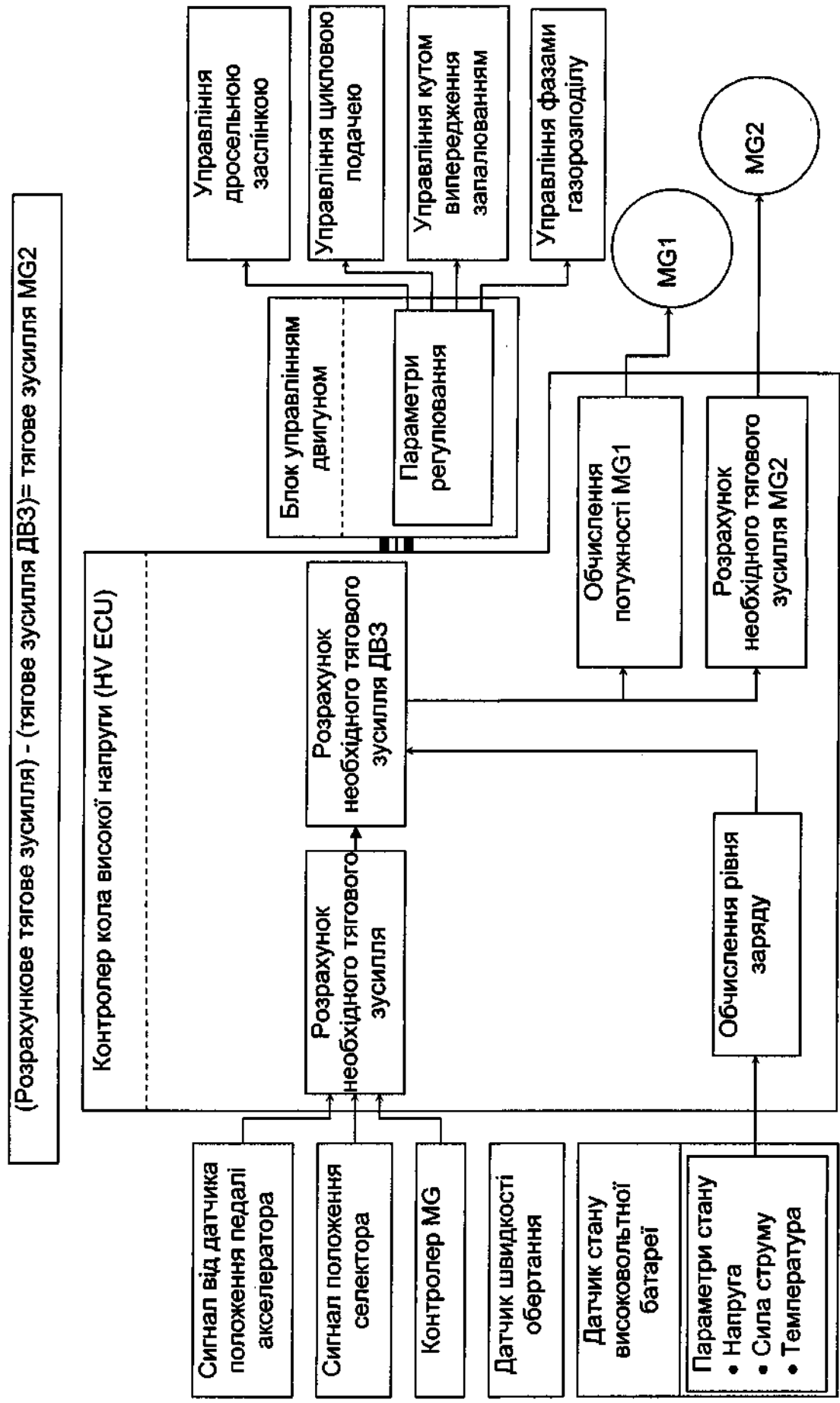


Рис. 4.34. Розрахунок тягового зусилля електричного двигуна MG2

Для отримання потрібної потужності контролер кола високої напруги, через блок керування двигуном, відповідним чином здійснює регулювання положення дросельної заслінки (ETCS-i), регулювання циклової подачі, регулювання кута випередження запалювання і регулювання фаз газорозподілу (WT-i). Крім того, контролер кола високої напруги здійснює керування роботою електричних машин MG1 і MG2 для отримання необхідної потужності тягового двигуна MG2.

Структурна схеми взаємозв'язків контролера кола високої напруги з інформаційно-вимірювальним комплексом автомобіля GS450h наведено на рис. 4.35.

Контролер кола високої напруги веде постійне спостереження за рівнем зарядки (SOC) високовольтної батареї. Контролер кола високої напруги визначає рівень зарядки (SOC) високовольтної батареї по значенню сили струму зарядки і розрядки батареї.

У процесі руху автомобіля, високовольтна акумуляторна батарея проходить цикли зарядки і розрядки, оскільки електрична машина MG2 розряджає батарею при розгоні, а при рекуперативному гальмуванні заряджає батарею. Контролер кола високої напруги обчислює рівень зарядки/розрядки батареї по сигналу датчика струму. Контролер кола високої напруги здійснює керування зарядкою і розрядкою високовольтної акумуляторної батареї, так щоб рівень зарядки постійно мав задану величину (рис. 4.36).

Коли рівень зарядки батареї падає нижче за допустимий рівень, контролер кола високої напруги збільшує потужність двигуна внутрішнього згоряння для приведення в дію генератора MG1, який заряджує акумуляторну батарею. Крім того електрична машина MG1 використовується як стартер. Після запуску ДВЗ розвиває додаткову потужність, для того, щоб генератор MG1 міг здійснити зарядку батареї.

Якщо рівень зарядки батареї нижчий за норму, або температура високовольтної батареї і електричних машин MG1 або MG2 вище за допустиму, то контролер кола високої напруги обмежує формування тягового зусилля за рахунок перерахованих джерел до відновлення нормальних умов.

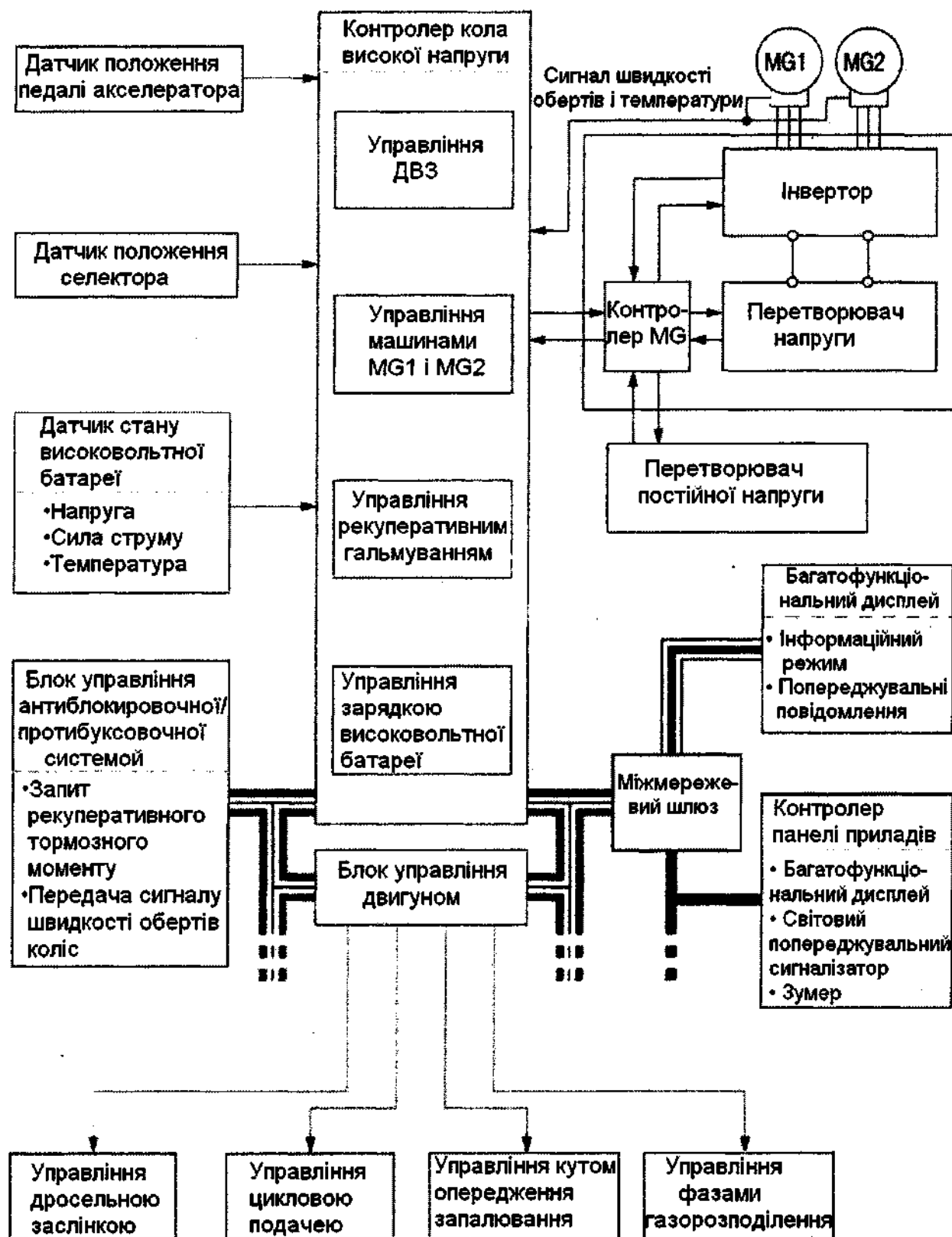


Рис. 4.35. Схема взаємозв'язків контролера кола високої напруги з інформаційно-вимірвальним комплексом автомобіля GS450h

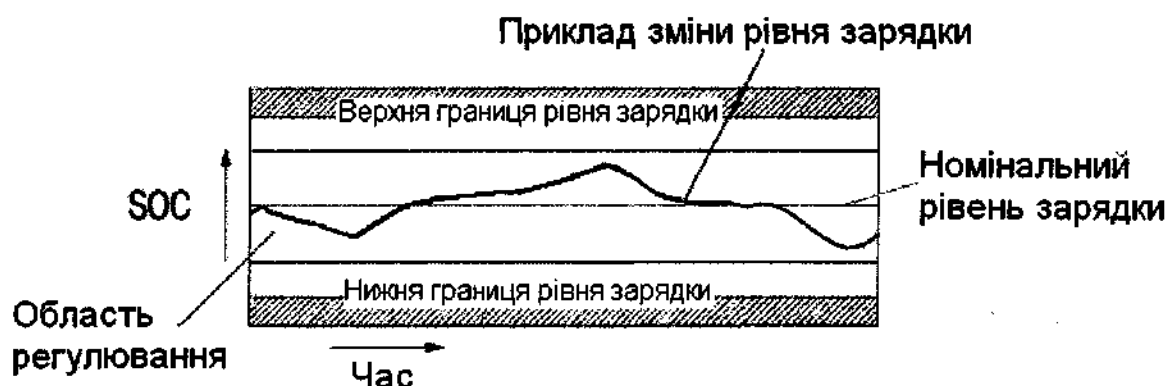


Рис. 4.36. Приклад керування зарядкою і розрядкою високовольтної батареї

Контролер кола високої напруги керує відключенням живлення високовольтних кіл. Коли селектор ставиться в положення "N" електричні машини MG1 і MG2 вимикаються за допомогою головного реле системи (SMR). Електричне відключення електричних машин MG1 і MG2 необхідно тому що тяговий електричний двигун MG2 механічно пов'язаний із задніми колесами автомобіля.

Головне реле системи (SMR) призначене для включення і виключення живлення високовольтного кола по команді контролера кола високої напруги.

Всього використовується три реле: реле SMRB в «позитивному» колі і два реле, SMRP і SMRG, в «негативному» колі. Одне з реле (SMRP) в «негативному» колі є реле транзисторного типу з вбудованим понижуючим перетворювачем постійного струму Реле SMRB і SMRG являються реле контактного типу і установлені в монтажній коробці блоку високовольтної батареї. Схема підключення реле наведено на рис. 4.37.

Розглянемо для початку процес включення живлення. В першу чергу контролер кола високої напруги включає реле SMRB і потім - реле SMRP. Після включення реле SMRG контролер кола високої напруги вимикає реле SMRP (рис. 4.38). Оскільки початковий струм проходить через реле транзисторного типу, контакти решти реле захищені від підгоряння, яке може бути викликане первинним кидком струму.

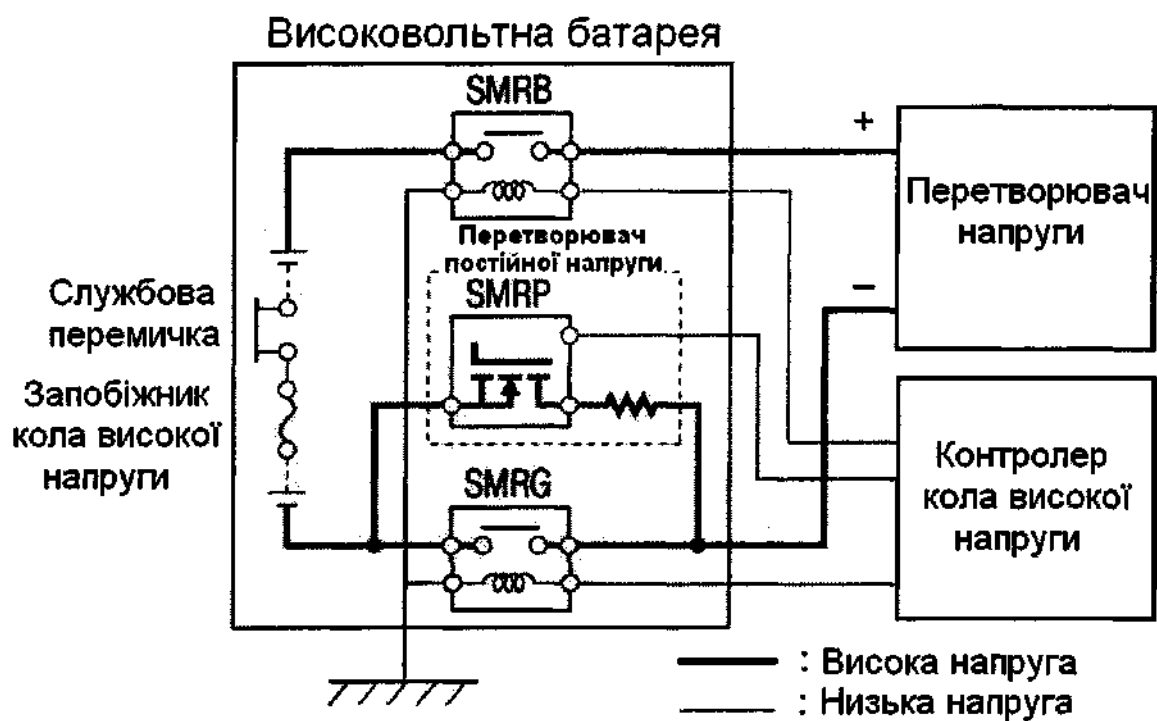


Рис. 4.37. Схема підключення головного реле системи

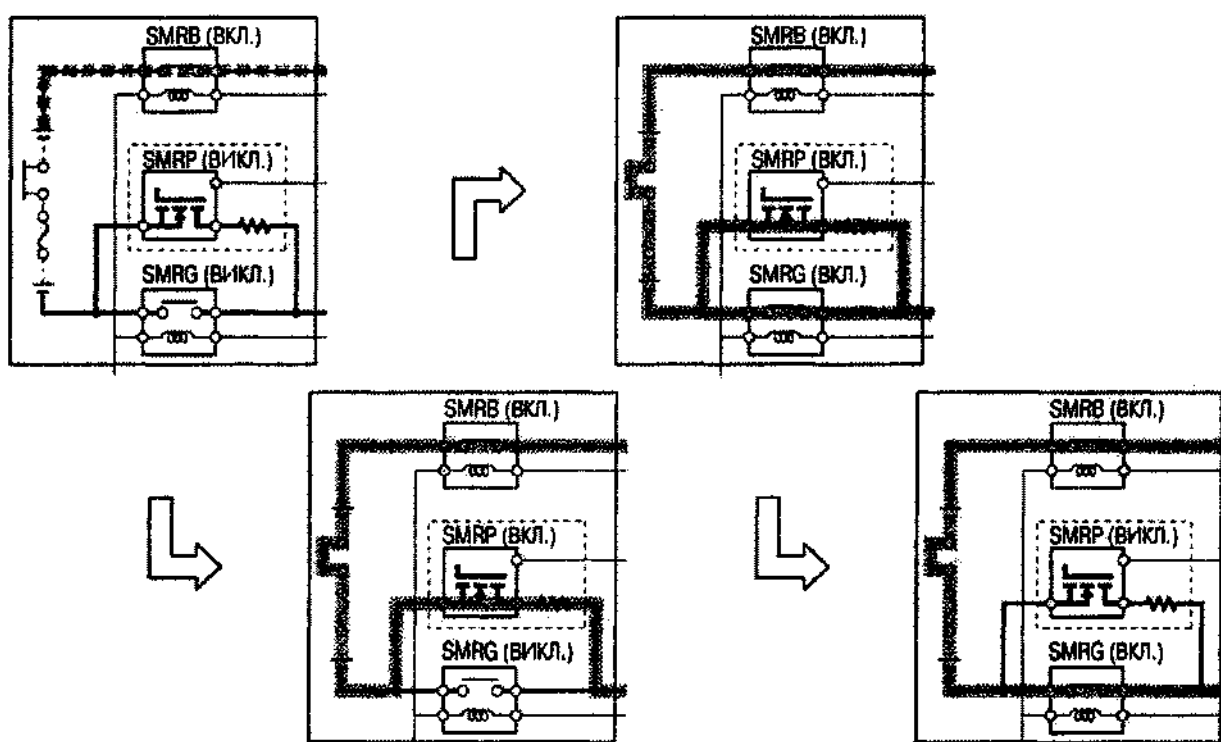


Рис. 4.38. Порядок включення живлення
головним реле системи

Розглянемо далі виключення живлення. В першу чергу контролер кола високої напруги вимикає реле SMRG. Після перевірки відсутності залипання контактів реле SMRG відбувається виключення реле SMRB. Після цього контролер кола високої напруги включає реле SMRP, щоб перевірити відсутність залипання контактів реле SMRB. Потім вимикається реле SMRP. (рис. 4.39)

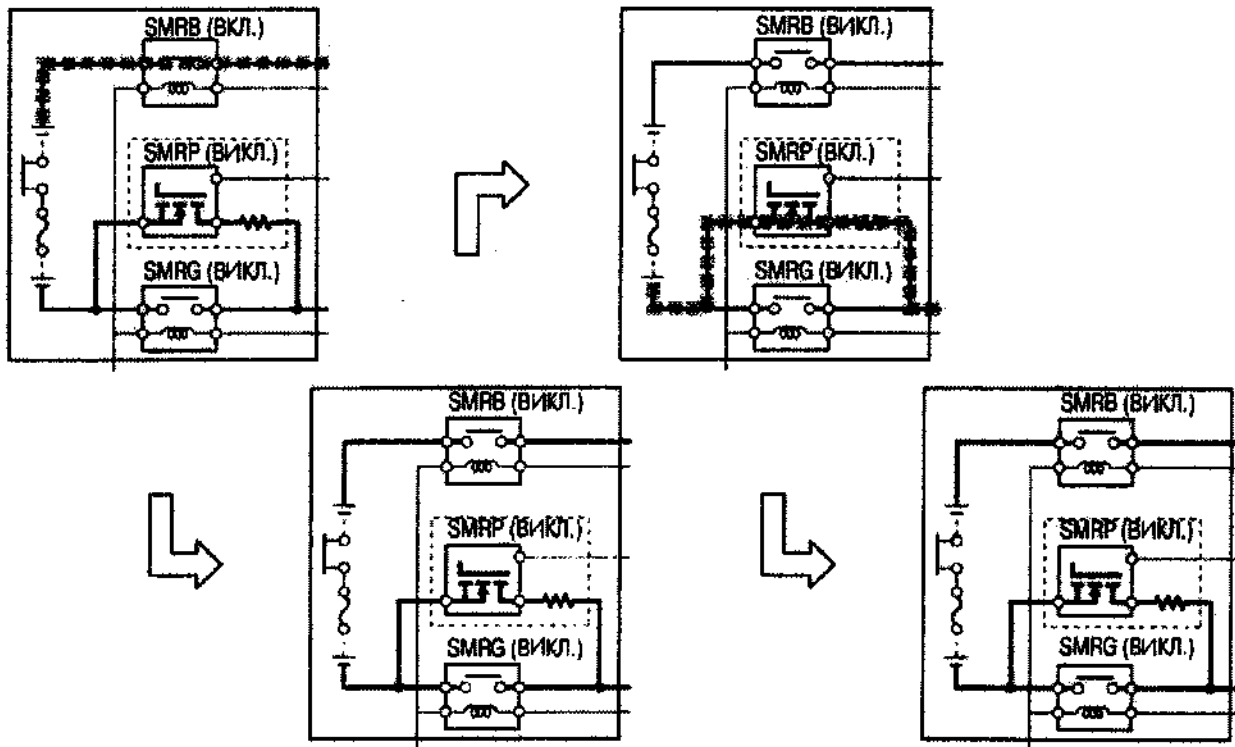


Рис. 4.39. Порядок виключення живлення головним реле системи

Якщо контролер кола високої напруги виявить залипання контактів реле, то він включить загальний попереджувальний сигналізатор і виведе на багатопараметровий дисплей повідомлення "CHECK HYBRID SYSTEM", записавши в пам'ять код несправності. При залипанні контактів реле SMRG в пам'яті записується код DTC P0AA4-232. При залипанні контактів реле SMRB в пам'яті записується код DTC P0AA1 -231. При залипанні контактів обох реле в пам'яті записується код DTC P0AA1 -233.

Контролер кола високої напруги керує вентилятором охолодження високовольної батареї. За підвищенням температури батареї контролер кола високої напруги стежить за

допомогою 4 датчиків температури. Щоб підтримувати температуру батареї в допустимих межах, контролер кола високої напруги, за допомогою широтно-імпульсної модуляції, регулює швидкість обертання вентилятора.

Якщо під час охолодження салону системою кондиціонування температура високовольтної батареї знаходиться в допустимих межах, то контролер кола високої напруги вимикає вентилятор охолодження батареї або переводить його в режим низької швидкості обертання. Це робиться, для того, щоб віддати пріоритет охолодженню салону, з якого повітря поступає також і на охолодження батареї.

Схема системи керування вентилятором охолодження високовольтної батареї наведено на рис. 4.40.

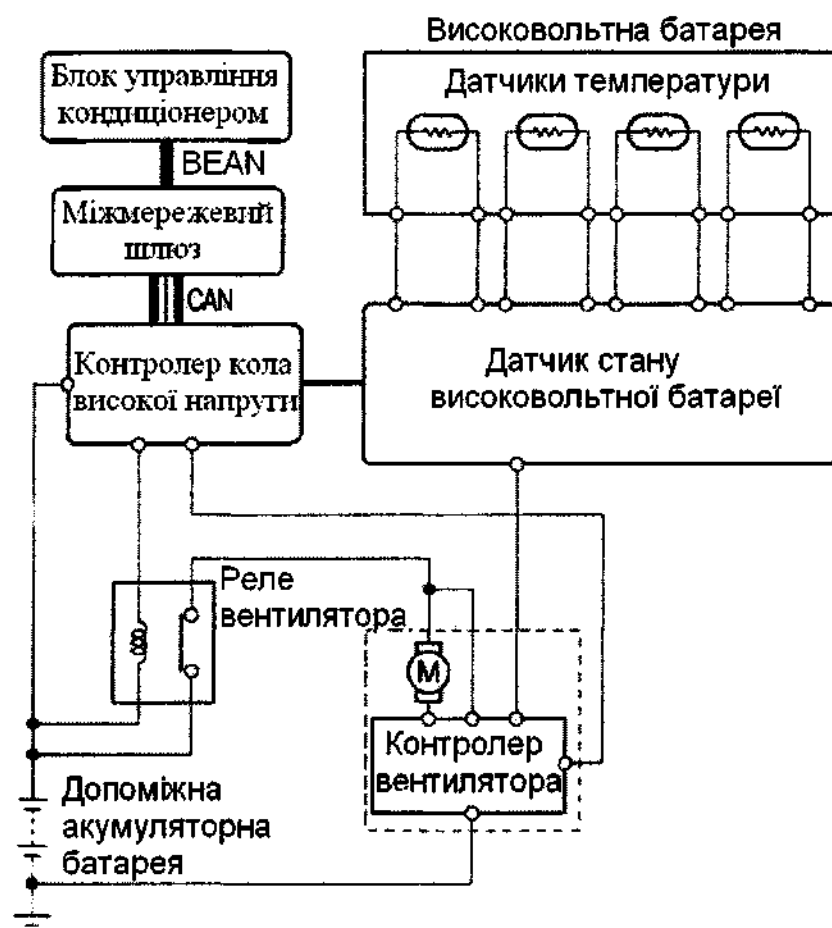


Рис. 4.40. Схема системи керування вентилятором охолодження високовольтної батареї

Контролер кола високої напруги, за допомогою перетворювача постійної напруги, керує зарядкою допоміжної акумуляторної батареї відповідно до її температури.

Датчик температури акумуляторної батареї встановлений в батареї. Внутрішній опір акумуляторної батареї і її здатність приймати струм зарядки залежить від температури електроліту. Дуже низька або висока температура електроліту веде до підвищення внутрішнього опору батареї і до прискореного виходу з ладу. Щоб цього не відбувалося, передбачено використання датчика температури, що змінює свій опір, як показано на графіку наведеному на рис. 4.41.

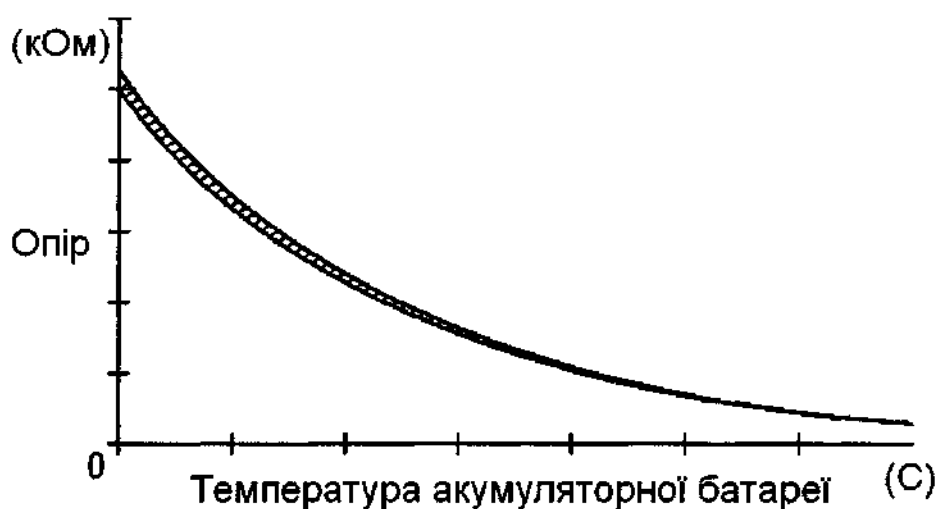


Рис. 4.41. Залежність опору датчика температури від температури

Контролер кола високої напруги керує блоком керування двигуном внутрішнього згоряння. Від контролера кола високої напруги блок керування двигуном внутрішнього згоряння набуває значення потрібних швидкості обертання колінчастого валу і обертаючого моменту. Блок керування двигуном реалізує вимоги, що поступили, через керування дросельною заслінкою, цикловою подачею, моментом випередження запалювання і фазами газорозподілу.

Про поточні параметри двигуна блок керування повідомляє контролеру кола високої напруги.

Одержавши від контролера кола високої напруги запит на виключення двигуна, блок керування зупиняє його.

При виникненні несправності блок керування двигуном, по вказівці контролера кола високої напруги, включає світловий сигналізатор системи само діагностики.

Схема системи керування двигуном внутрішнього згоряння наведено на рис. 4.42.

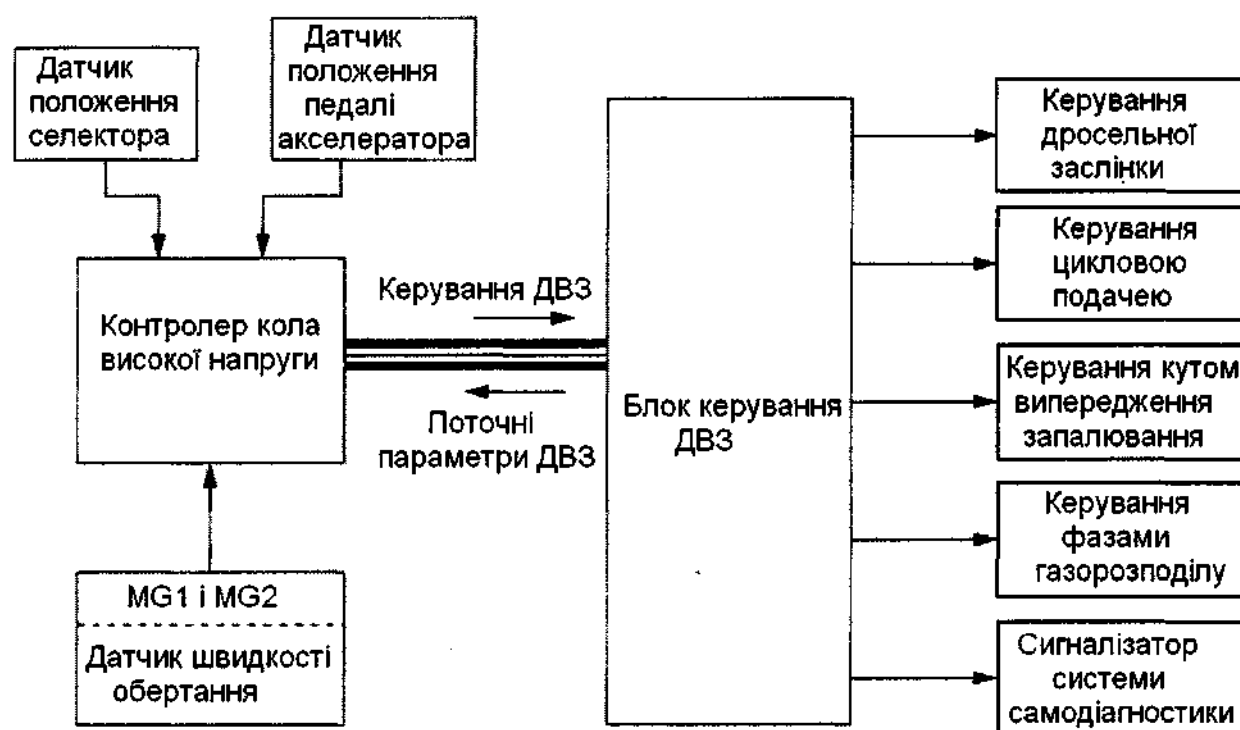
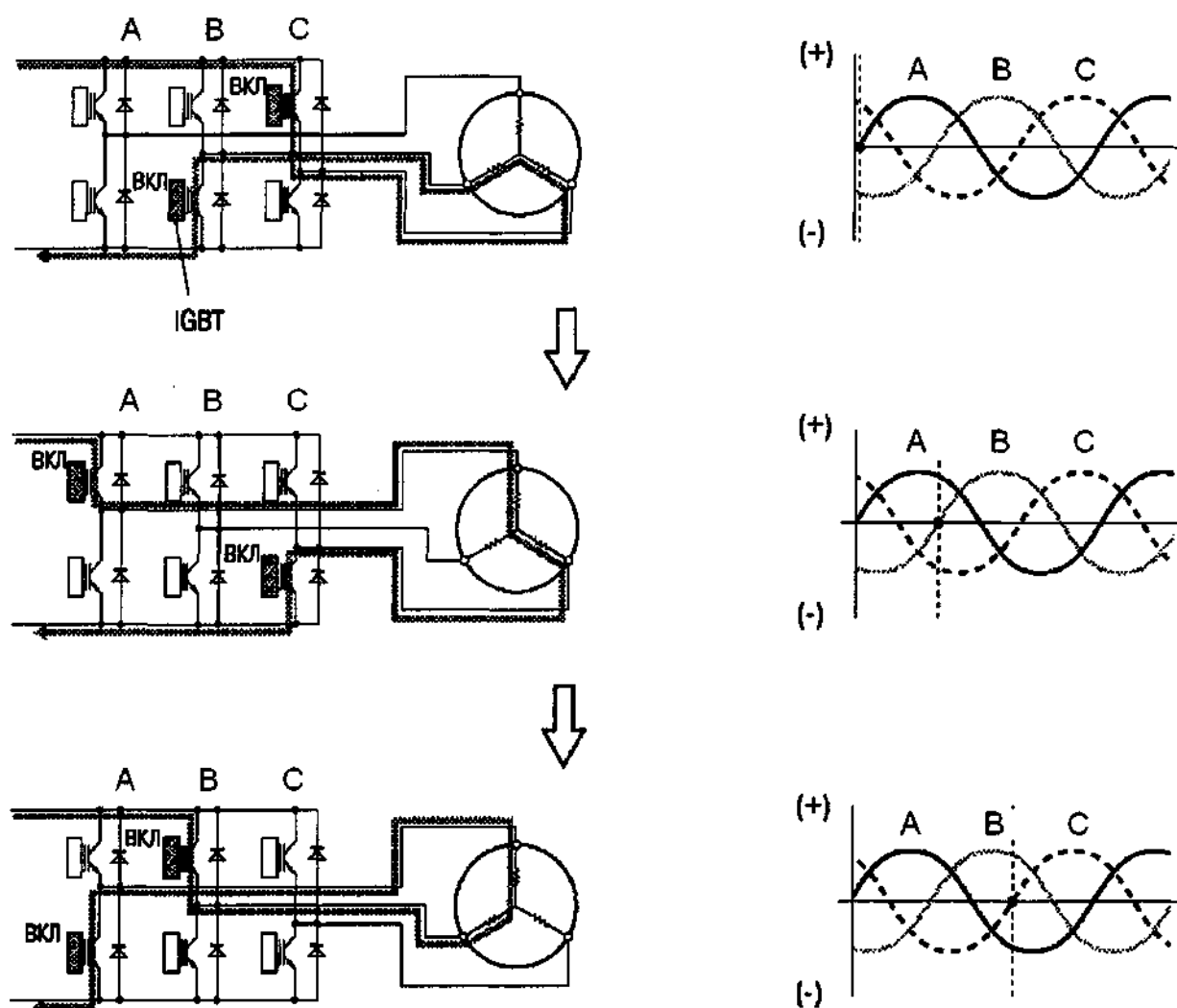


Рис. 4.42. Схема системи керування ДВЗ

Контролер кола високої напруги керує живленням електричних машин MG1 і MG2. Електричний генератор MG1, який приводиться двигуном внутрішнього згоряння, виробляє струм високої напруги для живлення електричного двигуна MG2 і для зарядки високовольтної акумуляторної батареї. Крім того електрична машина MG1 використовується як стартер для двигуна внутрішнього згоряння.

Тяговий електричний двигун MG2 одержує живлення від генератора MG1 або від високовольтної батареї і призначений для приводу ведучих коліс. Крім того електрична машина MG2 виробляє енергію для зарядки високовольтної батареї в режимі рекуперативного гальмування або в режимі руху накатом.

Розглянемо для початку робота електричної машини в режимі двигуна. На рис. 4.43 показаний принцип керування роботою електричної машини у тяговому режимі.



152

Біполярні транзистори, розташовані в інтелектуальному силовому блоці, включають і виключають живлення трьох фаз генератора. Щоб створити тягове зусилля потрібної величини, контролер електричних машин включає і виключає транзистори, регулюючи цим швидкість обертання двигуна.

Розглянемо далі роботу електричної машини в режимі генератора. На рис. 4.44 показаний принцип керування електричної машини в режимі генератора. Струм, який послідовно генерується в кожній з трьох фаз генератора, що приводиться в рух колесами автомобіля, використовується для зарядки високовольтної батареї.

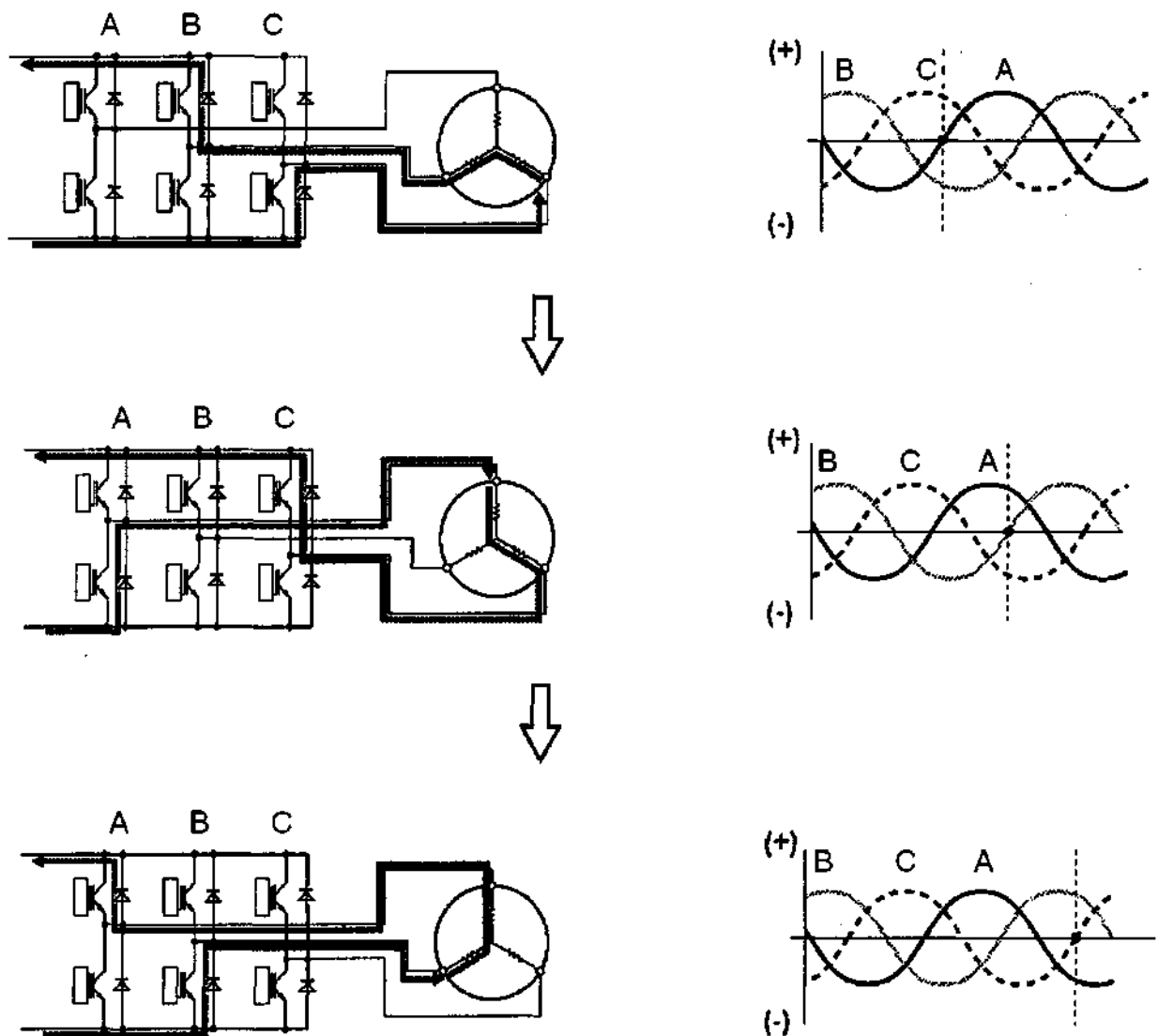


Рис. 4.44. Керування роботою електричної машини у режимі генератора

Контролер кола високої напруги керує роботою перетворювача постійної напруги. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин, підвищує номінальну напругу високовольтної батареї з 288 В до максимального значення 650 В.

Інвертор перетворює змінну напругу, що виробляється електричним генератором MG1 або MG2, у постійну напругу. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин MG, знижує максимальну напругу з 650 В до номінальної напруги 288 В (для зарядження високовольтної батареї).

Основними компонентами перетворювача постійної напруги є інтегрований силовий модуль (IPM) з біполярними транзисторами (IGBT), які виконують функцію перемикачів, і реактор, що накопичує і віддає енергію. Підвищення номінальної постійної напруги 288 В до максимальної постійної напруги 650 В відбувається таким чином (рис. 4.45).

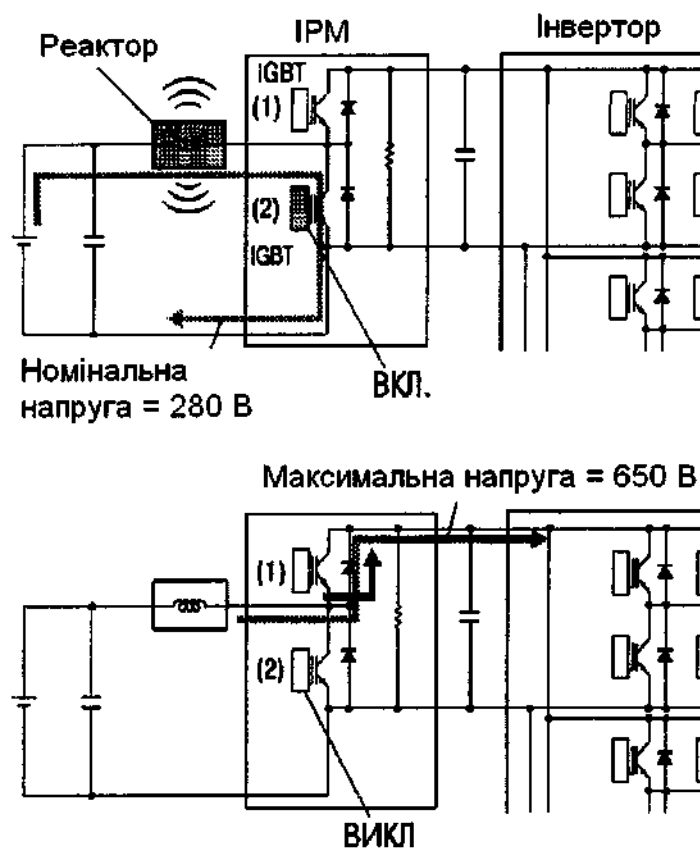


Рис. 4.45. Процес підвищення напруги до максимальної 650 В

При включенні IGBT (2) високовольтна батарея (номінальна напруга 288 В) віддає енергію в реактор. В результаті починає збільшуватися напруга на реакторі. Коли напруга на реакторі збільшується до 650 В транзистор IGBT (2) вимикається і виникає е.р.с. самоіндукції. Енергія, створена за допомогою е.р.с. самоіндукції (при напрузі 650 В), поступає з реактора в інвертор.

Зниження максимальної постійної напруги 650 В до номінальної постійної напруги 288 В відбувається таким чином (рис. 4.46).

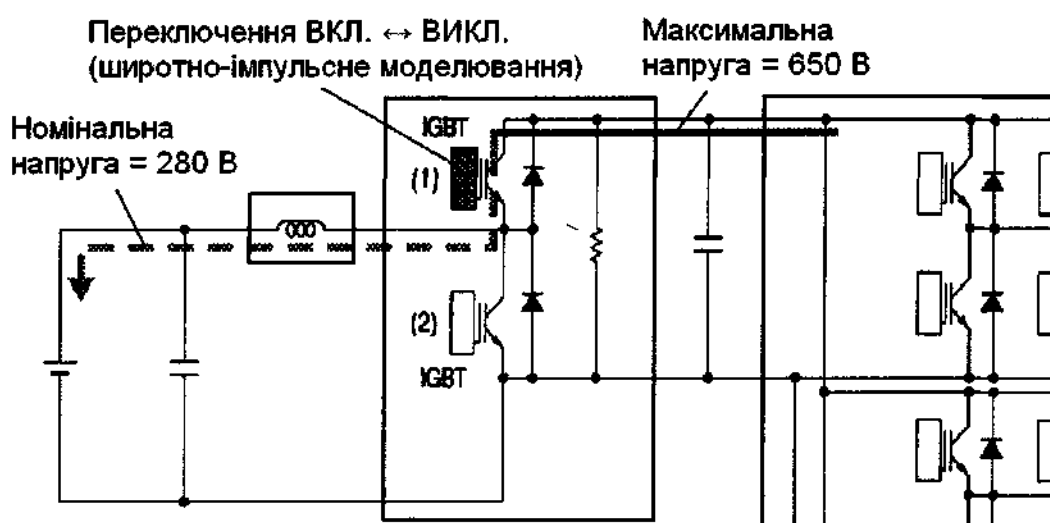
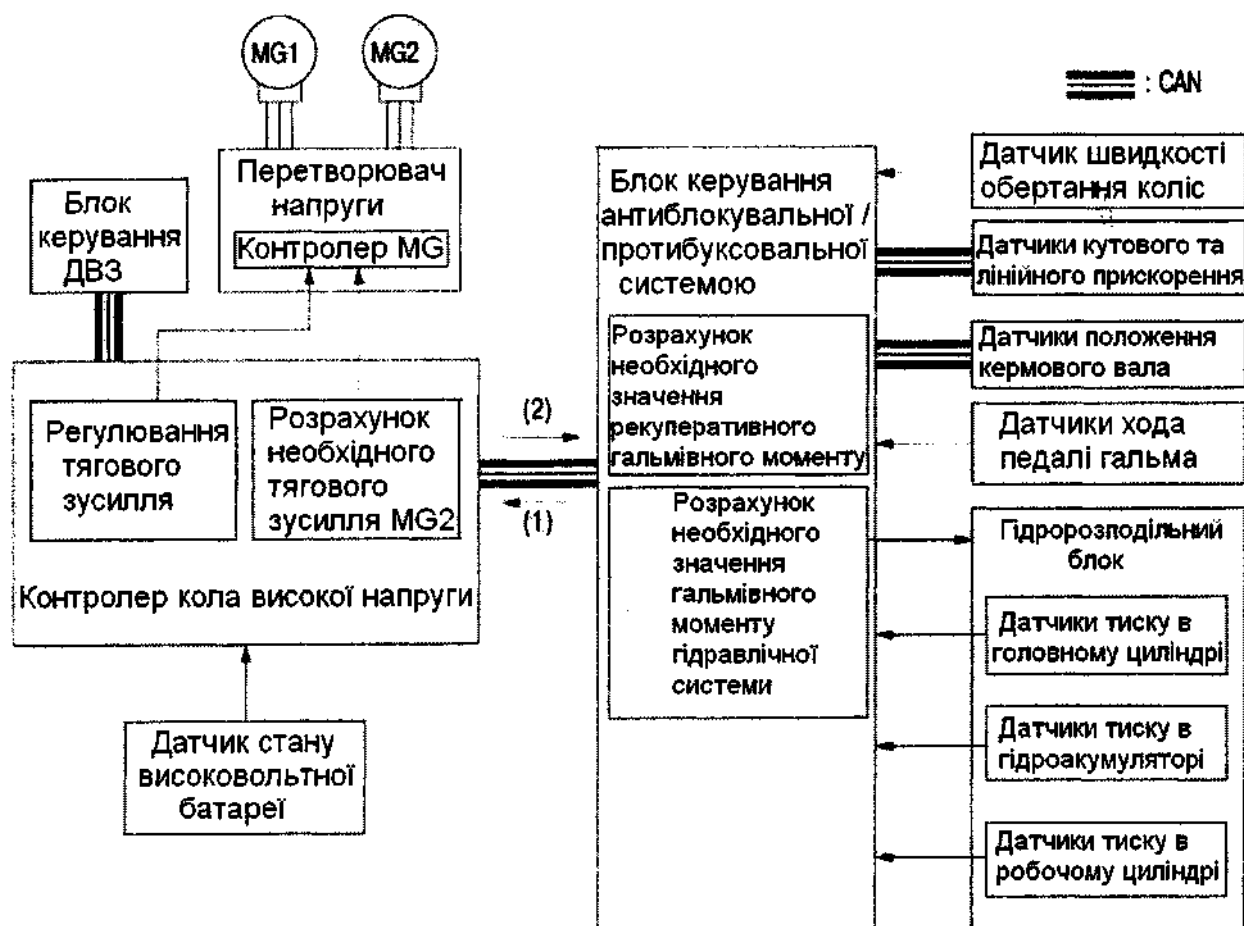


Рис. 4.45. Процес зниження напруги до номінальної 280 В

Змінна напруга, яка виробляється електричними генераторами MG1 або MG2 для зарядки високовольтної батареї, в інверторі перетворюється в постійну напругу 650 В. Потім перетворювач напруги знижує його значення до 288 В. Зниження напруги досягається широтно-імпульсною модуляцією, яку виконує транзистор IGBT (1).

Контролер кола високої напруги керує роботою блока керування антиблокувальної / протибуксовальної системи (рис. 4.46). На підставі сигналу тиску в головному гальмівному циліндрі і сигналу ходу педалі гальма блок керування антиблокувальної / протибуксовальної системою обчислює значення сумарного необхідного гальмівного моменту.



- (1) – Необхідний рекупераційний гальмівний момент та необхідне тягове зусилля (для роботи систем TRC або VSC),
 (2) – Дійсне значення рекупераційного гальмівного моменту.

Рис. 4.46. Схема системи керування антиблокувальної / протибуксовальною системою

Блок керування антиблокувальної / протибуксовальної системою обчислює частину рекупераційного гальмівного моменту від загального гальмівного моменту і направляє дані на контролер кола високої напруги.

Контролер кола високої напруги переводить електричну машину MG2 у режим генератора і здійснює рекупераційне гальмування. Блок керування антиблокувальної / протибуксовальної системою, за допомогою електромагнітних клапанів, підтримує такий тиск в робочих циліндрах, щоб гідравлічна гальмівна система розвивала гальмівний момент рівний сумарному необхідному моменту за вирахуванням рекупераційного гальмівного моменту.

Для регулювання тягового зусилля генератора мотора в ході роботи системи підтримки курсової стійкості блок керування антиблокувальної / протибуксовальної системою направляє відповідний запит контролеру кола високої напруги. Контролер кола високої напруги регулює тягове зусилля електричних машин MG1, MG2 і двигуна внутрішнього згоряння відповідно до поточних їздових умов.

Контролер кола високої напруги керує роботою системи при зіткненні. При виникненні аварійної ситуації контролер кола високої напруги вимикає головне реле системи (SMR) і повністю перериває коло живлення, забезпечуючи безпеку водію та пасажирам.

Під час фронтального або бокового зіткнення контролер кола високої напруги приймає від блоку датчиків подушок безпеки сигнал розкриття подушок (рис. 4.47).

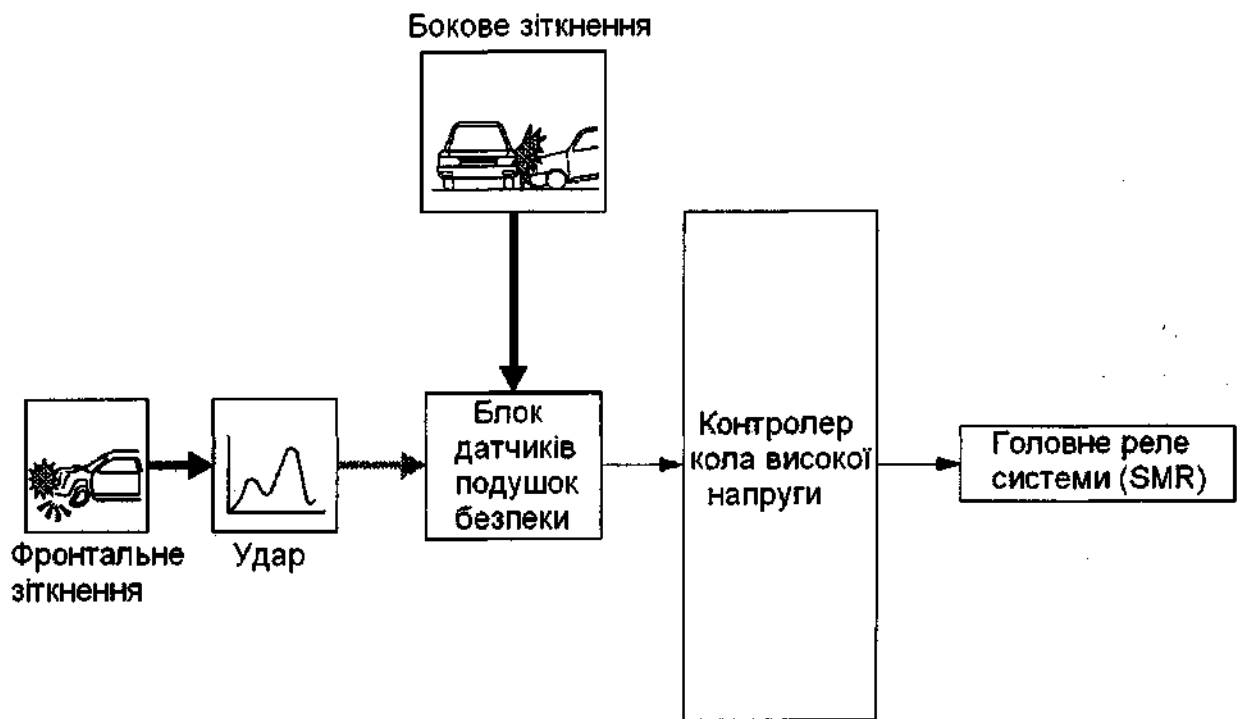


Рис. 4.47. Схема роботи системи при зіткненні

4.11. Система контролю тиску повітря в шинах

Найбільш частою і серйозною причиною передчасного зносу і руйнування шин є недотримання встановлених норм і особливо пониження тиску повітря усередині шини щодо норми. Контроль тиску повітря в шинах необхідно проводити не рідше одного разу в 10 днів.

При різкому пониженні тиску повітря поперечний профіль шини набуває овальної форми, тобто меншу висоту і велику ширину, чому збільшується площа контакту шин з дорогою і змінюється радіус кочення колеса спотворення конфігурації профілю і збільшення деформації шини викликає підвищення напруги в її матерії. При цьому зростає внутрішнє тертя і теплоутворення в шині, чому і відбувається передчасний знос.

Пониження тиску повітря в шині викликає пошкодження каркаса покриття по всьому колу бічних стінок. Це викликає відшаровування ниток корду від гуми, вони швидко перетираються і рвуться.

Значне пониження тиску повітря в шинах під час руху автомобіля викликає порушення стійкості руху, тобто відведенню його убік і погіршення керованості.

Підвищення тиску повітря в шині, викликає перенапруження ниток корду і з часом приводить до передчасного розриву каркаса. Збільшений питомий тиск шини на дорогу сприяє великому стиранню протектора.

При збільшеному тиску повітря шина стає жорсткішою, гірше амортизує удари від нерівностей дороги, чому підвищується знос деталей автомобіля і знижується комфортабельність їзди.

Тому необхідний систематичний контроль за тиском повітря в шині і підтримка тиску в межах норми. Для цих цілей на сучасних легкових автомобілях встановлюється як стандартне устаткування система сигналізації про падіння тиску повітря в шинах. При русі автомобіля з однією або більш шинах, в яких тиск нижче за норму, система інформує про це водія включенням попереджувального сигналізатора, розташованого на панелі приладів. У цій системі виконується пряме вимірювання тиску в шині за допомогою вимірювального вентиля з вбудованим радіопередавачем сигналу.

Схема системи сигналізації про падіння тиску в шинах представлена на рис. 4.48.

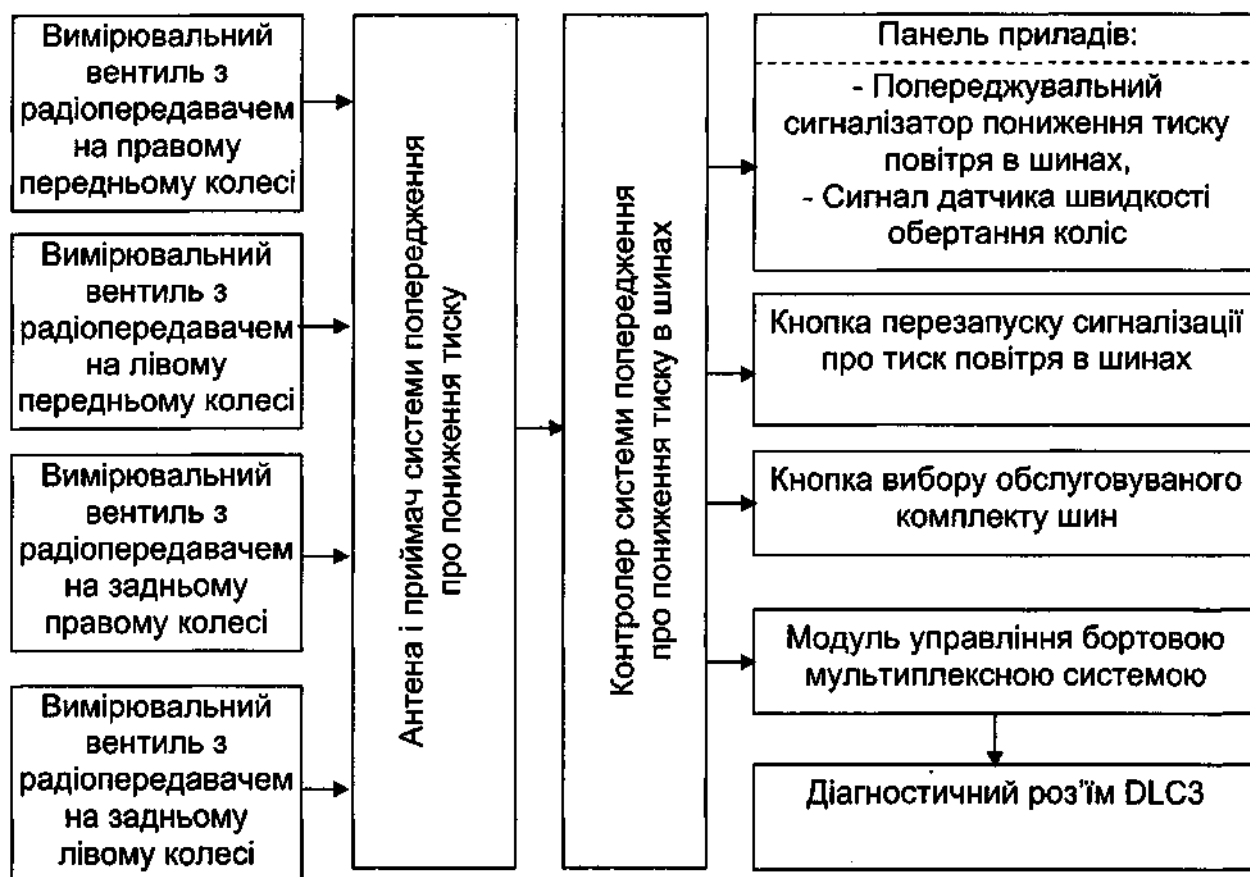


Рис. 4.48. Схема системи сигналізації о падінні повітря в шинах автомобіля

До складу системи попередження про падіння тиску в шинах входить вимірювальний вентиль з передавачем, антена і приймач, контролер системи, перемикач вибору комплекту обслуговуваних коліс, кнопка перезавпуску системи і попереджувальний світловий сигналізатор. Розташування основних компонентів системи сигналізації о падінні повітря в шинах автомобіля наведено на рис. 4.49.

Вимірювальний вентиль з радіопередавачем є пристроєм, об'єднуючим повітряний вентиль, датчик тиску і радіопередавач, який передає вимірювальний сигнал тиску і пізнавальний код колеса. Датчик тиску і передавач об'єднані з повітряним вентилем, утворюючи вимірювальний вентиль (рис. 4.50).

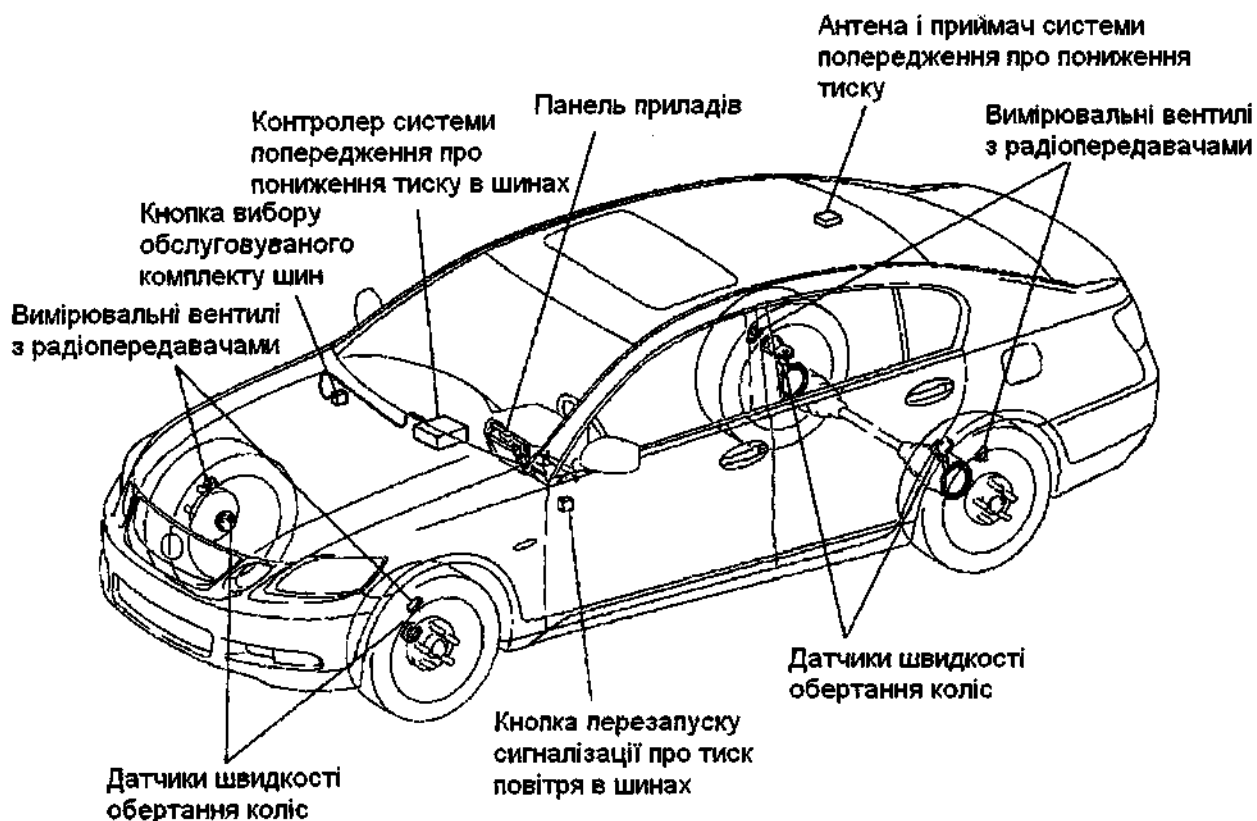


Рис. 4.49. Розташування основних компонентів системи сигналізації на автомобілі

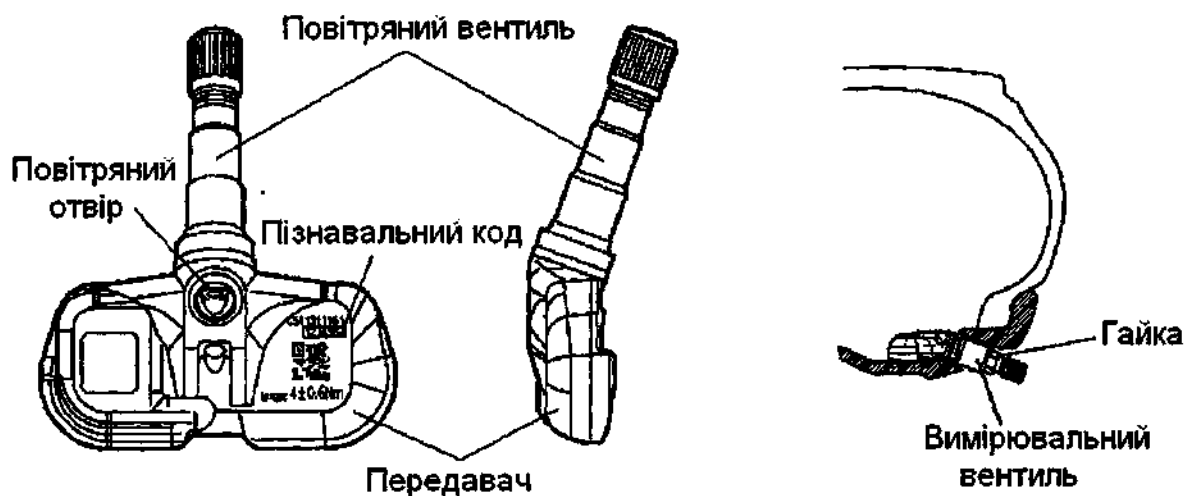


Рис. 4.50. Вимірювальний вентиль

Живлення передавача забезпечується літійовим елементом з ресурсом приблизно 10 років. Якщо напруга елемента падає, то контролер системи попередження записує в пам'яті код несправності. Якщо напруга продовжує знижуватися далі і

передавач перестас працювати, то в пам'яті записується код несправності і включається миготливий сигналізатор системи, розташований в панелі приладів. Передавач на кожному автомобілі має свій власний, пізнавальний код, який більше ніде не повторюється. У кожному передавачі є вбудовані напівпровідниковий чутливий елемент, який реагує на тиск в шині.

У пакеті даних, що направляються передавачем на антену з приймачем, крім результату вимірювання тиску міститься пізнавальний код передавача. Це дозволяє системі попередження встановити приналежність одержаного сигналу однієї з шин, встановлених на автомобілі. Передавач працює на частоті 433,92 МГц.

Чотири вимірювальні вентилі з передавачами вимірюють тиск у відповідних шинах і передають радіосигналами пізнавальні код передавача і результати вимірювань. Сигнали що передаються приймаються антеною і приймачем системи, які розташовані в стелі салону. Контролер системи попередження порівнює прийняті пізнавальні коди з раніше зареєстрованими. Якщо пізнавальний код співпадає, то контролер порівнює результати вимірювання із встановленими межами і, якщо значення тиску нижче встановленої межі, то включається попереджувальний сигналізатор в панелі приладів. Кнопка вибору обслуговуваного комплекту шин знаходиться в нижній панелі управління, з боку переднього пасажира (рис. 4.51).

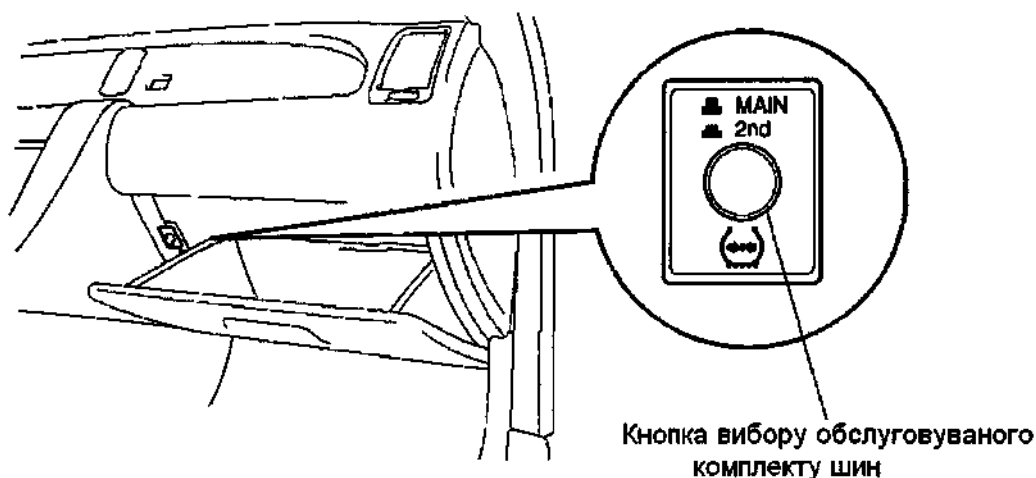


Рис. 4.51. Розташування кнопки вибору обслуговуваного комплекту шин на панелі управління автомобіля

У контролері системи попередження можуть реєструватися пізнавальні коди двох комплектів шин. Водій може натисненням на кнопку перемикача вибрати один з варіантів комплектації автомобіля шинами. Окрім, того, не потрібно реєструвати пізнавальні коди при кожній заміні шин. Пізнавальні коди повинні бути зареєстровані у офіційного дилера. Кнопка перезапуску сигналізації про тиск повітря в шинах знаходиться на панелі управління автомобіля (рис. 4.52).

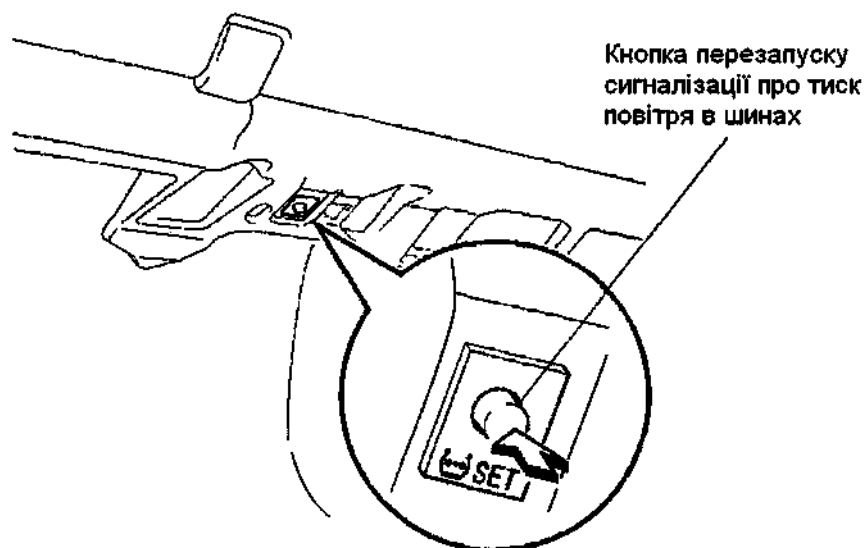


Рис. 4.52. Розташування кнопки перезапуску сигналізації про тиск повітря в шинах

Маніпулюючи кнопкою перезапуску сигналізації про тиск повітря в шинах, можна встановити значення тиску включення попереджувальної сигналізації, відповідне типу використовуваних шин. Тому, з метою дотримання місцевого законодавства, дилер повинен встановити значення граничного допустимого тиску.

Кнопкою перезапуску можна користуватися після того, як тиск у всіх чотирьох колесах буде доведений до норми.

Перезапуск системи відбувається, якщо, при включенні запалення кнопку натиснути і утримати не менше трьох секунд. Після завершення перезапуску системи попередження сигналізатор починає мигати з частотою 0,5 Гц.

Під час перезапуску системи вентиль з передавачем ведуть вимірювання тиску в шині і реєструє передані на контролері

системи сигнали з частотою раз на хвилину. Процес перезапуску завершиться, коли будуть одержані сигнали від датчиків 4 шин.

Система підлягає перезапуску при наступних обставинах:

- 1) Виконана заміна вимірювального вентиля з передавачем
- 2) Виконана установка шин іншого розміру (інший тиск)
- 3) Виконана заміна контролера системи попередження.

Оскільки точність значень тиску, що задаються в процесі перезапуску, залежить від точності використовуваного манометра, то перед проведенням перезапуску слід перевірити манометр.

Із зміною навколишньої температури тиск в шинах міняється, як показано на рис. 4.53. Якщо брати до уваги температуру навколишнього середовища, то при регулюванні тиску в шинах автомобіля LEXUS GS 450h можливо включення сигналізатора системи попередження. При регулюванні тиску в шинах слід завжди враховувати реальні умови експлуатації автомобіля.

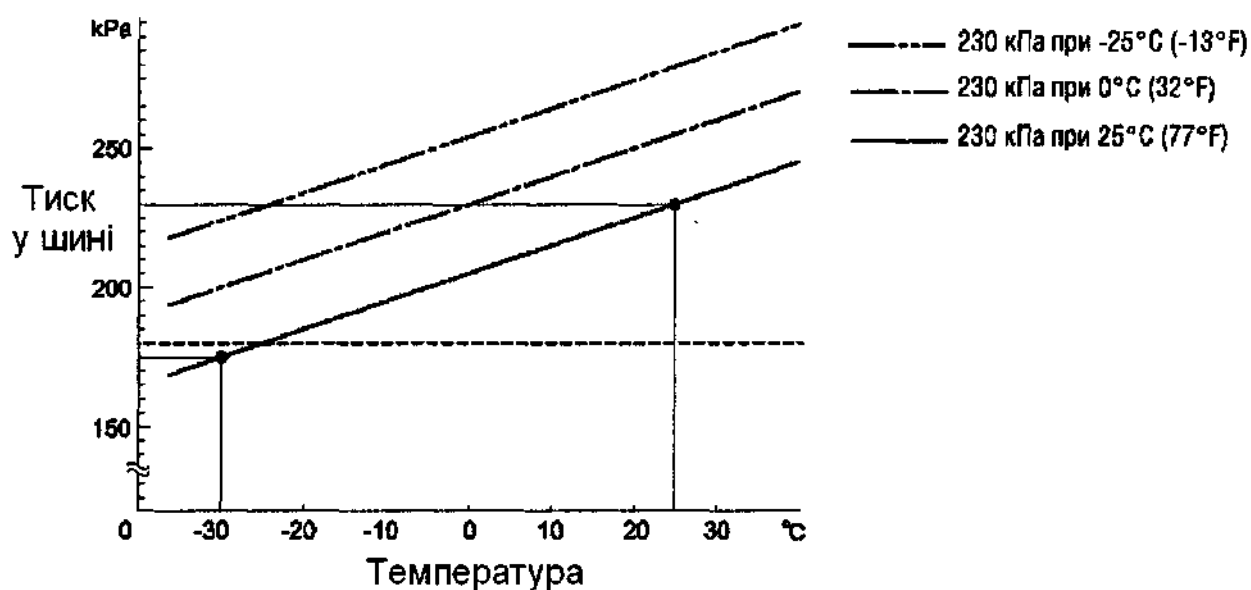


Рис. 4.53. Залежність тиску повітря в шині від температури навколишнього середовища

Якщо система здійснює перезапуск при тиску в шинах, що відрізняється від граничного значення, то система запам'ятає нове значення тиску. Тому, перезапуск системи потрібно виконувати тільки після доведення тиску в шинах до норми.

Світловий сигналізатор системи попередження розташований на панелі приладів рис. 4.54.



Рис. 4.54. Розташування світлового сигналізатора на панелі приладів

Залежно від отриманих від контролера системи попередження сигналів (низький тиск в шині або несправність системи) сигналізатор може бути включений постійно або в миготливому режимі табл. 1.

Таблиця 4.6

Режим включення сигналізатора

Умови	Режим включення сигналізатора
Перевірка системи	Включається на 3 секунди (запалення включене, система справна)
Знижений тиск повітря в шинах	Включається постійно
Перезапуск системи	Мигає з частотою 0,5 Гц (якщо натиснути кнопку перезавантаження системи не менше чим на 3 секунди)
Відмова системи	Мигає з частотою 0,5 Гц (включається постійно за наявності обриву в цепі сигналізатора)

При експлуатації системи контролю тиску повітря в шинах слід дотримуватися наступних рекомендацій.

При включенні сигналізатора системи попередження про падіння тиску в шинах потрібне, якнайшвидше зменшити швидкість руху.

Не допускається різке маневрування або гальмування, оскільки знижений тиску в шинах негативно впливає на керуваність автомобіля і на його гальмівні якості.

Для вимірювальних вентилів з передавачем використовуються ті ковпачки, що поставляються в комплекті з вентилями (алюмінієві). Латунні ковпачки схильні до прихоплювання.

При проколах не допускається закачувати в шину герметик, оскільки він може привести до виходу з ладу вимірювального вентиля з передавачем.

Якщо при включенні запалення не спалахує сигналізатор системи попередження, то система несправна. Система відключається за наступних умов:

- при розрядці літєвого елемента живлення замінюється вимірювальний вентиль в зборі. Пізнавальний код встановлюваного вимірювального вентиля повинен відрізнятися від кодів з решти вентилів. Для запобігання розрядці елемента живлення вимірювальні вентиля, що поставляються із запчастинами, знаходяться в не активованому стані. Після виконання правильної установки вимірювального вентиля на колесо він активується доведенням тиску в шині до заданого значення.

- при виникненні несправності в цепі вимірювального вентиля з датчиком, в антені з приймачем або в контролері системи попередження робота системи припиняється, і водій сповіщається про це постійним включенням сигналізатора або його миганням.

4.12. Робота індикаторів і попереджувальних сигналізаторів

Багатопараметровий дисплей, розташований на панелі приладів, має функцію показу балансу потужності, яка дає водію можливість стежити за роботою силового агрегату. Окрім потоків потужності, представлених стрілками, на дисплеї відображається рівень заряду високовольтної батареї (рис. 4.5).

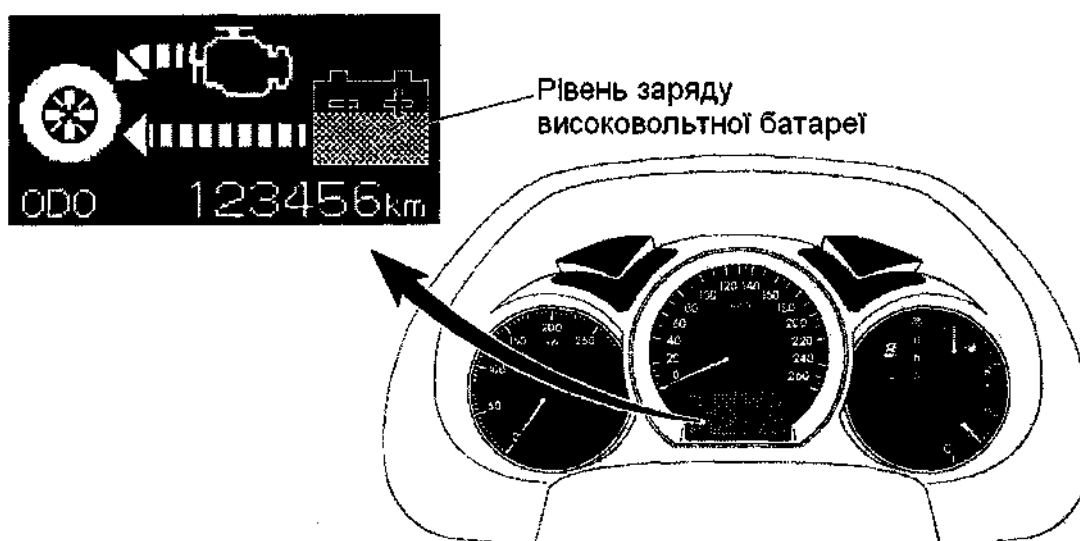


Рис. 4.55. Відображення на багатопараметровому дисплеї рівня заряду високовольтної батареї

На багатфункціональному дисплеї баланс потужності представлений в іншому вигляді. Детальніше зображені потоки потужності, а заряджена батареї представлена за допомогою восьми горизонтальних смужок (рис. 4.56).

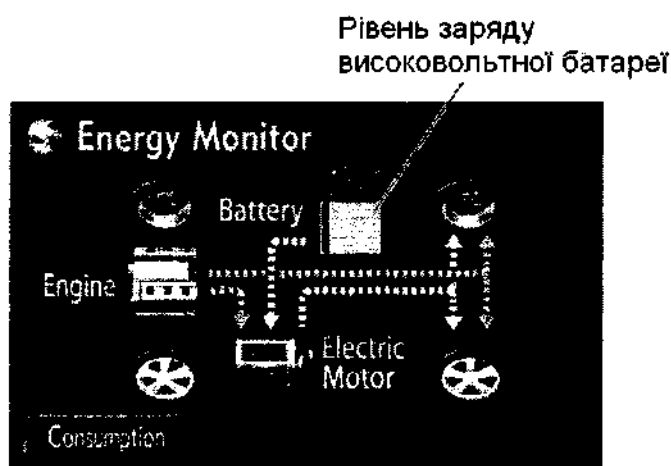


Рис. 4.56. Відображення на багатфункціональному дисплеї рівня заряду високовольтної батареї

На рис. 4.57 наведено індикатори і світлові сигналізатори панелі приладів автомобіля LEXUS GS 450h, які пов'язані з гібридним силовим агрегатом, а опис цих індикаторів і світлових сигналізаторів зведено у табл. 4.7.

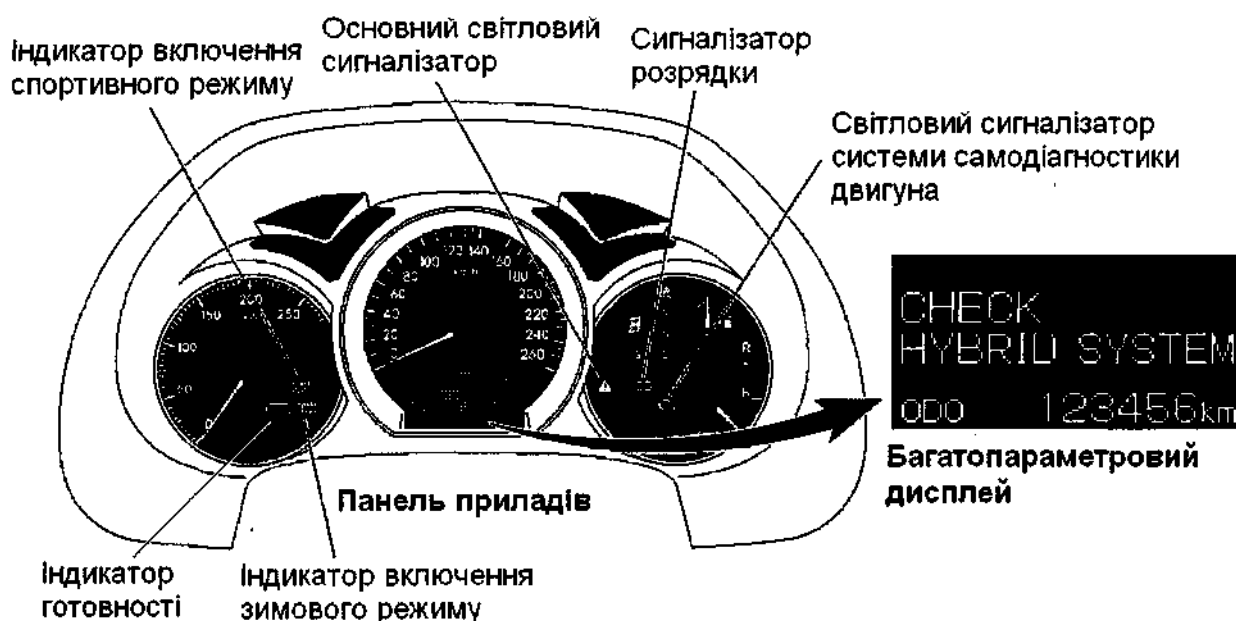


Рис. 4.57. Індикатори і світлові сигналізатори панелі приладів автомобіля LEXUS GS 450h

Таблиця 4.7

Режим включення сигналізатора

Найменування	Опис
1	2
Індикатор готовності	Індикатор починає мигати, коли водій одночасно натискає педаль гальма і кнопку запуску двигуна в положення START. При цьому селектор повинен знаходитися в положенні Р. Після запуску системи мигання змінюється постійним включенням, сповіщаючи водія про те, що автомобіль готовий до поїздки.
Основний світловий сигналізатор	Основний світловий сигналізатор призначений головним образом для сповіщення водія про несправність системи THS II або іншої системи і для сповіщення про низький рівень зарядженої батареї. Сигналізатор починає мигати або включається постійно одночасно з включенням зумера.

1	2
Світловий сигналізатор системи самодіагностики двигуна	Сигналізатор включається при виникненні несправності в системі керування двигуном внутрішнього згоряння.
Сигналізатор розрядки	Включається при виникненні несправності в колі зарядки 12 В (блок перетворювача напруги).
Попереджувальний дисплей гібридної системи	На багатопараметровий дисплей виводяться попередження про несправності системи THS II. Одночасно включається загальний попереджувальний сигналізатор.
Індикатор включення спортивного режиму	Включається, коли водій вибирає спортивний режим перемикання передач.
Індикатор включення зимового режиму	Включається, коли водій вибирає зимовий режим перемикання передач.

4.13. Діагностика та самодіагностика

Якщо контролер кола високої напруги виявляє несправність в системі THS II, то блок керування двигуном виконує діагностику і запам'ятовує компонент, що відмовив. Для сповіщення водія блок керування двигуном включає світловий сигналізатор системи самодіагностики в постійному або в миготливому режимі або основний світловий сигналізатор. Контролер кола високої напруги при цьому зберігає відповідний код несправності. До основних, 5-розрядних кодів несправності були додані 3-розрядні субкоди. Це дозволило звузити область пошуку несправності.

Коди несправності можна прочитати за допомогою діагностичного приладу «intelligent tester II», підключеного до роз'єму DLC3. Всі діагностичні коди несправностей (DTC) відповідають кодам SAE. Деякі DTC розбиті на дрібніші підрозділи, чим раніше. Підрозділам привласнені нові коди. Були додані коди несправностей специфічних для гібридної системи. Якщо контролер кола високої напруги виявить несправність в системі THS II, то він перейде на керування по записаному в пам'ять масиву даних.

При відмові одного з датчиків або виконавчих пристроїв гальмівної системи, блок керування антиблокувальною / протибуксовальною системою інформує про це водія включенням попереджувального сигналізатора ECBWSC, попереджувального сигналізатора гальмівної системи, або попереджувального сигналізатора ABS на панелі приладів, а також виведенням попереджувального повідомлення систем VSC й ECB на дисплей. Одночасно відбувається запам'ятовування коду DTC (електронні коди несправності).

При самодіагностики треба перемкнути контакти TC й CG роз'єму DLC3 спеціальною перемичкою 0984318040, і врахувавши кількість миготінь сигналізатора ABS, сигналізатора ECBWSC, або повідомлень "VSC DIAG" й "ECB DIAG", виведених на багатопараметровий дисплей. Система має функцію перевірки сигналів датчиків (у режимі перевірки). Дана функція активується підключенням перемички (SST 0984318040) до контактів TS й CG роз'єму DLC3 або підключенням діагностичного приладу «intelligent tester II».

5. ГІБРИДНА ТРАНСМІСІЯ

5.1. Загальні відомості

Розглянемо принцип роботи гібридної трансмісії на прикладі силового агрегату THS II, встановленого на новому автомобілі Lexus моделі GS450h.

Основними компонентами гібридної трансмісії автомобіля Lexus GS450h є: двигун внутрішнього згоряння, електричні машини MG1, MG2, планетарний дільник потужності, 2-ступеневий понижуючий редуктор для MG2, високовольтна акумуляторна батарея і перетворювач напруги.

Схема розташування цих компонентів представлена на рис. 5.1.

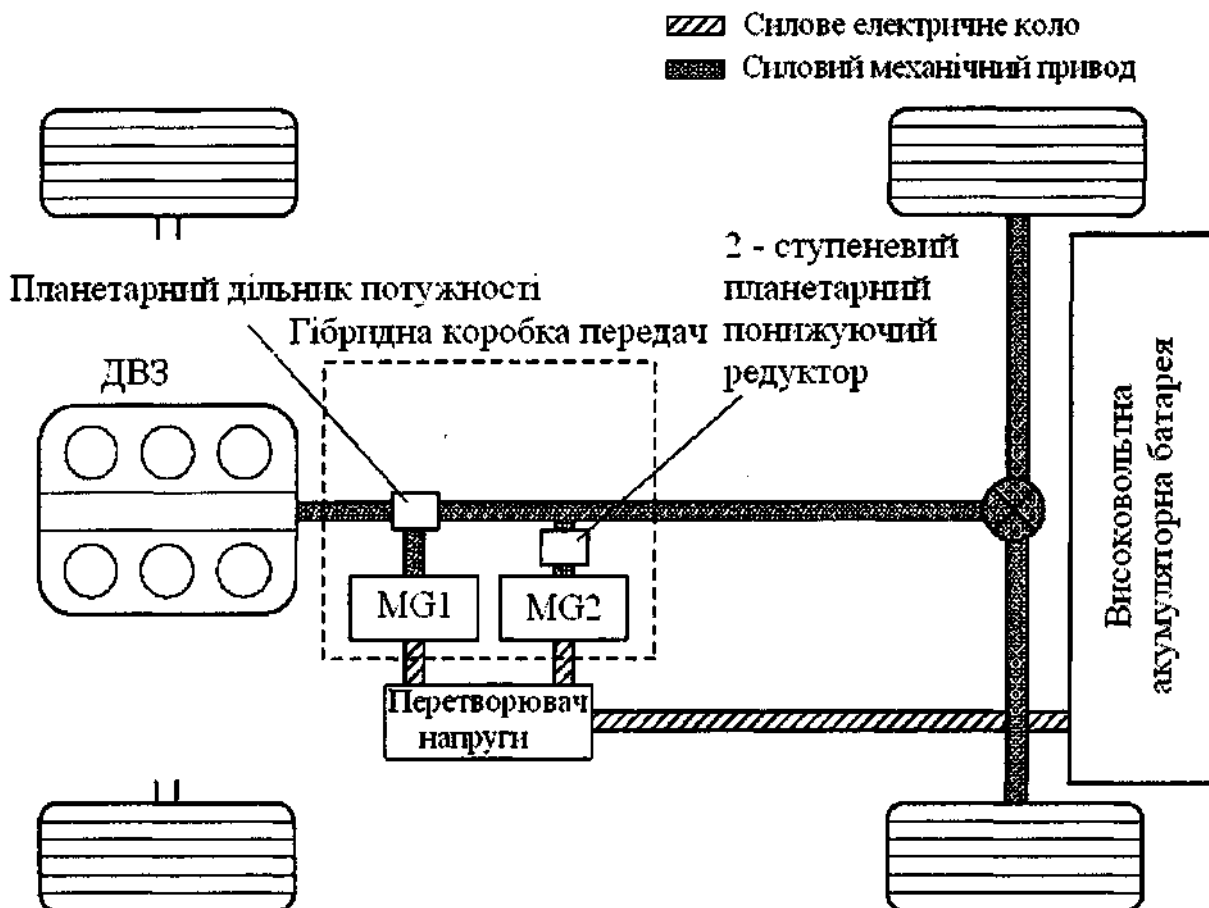


Рис. 5.1. Схема розташування компонентів гібридної трансмісії автомобіля GS450h

В рамках концепції «Hybrid Synergy Drive» на автомобілі Lexus GS450h встановлений гібридний силовий агрегат з коробкою передач L110, яка кінематично об'єднує потоки моментів двигуна внутрішнього згоряння, швидкісних і могутніх електричних машин MG1 і MG2 за допомогою планетарного дільника потужності і двохступеневого планетарного редуктора.

Основним силовим агрегатом у складі гібридної трансмісії автомобіля Lexus GS450h є двигун внутрішнього згоряння моделі 2GR-FSE.

Електрична машина MG1 працює в основному в режимі генератора, але окрім цього виконує функції стартера для пуску двигуна внутрішнього згоряння.

Електрична машина MG2 працює в основному в режимі двигуна і використовується для електроприводу автомобіля, але окрім цього під час руху під ухил або гальмування рекуперативне гальмо використовує електричну машину MG2 як генератор для заряду високовольної акумуляторної батареї.

Планетарний дільник потужності розділяє потік потужності двигуна внутрішнього згоряння на два: перший призначений для приводу задніх коліс, а другий – для приводу електричної машини MG1, яка працює як генератор.

Двохступеневий планетарний редуктор знижує обороти тягового електричного двигуна MG 2, використовуючи для цього дві ступені передач, залежно від швидкості руху і забезпечуючи передачу максимального моменту і максимальної швидкості. Це забезпечує плавність прискорення автомобіля від початку руху до максимальної швидкості руху. Використовування двохступеневого понижуючого планетарного редуктора дозволило зробити гібридну коробку передач легкої і компактної.

В гібридній трансмісії автомобіля використовується високовольтна акумуляторна батарея з номінальною напругою 288 В.

Для живлення електричних машин MG1 і MG2 використовується перетворювач напруги. В його склад входить перетворювач, який підвищує постійну напругу акумуляторної батареї до величини 650 В і інвертор, який перетворює постійну напругу в змінну.

Схема живлення електричних машин MG1 і MG2 представлена на рис. 5.2.

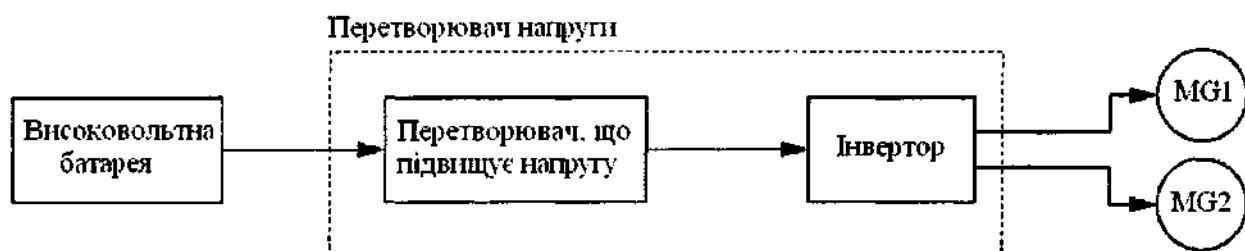


Рис. 5.2. Схема живлення електричних машин MG1 і MG2

Гібридна коробка передач знижує викид шкідливих речовин і зменшує витрату палива.

Таким чином, гібридна трансмісія приводить автомобіль в рух, об'єднуючи потоки моменту двигуна внутрішнього згоряння і високошвидкісного тягового електричного двигуна MG2. Система керування гібридною трансмісією оптимізує поєднання енергетичних потоків залежно від умов руху автомобіля.

5.2. Електричні машини MG1 і MG2

Електричні машини MG1 і MG2 є компактними і високоефективними синхронними електричними машинами змінного струму з постійними магнітами, які в сучасній науковій літературі частіше називають вентильними електричними машинами. Конструкція і принцип роботи таких електричних машин розглянута в розділі 1.3 даного дослідження.

В електричних машинах MG1 і MG2 застосовується ротор з V-образним магнітом великої потужності, який підвищує гальмівний момент електричної машини. В статорі застосовується сердечник з електротехнічної сталі з низькими активними втратами і обмотка з високовольтною ізоляцією. Це дозволяє електричним машинам MG1 і MG2 розвивати високу потужність і момент при невеликих габаритних розмірах і масі.

Електрична машина MG1 в режимі генератора приводиться в дію двигуном внутрішнього згоряння, при цьому виробляється електрична потужність, призначена для зарядки високовольтної

аккумуляторної батареї і для живлення тягового електричного двигуна MG2 у складі гібридної трансмісії. Електрична машина MG1 в режимі двигуна використовується як стартер для пуску двигуна внутрішнього згоряння.

Основні технічні характеристики електричної машини MG1 представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Технічні характеристики електричної машини MG1

Тип	Вентильний
Призначення	Генератор, стартер
Максимальна робоча напруга	650 В
Система охолодження	Рідинна

Електрична машина MG2 в режимі двигуна служить джерелом допоміжного моменту ДВЗ в гібридній силовій установці, що сприяє досягненню автомобілем прекрасних динамічних якостей, включаючи плавність руху і прискорення. В режимі генератора електрична машина MG2 працює у складі рекуперативного гальма, перетворюючи гальмівну кінетичну енергію автомобіля в електричну енергію, яка накопичується у високовольтній аккумуляторній батареї.

При подачі змінної напруги на трифазну обмотку статора електричних машин в електродвигунах виникає обертове магнітне поле. Обертове поле статора взаємодіє з полюсами постійних магнітів ротора і створює обертовий момент. Момент можна вважати практично пропорційним силі струму, а швидкість обертання ротора регулюється частотою змінного струму.

Оптимальне керування кутовим зсувом осі магнітів ротора і обертовим магнітним полем статора дозволяє отримати на валу двигуна високий корисний обертовий момент на всіх швидкісних режимах.

Під час переходу електричних машин в режим генератора обертове магнітне поле ротора наводить струм в обмотці статора.

Основні технічні характеристики електричної машини MG2 представлені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Технічні характеристики електричної машини MG2

Тип	Вентильний
Призначення	Привід ведучих коліс, рекуперативне гальмування
Максимальна робоча напруга	650 В
Максимальна потужність	147 кВт
Максимальний момент	275 Н м
Система охолодження	Рідинна

Електричні машини MG1 і MG2, а також перетворювач напруги, охолоджуються примусово, за допомогою рідинної системи охолодження з циркуляційним насосом охолоджуючої рідини (рис. 5.3). Ця система охолодження працює незалежно від системи охолодження двигуна внутрішнього згоряння і включається, коли коло живлення переходить в стан READY.

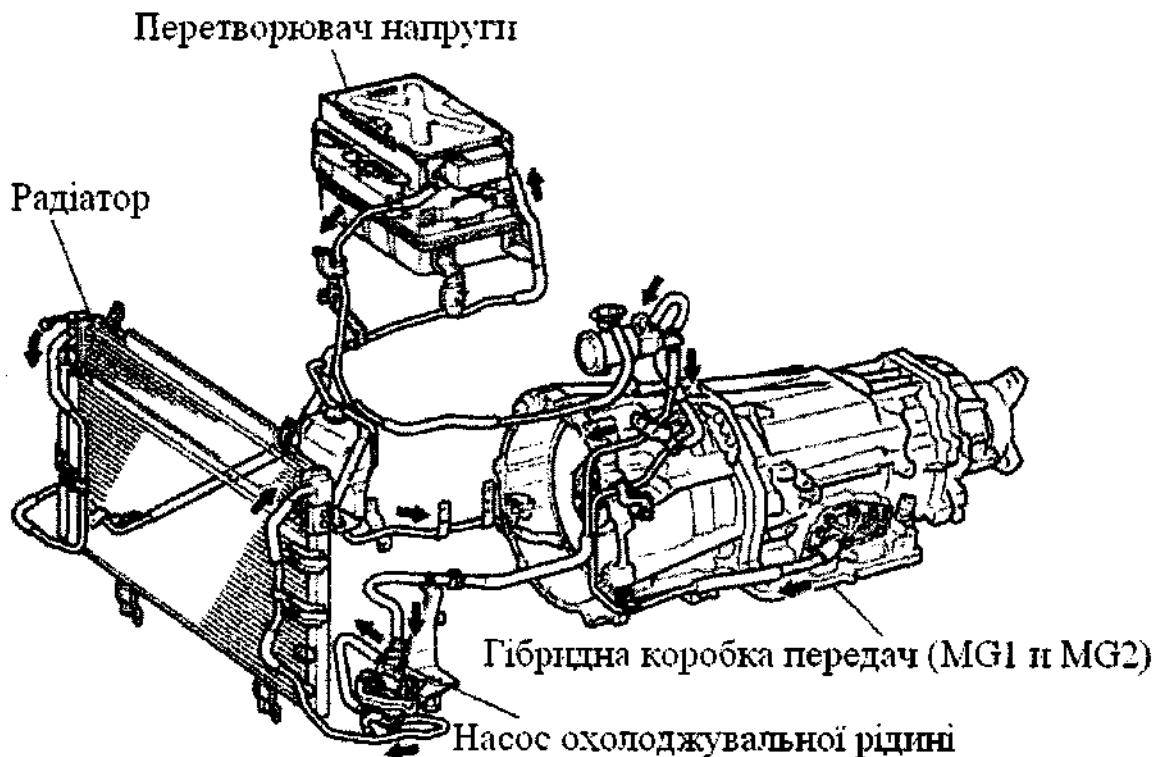


Рис. 5.3. Система охолодження електричних двигунів MG1 і MG2

Схема розташування електричних машин MG1 і MG2 у складі гібридної коробки передач представлена на рис. 5.4.

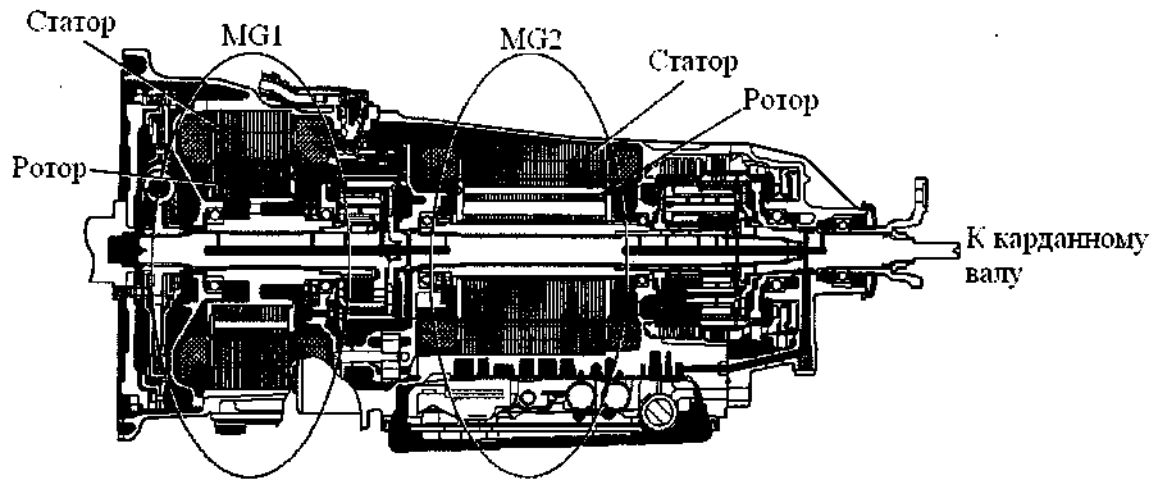


Рис. 5.4. Схема розташування електричних машин MG1 і MG2 у складі гібридної коробки передач

5.3. Перетворювач напруги

Для живлення електричних машин MG1 і MG2 використовується перетворювач напруги. В його склад входить перетворювач, який підвищує постійну напругу акумуляторної батареї до величини 650 В і інвертор, який перетворює постійну напругу в змінну (див. рис. 5.2). Схема функціональна перетворювача напруги представлена на рис. 5.5.

Живлення електричних машин MG1 і MG2 високою напругою дозволяє понизити омичні втрати, характерні для силових кіл з низькою напругою. Система живлення забезпечує роботу електричних машин MG1 і MG2 на високих оборотах і з високим обертовим моментом.

Задні колеса і електрична машина MG2 зв'язані карданним валом і не розділені зчепленням. Щоб припинити передачу обертового моменту на задні колеса при нейтральному положенні селектора, датчик положення селектора направляє на перетворювач напруги сигнал N (нейтраль), де вимикаються всі силові транзистори, які управляють роботою електричних машин MG1 і MG2. В результаті, робота MG1 і MG2 припиняється і обертовий момент на задніх колесах стає рівним нулю.

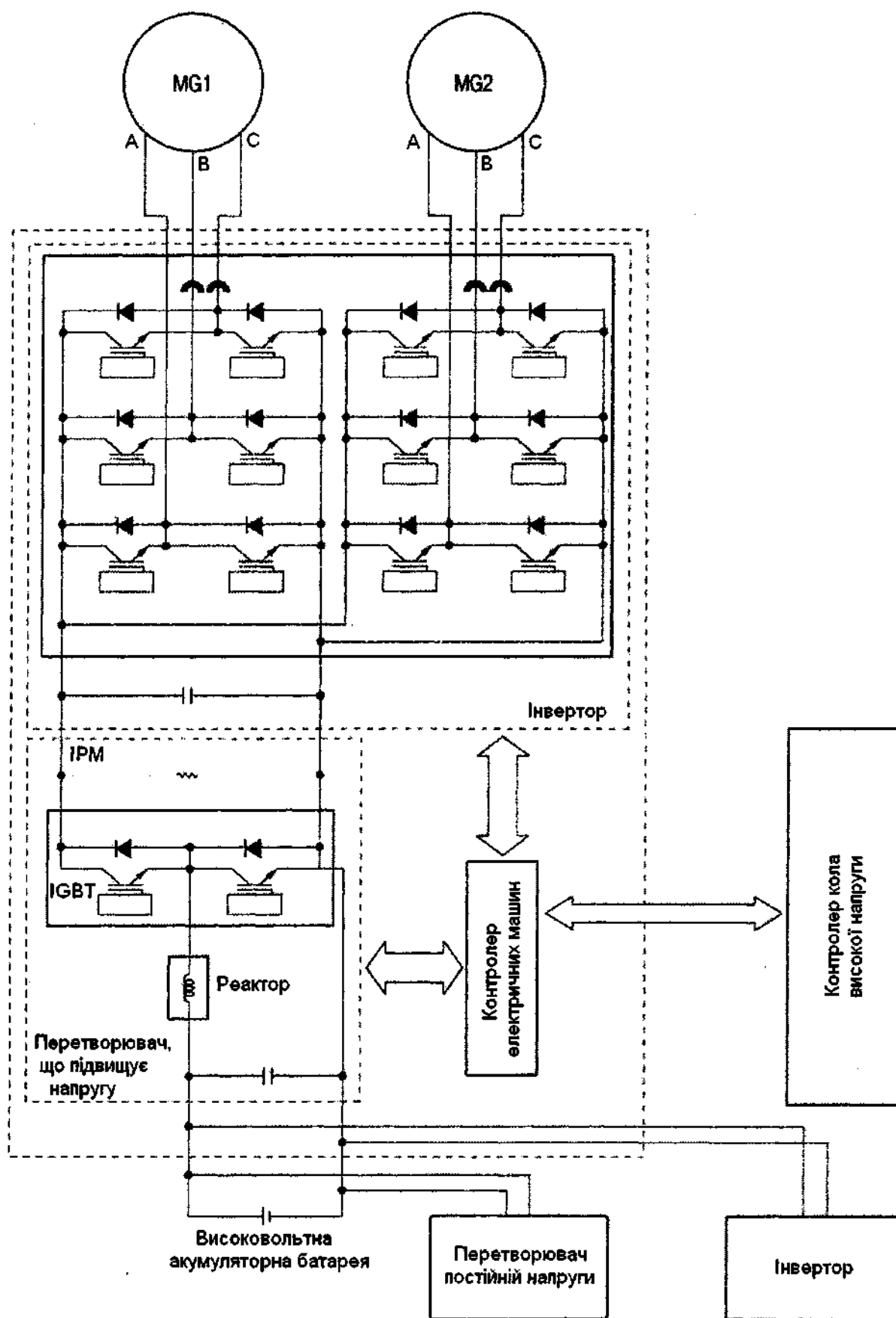


Рис. 5.5. Схема функціональна перетворювача напруги

До складу перетворювача напруги входить перетворювач постійної напруги, який підвищує напругу високовольтної акумуляторної батареї з 288 В до 650 В. Після перетворювача, який підвищує напругу, постійна напруга поступає в інвертор, в якому постійна напруга перетворюється в змінну.

Перетворювач напруги, що підвищує постійну напругу включає інтегральний силовий блок (IPM), в якому знаходяться перемикаючі біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) і реактор, що служить накопичувачем енергії. Перераховані компоненти використовуються для підвищення постійної напруги живлення.

Інвертор перетворює постійну напругу в трифазну змінну напругу для живлення електричних машин MG1 і MG2. В кожному плечі моста інвертора, живлячого MG1 і MG2, знаходяться силові транзистори (рис. 5.6). Крім того, в компактному інтелектуальному силовому блоці інвертора (IPM) встановлений процесор, призначений для обробки сигналів і реалізації захисних функцій.

Роботою силових транзисторів управляє контролер кола високої напруги через контролер електричних машин. Крім того, інвертор передає через контролер електричних машин контролеру кола високої напруги необхідну інформацію для регулювання живлення (сила струму, напруга).

Інвертор, як і електричні машини MG1 і MG2, охолоджується системою охолодження з радіатором, яка діє незалежно від системи охолодження двигуна внутрішнього згоряння.

Коли електричні машини MG1 та MG2 працюють в режимі генератора, інвертор перетворює змінну напругу в постійну напругу 650 В. після цього перетворювач постійної напруги знижує цю напругу до 288 В, яке використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї.

5.4. Система керування

Контролер електричних машин керує роботою інвертора і перетворювача, що підвищує напругу (см. рис. 5.5), щоб забезпечити ефективну роботу MG1 і MG2 в режимах генератора або двигуна.

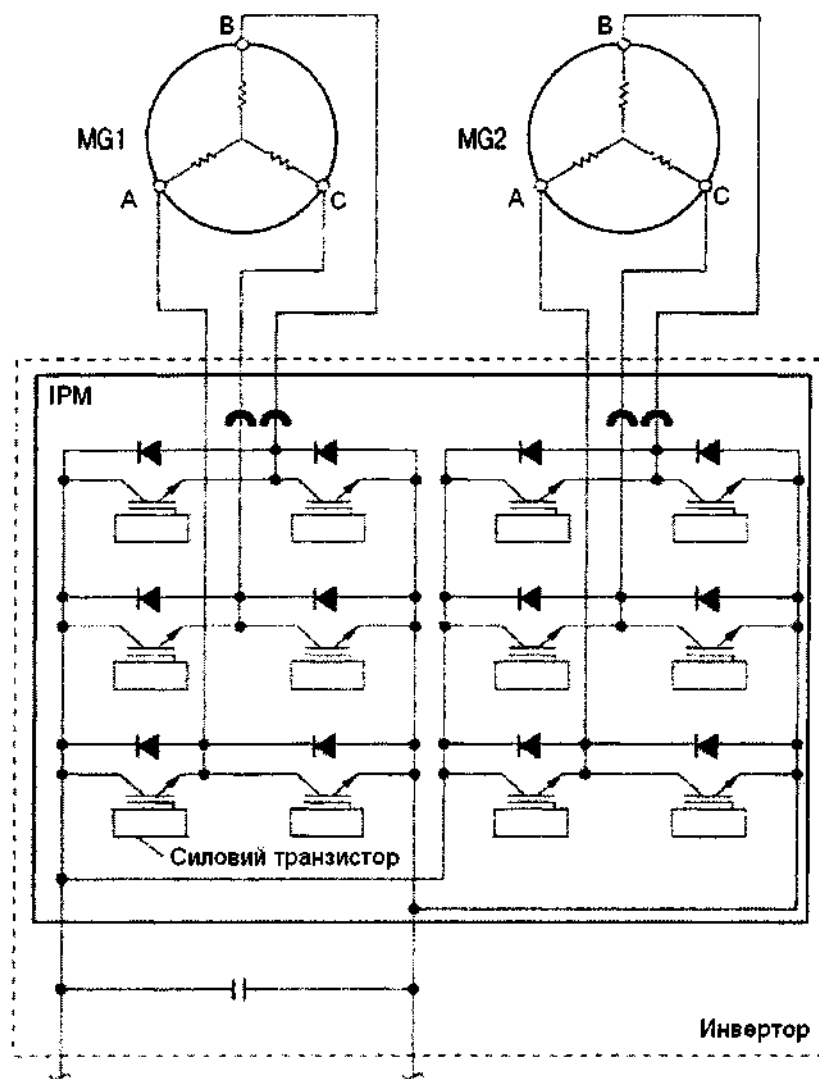


Рис. 5.6. Схема електрична принципова живлення електричних машин MG1 і MG2

Контролер електричних машин передає на контролер кола високої напруги данні, необхідні для керування автомобілем, такі як, сила струму на виході інвертора, температура інвертора і виниклі несправності. Контролер електричних машин приймає від контролера кола високої напруги данні, необхідні для керування електричними машинами, такі, наприклад, як, необхідне значення обертового моменту.

Контролер кола високої напруги постійно спостерігає за рівнем зарядки високовольтної акумуляторної батареї, за її температурою, за температурою охолоджуючої рідини системи охолодження електричних силових пристроїв і за величиною

електричного навантаження. Якщо, при включеному сигналізаторі READY і селекторі в положенні Р, або при русі заднім ходом, будь-який з перерахованих параметрів не відповідатиме встановленим вимогам, то контролер кола високої напруги віддає команду на запуск двигуна внутрішнього згоряння, щоб привести до руху електричний генератор MG1 з метою заряду високовольтної акумуляторної батареї.

Підвищення екологічної чистоти автомобіля досягається за рахунок оптимізації процесу рекуперації енергії і зниження витрати палива. Система керування гібридною трансмісією вимикає двигун внутрішнього згоряння на холостому ходу, а також, коли двигун знаходиться в зоні високих питомих витрат палива, використовуючи для руху тяговий електричний двигун MG2. Коли умови для роботи двигуна внутрішнього згоряння сприятливі (низька питома витрата палива), обертовий момент двигуна використовується для руху автомобіля і для приводу електричної машини MG1, яка працює в режимі генератора. Таким чином, система керування міняє поєднання і напрям обертових моментів усередині коробки передач, добиваючись високої паливної економічності, а, отже, і високої екологічної чистоти.

Система керування оптимальним чином поєднує тягові зусилля двигуна внутрішнього згоряння, електричних машин MG1 і MG2 відповідно до умов руху автомобіля. Розглянемо декілька прикладів роботи системи керування гібридною трансмісією в різних режимах руху автомобіля (рис. 5.7).

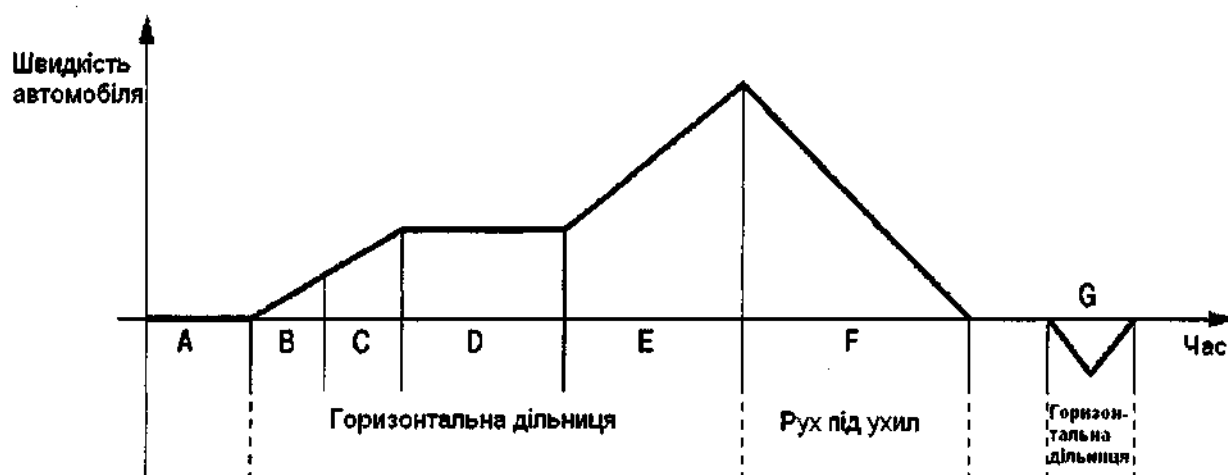


Рис. 5.7. Режими руху автомобіля

В таблиці 5.3 приведені основні режими руху автомобіля, відповідні позначенням, які показані на рис. 5.7.

Таблиця 5.3

Режими руху автомобіля

Позначення на рис. 5.7	Режим руху
A	Включений сигналізатор READY
B	Начало руху с використанням тяги електричного двигуна MG2
C	Рух с використанням тяги MG2 и ДВЗ
D	Рух с постійної швидкістю при низькому навантаженню
E	Прискорення при повністю нажатій педалі акселератора
F	Рух з уповільненням
G	Рух заднім ходом

Розглянемо докладніше режими роботи системи керування залежно від умов руху автомобіля.

В режимі А, коли автомобіль знаходиться в стані готовності, ДВЗ не працює, тяговий електродвигун MG2 знеструмлений.

Початок руху з використанням тяги електричного двигуна MG2 (режим В). Автомобіль вирушає з місця тільки за рахунок тяги електричного двигуна MG2.

Схема передачі енергії в даному режимі руху автомобіля показана на рис. 5.8.

Рух з використанням тяги електричного двигуна MG2 і пуск двигуна внутрішнього згорання (режим С). Якщо, при русі автомобіля з використовуванням тільки тяги електродвигуна MG2, запрошуване тягове зусилля збільшується, то включається стартер MG1, який запускає двигун внутрішнього згорання. Схема передачі енергії в даному режимі руху автомобіля показана на рис. 5.9.

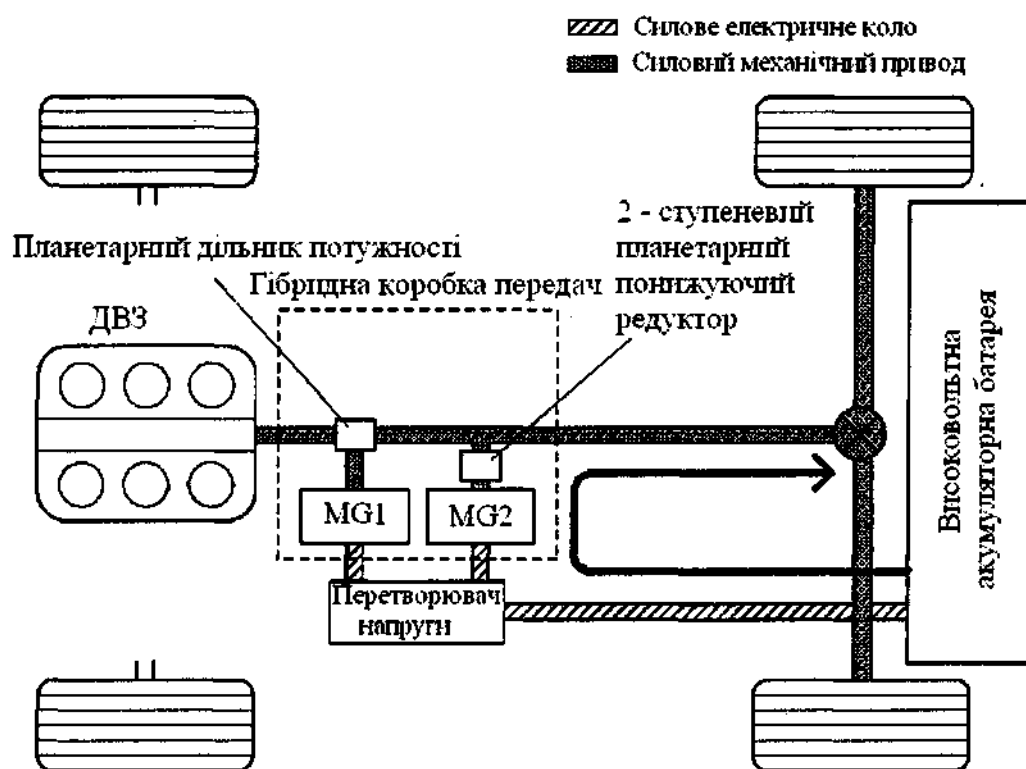


Рис. 5.8. Схема передачі енергії на початку руху автомобіля

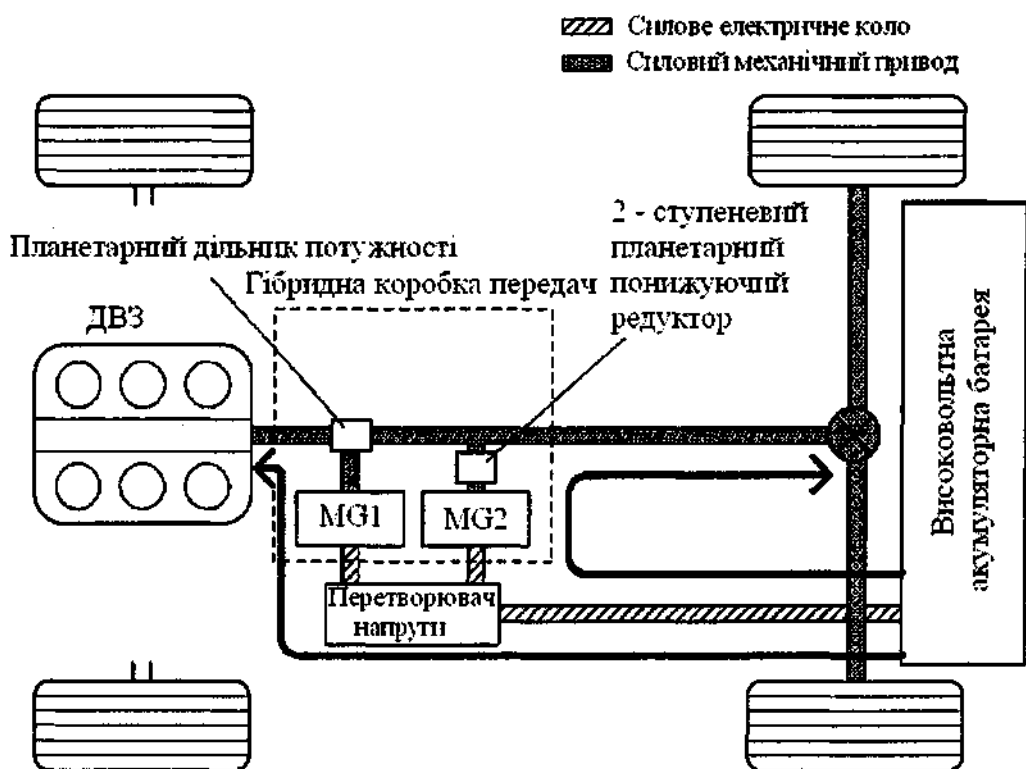


Рис. 5.9. Схема передачі енергії при русі з використанням тяги MG2 і пуск ДВЗ

Двигун внутрішнього згоряння буде запущений також у тому випадку, коли контролер кола високої напруги знайде відхилення від норми таких параметрів, як рівень заряду високовольтної акумуляторної батареї, температури батареї, температури охолоджуючої рідини і електричного навантаження.

Рух з постійною швидкістю при низькому навантаженні (режим D). Коли автомобіль рухається з постійною швидкістю при низькому навантаженні, тягове зусилля двигуна внутрішнього згоряння передається планетарними механізмами. Частина цього тягового зусилля використовується для приводу ведучих коліс, а частина прямує на генерацію енергії за допомогою електричного генератора MG1.

Схема передачі енергії в даному режимі руху автомобіля показана на рис. 5.10.

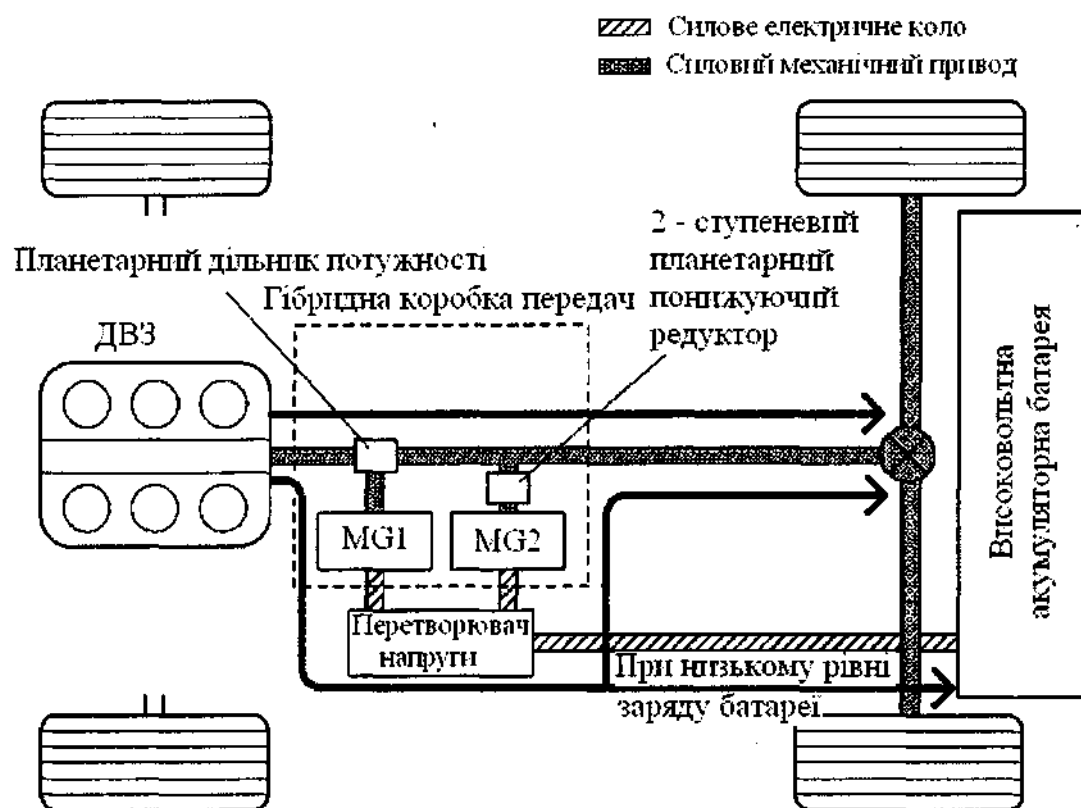


Рис. 5.10. Схема передачі енергії при русі з постійною швидкістю і низькому навантаженню

Використовуючи електричний зв'язок через інвертор, частина електричної енергії прямує на тяговий електричний двигун MG2

для створення додаткового тягового зусилля. При зниженні рівня заряду високовольтної акумуляторної батареї, генератор MG1, що приводиться в дію двигуном внутрішнього згоряння, здійснюватиме її заряд. Перемикання між діапазоном високої швидкості і діапазоном низької швидкості здійснюється за допомогою 2-ступеневого планетарного редуктора.

Прискорення при повному натисканні педалі акселератора (режим Е). При переході від руху з постійною швидкістю до прискорення при повному натисканні педалі акселератора високовольтна акумуляторна батарея віддає енергію на тяговий електричний двигун MG2 для отримання додаткового тягового зусилля.

Схема передачі енергії в даному режимі руху автомобіля показана на рис. 5.11.

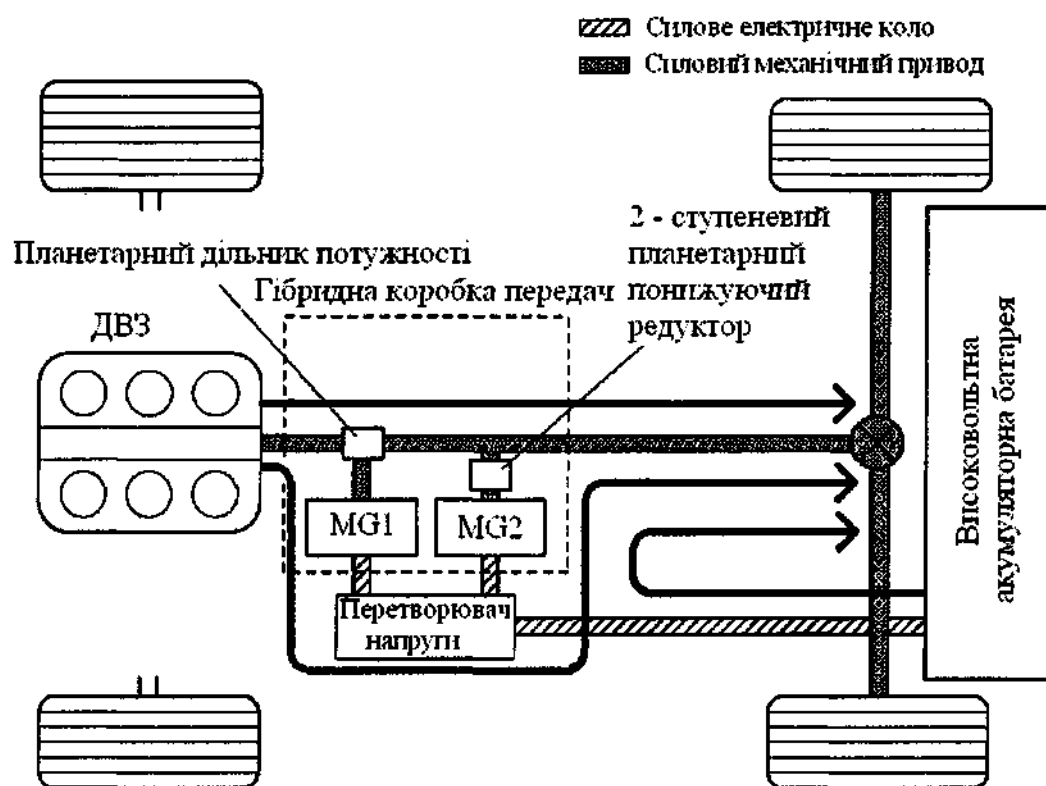


Рис. 5.11. Схема передачі енергії при русі з прискоренням при повному натисканні педалі акселератора

Рух з уповільненням (режим F). Якщо автомобілю треба загальмовуватися при русі під ухил, а селектор знаходиться в положенні D, двигун внутрішнього згоряння вимикається, і

Схема передачі енергії в даному режимі руху автомобіля показана на рис. 5.12.



Рух заднім ходом (режим G). При русі заднім ходом використовується сила тяги електричного двигуна MG2. Схема передачі енергії аналогічна початку руху автомобіля вперед, яка показана на рис. 5.8.

5.5. Гібридна коробка передач

Розглянемо більш детально принцип роботи гібридної коробки передач L110, яка встановлюється на автомобіль Lexus GS450h. До складу цієї коробки передач входять наступні компоненти (рис. 5.13): електричні машини MG1, MG2, планетарний дільник потужності, 2-ступеневий планетарний понижуючий редуктор для MG2, клапанна коробка; масляний насос з механічним приводом від двигуна внутрішнього згоряння; масляний насос з електричним приводом, який забезпечує гідравлічний тиск при зупиненому двигуні внутрішнього згоряння і демпфер ведучого диска.

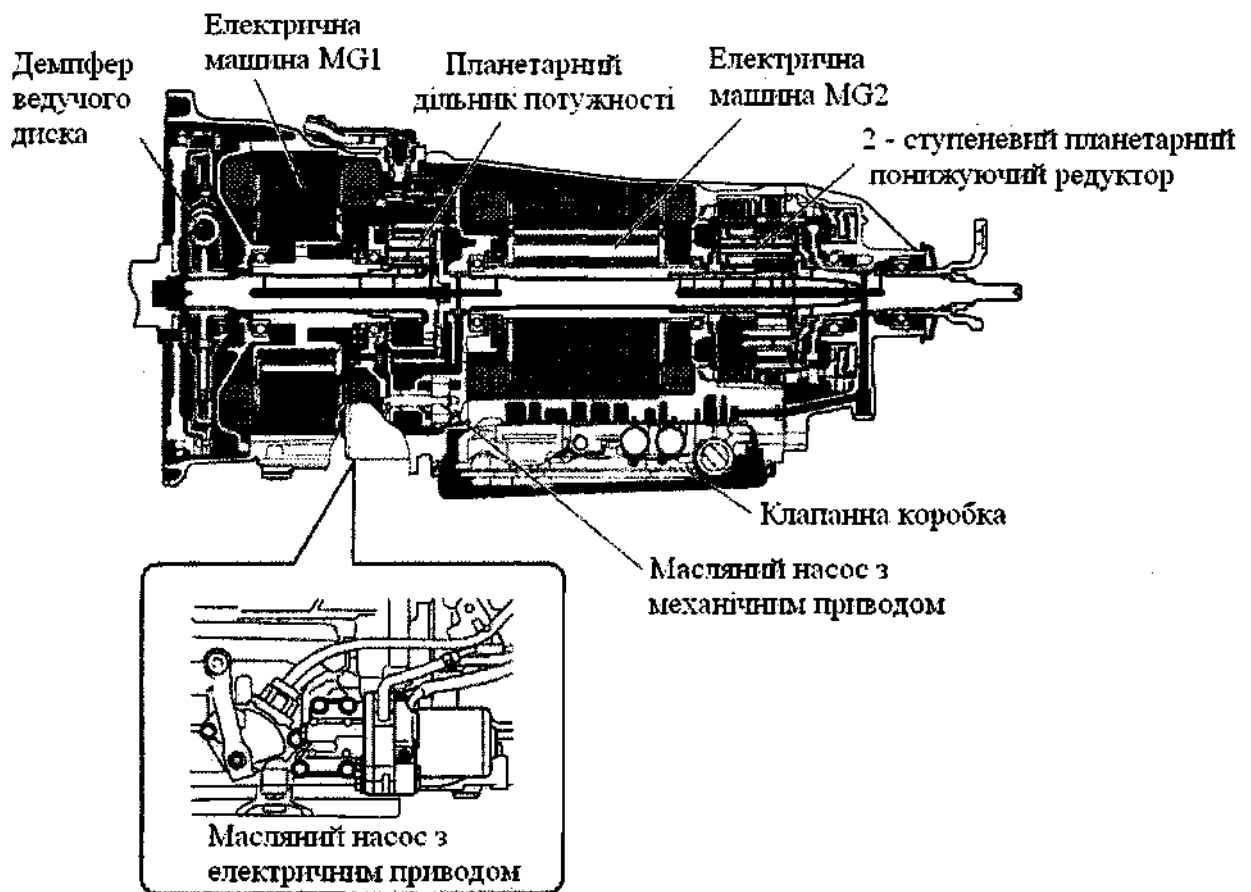


Рис. 5.13. Гібридна коробка передач L110

Застосування в коробці передач двох масляних насосів гарантує безперебійне створіння тиску робочої рідини.

Електричні машини MG1 і MG2, планетарний дільник потужності і 2-ступеневий планетарний понижуючий редуктор розташовані співвісно, уздовж вхідного валу.

Демпфер ведучого диска коробки передач представляє собою виту циліндрову пружину з пологою характеристикою і призначений для згладжування нерівномірності швидкості обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згоряння. Потік потужності від двигуна внутрішнього згоряння, проходячи через планетарний дільник потужності, ділиться на два потоки, перший з яких використовується для обертання ведучих коліс, а другий служить для приводу генератора MG1, який виробляє електричну енергію для гібридної трансмісії.

Електрична машина MG1 сполучена з сонячною шестернею планетарного дільника потужності, а електрична машина MG2 – із задньою сонячною шестернею двохступеневого планетарного понижуючого редуктора. Планетарний дільник потужності розташований за електричною машиною MG1, а 2-ступеневий планетарний понижуючий редуктор – позаду MG2. Кінематичний зв'язок між компонентами гібридної коробки передач L110 представлений в табл. 5.4 і на рис. 5.14.

Таблиця 5.4

**Кінематичний зв'язок між компонентами
гібридної коробки передач L110**

Компонент		Зв'язок
1		2
Планетарний дільник потужності	Сонячна шестерня	MG1
	Водило	Вхідний вал коробки (вал ДВЗ)
	Корона шестерня	Вихідний вал коробки передач (карданний вал)

1		2
2-ступеневий планетарний понижуючий редуктор електричного двигуна MG2	Передня сонячна шестерня	Гальмо N1 (B_1)
	Задня сонячна шестерня	Довгий сателіт
	Водило	Вихідний вал коробки передач (карданний вал)
	Коронна шестерня	Гальмо N2 (B_2)

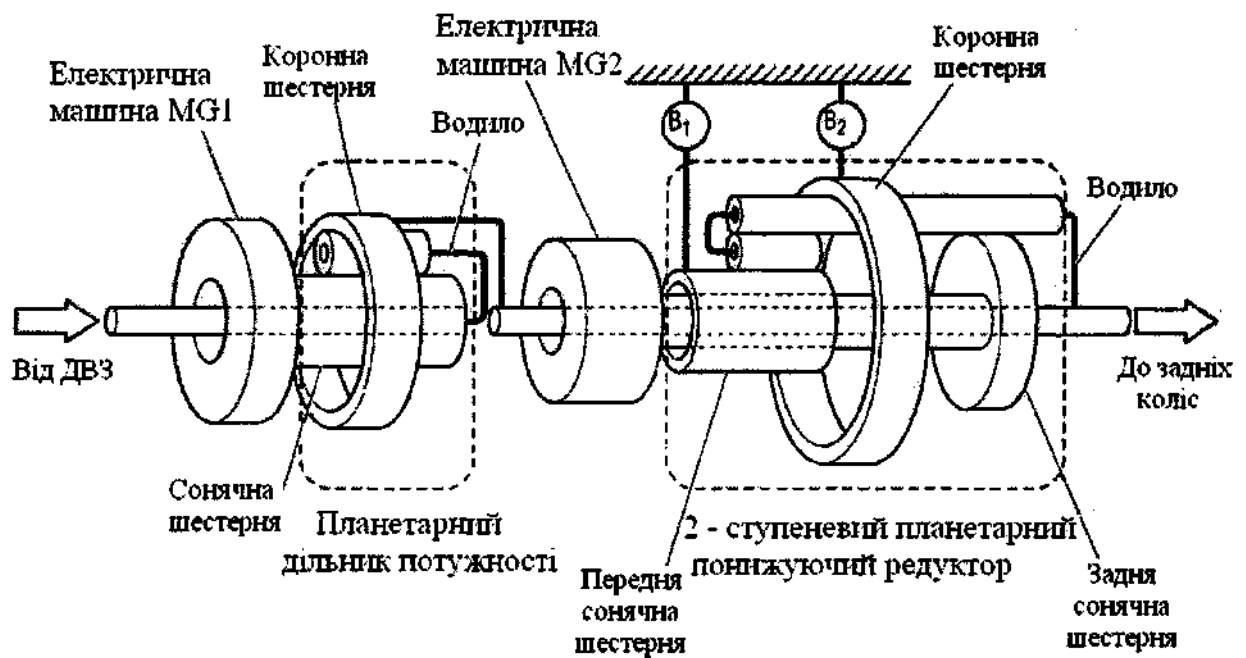


Рис. 5.14. Кінематичний зв'язок між компонентами гібридної коробки передач

Технічні дані компонентів гібридної коробки передач L110 автомобіля Lexus GS450h приведена в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Технічні дані компонентів гібридної коробки передач

B ₁	Гальмо N1	Кількість дисків		5
B ₂	Гальмо N2	Кількість дисків		4
Планетарний дільник потужності		Число зубців коронної		78
		Кількість зубців сателіта		22
		Кількість зубців сонячної шестерні		34
2-ступеневий планетарний понижуючий редуктор електричного двигуна MG2		Число зубів коронної шестерні		87
		Кількість зубців сателіта	Короткий	28
			Довга	20
		Кількість зубців сонячної шестерні	Передня	27
			Задня	30

Сонячне колесо планетарного дільника потужності сполучено з електричною машиною MG1, коронна шестерня сполучена з вихідним валом коробки передач, а водило – з вхідним валом гібридної коробки передач, тобто з двигуном внутрішнього згоряння (рис. 5.15).

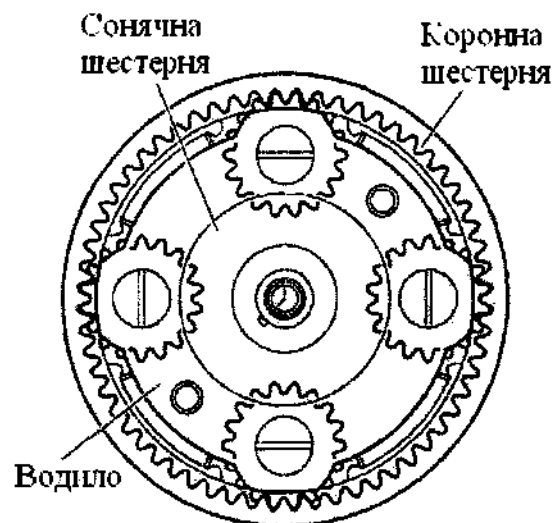


Рис. 5.15. Планетарний дільник потужності

Зв'язок між напрямом обертання і моментом, діючим на зубчаті колеса, розглянемо на прикладі деяких основних режимів роботи: початок руху за допомогою електричного двигуна MG2 (режим В), рух з постійною швидкістю при низькому навантаженні (режим D), прискорення при повністю відкритій дросельній заслінці (режим Е), рух з уповільненням (режим F), рух заднім ходом (режим G). Опис цих режимів проведемо за допомогою номограм, які дають наочне уявлення про напрям обертання зубчатого колеса планетарної передачі, про швидкість його обертання і про баланс моментів, що крутять. Швидкість обертання трьох типів зубчатих коліс планетарного дільника потужності знаходяться в такому співвідношенні, що на номограмі вони незмінно знаходяться на одній прямій лінії.

Початок руху за допомогою електричного двигуна MG2 (режим З). Для нормального руху з місця використовується обертовий момент тягового електродвигуна MG2. У цей момент швидкість обертання водила рівна 0, оскільки двигун внутрішнього згоряння не працює. Обертовий момент не впливає на сонячне колесо, оскільки генератор MG1 не виробляє якого-небудь обертового моменту. Сонячне колесо вільно обертається в напрямі (-) (рис. 5.16), завдяки зв'язку з обертанням коронної шестерні. Номограма роботи планетарного дільника потужності в даному режимі руху автомобіля представлена на рис. 5.16.

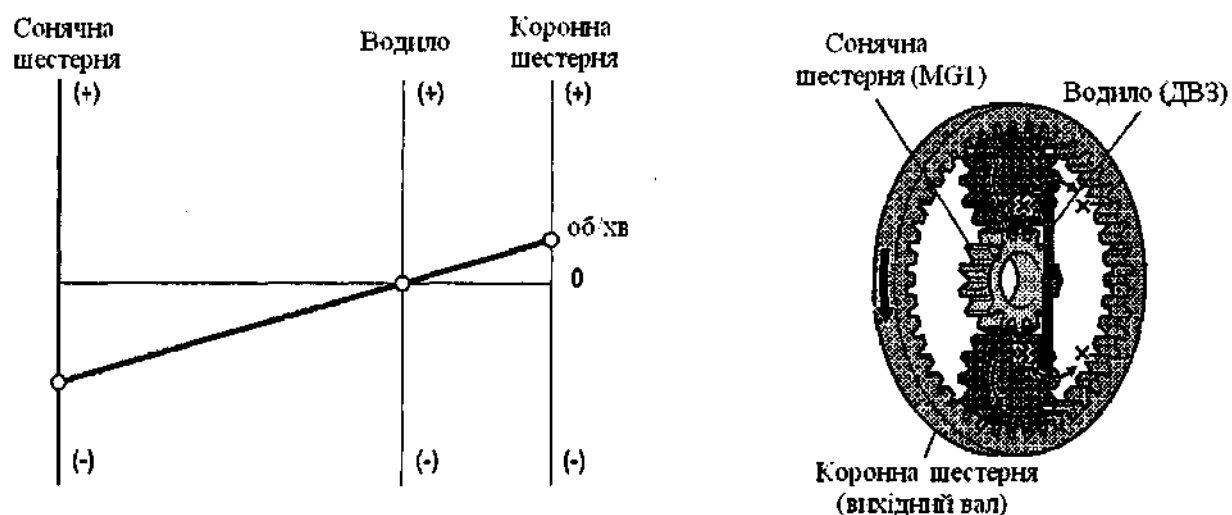


Рис. 5.16. Номограма роботи планетарного дільника потужності при початку руху автомобіля

Стан компонентів планетарного дільника потужності при початку руху автомобіля представлена в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Стан планетарного дільника потужності при початку руху автомобіля

Стан компонента	Сонячна шестерня (MG1)	Водило (ДВЗ)	Коронна шестерня (вихідний вал)
Напрямок обертання	-	0	+
Значення обертового моменту	0	0	0

Рух автомобіля з постійною швидкістю при низькому навантаженні (режим D). Сонячна шестерня, водило і коронна шестерня обертаються в напрямі (+). Обертовий момент діє на водило в напрямі (+). Врівноважуючий момент діє на сонячну шестерню і коронну шестерню в напрямі (-) (рис. 5.17). Момент, діючий на сонячну шестерню в напрямі (-) примушує електричну машину MG1 виробляти електроенергію. Номограма роботи планетарного дільника потужності в даному режимі руху автомобіля представлена на рис. 5.17.



Рис. 5.17. Номограма роботи планетарного дільника потужності при русі з постійною швидкістю при низькому навантаженні

Стан компонентів планетарного механізму при русі з постійної швидкістю при низькому навантаженні наведена в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Стан планетарного дільника потужності при русі з постійною швидкістю при низькому навантаженні

Стан компонента	Сонячна шестерня (MG1)	Водило (ДВЗ)	Коронна шестерня (вихідний вал)
Напрямок обертання	+	+	+
Значення обертового моменту	-	+	-

Прискорення при повністю відкритій дросельній заслінці (режим Е). Коли вимагається виконати різке прискорення, збільшується швидкість обертання колінчастого валу. В цьому випадку співвідношення між кутовими швидкостями шестерень планетарного дільника потужності може стати подібним тому, що показано на рисунку 5.18. Напрямок передачі моменту на кожній шестерні залишається таким же, як і для випадку руху з постійною швидкістю при низькому навантаженні. Номограма роботи планетарного дільника потужності в даному режимі руху автомобіля представлена на рис. 5.18.

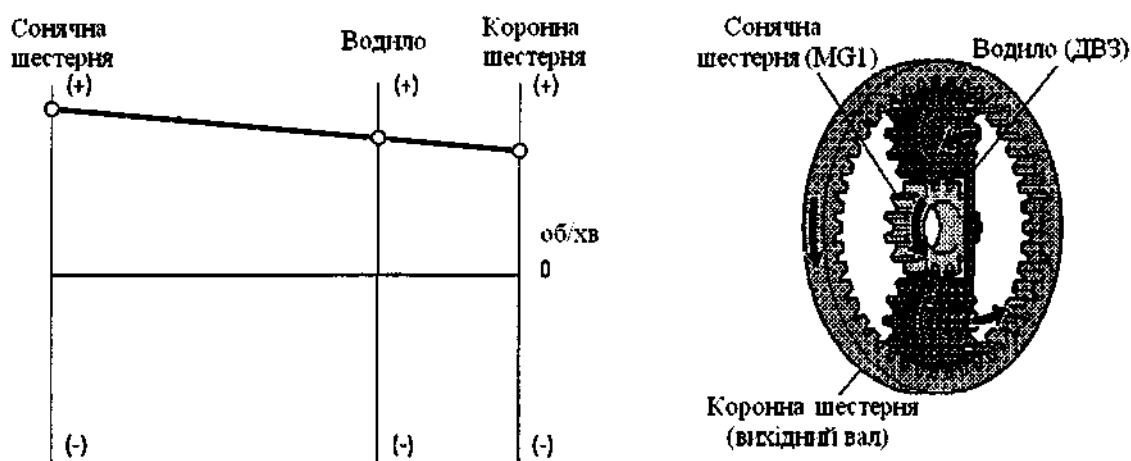


Рис. 5.18. Номограма роботи планетарного дільника потужності з прискоренням при повністю відкритій дросельній заслінці

Стан компонентів планетарного дільника потужності з прискоренням при повністю відкритій дросельній заслінці представлена в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Стан планетарного дільника потужності з прискоренням при повністю відкритій дросельній заслінці

Стан компонента	Сонячна шестерня (MG1)	Водило (ДВЗ)	Коронна шестерня (вихідний вал)
Напрямок обертання	+	+	+
Значення обертового моменту	-	+	-

Рух з уповільненням (режим F). При русі з уповільненням коронна шестерня приводиться в рух задніми колесами. У цей момент швидкість обертання водила стає рівною 0, оскільки двигун внутрішнього згоряння не працює. Момент, що крутить, не впливає на сонячне колесо, оскільки генератор MG1 не виробляє якого-небудь моменту, що крутить. Сонячне колесо вільно обертається в напрямі (-), завдяки зв'язку з обертанням коронної шестерні. Номограма роботи планетарного дільника потужності в даному режимі руху автомобіля представлена на рис. 5.19.



Рис. 5.19. Номограма роботи планетарного дільника потужності при русі з уповільненням

Стан компонентів планетарного дільника потужності при русі з уповільненням представлена в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Стан планетарного дільника потужності при русі з уповільненням

Стан компонента	Сонячна шестерня (MG1)	Водило (ДВЗ)	Коронна шестерня (вихідний вал)
Напрямок обертання	-	0	+
Значення обертового моменту	0	0	0

Рух заднім ходом здійснюється, головним чином, за рахунок моменту тягового електричного двигуна MG2, що крутить. В цьому режимі напрям обертання шестерень планетарного дільника потужності протилежно тому, що спостерігається при русі в прямому напрямі. Швидкість обертання водила стає рівною 0, оскільки двигун внутрішнього згоряння не працює. Сонячне колесо вільно обертається в напрямі (+), завдяки зв'язку з обертанням коронної шестерні. Номограма роботи планетарного дільника потужності в даному режимі руху автомобіля представлена на рис. 5.20.

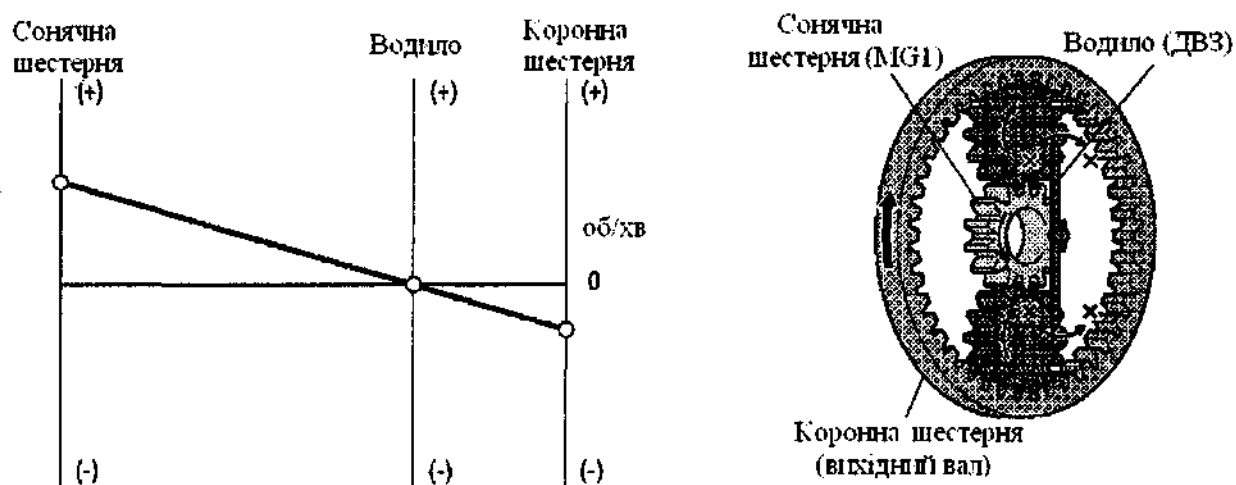


Рис. 5.20. Номограма роботи планетарного дільника потужності при русі заднім ходом

Стан компонентів планетарного дільника потужності при русі заднім ходом представлена в табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Стан планетарного дільника потужності при русі заднім ходом

Стан компонента	Сонячна шестерня (MG1)	Водило (ДВЗ)	Коронна шестерня (вихідний вал)
Напрямок обертання	+	0	-
Значення обертового моменту	0	0	0

Розглянемо далі принцип роботи 2-ступеневого планетарного понижуючого редуктора електричної машини MG2. Двохступеневий планетарний редуктор з гідравлічним керуванням автоматично змінює передавальне відношення підключення електричної машини MG2 з високого на низьке і навпаки, що і забезпечує плавність ходу автомобіля.

Двохступеневий понижуючий редуктор електродвигуна складається з передньої сонячної шестерні, задньої сонячної шестерні, довгого сателіта, короткого сателіта і коронної шестерні. Момент від MG2, що крутить, передається через задню сонячну шестерню на провідні (задні) колеса.

В планетарному редукторі встановлені гальмо N1 (B_1) і гальмо N2 (B_2), які забезпечують керування редуктором. При включенні гальма N1 відбувається загальмовування передньої сонячної шестерні, а при включенні гальма N2 загальмовується коронна шестерня. В результаті, відповідно до швидкості руху і положення педалі акселератора, відбувається зміна передавального відношення від електричної машини MG2 з високого на низьке і навпаки. Для зменшення управляючого тиску і розмірів в гальмі N2 (B_2) застосовані подвійні поршні.

Розглянемо принцип роботи 2-ступеневого планетарного понижуючого редуктора електричної машини MG2. Двохступеневий планетарний редуктор з гідравлічним керуванням

автоматично змінює передавальне відношення підключення електричної машини MG2 з високого на низьке і навпаки, що і забезпечує плавність ходу автомобіля.

Двохступеневий понижуючий редуктор електродвигуна складається з передньої сонячної шестерні, задньої сонячної шестерні, довгого сателіта, короткого сателіта і коронної шестерні. Обертний момент від MG2 передається через задню сонячну шестерню на провідні (задні) колеса.

В планетарному редукторі встановлені гальмо N1 (B_1) і гальмо N2 (B_2), які забезпечують керування редуктором. При включенні гальма N1 відбувається загальмовування передньої сонячної шестерні, а при включенні гальма N2 загальмовується коронна шестерня. В результаті, відповідно до швидкості руху і положення педалі акселератора, відбувається зміна передавального відношення від електричної машини MG2 з високого на низьке і навпаки. Для зменшення управляючого тиску і розмірів в гальмі N2 (B_2) застосовані подвійні поршні.

Кінематичний зв'язок між компонентами планетарного редуктора і потоки потужності при низькій швидкості автомобіля представлений на рис. 5.21.

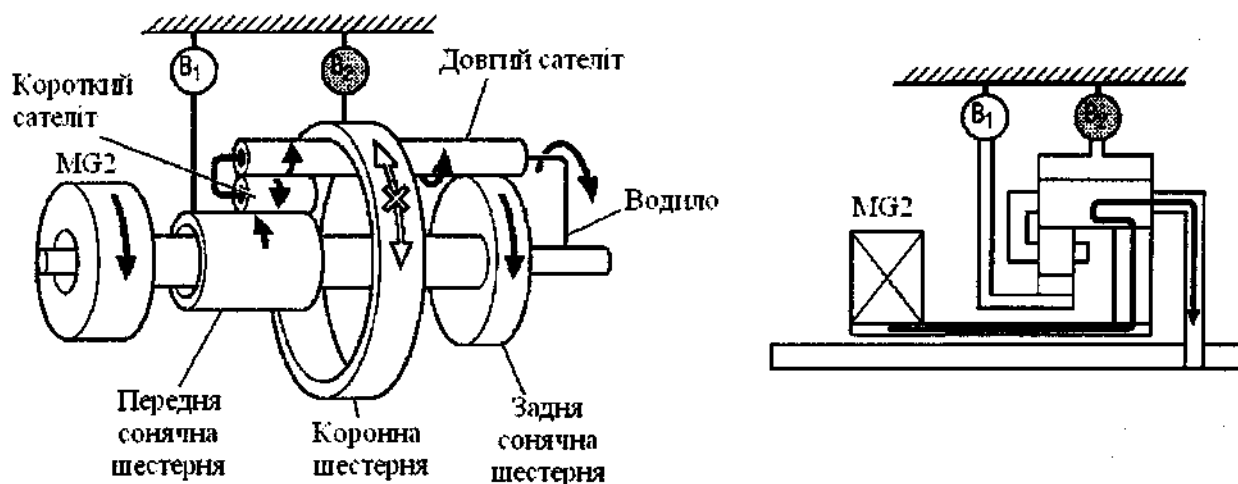


Рис. 5.21. Потоки потужності між компонентами планетарного редуктора при низькій швидкості автомобіля

Кінематичний зв'язок між компонентами планетарного редуктора і потоки потужності при високій швидкості автомобіля представлений на рис. 5.22.

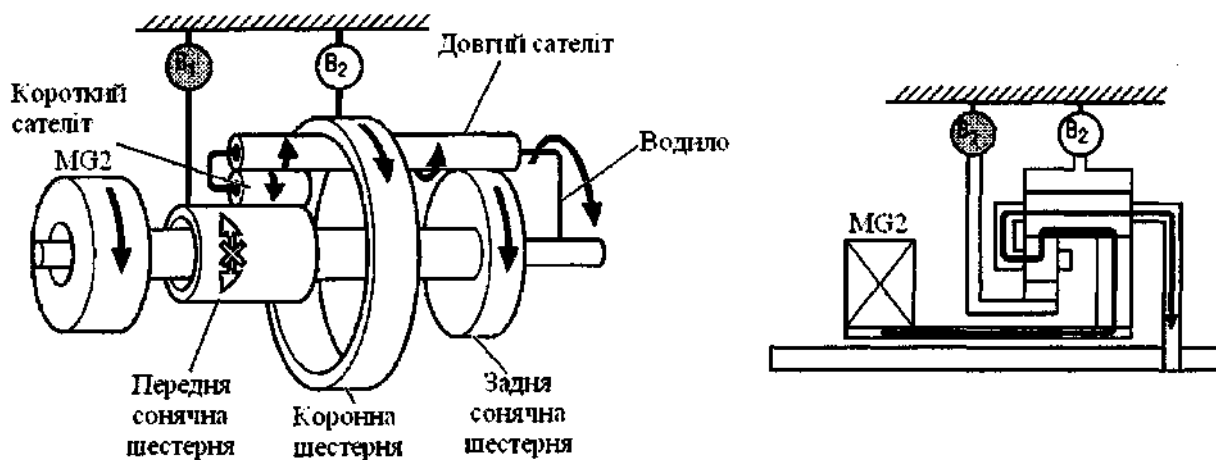


Рис. 5.22. Потоки потужності між компонентами планетарного редуктора при високій швидкості автомобіля

Перемикання контуру керування потоками потужності здійснюється згідно схемі, представленій на рис. 5.23.

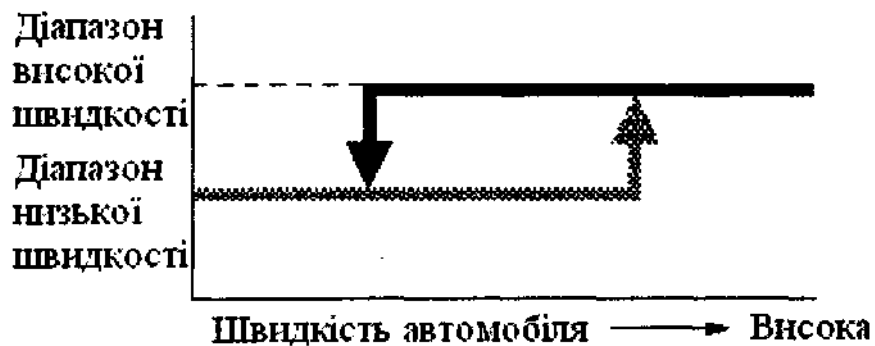


Рис. 5.23. Схема перемикання контуру керування потоками потужності

Розглянемо схему керування контурами гідравлічного управління. Електромагнітні клапани SL1 і SL2 включаються по команді контролера кола високої напруги (рис. 5.24). Тиск від них поступає безпосередньо на управляючі клапани B_1 і B_2 , які регулюють величину магістрального тиску в гальмі N1 (B_1) і в гальмі N2 (B_2). Це значно покращує якість перемикання ступенів і підвищує швидкодію.

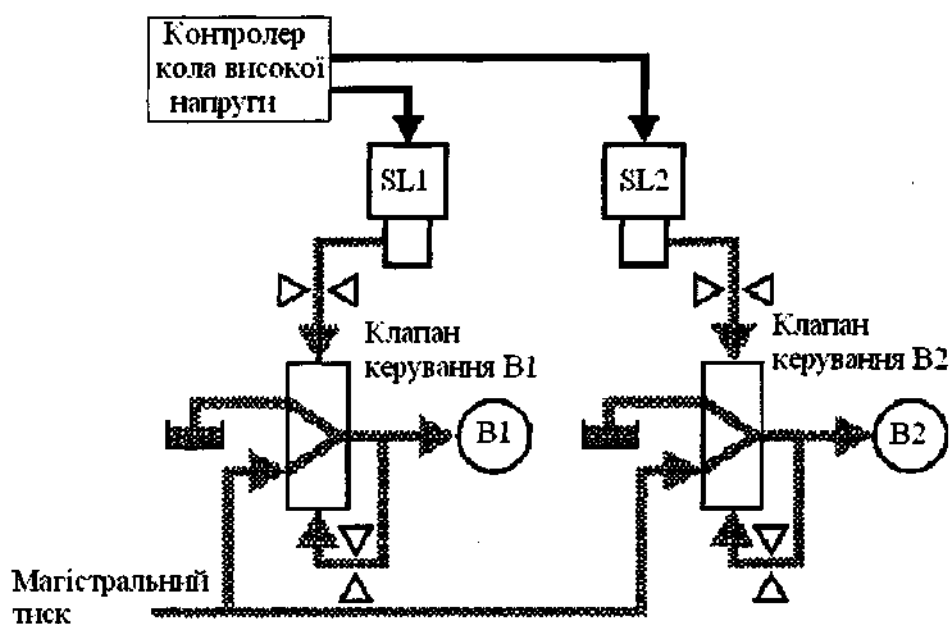


Рис. 5.24. Схема керування контурами гідравлічного управління

На рис. 5.25 показані електромагнітні клапани SL1 і SL2 і відповідні їм регулювальні характеристики тиску.

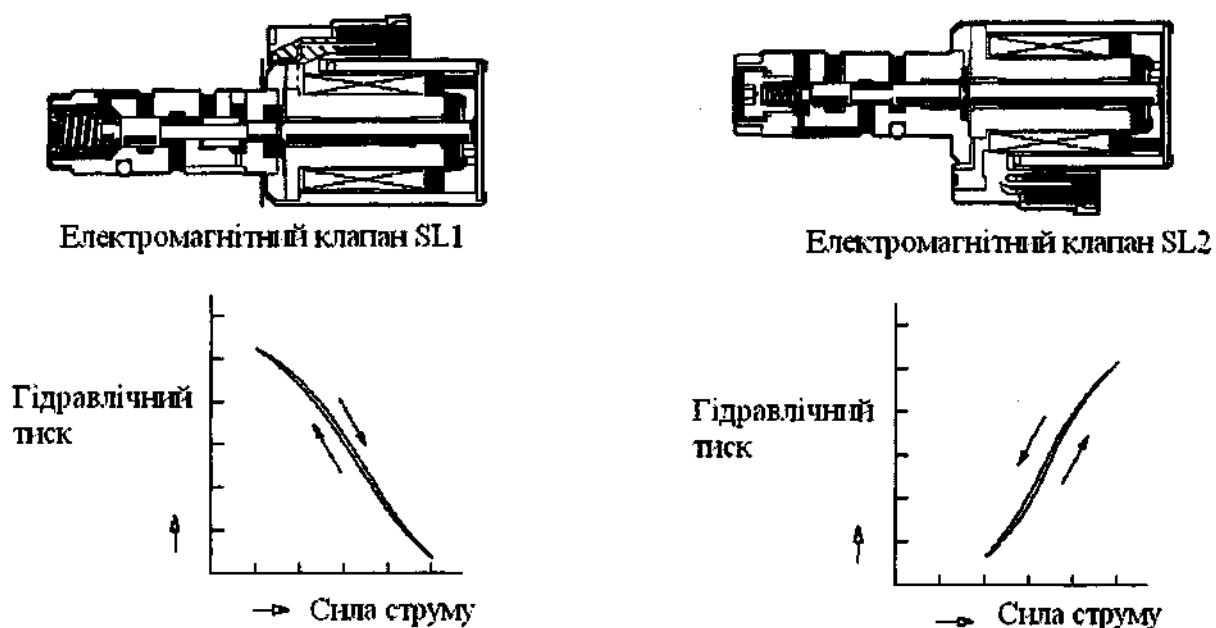


Рис. 5.25. Електромагнітні клапани SL1 і SL2 і відповідні їм регулювальні характеристики

В таблиці 5.10 показані стани електромагнітних клапанів SL1 і SL2 залежно від положення селектора

Таблиця 5.10

**Стан електромагнітних клапанів SL1 і SL2
при різних положеннях селектора**

Положення селектора		Електромагнітний клапан	
		SL1	SL2
P	OFF (Коло живлення кнопки пуску вимкнені)	Вимкнений	Вимкнений
	READY (Коло живлення кнопки пуску вимкнені у режимі очікування)	Вимкнений	Включений
R		Вимкнений	Включений
N		Вимкнений	Включений
D,S	Діапазон низької швидкості	Вимкнений	Включений
	Діапазон високої швидкості	Включений	Вимкнений

Для регулювання магістрального тиску в електромагнітному клапані S1 використовується триходовий золотник (рис. 5.26).

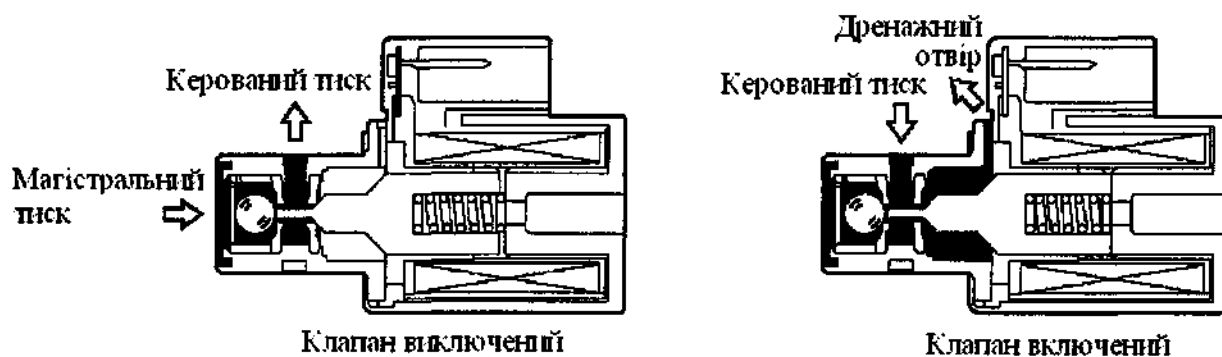


Рис. 5.26. Стан вимкненого та включеного
електромагнітного клапана

Високий тиск використовується для перемикання ступенів двохступеневого планетарного понижуючого редуктора. Низький тиск використовується для управління при русі з постійною швидкістю і з низьким навантаженням для підвищення паливної

економічності. Величина магістрального тиску після його регулювання визначається контактними датчиками тиску. Відомості про величину тиску передаються на контролер кола високої напруги.

Функціональне призначення електромагнітних клапанів і контактних датчиків тиску представлено в табл. 5.11.

Таблиця 5.11

**Призначення електромагнітних клапанів і
контактних датчиків тиску**

Компонент	Призначення
Електромагнітний клапан SL1	Керування тиском гальма N1 (B_1)
Електромагнітний клапан SL2	Керування тиском гальма N2 (B_2)
Електромагнітний клапан S1	Керування магістральним тиском
Контактний датчик тиску N 1	Визначає тиск робочої рідини гальма N1 (B_1)
Контактний датчик тиску N 2	Визначає тиск робочої рідини гальма N2 (B_2)
Контактний датчик тиску N 3	Визначає величину магістрального тиску

В цій гібридній коробці передач використовується система послідовного напівавтоматичного перемикавання передач «Shiftmatic», яка дозволяє, використовуючи селектор, вибирати шість ступенів гальмування двигуном. Через керування двигуном внутрішнього згоряння і електричними машинами MG1 і MG2, що працюють в режимі генератора, система покращує рекуперацію генератором кінетичної енергії при гальмуванні двигуном і підвищує динамічні характеристики автомобіля.

Робота системи послідовного напівавтоматичного перемикавання передач «Shiftmatic» полягає в наступному. Припустимо, водій переставляє селектор в положення S (рис. 5.27). У цей момент гальмування двигуном відбувається на 5 передачі.

Переміщаючи селектор з положення «S» у бік «+» або «-», водій може вибрати для гальмування двигуном ступені від 1 до 6. Чим нижче вибраний ступінь для гальмування двигуном, тим вище гальмівний момент.

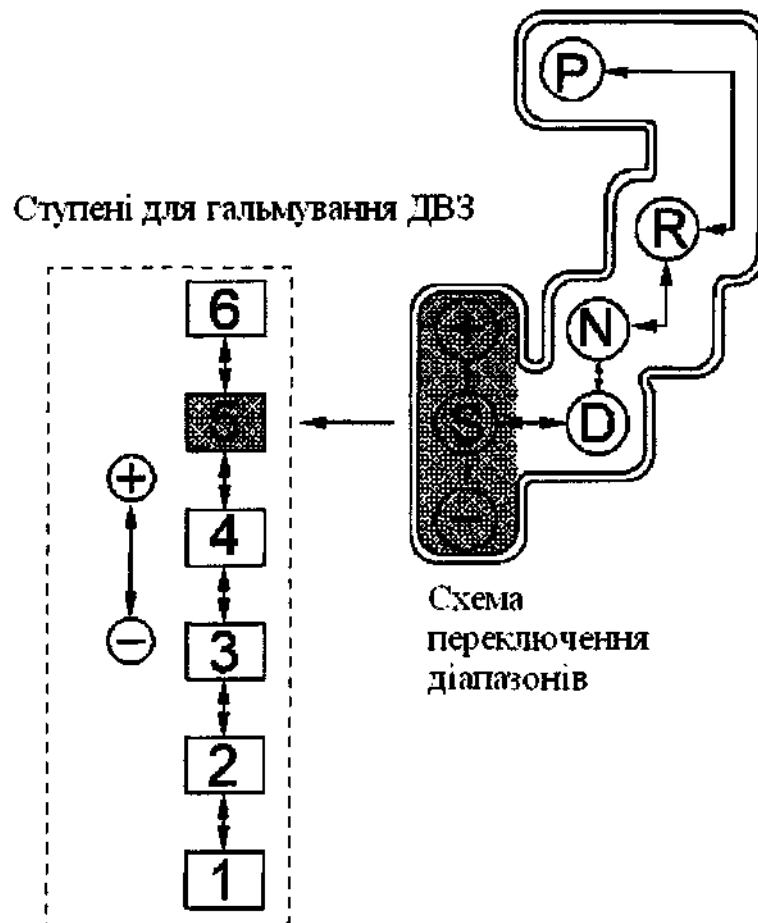


Рис. 5.27. Схема роботи системи послідовного напівавтоматичного перемикавання передач «Shiftmatic»

Якщо швидкість руху автомобіля вище певного (допустимого для гальмування на вибраній передачі) значення, то при отриманні запиту на гальмування двигуном на вибраній водієм передачі (водій маніпулює селектором) система обмежує пониження передачі і подає водію звуковий попереджувальний сигнал.

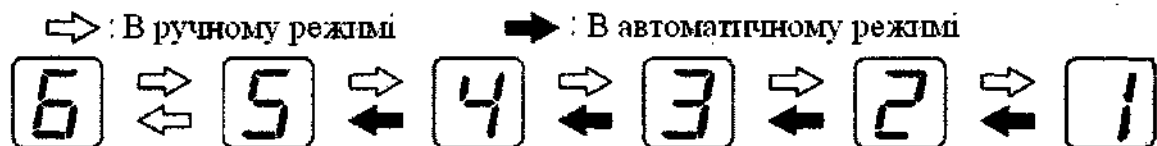
В таблиці 5.12 наведена відповідність максимальної швидкості руху автомобіля і ступенів гальмування двигуном внутрішнього згорання.

Таблиця 5.12

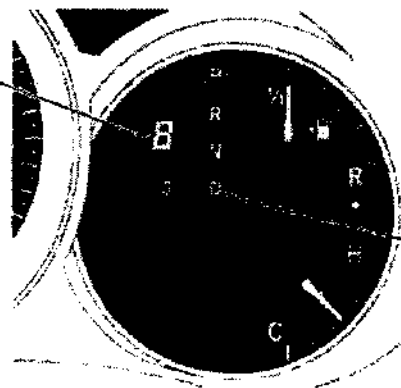
**Відповідність максимальної швидкості руху
і ступенів гальмування ДВЗ**

Ступені гальмування ДВЗ	Максимальна швидкість, км/год
6 ⁵	-
5 ⁴	200
4 ³	145
3 ²	108
2 ¹	64

Якщо автомобіль розганяється з перемиканням передач від 1 до 4, то передача для гальмування двигуном автоматично підвищується до 5, відповідно до швидкості руху. У цей момент включається світловий індикатор передачі (рис. 5.28).



Світловий
сигналізатор
діапазону



Сигналізатор
положення
селектора

Рис. 5.28. Ілюстрація роботи системи послідовного напівавтоматичного перемикання передач «Shiftmatic»

Перемикач режимів дозволяє вибрати один з режимів керування коробкою передач: PWR (power - динамічний), Hybrid (гібридний, нормальний), або SNOW (зимовий). Перемикач режимів розташований позаду селектора (рис. 5.29).

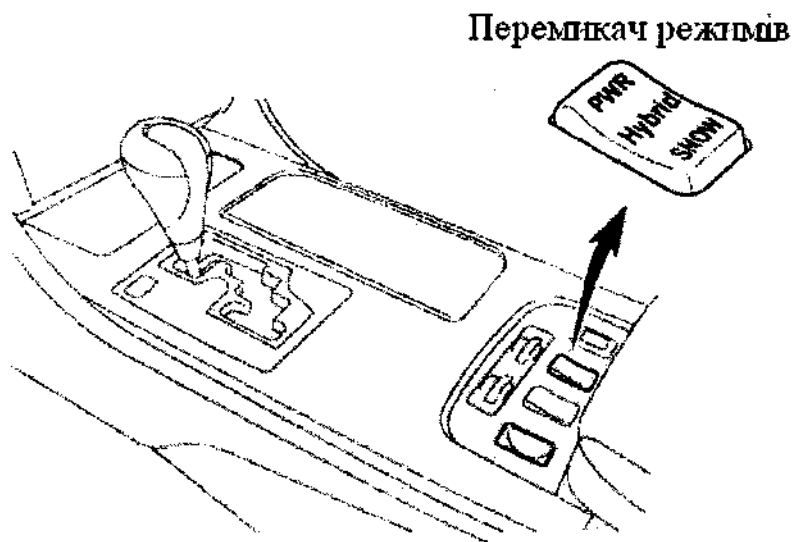


Рис. 5.29. Розташування перемикача режимів

Схема системи керування режимами представлена на рис. 5.30. При виборі режиму PWR або SNOW в панелі приладів включається світловий індикатор (рис. 5.30)

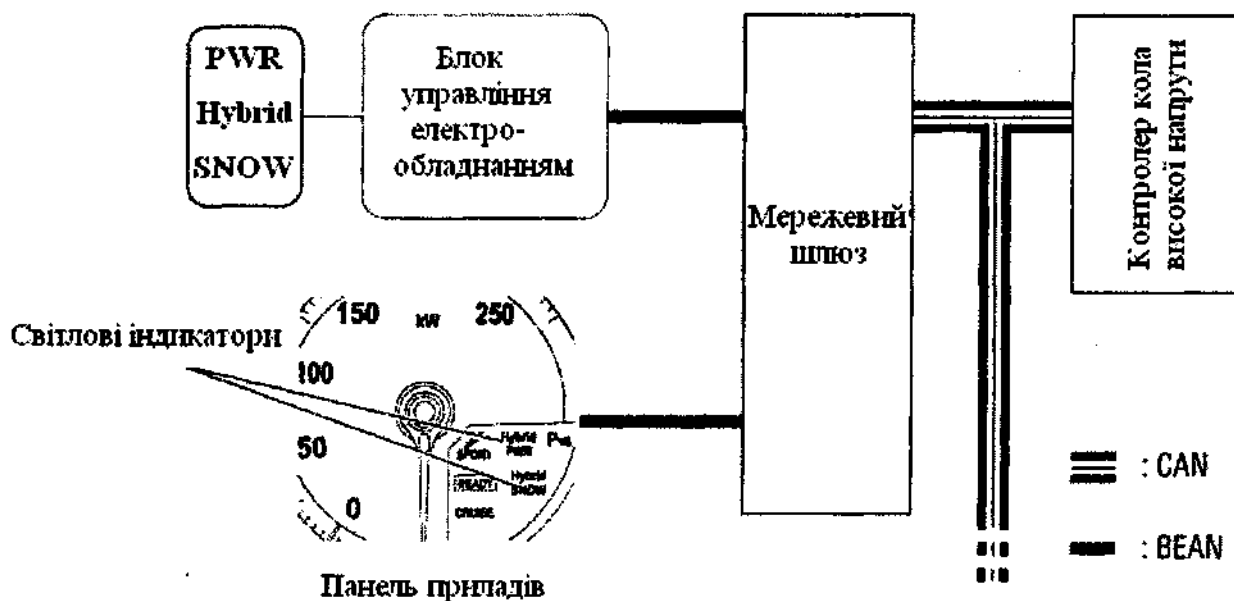


Рис. 5.30. Схема системи керування режимами коробки передач

Режим SNOW включається при слабому зчепленні шин з дорожнім покриттям. Цей режим призначений для усунення прослизання коліс при русі по слизькій дорозі (рис. 5.31).



Рис. 5.31. Ілюстрація роботи режимів коробки передач

Блокування селектора забороняє переміщення селектора в будь-яке положення окрім Р, якщо не включити коло живлення IG (запалення) і не натискувати педаль гальма. Блокування запобігає несподіваному початку руху автомобіля. Схема системи блокування пуску автомобіля представлена на рис. 5.32.

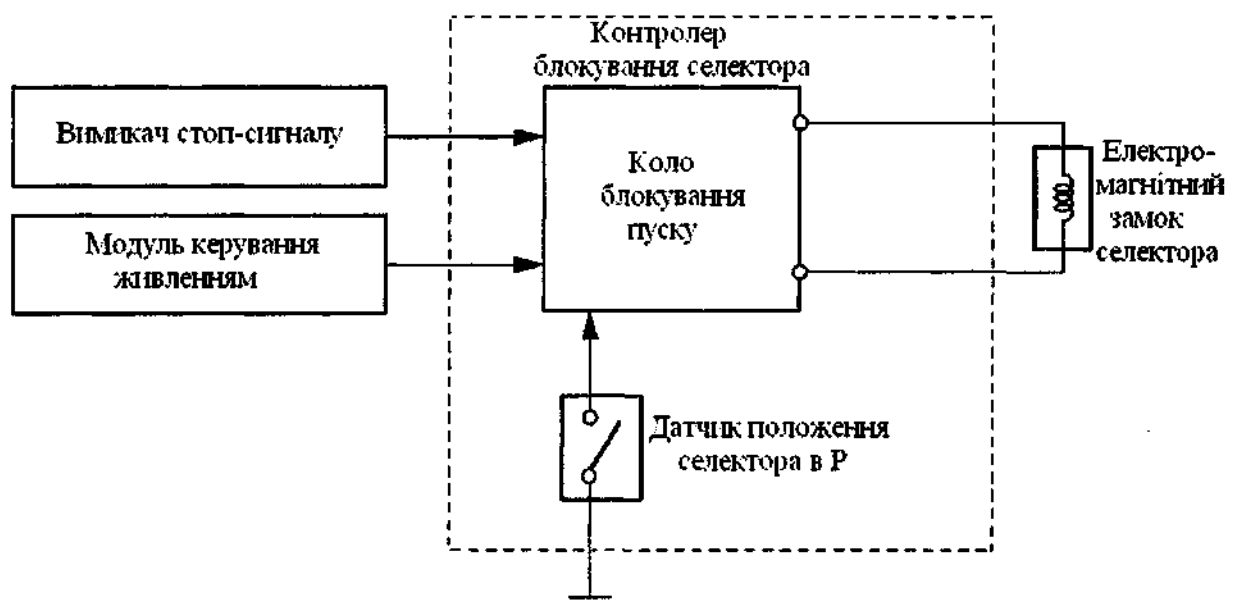


Рис. 5.32. Схема системи блокування пуску автомобіля

В гібридній коробці передач використовується механізм блокування на стоянці, оскільки під час стоянки задні колеса повинні бути заблокованими. Блокування на стоянці включається механічно, через систему тяги, коли водій ставить селектор в положення Р.

Для керування дросельною заслінкою застосовується інтелектуальна система ETCS-i. В цій системі не застосовується трос приводу, тобто, механічний привід заслінки не використовується. Для визначення положення педалі акселератора і положення дросельної заслінки використовуються відповідні датчики положення.

Відповідно до сигналу положення педалі акселератора, з їздовими умовами і із ступенем заряду високовольтної акумуляторної батареї контролер кола високої напруги (HV ECU) обчислює значення необхідних оборотів двигуна і потрібної величини обертового моменту. На підставі отриманого управляючого сигналу, блок керування двигуном встановлює дросельну заслінку в потрібне положення.

Схема керування дросельною заслінкою представлена на рис. 5.33.

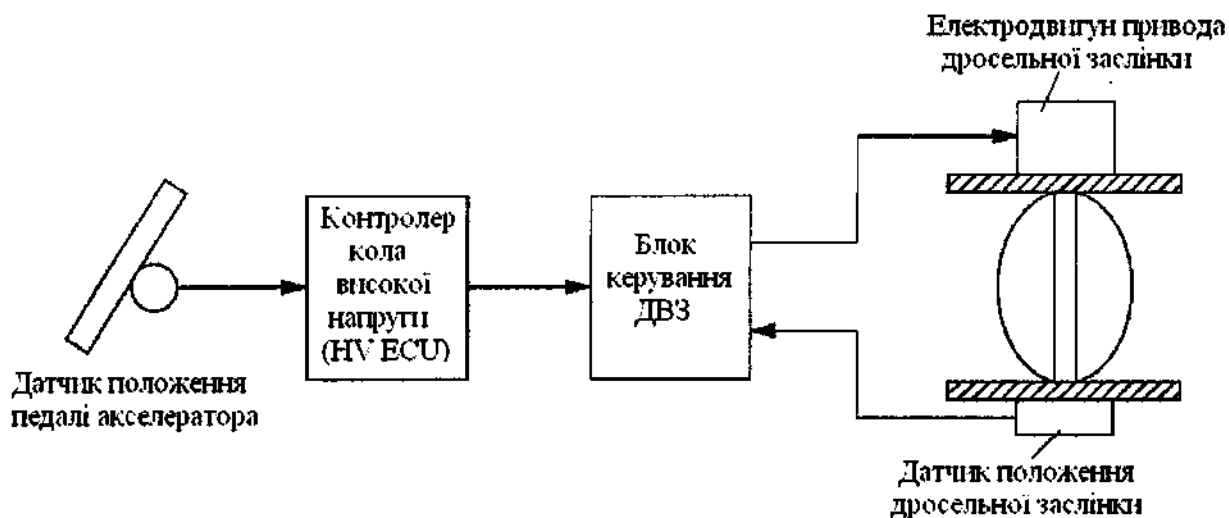


Рис. 5.33. Схема керування дросельною заслінкою

Датчик положення педалі акселератора містить магніт, встановлений на педалі акселератора, і датчик Холу (рис. 5.34).

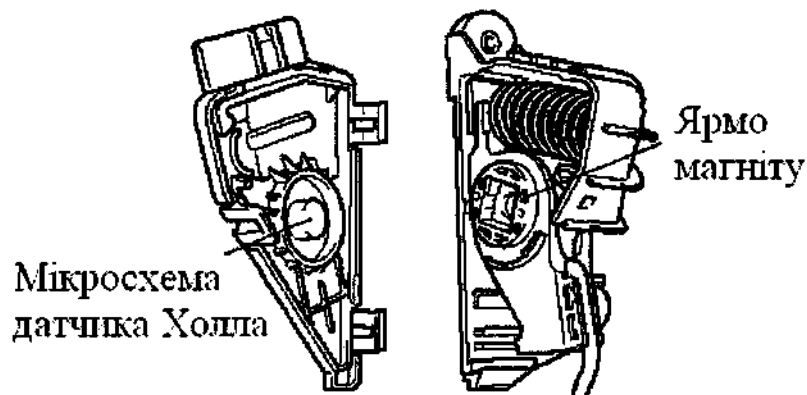
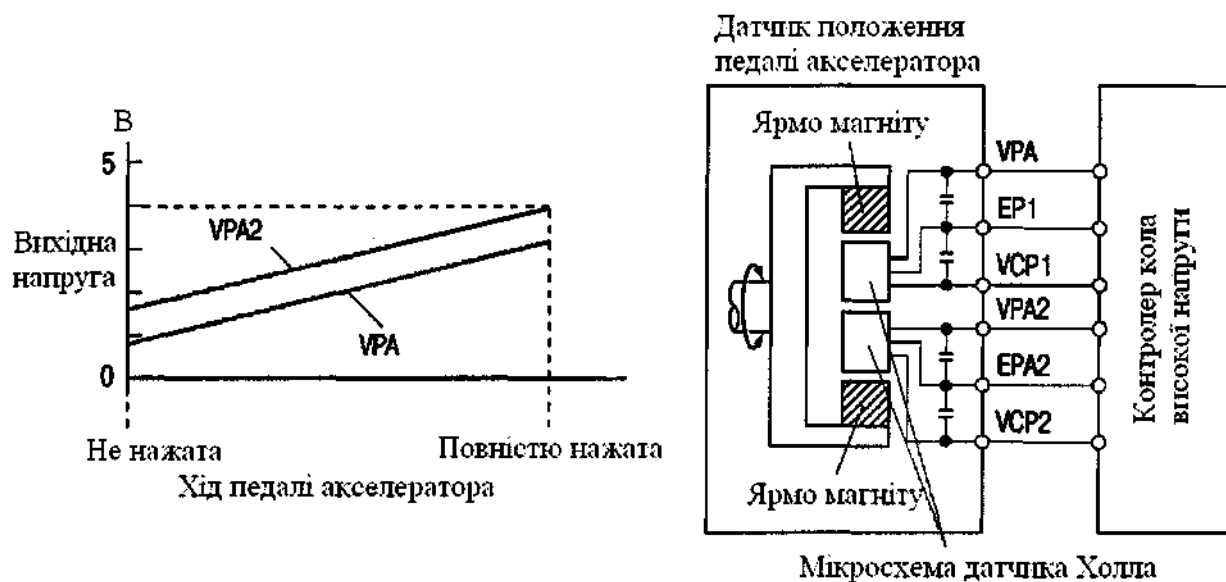


Рис. 5.34. Датчик положення педалі акселератора

Магніт повертається навкруги датчика Холу відповідно до ходу педалі (рис. 5.35, а). Датчик Холу перетворює зміну магнітного потоку в електричний сигнал і посилює його як сигналу ходу педалі акселератора в контролер кола високої напруги (рис. 5.35, б).



а) Залежність вихідної напруги від ходу педалі акселератора

б) Схема підключення датчика положення педалі акселератора

Рис. 5.35. Робота датчика положення педалі акселератора

В гібридній коробці передач є два масляні насоси. Перший насос механічний, приводиться від двигуна внутрішнього згорання (рис. 5.36).

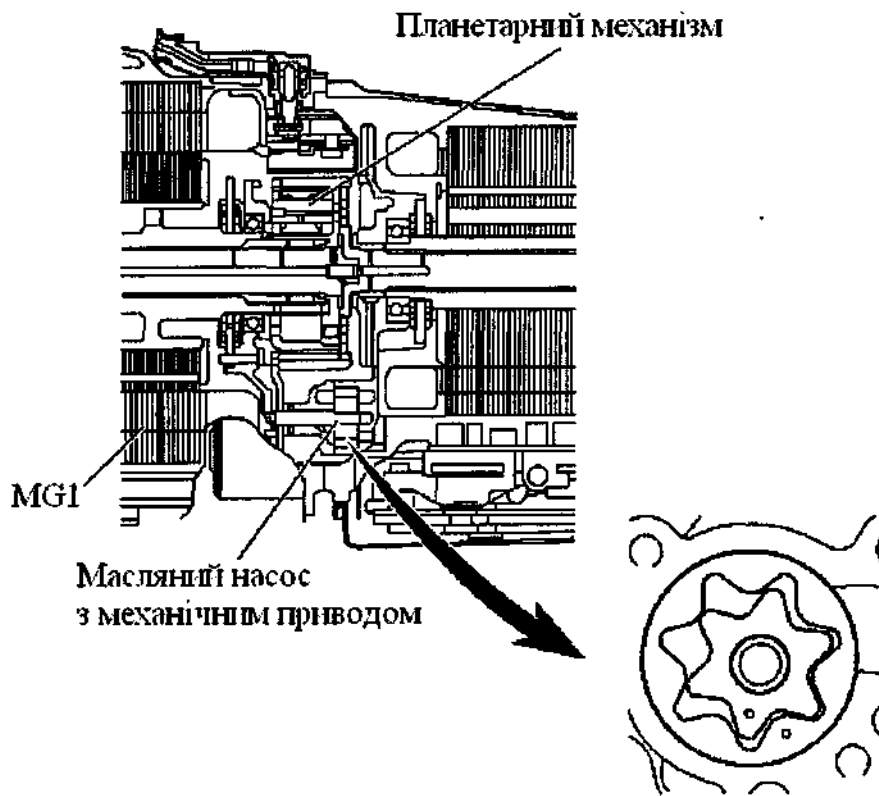


Рис. 5.36. Схема розташування масляного насоса з механічним приводом

Другий насос, з електроприводом, призначений для створення гідравлічного тиску в той час, коли двигун внутрішнього згоряння не працює. Цей насос розташований на правій стороні коробки передач (рис. 5.37).

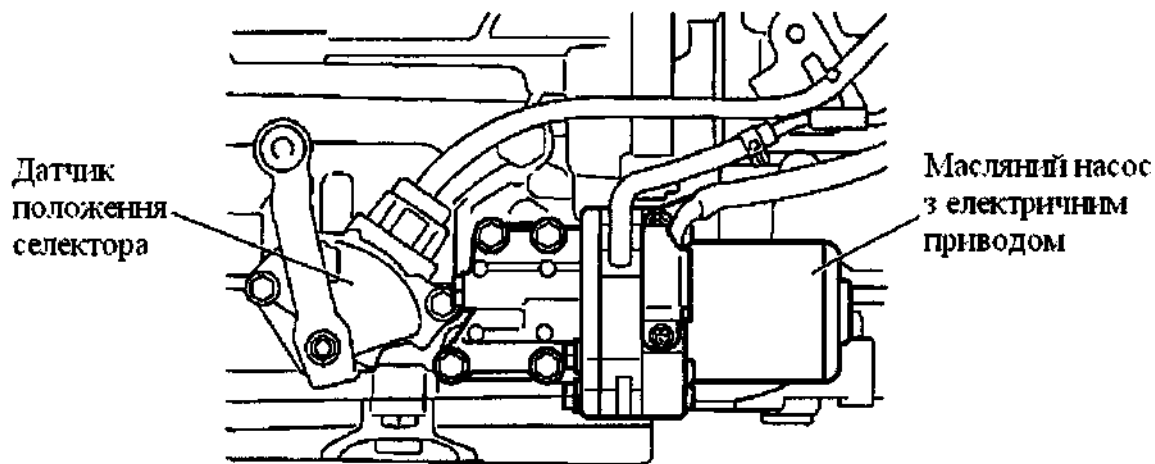


Рис. 5.37. Схема розташування масляного насоса з електричним приводом

збудовано на основі джерела живлення з постійною напругою 12 В. Генератор гібридного силового агрегату виробляє напругу 288 В, тому для зарядки акумуляторної батареї бортової електроустаткування напруга повинна бути знижена до 12 В за допомогою перетворювача постійної напруги (рис. 5.42).

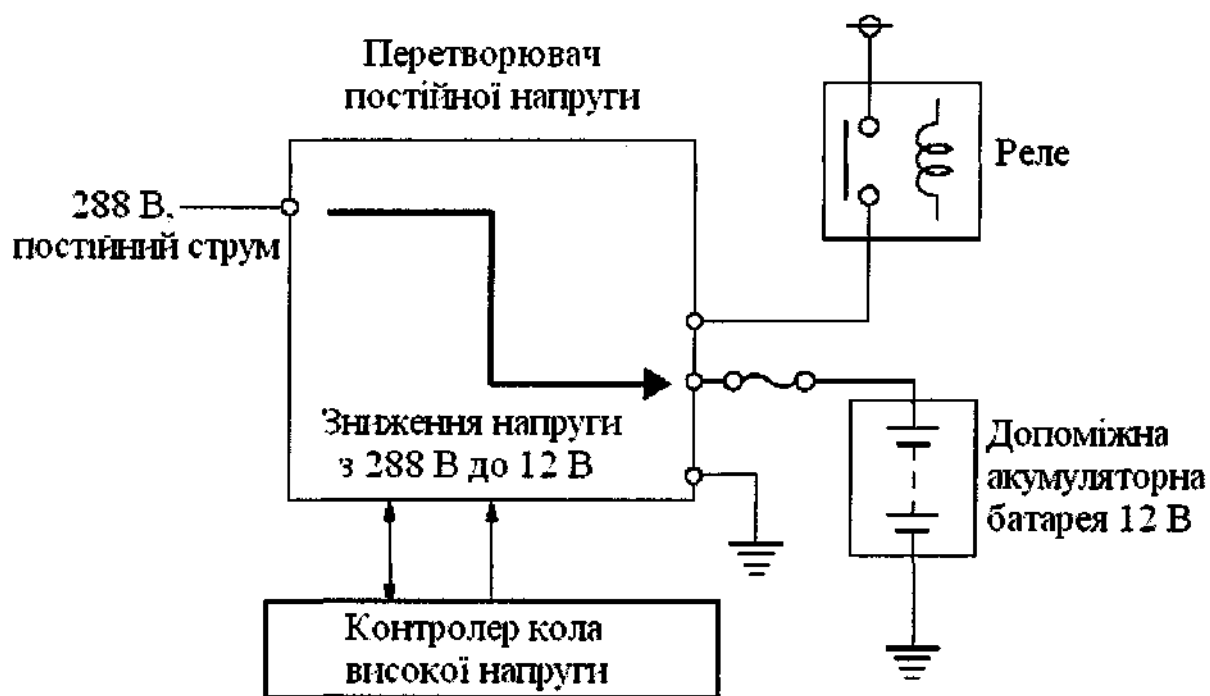


Рис. 5.42. Схема зниження постійної напруги

Перетворювач постійної напруги має вбудоване захисне реле SMR (SMRP).

Допоміжна акумуляторна батарея закрита, не обслуговується з напругою 12 В. Допоміжна батарея має свій датчик температури. Допоміжна батарея розташована в лівій частині багажного відділення (рис. 5.43).

Розглянемо докладніше систему охолодження високовольтної батареї і перетворювача постійної напруги. Під час своєї роботи високовольтна батарея виділяє тепло і для його відведення використовується спеціальна система охолодження. В корпусі високовольтної батареї розташований вентилятор охолодження. Для охолодження використовується відцентровий вентилятор з низьким рівнем шуму.

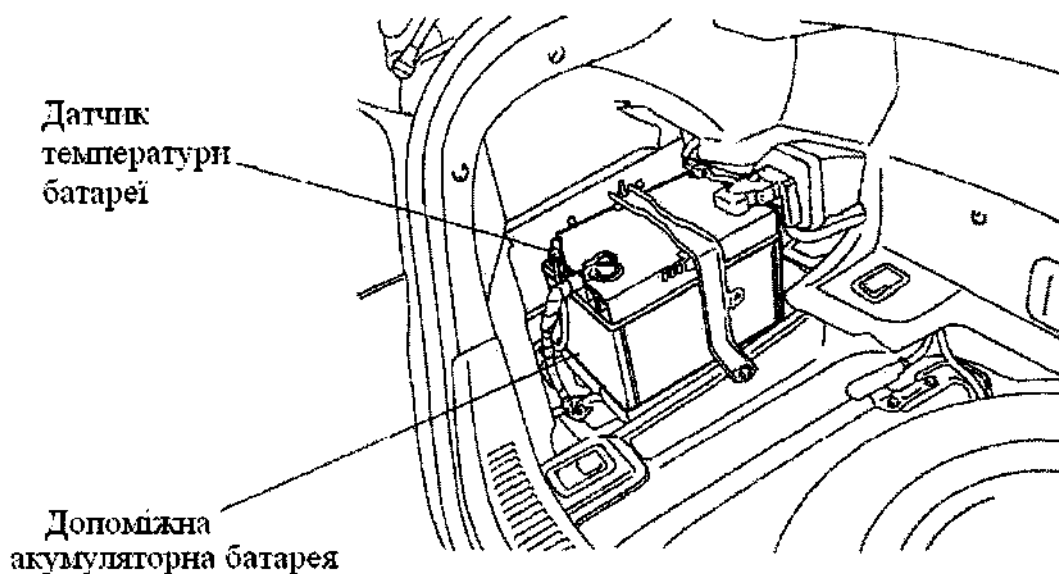


Рис. 5.43. Блок допоміжної акумуляторної батареї

Повітря до вентилятора поступає з салону через отвір в багажній полиці. Повітря поступає у верхній лівий отвір кожуха батареї і проходить вниз, охолоджуючи батарею. Потім повітря виходить назовні, покидаючи автомобіль (рис. 5.43).

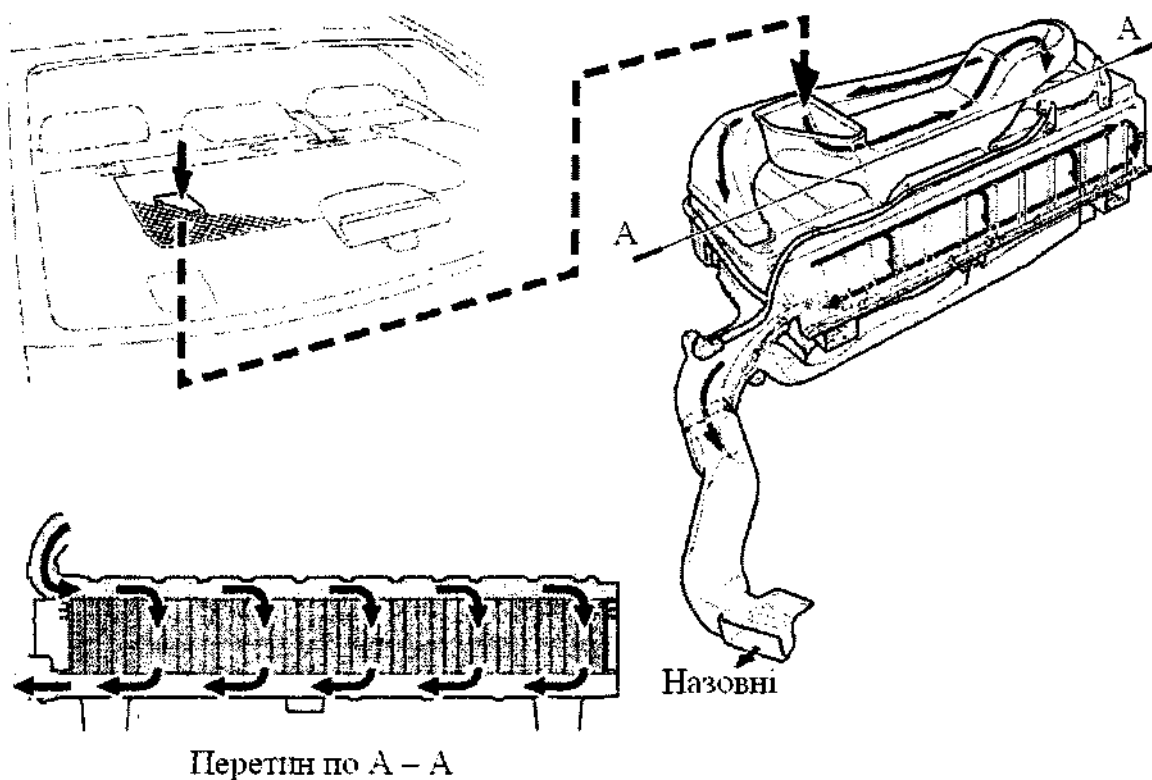


Рис. 5.43. Процес охолодження високовольтної батареї

За роботу вентилятора відповідає контролер кола високої напруги. Контролер кола високої напруги приймає сигнали датчика температури батареї через датчик стану високовольтної батареї. На підставі прийнятих сигналів контролер кола високої напруги керує роботою вентилятора, підтримуючи температуру батареї на заданому рівні.

Перетворювач постійної напруги має власну систему охолодження. Повітря для охолодження перетворювача постійної напруги поступає через отвір в багажній полиці. Потім повітря виходить назовні, покидаючи автомобіль (рис. 5.44).

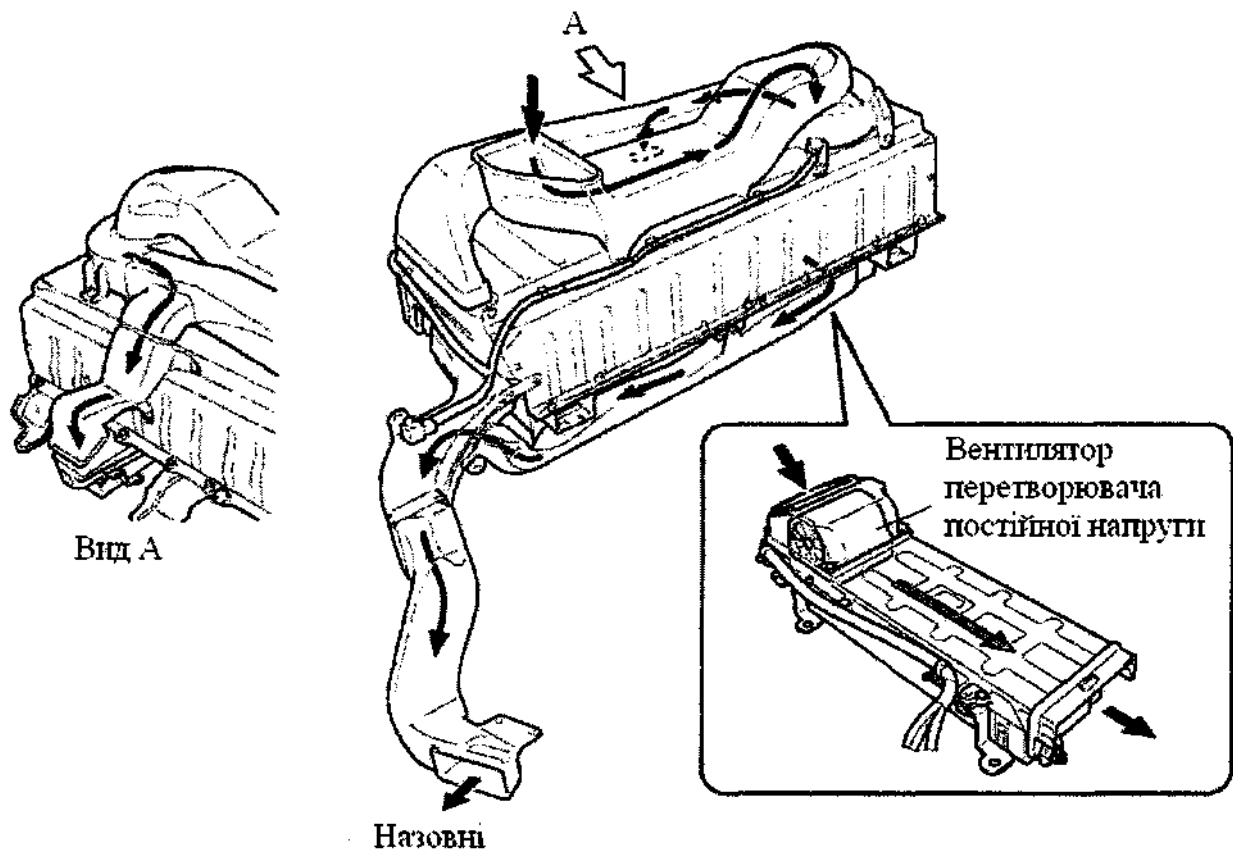


Рис. 5.44. Процес охолодження перетворювача постійної напруги

В перетворювачі напруги встановлений датчик температури термисторного типу, по сигналах якого перетворювач напруги управляє роботою вентилятора. Вентилятор має три швидкісні ступені: низька, середня і висока.

Силовa високowольтна шина, розрахована на струм великої сили, сполучає високowольтну батарею з перетворювачем напруги, перетворювач напруги з електричними машинами MG1 і MG2, перетворювач напруги з інвертором живлення приводу компресора системи кондиціонування (рис. 5.45).

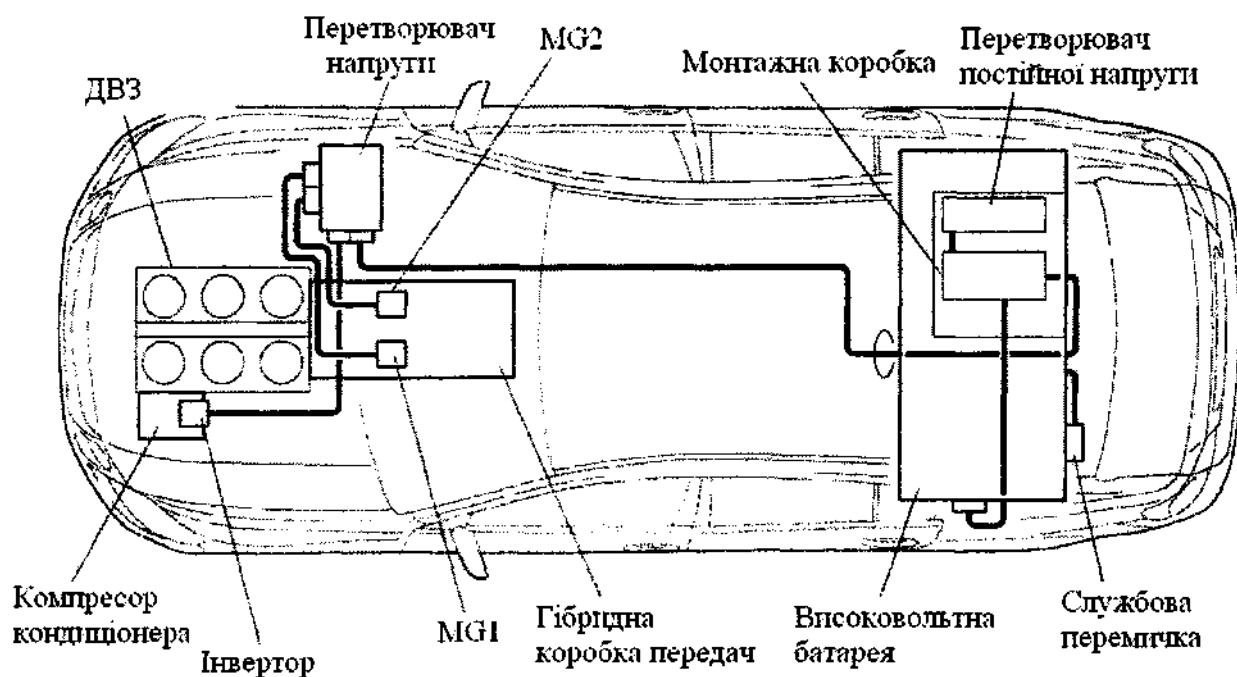


Рис. 5.44. Розміщення силової високowольтної шини

Силовa шина бере свій початок від монтажної коробки під кожухом високowольтної батареї. Шина проходить під панеллю підлоги, уздовж підсилювача підлоги, і приходить до інвертора в моторному відсіку. Для зниження рівня електромагнітних перешкод шина екранована.

Для того, щоб дроти високowольтного кола було можна відрізнити від компонентів низьковольтного кола, вони мають оранжеву маркіровку.

6. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

6.1. Вибір раціональної схеми гібридної силової установки и постановка задачі моделювання

В розділі 2 даної наукової роботи проведено аналіз схемних рішень побудови гібридних силових установок автомобілів, розглянуті та проаналізовані альтернативні варіанти побудови електротрансмій в гібридних силових установках автомобілів: послідовна, паралельна і послідовно-паралельна схеми. При побудові екологічно чистого автомобіля ХНАДУ найефективнішою схемою трансмісії гібридних силових установок, на наш погляд, є послідовно-паралельна схема. Тому що початок руху, і рух на невисоких швидкостях здійснюється або тільки на електричній тязі, або комбіновано ДВЗ та електродвигун, що істотно підвищує екологічну чистоту автомобіля, особливо в міському циклі руху [14,15].

Основними вузлами гібридної електромеханічної трансмісії автомобіля є: електричний генератор, тяговий електричний двигун, акумуляторна батарея, система управління [12] (рис. 6.1).

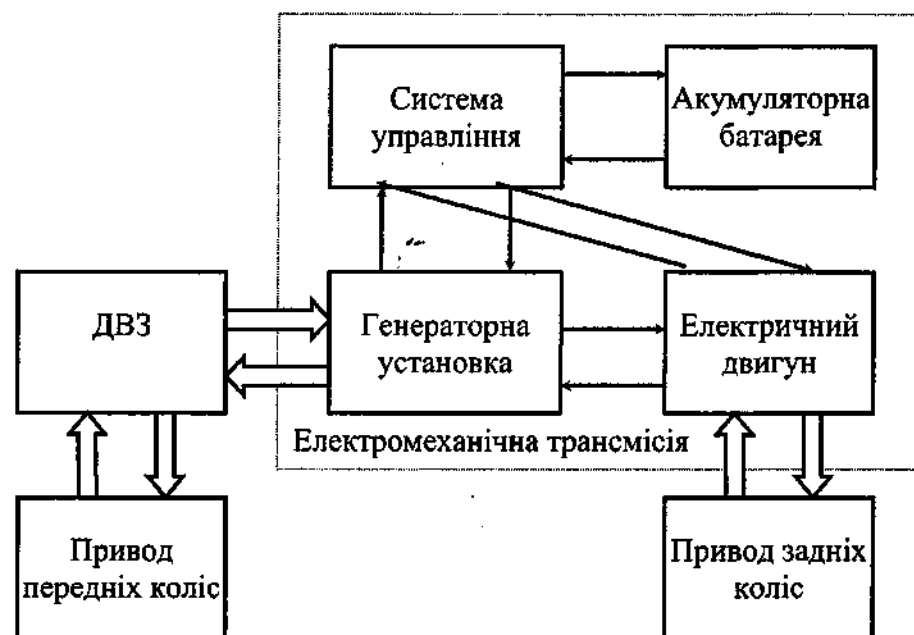


Рис. 6.1. Схема структурна електромеханічної трансмісії гібридної силової установки автомобіля ХНАДУ

Моделювання буває трьох видів:

- натурне моделювання. Дослідження параметрів системи і моделювання його роботи проводиться в реальних умовах експлуатації безпосередньо на випробувальному зразку системи. Гідність: висока достовірність отриманих результатів, тому що експеримент проводиться на реальному фізичному об'єкті в реальних умовах експлуатації. Недоліки: висока вартість досліджень, а в деяких випадках, повна неможливість їх проведення (система знаходиться у стадії розробки, а не удосконалення, або невідомі умови експлуатації);

- фізичне моделювання. Дослідження параметрів системи і моделювання його роботи проводиться в лабораторних умовах на випробувальному зразку системи або її частини. Гідність: відносно висока достовірність отриманих результатів, тому що експеримент проводиться на реальному фізичному об'єкті, але в лабораторних умовах експлуатації. Недоліки: відносно висока вартість досліджень, а в деяких випадках, повна неможливість їх проведення (система знаходиться у стадії розробки, а не удосконалення, або невідомі умови експлуатації);

- математичне моделювання. Дослідження параметрів системи і моделювання його роботи проводиться на математичних моделях фізичних об'єктів. Їх динаміка в загальному випадку описується диференціальними рівняннями.

При розробці таких електромеханічних систем як гібридна силова установка і безпосередньо сам автомобіль частіше всього використовують математичні моделі. Математична модель дозволяє вивчити властивості електромеханічної системи, що розробляється. При побудові математичних моделей необхідно встановити всі взаємозв'язки між змінними, які характеризують поведінку системи.

Математична модель є формалізованим описом системи за допомогою абстрактної мови, зокрема, за допомогою математичних співвідношень, що відображають процес функціонування системи. Для складання моделі можна використовувати будь-які математичні засоби – алгебра, диференціальне, інтегральне числення, теорію множин, теорію алгоритмів і т.д. При побудові математичних моделей необхідно встановити всі взаємозв'язки між змінними, які характеризують властивості і характеристики системи.

Оскільки всі реальні системи по своїй природі є динамічними, то для їх опису можна використовувати диференціальні рівняння. Для вирішення системи отриманих рівнянь використовується перетворення Лапласа.

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt. \quad (6.1)$$

Метод перетворення Лапласа дозволяє замінити достатньо складне рішення диференціальних рівнянь відносно простим рішенням рівнянь алгебри.

Змінну s в перетворенні Лапласа можна розглядати як оператор диференціювання

$$s \rightarrow \frac{d}{dt} \quad (6.2)$$

Аналогічно можна ввести оператор інтеграції

$$\frac{1}{s} \rightarrow \int_0^t dt \quad (2.3)$$

Визначення реакції системи на вхідну дію має на увазі наступні дії:

- отримання диференціальних рівнянь, що описують поведінку досліджуваної системи;
- перетворення по Лапласу цих диференціальних рівнянь;
- рішення отриманих рівнянь алгебри.

В даний час могутнім засобом для моделювання і дослідження систем управління із зворотним зв'язком є програма Simulink, а також інші системи моделювання. Розглянемо особливості побудови математичних моделей в програмі Simulink.

Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації і аналізу динамічних систем. Він дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і удосконалювати проекти. Simulink

повністю інтегрований з MATLAB, тому забезпечує оперативний доступ до широкого спектру інструментів аналізу і проектування.

Математична модель створена в програмі Simulink дозволить вивчити властивості гібридної силової установки і провести порівняльний аналіз тягово-динамічних характеристик автомобіля на різних режимах руху.

Поставимо задачі на математичне моделювання тягово-динамічних характеристик автомобіля з гібридною силовою установкою на різних режимах руху, а саме:

- скласти математичну модель тягово-динамічних характеристик автомобіля з існуючим двигуном внутрішнього згоряння, в яку входять наступні підсистеми: модель ДВС, модель трансмісії, модель системи управління, модель сил діючих на автомобіль, модель визначення потужності та інші підсистеми;
- скласти математичну модель тягово-динамічних характеристик автомобіля з тяговим електричним двигуном з урахуванням маси акумуляторних батарей;
- скласти комбіновану математичну модель тягово-динамічних характеристик автомобіля з гібридною силовою установкою;
- провести порівняльну оцінку тягово-динамічних характеристик автомобіля з ДВС і автомобіля з гібридною силовою установкою.

6.2. Початкові дані для розрахунку

Для моделювання тягово-динамічних характеристик автомобіля в якості прикладу виберемо найменш дорогі український автомобіль ЗАЗ 1102 «Таврія» з двигуном внутрішнього згоряння об'ємом 1.2 л. Вибір цього автомобіля підкріплено ще тим, що саме такий тип автомобіля, тільки в вантажно-пасажирському варіанті (ЗАЗ-110550) був обраний для створення фізичної моделі гібридної силової установки, та успішно пройшов всі стендові та дорожні випробування.

Для складання математичної моделі автомобіля з гібридною силовою установкою приведемо в табл. 6.1 основні технічні характеристики автомобіля ЗАЗ 1102 «Таврія», які потрібні для розрахунку тягово-швидкісних характеристик автомобіля.

Таблиця 6.1.

Початкові дані для моделювання автомобіля ЗАЗ 1102 «Таврія»

Параметр	Позначення в математичній моделі	Розмірність	Величина
Повна маса	m	кг	710
Тип двигуна карбюраторний			
Максимальна потужність двигуна	N_e	кВт	37,5
Частота обертання валу при максимальній потужності	n_N	Обертів за хвилину	5300
Передавальні числа коробки передач:			
1-а передача	U_{k1}		3,454
2-а передача	U_{k2}		2,056
3-а передача	U_{k3}		1,333
4-а передача	U_{k4}		0,969
5-а передача	U_{k5}		0,730
Передавальне число головної передачі	U_0		3,875
ККД трансмісії	η		0,9
Шини типу 155-70R13 Статичний радіус коліс	$r_{ст}$	м	0,271
Габаритні розміри: ширина	B_r	м	1,554
висота	H_r	м	1,410
Коефіцієнт опору повітря	k	$H \cdot c^2 / m^4$	0,29

В якості додаткового електропривода виберемо електричний двигун постійного струму. Його необхідну потужність розрахуємо під час моделювання гібридної силової установки автомобіля.

6.3. Математична модель гібридної силової установки

Для створення математичної моделі гібридної силової установки автомобіля необхідно побудувати підсистеми усіх її основних блоків. Для цього моделюємо в блоці “автомобіль” підсистеми “engine” (двигун внутрішнього згоряння), “gearbox” (коробка перемикавання передач), “U₀” (головна передача), “R_k” (ведучі колеса). Побудова моделі систем зводиться до того, щоб за допомогою програми “Simulink” зібрати схему, що буде відображати формулу, яка описує заданий вузол. Крім того в модель вписуються параметри автомобіля, тобто в модель підставляються потужність двигуна, передаточні числа коробки передач, головної передачі та інші дані, які були вибрані з технічних характеристик автомобіля.

Математична модель ДВЗ. Створюємо модель поршневого двигуна внутрішнього згоряння (підсистема “engine”) працюючого на зовнішній швидкісній характеристиці, використовуючи емпіричну формулу, що дозволяє по відомим координатам однієї точки швидкісної характеристики (N_{Еmax} та n_N) відтворити всю криву потужності:

$$N_e = N_{e\max} \left[A_1 \frac{n}{n_N} + A_2 \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right], \quad (6.1)$$

де N_e - поточне значення потужності ДВЗ, відповідне частоті обертання вала двигуна, кВт;

n - частота обертання вала ДВЗ, об/хв.;

n_N - частота обертання вала при максимальній потужності ДВЗ, об/хв.;

N_{Еmax} - максимальна потужність ДВЗ, кВт;

A_1, A_2 - емпіричні коефіцієнти, що характеризують тип двигуна внутрішнього згоряння. Для бензинових двигунів $A_1 = A_2 = 1,0$.

Визначивши поточне значення потужності ДВЗ N_e для любых значень частоти обертання вала n , модель рахує відповідне значення обертального моменту двигуна M_e .

$$M_e = 9550 \frac{N_e}{n}, \quad (6.2)$$

Структура моделі двигуна внутрішнього згоряння (підсистеми “engine”) представлена на рис. 6.2.

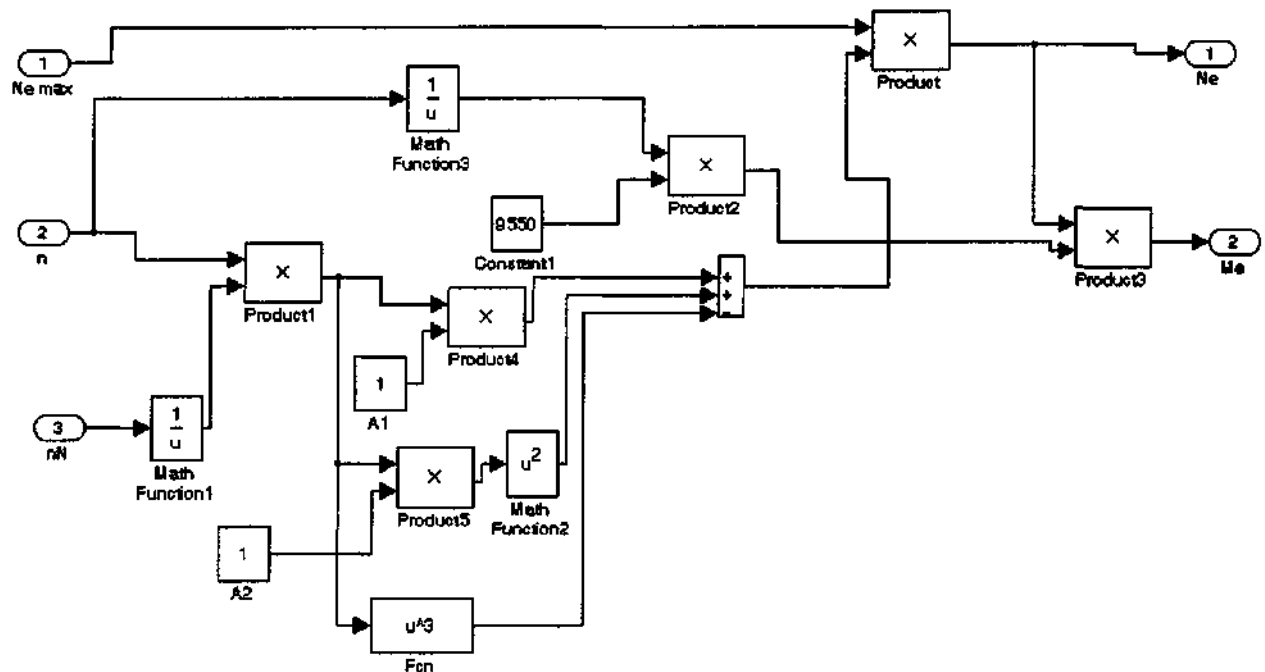


Рис. 6.2. Схема структурна моделі ДВЗ (підсистема “engine”)

Побудова моделі трансмісії. Блоки “gearbox”, U_0 , и R_k – моделі коробки передач, головної передачі та ведучих коліс, визначають тягове зусилля на ведучих колесах P_k та швидкість автомобіля V .

Розрахуємо тягове зусилля на ведучих колесах

$$P_k = \frac{M_e U_{ki} U_o \eta}{r_\partial}, \quad (6.3)$$

де U_{ki} - передаточне число коробки передач,
 U_0 - передаточне число головної передачі,
 η – ККД трансмісії,
 r_d – динамічний радіус колеса, який в нормальних умовах руху приймають рівним статичному радіусу r_{st} .

Розрахуємо швидкість автомобіля V , км/год, яка пов'язана з частотою обертання валу двигуна внутрішнього згоряння п наступною залежністю:

$$V = 0,377 \cdot \frac{r_k n}{U_{ki} U_o}, \quad (6.4)$$

де r_k - радіус кочення колеса, що дорівнює статичному радіусу r_{st} .

Блок моделі коробки передач “gearbox” наведено на рис. 6.3.

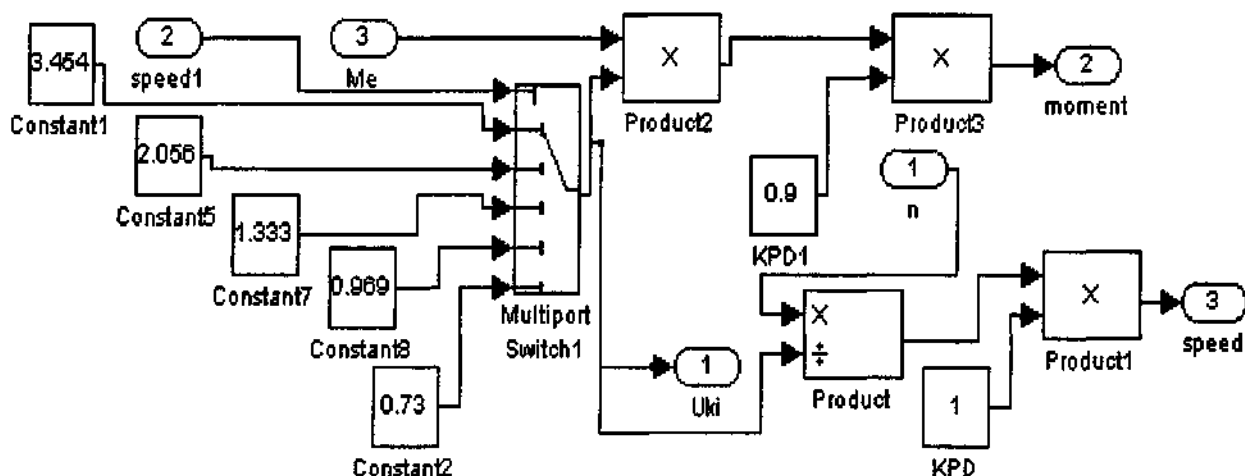


Рис. 6.3 – Схема структурна моделі коробки передач (підсистема “gearbox”)

В даній підсистемі константи – це передаточні числа коробки передач, які вибираються, в залежності від конкретного автомобіля, з його технічних характеристик.

Передачі перемикаються за допомогою перемикача “MultiportSwitch1”.

Аналогічно будуємо схему головної передачі, константою якої є передаточне число головної передачі. Схему головної передачі зображено на рис. 6.4.

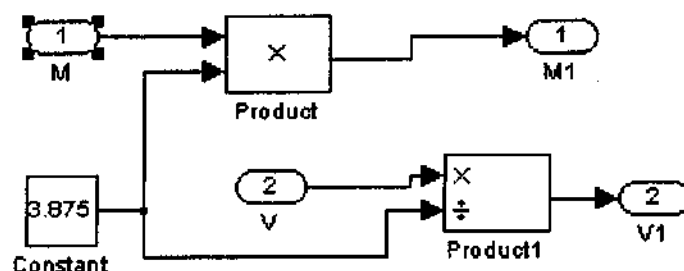


Рис. 6.4. Схема структурна моделі головної передачі (підсистема U_0)

Будуємо модель системи ведучих коліс, де r_{st} – це статичний радіус колеса. В системі “automobile” зображено, як підсистему “ R_k ”. Модель ведучих коліс зображено на рис. 6.5.

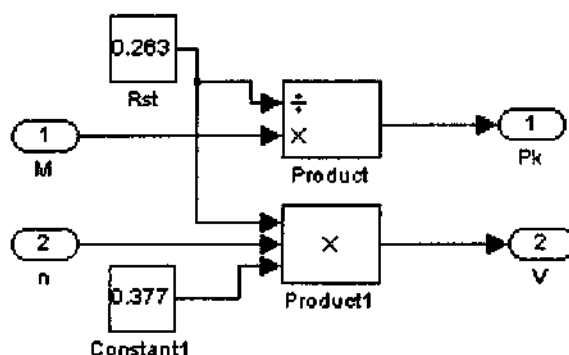


Рис. 6.5. Схема структурна моделі ведучих коліс (підсистема “ R_k ”)

Моделювання сил, які діють на автомобіль. Силу сумарного дорожнього опору визначаємо по формулі

$$P_{\psi} = \psi G, \quad (6.5)$$

де ψ – коефіцієнт опору кочення,

$G = gm$ - повна вага автомобіля, $g = 9,81$ м/с² - прискорення вільного падіння.

В розрахунках не враховується вплив швидкості руху на коефіцієнт опору коченню, в зв'язку з чим, вважаємо, що $\psi = const$.

$$P_w = \frac{kFv^2}{3,6^2}, \quad (6.6)$$

де k – коефіцієнт опору повітря

F - лобова площа,

V - швидкість автомобіля, км/год.

Лобова площа може бути визначена по кресленню автомобіля, а при його відсутності – приблизно з виразу

$$F = \alpha B_r H_r, \quad (6.7)$$

де α - коефіцієнт заповнення площі. Для легкових автомобілів $\alpha=0,78...0,8$. Приймаємо $\alpha=0,8$, тоді $F=1,86$.

Динамічний фактор автомобіля D визначається для різних передач і швидкостей руху за формулою:

$$D = \frac{P_k - P_w}{G}, \quad (6.8)$$

Для визначення динамічного фактору і сили опору повітря створюємо підсистему D (рис. 6.6)

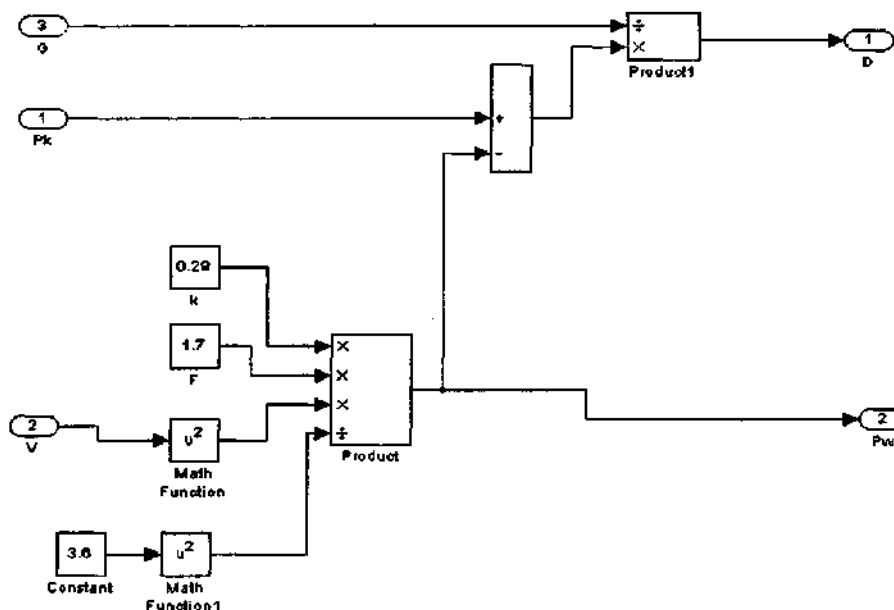


Рис. 6.6. Схема структурна моделі для визначення динамічного фактору і сили опору повітря (підсистема D)

Крім того, за допомогою підсистеми D визначається сумарний дорожній опір, який може подолати автомобіль $\psi_{\max}$.

$$\psi_{\max} = D_{\max} \quad (6.9)$$

$$i_{\max i} = (\psi_{\max i} - f) \cdot 100\% \quad (6.10)$$

де $i_{\max i}$ - максимальний продольний ухил дороги, який може подолати автомобіль,

f – опір коченню ($f = 0.1$ – ґрунтова дорога після дощу).

Для визначення максимального ухилу створюємо підсистему “Slope” (рис. 6.7)

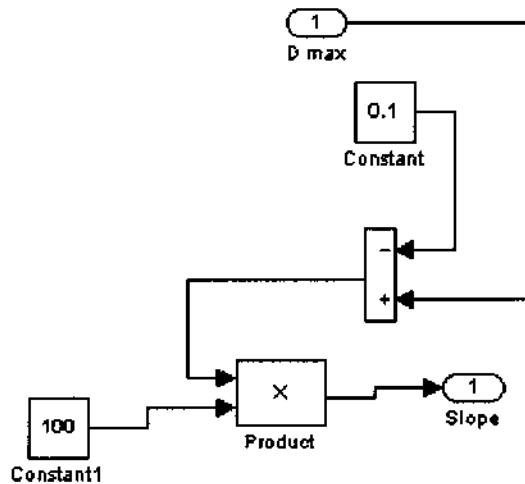


Рис. 6.7. Схема структурна підсистеми для визначення максимального ухилу, що може подолати автомобіль (підсистема “Slope”)

Крім динамічного фактору і сили опору повітря необхідно розрахувати силу сумарного дорожнього опору. Для цього будуємо підсистему $Pw+Pksi$ (рис. 6.8).

Час розгону одержуємо за допомогою блоків “math function” і “integrator” як інтеграл функції

$$t = \int_{v^1}^{v_2} \frac{1}{j} dv, \quad (6.11)$$

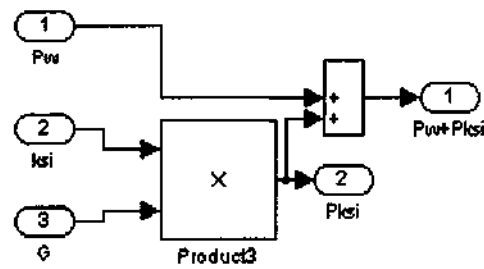


Рис. 6.8. Схема структурна моделі для визначення сили сумарного дорожнього опору (підсистема Pw+Pksi)

Прискорення j для різних передач і швидкостей визначають по значенням D , використовуючи формулу:

$$j = (D - \psi) \frac{g}{\delta}, \quad (6.12)$$

де $\delta = 1,04 + 0,04 U_{kj}^2$ - коефіцієнт для врахування інерції мас.

Для того, щоб визначити прискорення автомобіля, побудуємо систему J (рис. 6.9).

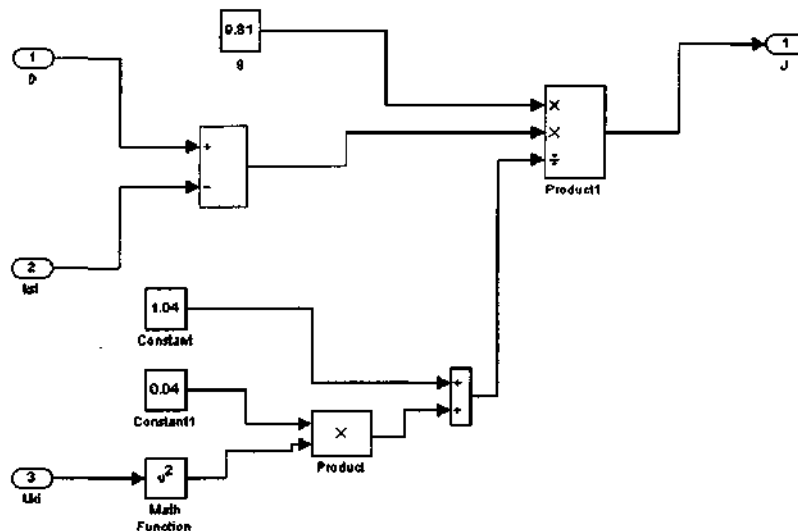


Рис. 6.9. Схема структурна моделі для визначення прискорення автомобіля (підсистема J)

Поєднавши приведені вище схеми, створюємо систему “automobile”, яка наведено на рис. 6.10.

Модель системи управління. Для зміни оборотів двигуна і перемикавання передач в процесі моделювання створюємо підсистему “driver”, що має 3 зовнішні входи для задавання обертів ДВЗ у момент перемикавання передач і 2 виходи “speed” – діюча передача і “turns” – поточне значення оборотів двигуна. Лінійно зростаючі оберти двигуна внутрішнього згоряння задаються блоком “first” (ramp). Для запуску процесу перемикавання передач використовуються схеми порівняння “hit crossing”

У момент, коли спрацьовує блок “hit crossing”, відбувається запуск підсистеми тригера “triggered subsystem” і за допомогою блоків суматора і n_{max} відбувається зміна обертів двигуна до значення заданого на зовнішньому вході “from first to second”. Крім того одиничний імпульс схеми порівняння запускає підсистему “1to2”, що приводить до збільшення на 1 діючу передачу. Одночасно з цим одиничний сигнал, який поступає на вхід блоку “enabled and triggered subsystem” дозволяє роботу наступного каскаду схеми перемикавання передач.

Модель системи управління (підсистема “driver”) наведено на рис. 6.11.

Об’єднаємо модель автомобіля та модель системи управління (рис. 6.12).

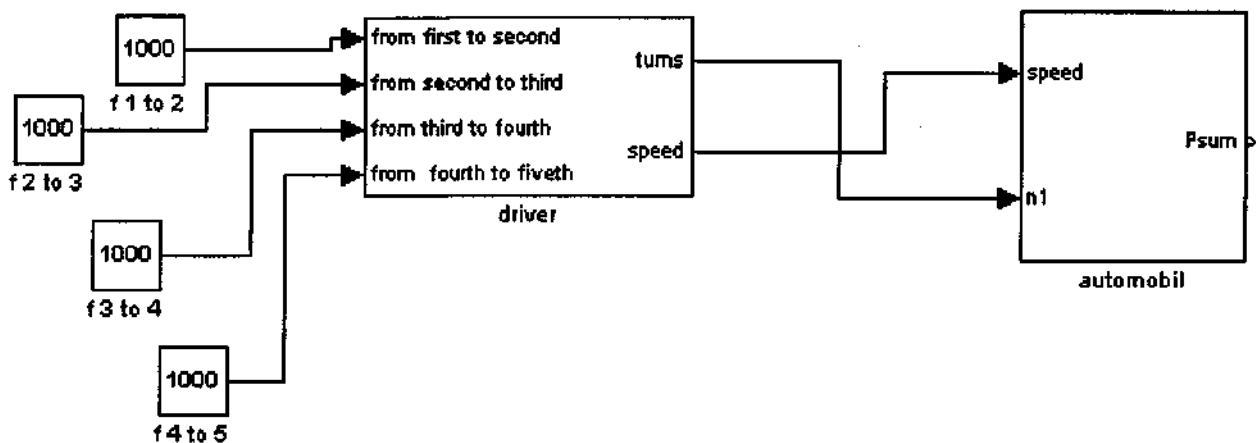


Рис. 6.12. Схема структурна моделі автомобіля та системи управління

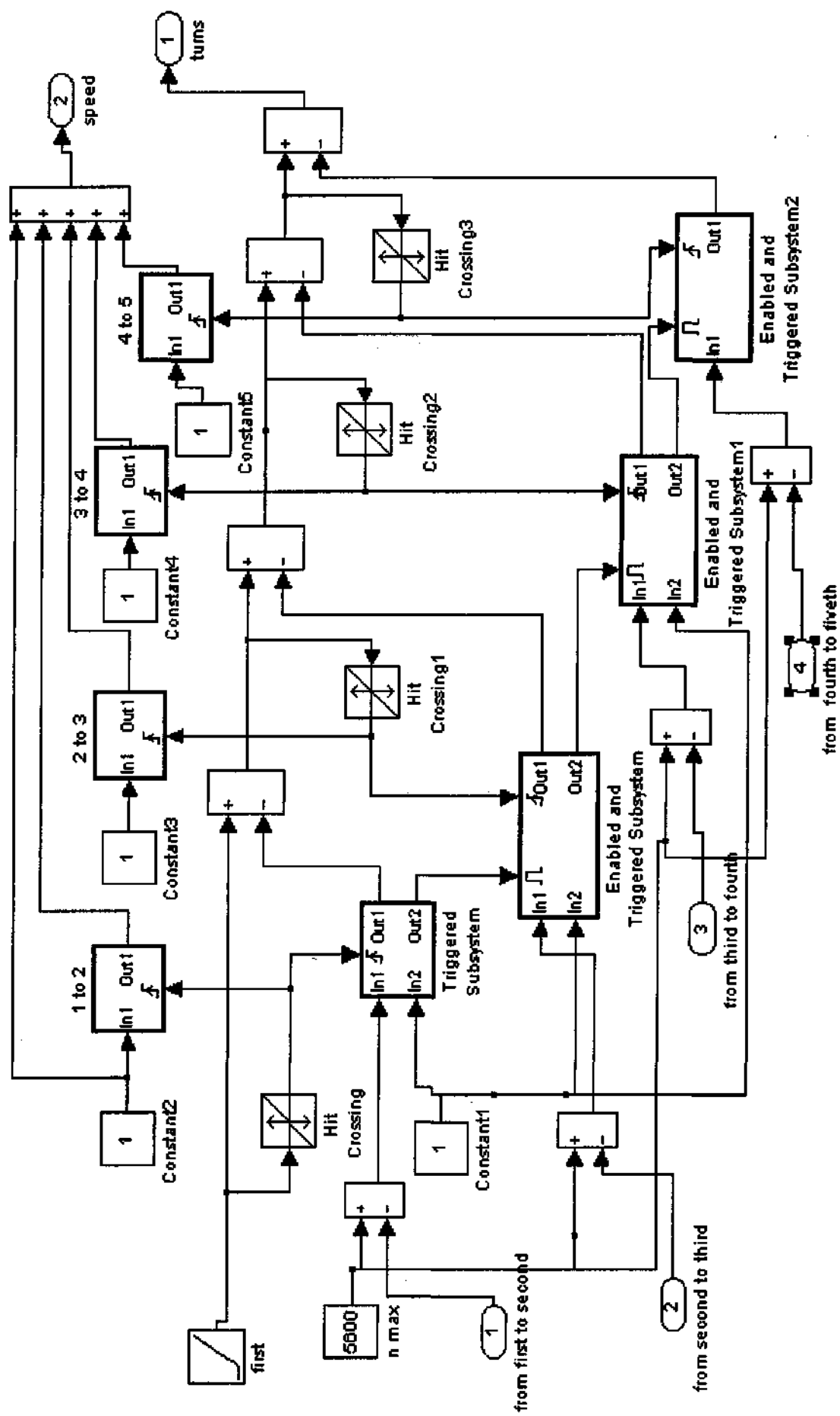


Рис. 6.11. Схема структурна моделі системи управління (підсистема "driver")

Спочатку оберти ДВЗ, при переході на вищу передачу, встановлюємо вільно. В результаті моделювання отримаємо наступний графік прискорень автомобіля при не налаштованій системі управління (рис. 6.13).

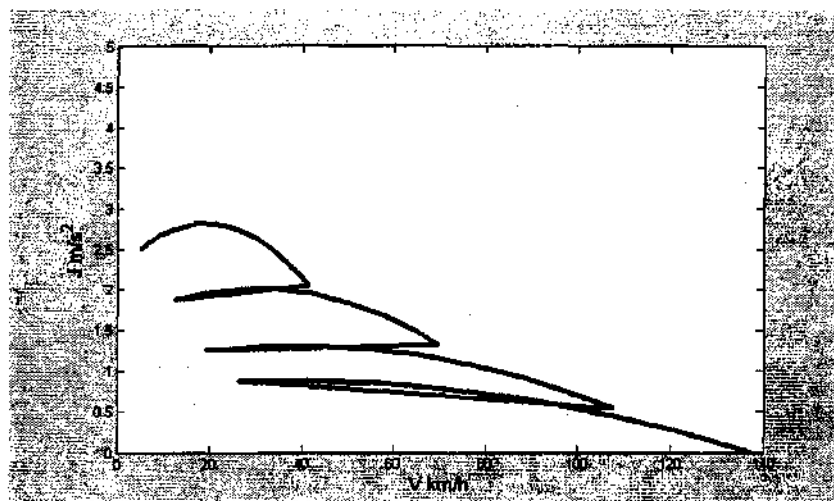


Рис. 6.13. Графік прискорень автомобіля при не налаштованій системі управління

Підбираємо параметри системи управління (значення констант 'f 1 to 2, f 2 to 3, f 3 to 4) так, щоб перехід на вищу передачу здійснювався при рівних прискореннях, тоді графік прискорень автомобіля буде мати вигляд наведений на рис. 6.14.

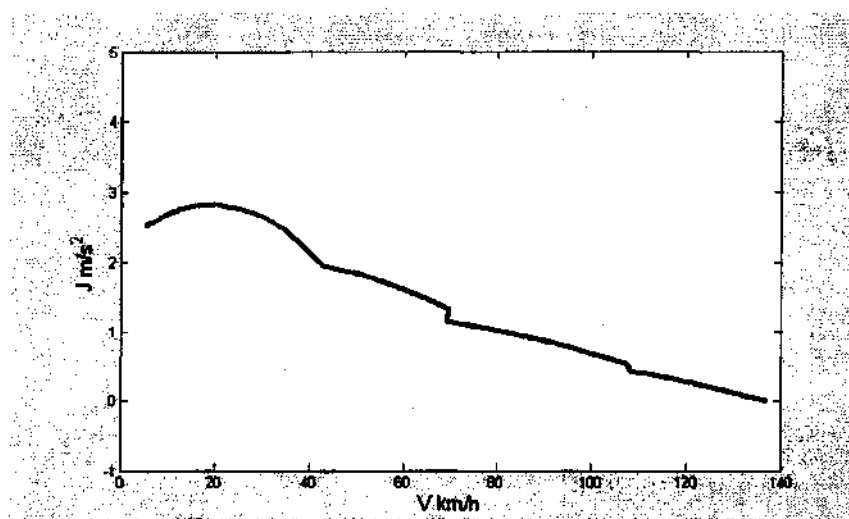


Рис. 6.14. Графік прискорення автомобіля при налаштованій системі управління

Після вибору моментів перемикання передач вибираємо масштаб інтегрування величин, зворотних прискоренням. Для цього змінюємо параметр "Slope" блока "first" в підсистемі "driver" до тих пір, доки на графіку часу розгону (рис. 6.15) ні співпадає з паспортними даними

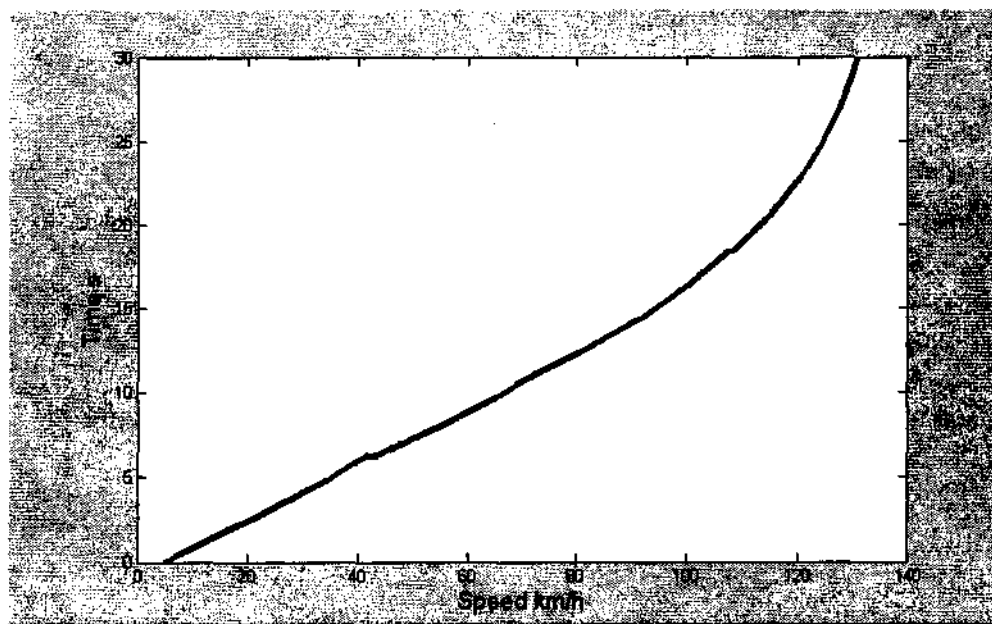


Рис. 6.15. Графік часу розгону автомобіля

Моделювання електричного двигуна. Електричний двигун обираємо при мінімально необхідній потужності для руху зі швидкістю 40 км/год.

$$N_{need} = N_{\psi} + N_w \quad (6.13)$$

де N_{ψ} – потужність, яка витрачається на здолаття сумарного дорожнього опору

$$N_{\psi} = \frac{P_{\psi} V}{3600} \quad (6.14)$$

N_w – потужність, яка витрачається на здолаття опору повітря

$$N_w = \frac{P_w V}{3600} \quad (6.15)$$

Для знаходження необхідної потужності електричного двигуна зберемо підсистему “necessary power” (рис. 6.16), в якій і визначимо необхідну потужність тягового електричного двигуна для нашого автомобіля.

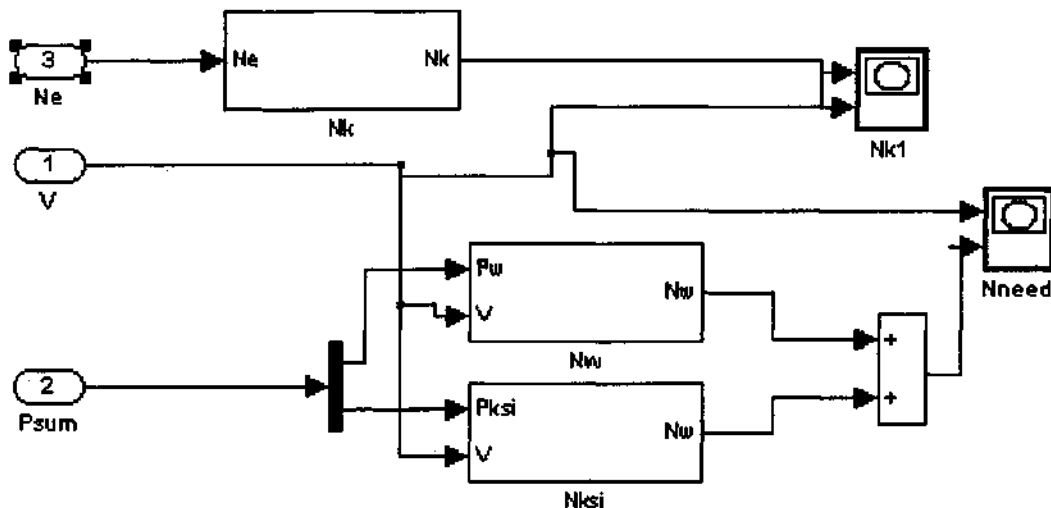


Рис. 6.16. Схема структурна моделі для визначення потужності електричного двигуна (підсистема “necessary power”)

Промодельюємо та отримаємо графік мінімально необхідної потужності тягового електричного двигуна для руху автомобіля по горизонтальній поверхні з заданої швидкістю, який показаний на рис. 6.17.

За допомогою графіка (рис. 6.17) визначимо потужність тягового електричного двигуна, який треба використовувати в автомобілі з гібридною силовою установкою. Для цього по осі швидкості знайдемо відмітку 40 кілометрів на годину, проведемо лінію до перетину з графіком, потім спроектуємо точку перетину на вісь потужності.

В результаті встановлено, що для рівномірного руху із швидкістю 40 км на годину мінімально необхідна потужність електричного двигуна складає 4 кВт, таким чином вибираємо електричний двигун постійного струму з потужністю 4000 Вт.

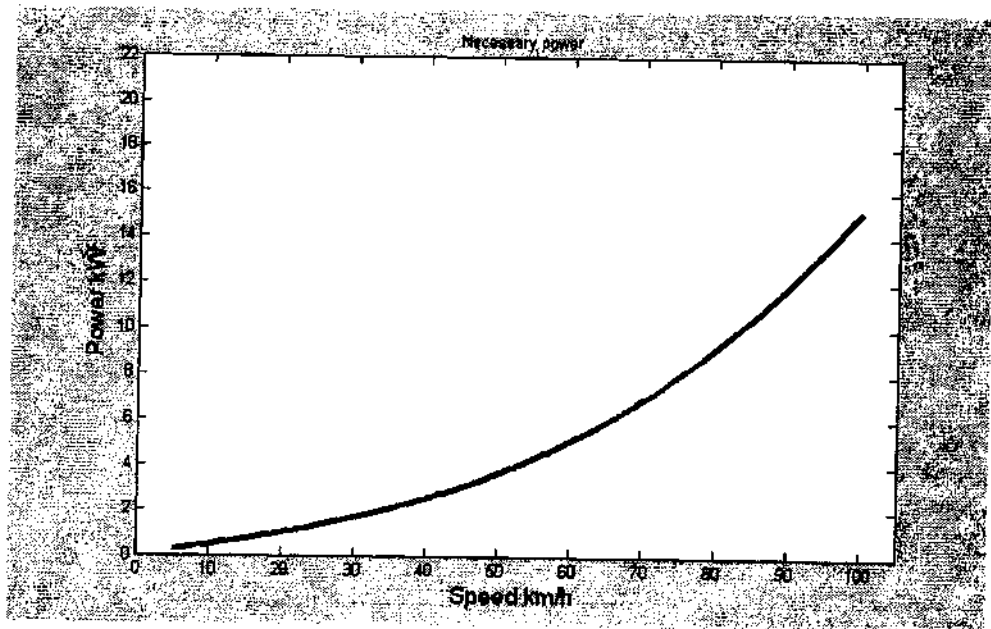


Рис. 6.17. Мінімально необхідна потужність для руху с заданої швидкістю

Проведемо визначення параметрів моделі за паспортними даними електричного двигуна.

Початкові дані двигуна постійного струму: $P_{\text{ном}} = 4$ кВт, $U_{\text{н}} = 220$ В, $n = 4000$ об/хв, $R_{\text{я}} = 0.564$ Ом, $R_{\text{об}} = 35$ Ом, $L_{\text{я}} = 4,8$ мГн $= 0.0048$ Гн.

Визначимо взаємну індуктивність обмоток збудження та обмотки якоря ($L_{\text{аф}}$)

Знаходимо струм обмотки збудження

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{і}}}{R_{\text{я}}} = \frac{220}{35} = 6,285 \text{ А} \quad (6.16)$$

Визначаємо струм, який споживає двигун в номінальному режимі

$$I_{\text{аа}} = \frac{P_{\text{ііі}}}{U_{\text{і}}} = \frac{4000}{220} = 18.18 \text{ А} \quad (6.17)$$

Знаходимо струм якоря

$$I_{\text{у}} = I_{\text{аа}} - I_{\text{б}} = 18,18 - 6,285 = 11,8968 \text{ А} \quad (6.18)$$

Визначаємо противо-ЕРС , що виникає в обмотці якоря

$$E_0 = U_1 - I_y \cdot R_y = 220 - 11,896 \cdot 0,564 = 213,29 \text{ В} \quad (6.19)$$

Знаходимо взаємну індуктивність

$$L_{a\delta} = \frac{E_0}{\omega \cdot I_{\delta}} = \frac{213,29}{418,879} \cdot 6,285 = 0,32 \text{ Гн} \quad (6.20)$$

$$\text{де } \omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \cdot \frac{4000}{60} = 418,879 \text{ рад/с}$$

Визначивши всі необхідні параметри електричного двигуна, необхідно для його роботи синхронізувати його частоту із зовнішньою частотою, для цього ми створюємо підсистему “n/w”, показану на рис. 6.18. Синхронізація проводиться за формулою

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (6.21)$$

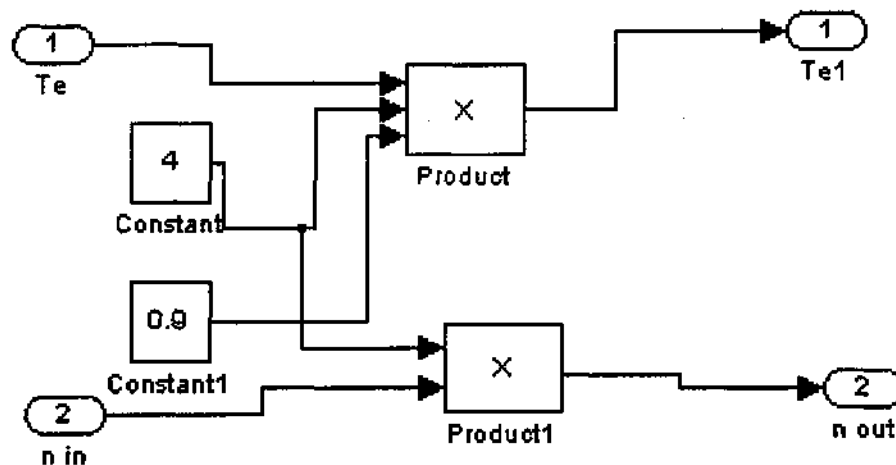


Рис. 6.18. Схема структурна системи синхронізації частот (підсистема “n/w”)

Після синхронізації його із зовнішньою частотою двигуна внутрішнього згоряння, підсистема моделі тягового електричного двигуна має вигляд, наведений на рис. 6.19.

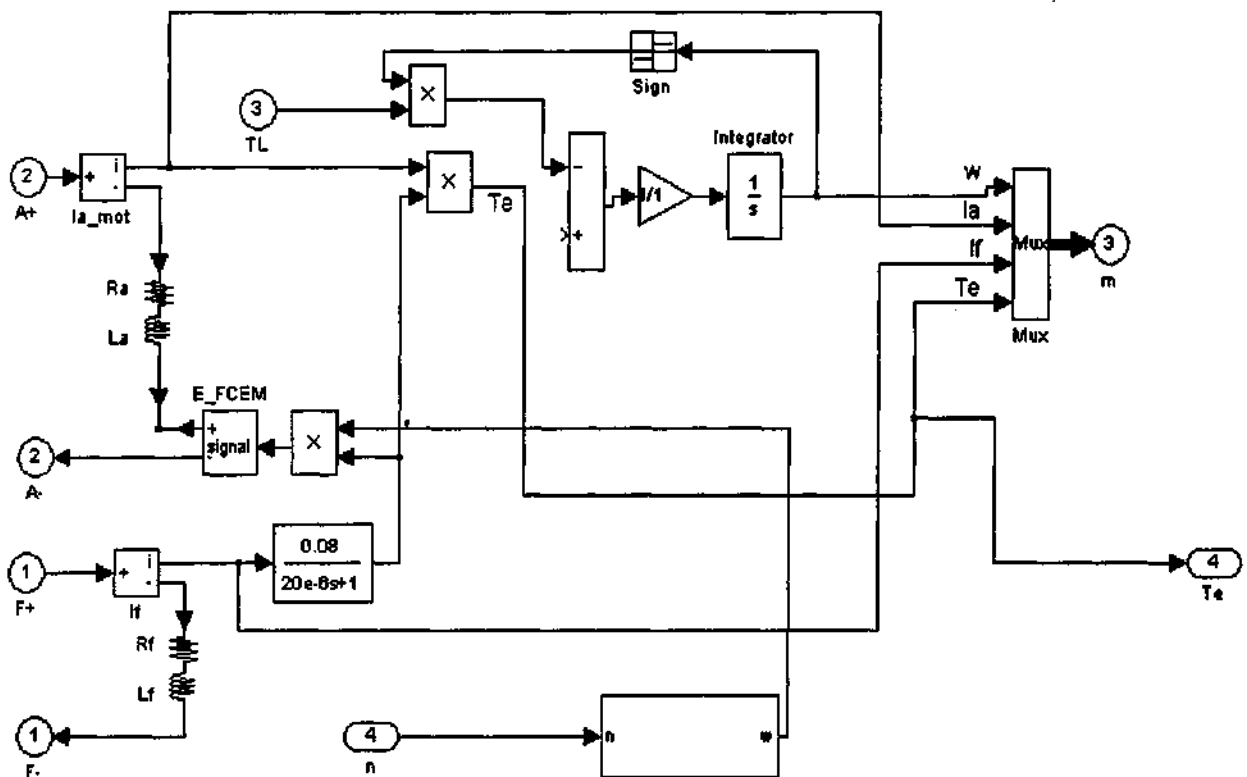


Рис. 6.19. Схема структурна тягового електричного двигуна

6.4. Результати моделювання

Проведемо моделювання порівняльних характеристик базового та гібридного автомобілів. Для моделювання автомобіля з гібридною силовою установкою підключимо розрахований і змодельований нами тяговий електричний двигун до системи “automobile”. Така система імітує сумісну роботу ДВЗ та електричного двигуна у процесі розгону автомобіля. Створену систему назвемо “Hybrid”.

Схема структурна гібридного автомобіля (система “Hybrid”) наведена на рис. 6.20

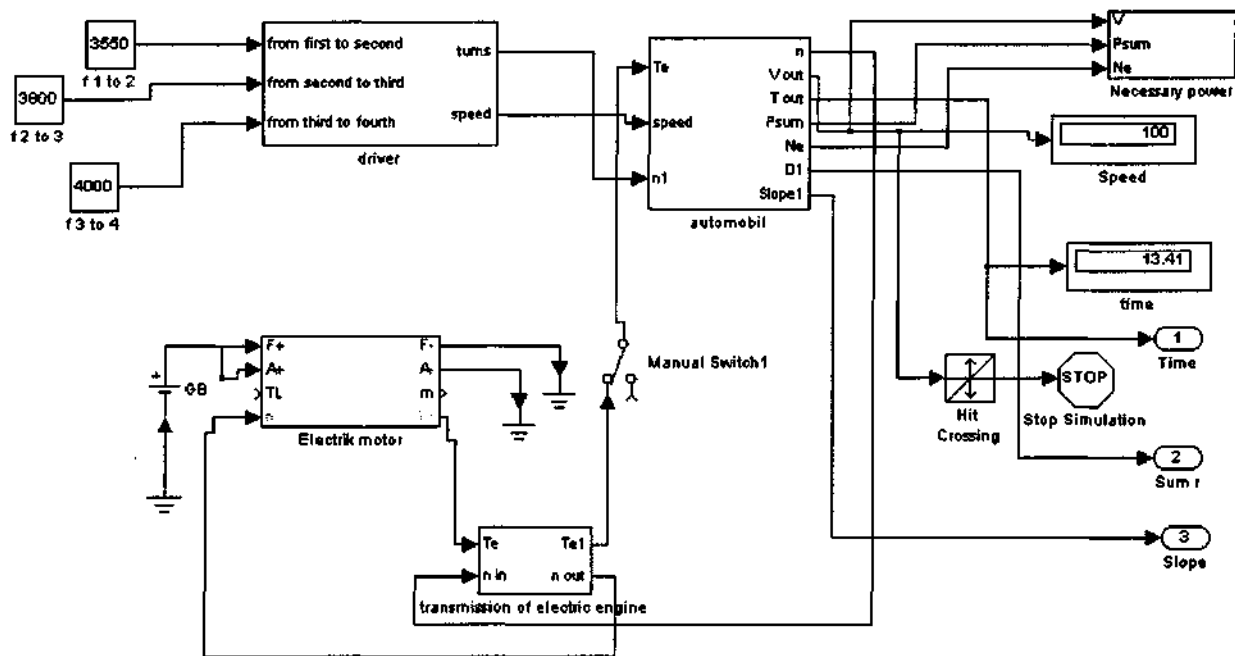


Рис. 6.20. Схема структурна автомобіля з гібридною силовою установкою (система “Hybrid”)

Порівняльна характеристика динаміки розгону базового автомобіля (система “automobile”) з динамікою розгону автомобіля, який оснащений гібридною силовою установкою (система “Hybrid”) наведено на рис. 6.21.

Результати порівняльного моделювання показують, що незважаючи на збільшення маси гібридного автомобіля та відносно малої потужності електричного двигуна постійного струму (4 кВт), час розгону до 100 км/год знизився на 2 секунди.

На рис. 6.22 показана динамічна характеристика гібридного автомобіля, у порівнянні з базовим.

Результати порівняльного моделювання показує, що автомобіль з гібридною енергетичною установкою здатний подолати набагато більший дорожній опір, ніж базовий автомобіль.

На рис. 6.23 показано порівняльний аналіз максимального продольного ухилу автомобільної дороги, який в змозі подолати гібридний та базовий автомобіль.

Результати порівняльного моделювання показують, що гібридний автомобіль здатний подолати більш круті підйоми, не знижуючи швидкості, та без перемикання коробки передач на нижчу передачу

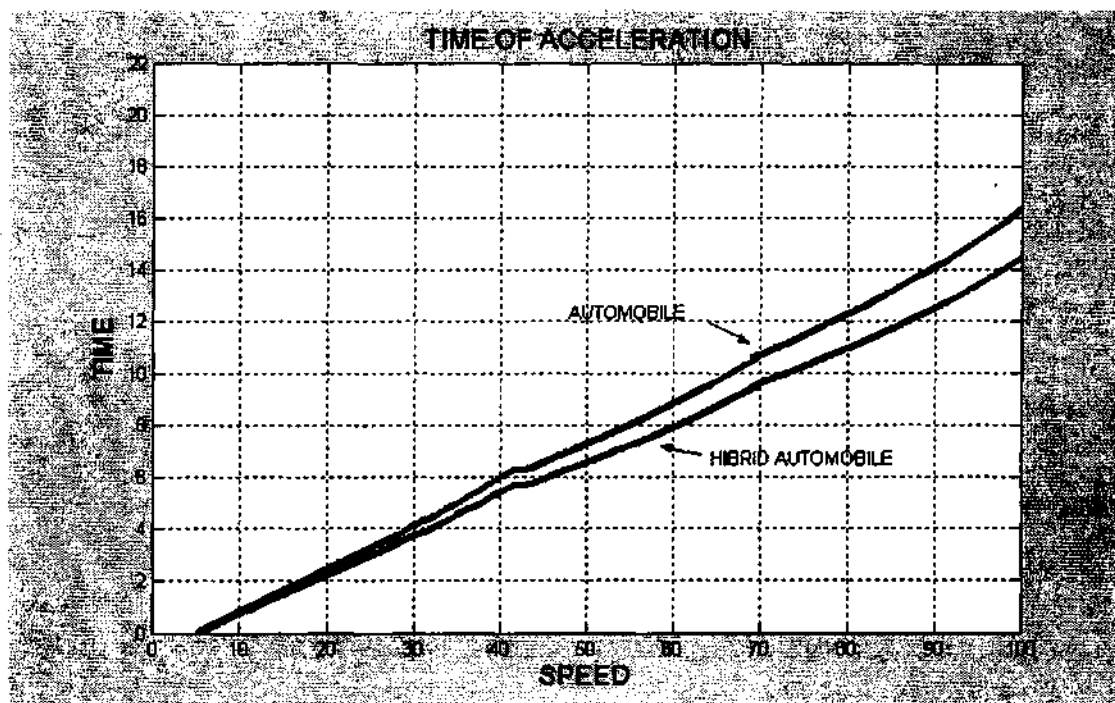


Рис. 6.21. Графік порівняння динаміки розгону базового та гібридного автомобілів

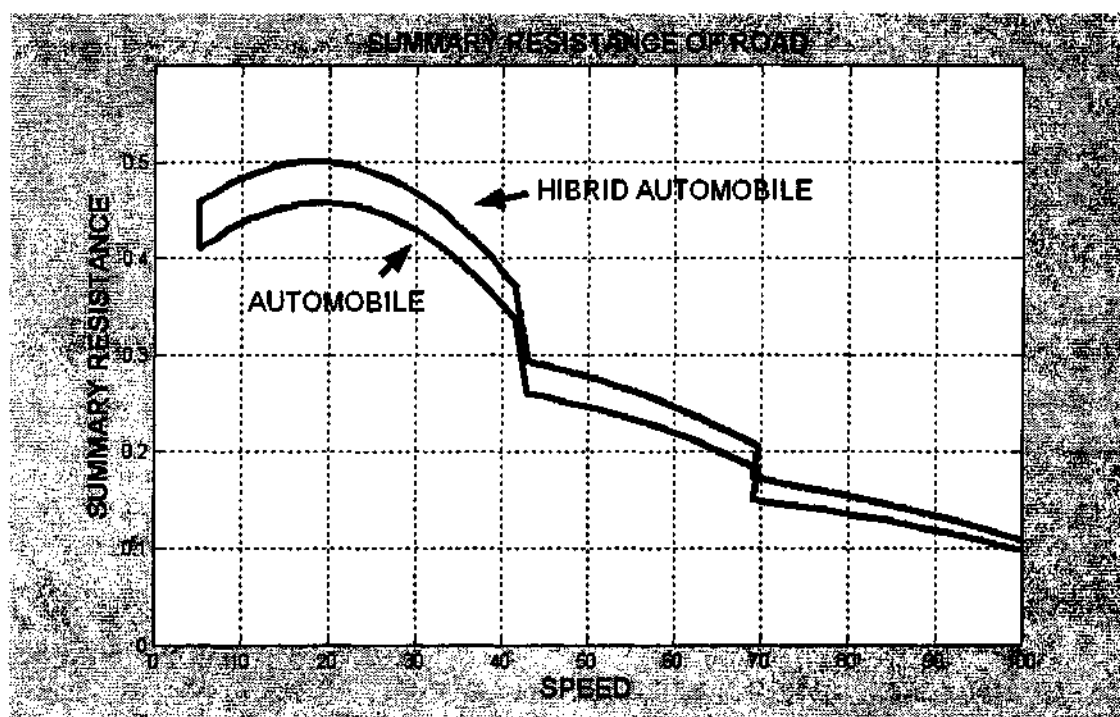


Рис. 6.22. Графік порівняння динамічних характеристик гібридного та базового автомобілів

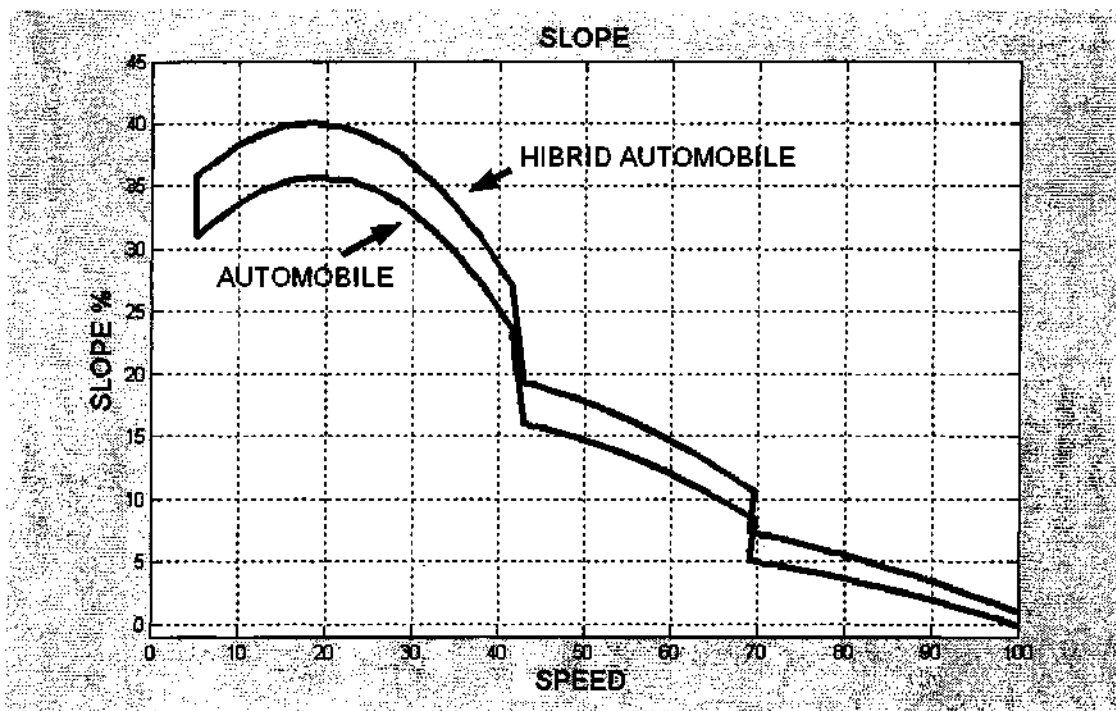


Рис. 6.23. Графік порівняння максимального ухилу, що можуть подолати гібридний та базовий автомобіль

В результаті проведеного математичного моделювання ми переконалися, що автомобіль з гібридною силовою установкою, в порівнянні з базовою моделлю, є більш потужним, екологічно чистішим, більш економічним, та більш динамічним транспортним засобом. Він здатний легше і набагато ефективніше долати максимально допустимі ухили без перемикання передач. Крім того, швидкість розгону до 100 км/год автомобіля з гібридною силовою установкою зменшилася на 2 секунди, незважаючи на збільшення маси автомобіля.

7 КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

7.1 Силова установка гібридного автомобіля як об'єкт керування

Одними з головних напрямків розвитку автомобільного транспорту на даний час є підвищення його економічності та екологічної безпечності. Світовий досвід показує, що найбільш перспективним способом вирішення цих проблем є розробка і удосконалення гібридних силових установок. Такі установки дозволяють оптимізувати режим роботи ДВЗ і акумулювати надлишки кінетичної енергії транспортного засобу при гальмуванні, що надзвичайно ефективно в міському циклі руху.

Спрощена схема силової установки гібридного автомобіля наведена на рис.7.1.

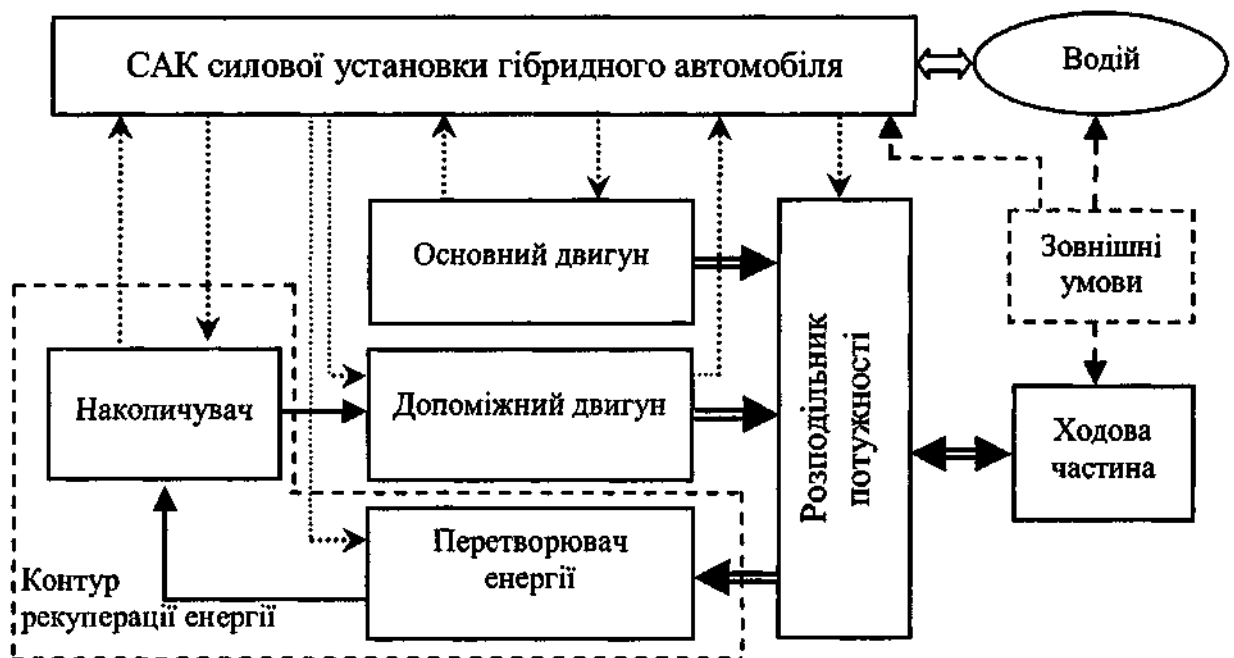


Рис.7.1. Структурна схема гібридної силової установки

Основним двигуном гібридної силової установки може виступати бензиновий або газовий двигун внутрішнього згоряння. Як допоміжний двигун використовується пневматичний або

електричний двигун постійного чи змінного струму. Контур рекуперації енергії складається з компресора, балонів, редуктора і т. д. при використанні пневматичного допоміжного двигуна, або генератора, акумулятора, перетворювача напруги, інвертора у випадку використання електричного допоміжного двигуна.

На рис. 7.2 наведені можливі варіанти технічної реалізації гібридної силової установки при використанні у якості допоміжного двигуна електродвигуна (а) і пневмодвигуна (б).

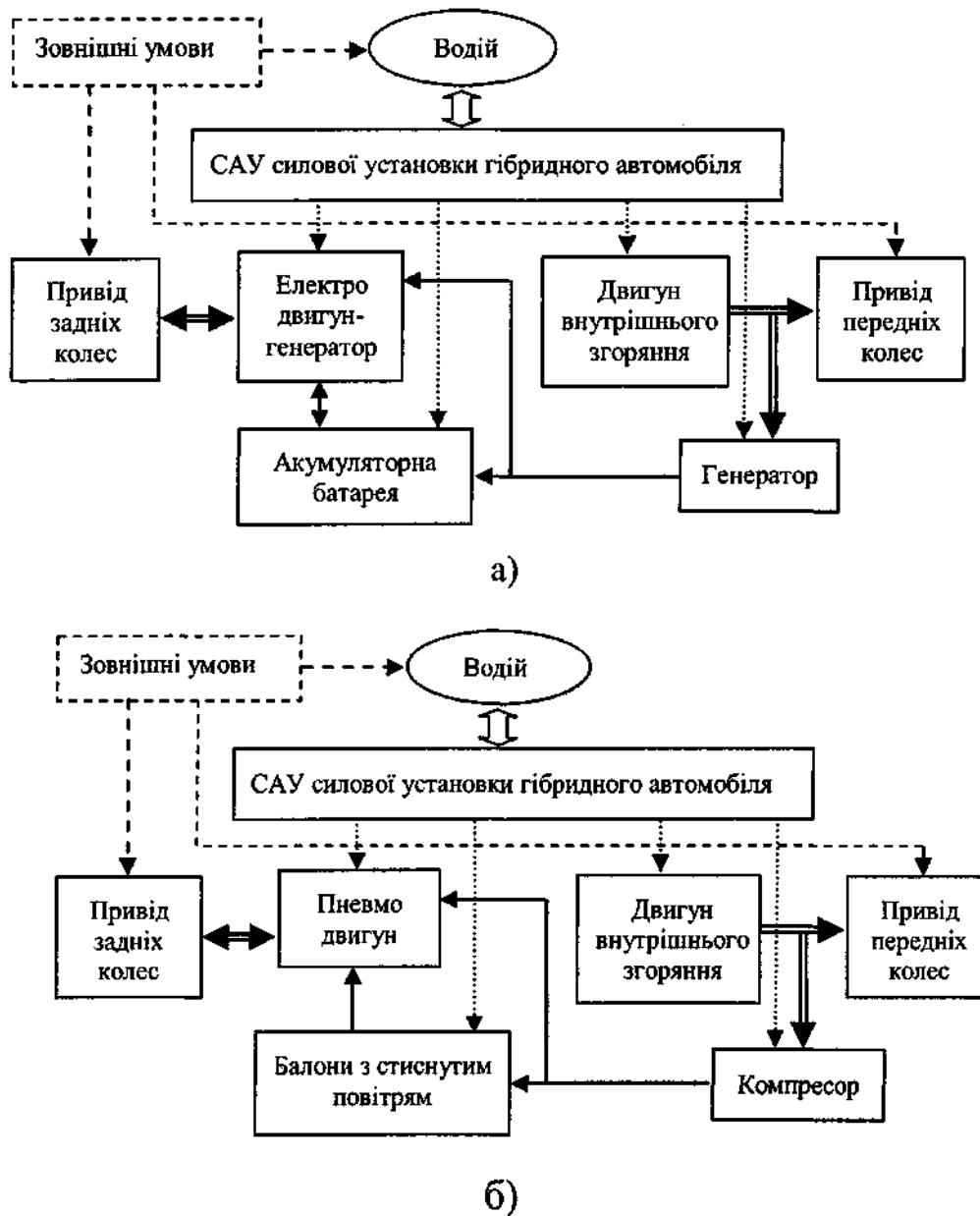


Рис.7.2. Спрощена структурна схема гібридного автомобіля з електродвигуном (а) і пневмодвигуном (б) у якості допоміжного двигуна

Ключовим елементом гібридної силової установки є розподільник потужності, який забезпечує перерозподіл потоків потужності між ходовою частиною автомобіля, основним двигуном, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії.

Відомі три схеми побудови гібридних силових установок. При використанні електродвигуна у якості допоміжного ці схеми можна характеризувати наступним чином:

1. Послідовна схема. Навантаженням ДВЗ є генератор. При цьому обирається найбільш економічний режим роботи ДВЗ. Енергія, яка вироблюється генератором, подається або на тяговий електродвигун, або в накопичувач енергії та на тяговий електродвигун, або тільки в накопичувач енергії. Тяговий електродвигун забезпечує всі необхідні потужнісні й швидкісні режими транспортного засобу, а при гальмуванні автомобіля працює в режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію кінетичної енергії. Перевагою такої схеми є простота керування силовою установкою, відсутність спеціальних вузлів трансмісії, можливість використання ДВЗ малої потужності в економічних режимах. Недоліком такого варіанта є малий коефіцієнт корисної дії (ККД).

2. Паралельна схема. ДВЗ і тяговий електродвигун разом з акумуляторною батареєю через трансмісію пов'язані з ведучими колесами. Підсумковий обертаючий момент визначається сумою обертаючих моментів ДВЗ і електродвигуна. У такій схемі більш високий ККД. Використовується одна електрична машина в режимах тягового електродвигуна і генератора. До недоліків такого варіанта варто віднести ускладнення трансмісії, системи керування, а також відхилення від економічного режиму роботи ДВЗ при регулюванні швидкості транспортного засобу.

3. Змішана схема. Комбінація послідовної і паралельної схем. Залежно від умов руху, привід ведучих коліс може здійснюватися від допоміжної силової установки, ДВЗ або від допоміжної силової установки і ДВЗ, які включаються паралельно. В цьому випадку досягається максимальна ефективність силової установки. Саме така схема побудови застосована на автомобілях Lexus RX400h, Lexus GS450h, Toyota Prius. У подальшому будемо розглядати саме цю схему.

Особливостями силової установки гібридного автомобіля як об'єкта керування є змінна структура, невизначеність керуючих впливів і впливів, що збурюють. Основні складові такої силової установки характеризуються нелінійністю та істотною параметричною невизначеністю.

Складності формального опису силової установки гібридного автомобіля як об'єкта керування, з урахуванням структурних і параметричних невизначеностей робить доцільним застосування в алгоритмах керування методів нейро-фазі регулювання. Такий підхід дозволяє сформулювати алгоритм керування силовою установкою в термінах нечіткої логіки на підставі формалізації експертних висновків, а також здійснити налаштування отриманого алгоритму в процесі випробувань і подальшої експлуатації гібридного транспортного засобу.

В останні роки провідними компаніями по розробці систем керування агрегатами автомобіля широко застосовуються компоненти нечіткої логіки та штучні нейронні мережі [16,17]. Системами з використанням нечіткої логіки оснащуються автомобілі Nissan, Mitsubishi, Honda, BMW, Hyundai, Mazda, Mercedes, Peugeot.

7.2 Постановка задачі синтезу системи керування

Основним завданням САК силової установки гібридного автомобіля є забезпечення найбільш економічного й екологічно безпечного режиму роботи ДВЗ за рахунок перерозподілу навантаження між ДВЗ, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії.

Додатковими завданнями САК є:

- забезпечення рекуперації енергії гальмування транспортного засобу;
- забезпечення необхідної розгінної динаміки транспортного засобу за рахунок використання допоміжної силової установки й накопичувача енергії;
- забезпечення режиму старт - стоп з мінімальним періодом холостого ходу ДВЗ у випадку короткочасних зупинок транспортного засобу.

Питома ефективна витрата палива визначається з урахуванням теплоти його згоряння H_u ; індикаторного η_i і механічного η_m ККД двигуна [16]:

$$g_e = \frac{3,6 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_m \cdot \eta_i}.$$

Витрата палива зменшується з підвищенням навантаження двигуна за рахунок збільшення η_m . При деякому навантаженні, що відповідає моменту обертання ДВЗ $M_{ДВЗ}^{opt}$, зменшення g_e припиниться й починає зростати через зменшення η_i внаслідок зниження коефіцієнта надлишку повітря. Поряд з цим, значення $M_{ДВЗ}^{opt}$ збільшується при підвищенні частоти обертання колінчастого вала ω .

Прирошення швидкості обертання визначається алгебраїчною сумою моментів

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{ДВЗ}^{об} + M_{ел.дв}^{об} - M_{дор}^{оп} - M_{генер}^{оп},$$

де J - сумарний момент інерції, приведений до вісі обертання колінчастого вала; $M_{ДВЗ}^{об}$ - момент обертання ДВЗ; $M_{ел.дв}^{об}$ - приведений момент обертання допоміжного двигуна (електродвигуна); $M_{дор}^{оп}$ - приведений момент опору, що створюється дорогою з урахуванням передатного відношення коробки передач; $M_{генер}^{оп}$ - приведений момент опору, що створюється генератором.

Задача синтезу САК силової установки може бути сформульована в такий спосіб. При всіх припустимих змінах тягово-швидкісного режиму силової установки забезпечити керування частотою обертання колінчастого вала ω , при якому мінімізується середньоквадратична помилка регулювання

$$\sigma_e = \sqrt{M[(\omega_s(t) - \omega(t))^2]},$$

де ω_3 - керуючий вплив з боку водія - задана частота обертання колінчастого валу, а також середньоквадратичне відхилення моменту обертання ДВЗ від оптимального значення

$$\sigma_M = \sqrt{M \left[\left(M_{ДВЗ}^{opt}(t) - M_{ДВЗ}^{op}(t) \right)^2 \right]}$$

при наявності обмежень на керуючі впливи.

Складність задачі керування пов'язана з складністю математичної моделі об'єкту керування та невизначенністю моделей керуючих та збурюючих впливів. Щодо обмежень на керуючі впливи та змінні стану об'єкта керування, то вони залежать від особливостей конкретної технічної реалізації гібридної силової установки.

7.3 Принципи побудови САК гібридною силовою установкою

Особливості об'єкта керування припускають ієрархічну організацію системи керування силовою установкою гібридного автомобіля.

Необхідні режими роботи кожного агрегату силової установки забезпечуються відповідними регуляторами і блоками керування, які враховують особливості побудови конкретних вузлів й агрегатів і становлять перший рівень ієрархії.

Підтримка оптимального режиму роботи ДВЗ на різних режимах автомобіля за рахунок перерозподілу навантаження між ДВЗ, допоміжним двигуном і контуром рекуперації енергії забезпечується елементами САК другого рівня ієрархії.

Елементи САК третього рівня ієрархії забезпечують інтерфейс водія, який імітує керування традиційним транспортним засобом і, в той же час, забезпечує відображення поточного стану і режиму роботи гібридної силової установки.

Структурна схема силової установки гібридного автомобіля з використанням електродвигуна у якості допоміжного агрегату наведена на рис. 7.3. Згідно рисунку: g_u – циклова витрата палива, α – коефіцієнт надлишку повітря, K_{B3} – кут випередження запалювання, K_{BV} – кут випередження впорскування, K_{KP} – коефіцієнт передачі коробки передач.

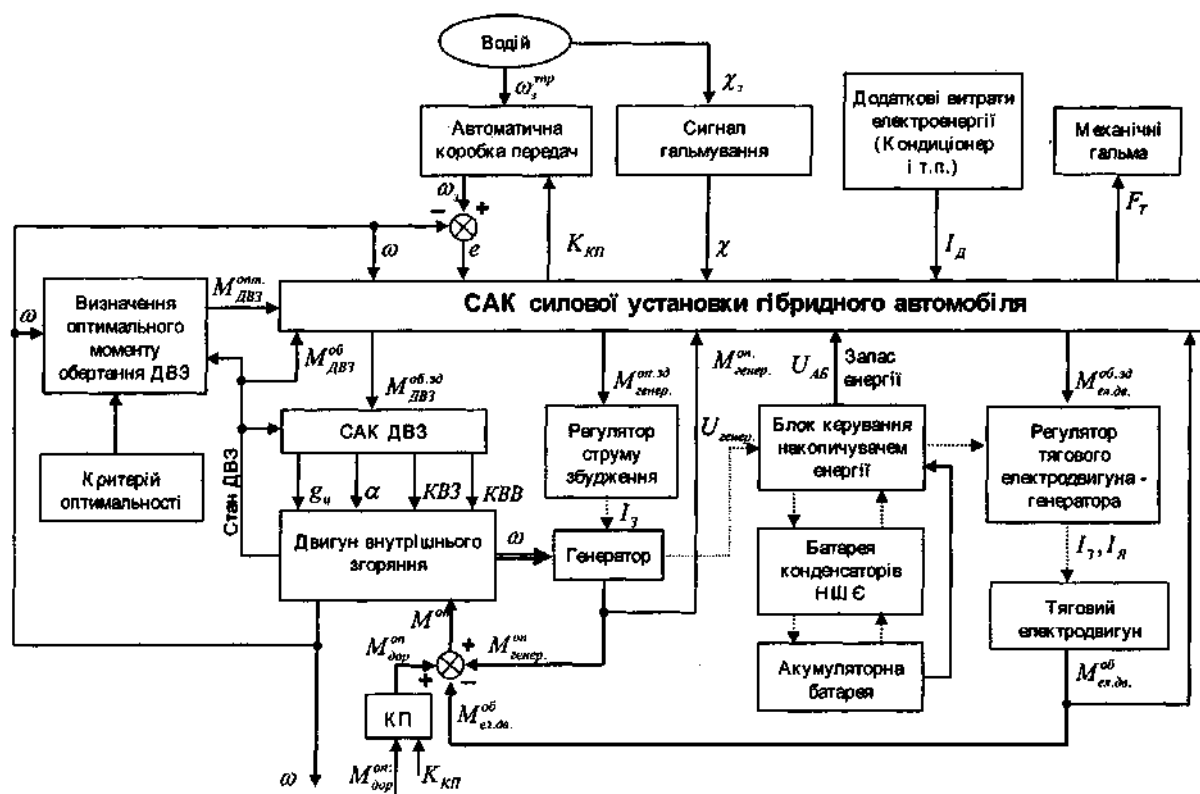


Рис.7.3. Структурна схема силової установки гібридного автомобіля

Спрощений опис принципів роботи САК гібридної силової установки може бути представлений в наступній формі.

1. Початок руху, рух при малому навантаженні, з невеликою швидкістю або під ухил. Оскільки ДВЗ має низький ККД при малих навантаженнях, рух забезпечується за рахунок допоміжного двигуна, якщо запас енергії в накопичувачі достатній. Якщо ні – рух забезпечується двигуном внутрішнього згоряння. Крім того за допомогою ДВЗ забезпечується поповнення енергії накопичувача.

2. Рівномірний рух. САК забезпечує найбільш ефективний режим роботи ДВЗ. У випадку якщо обертаючий момент ДВЗ менший за момент опору, потужність, якої бракує, забезпечується за рахунок підключення допоміжного двигуна. Якщо оптимальний обертаючий момент більший за момент опору, надлишок потужності надходить до контуру рекуперації енергії.

3. Розгін. Необхідна розгінна динаміка забезпечується, в основному, за рахунок допоміжного двигуна при підтримці найбільш економічного режиму основного ДВЗ. При недостатньому

запасі енергії в накопичувачі або недостатку потужності допоміжного двигуна, додаткова потужність забезпечується основним ДВЗ.

4. Гальмування. Надлишок кінетичної енергії транспортного засобу утилізується контуром рекуперації. При недостатній ефективності рекуперативного гальмування, підключається система гідравлічного гальмування.

5. При зупинці й наявності енергії в накопичувачі, достатньої для рушання автомобіля, ДВЗ відключається. Якщо запасеної енергії недостатньо, ДВЗ продовжує працювати до її необхідного поповнення.

7.4 Нечітка модель системи керування.

Вхідні та вихідні впливи САК силової установки гібридного автомобіля, які необхідні для вирішення задачі оптимізації режиму роботи ДВЗ на різних тягово – швидкісних режимах, наведені на рис.7.4.

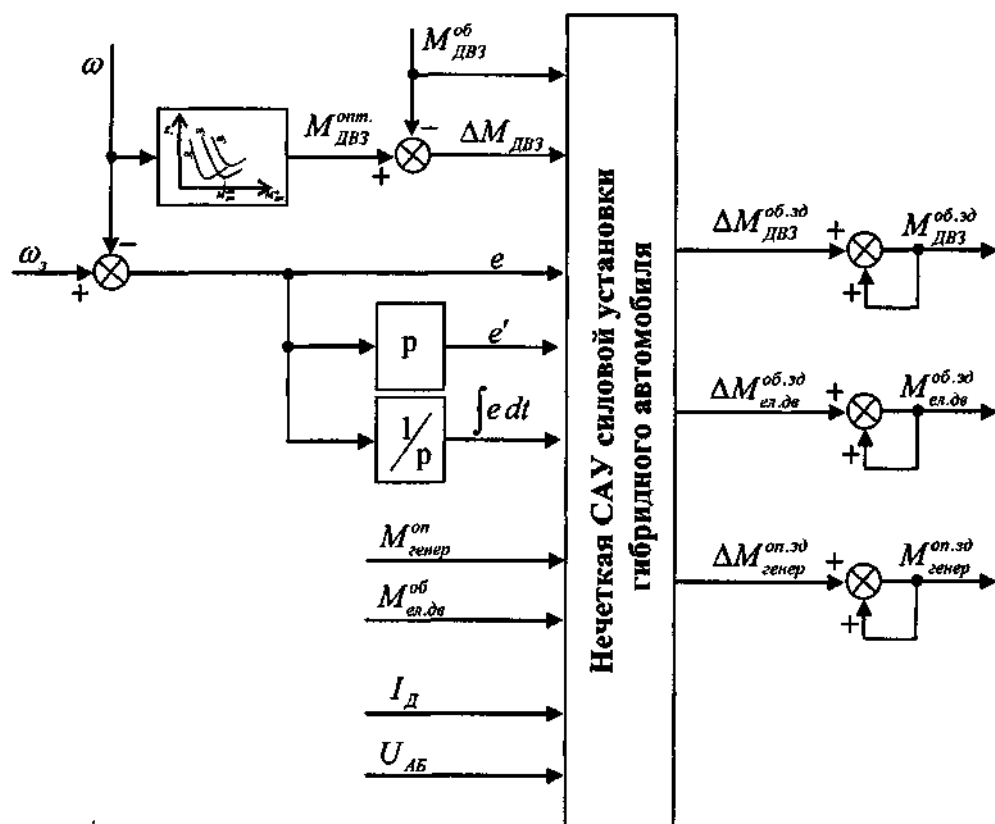


Рис.7.4. Вхідні та вихідні впливи САК силової установки гібридного автомобіля

З метою зменшення розмірності проведемо декомпозицію задачі як показано на рис.7.5. При цьому введені додаткові проміжні змінні:

ΔM_{TP} - прирощення моменту обертання, необхідне для підтримання заданого швидкісного режиму; $\Delta M_{ДВЗ}^6$ - Бажане прирощення моменту обертання ДВЗ; $E_{зп}$ - запас енергії в контурі рекуперації; S_{KnR} - стан контуру рекуперації.

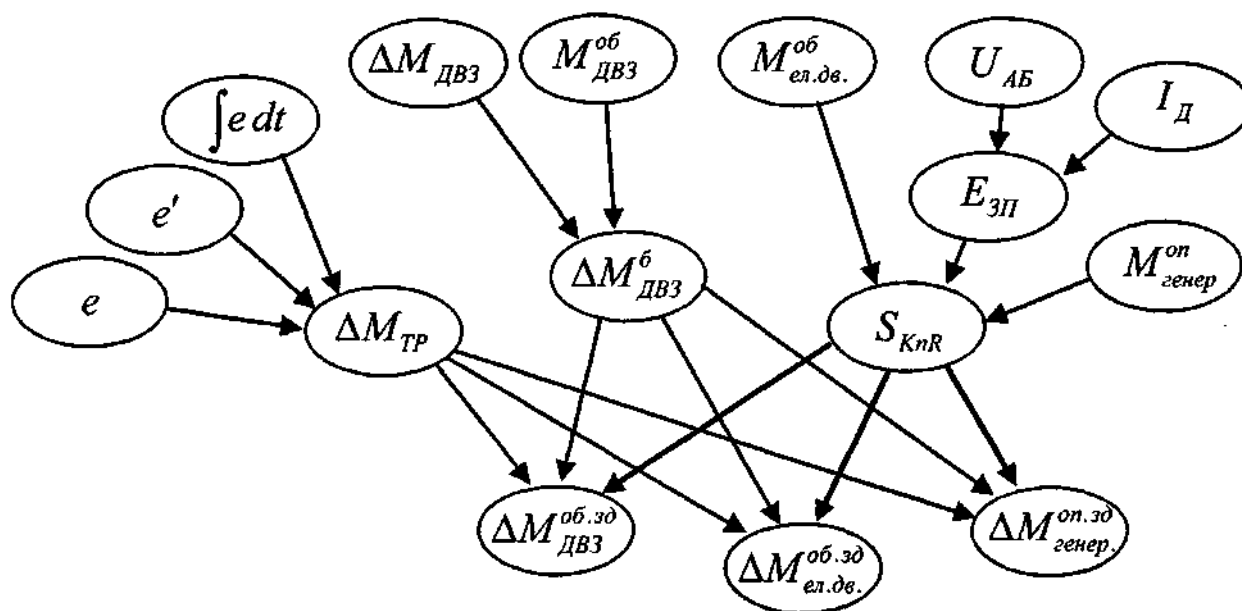


Рис.7.5. Схема алгоритмічної декомпозиції задачі оптимізації режиму роботи ДВЗ

На першому етапі будуть визначатись проміжні змінні на базі поточних значень окремих вхідних впливів. Потім на базі проміжних змінних обчислюються вихідні впливи САК.

Для вирішення цих задач будемо використовувати методи нечіткого керування. Структуру блоку нечіткого курування зображено на рис.7.6.

Наведений вище опис роботи САК гібридної силової установки може бути формалізований у вигляді бази правил нечітких продукцій.

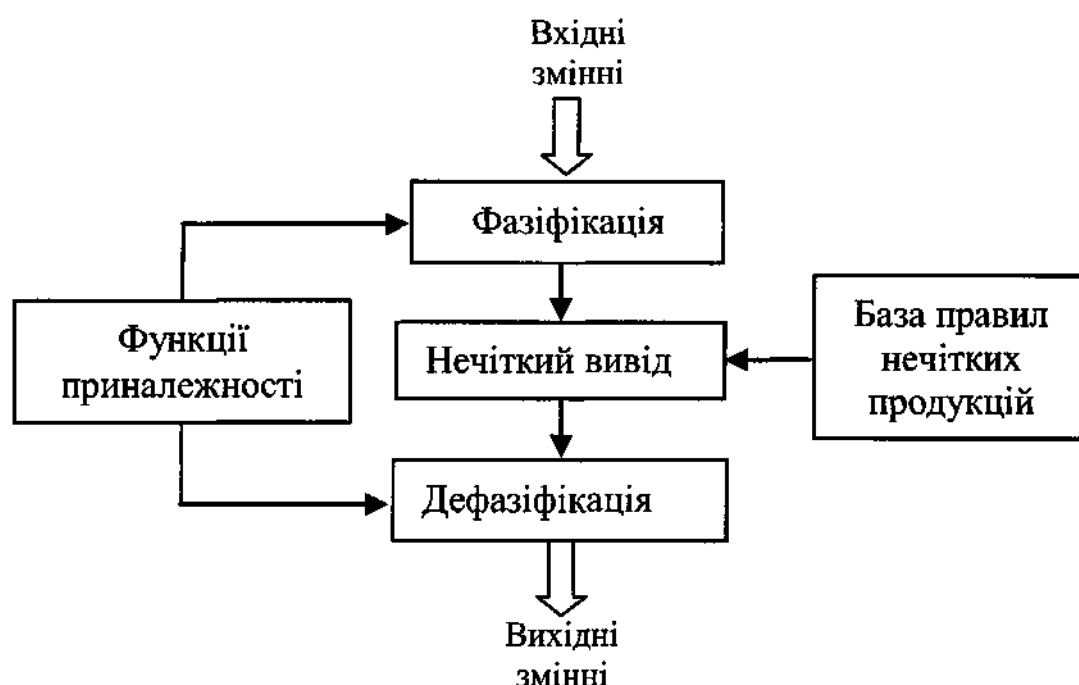


Рис.7.6 Структура блоку нечіткого керування

Для зручності запису найменувань термів лінгвістичних змінних використовуються загальноприйняті скорочення (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Скорочення для значень основних термів
лінгвістичних змінних

Символічне позначення	Англомовна нотація	Україномовна нотація
NB	Negative Big	Негативне велике
NM	Negative Middle	Негативне середнє
NS	Negative Small	Негативне мале
ZN	Zero Negative	Негативне близьке до нуля
Z	Zero	Нуль, близьке до нуля
ZP	Zero Positive	Позитивне близьке до нуля
PS	Positive Small	Позитивне мале
PM	Positive Middle	Позитивне середнє
PB	Positive Big	Позитивне велике

Створимо нечіткі моделі для обчислення значень проміжних змінних и вихідних впливів САК.

7.5 Визначення потрібного прирощення моменту обертання гібридної силової установки

Під час визначення потрібного прирощення моменту обертання силової установки гібридного автомобіля у якості вхідних змінних розглядаються:

- похибка регулювання по швидкості $e(t) = \omega_s(t) - \omega(t)$;
- перша похідна від похибки регулювання $e'(t) = \frac{de(t)}{dt}$;
- інтеграл від похибки регулювання $\int_0^t e(t) dt$.

З метою упрощення аналізу будемо використовувати безрозмірне представлення вхідних і вихідних змінних.

Для завдання бази правил нечіткого виводу задамо вхідні і вихідні лінгвістичні змінні.

1). Вхідна лінгвістична змінна ErW - «Похибка регулювання по швидкості» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{ErW} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.7,а.

2). Вхідна лінгвістична змінна $dErW$ - «Прирощення похибки регулювання» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dErW} = \{NS, Z, PS\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.7,б.

3). Вхідна лінгвістична змінна $iErW$ - «Накопичування похибки регулювання» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{iErW} = \{NS, Z, PS\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.7,в.

4). Вихідна лінгвістична змінна $dMtr$ - «Необхідне прирощення моменту обертання» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dMtr} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.7,г.

Функції приналежності кожного з термів кожної лінгвістичної змінної є гаусовськими функціями з центром s і варіацією σ [17]

$$\mu(x; \sigma, c) = \exp \left[\frac{-(x - c)^2}{2\sigma^2} \right]$$

Параметри c і σ підбираються виходячи з фізичного єства відповідних змінних.

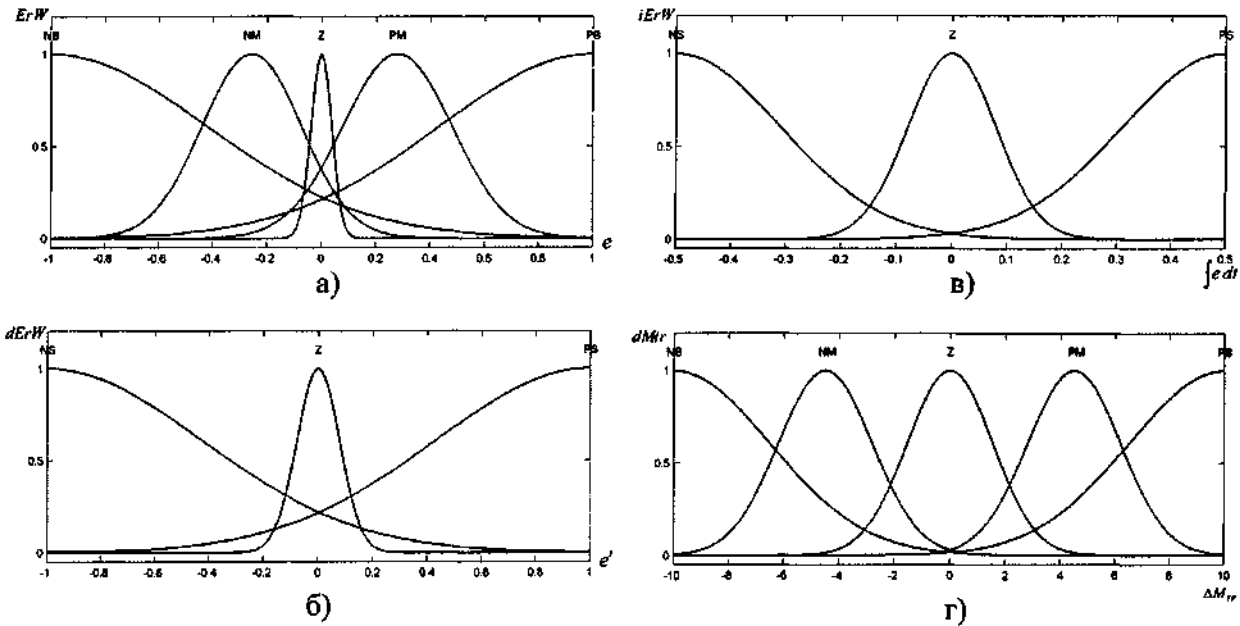


Рис.7.7 Функції приналежності для термів лінгвістичних змінних ErW (а), $iErW$ (б), $iErW$ (в), $dMtr$ (г)

Базу правил системи нечіткого виводу для визначення необхідного прирощення моменту обертання силової установки можна представити в табличному вигляді (див. табл. 7.2).

Таблиця 7.2.

База правил нечіткого виводу для визначення необхідного прирощення моменту обертання силової установки

ErW		NB			NM			Z			PM			PB		
$dErW$		NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS	NS	Z	PS
$iErW$	PS	NB	NM	NM	NM	NM	Z	Z	PM	PB	PM	PB	PB	PB	PB	PB
	Z	NB	NB	NM	NB	NM	NM	NM	Z	PM	PM	PM	PB	PM	PB	PB
	NS	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NB	NM	Z	Z	PM	PM	PM	PM	PB

Відповідно до складеної таблиці формулюється 31 правило нечітких продукцій:

1. Якщо $ErW = NB$ і $dErW = NS$ то $dMtr = NB$;
2. Якщо $ErW = PB$ і $dErW = PS$ то $dMtr = PB$;
3. Якщо $ErW = NB$ і $dErW = Z$ і $iErW = \text{не}PS$ то $dMtr = NB$;
4. Якщо $ErW = NB$ і $dErW = Z$ і $iErW = PS$ то $dMtr = NM$;
5. Якщо $ErW = PB$ і $dErW = Z$ і $iErW = \text{не}NS$ то $dMtr = PB$;
6. Якщо $ErW = PB$ і $dErW = Z$ і $iErW = NS$ то $dMtr = PM$;
7. Якщо $ErW = NB$ і $dErW = PS$ і $iErW = \text{не}NS$ то $dMtr = NM$;
8. Якщо $ErW = NB$ і $dErW = PS$ і $iErW = NS$ то $dMtr = NB$;
9. Якщо $ErW = PB$ і $dErW = NS$ і $iErW = \text{не}PS$ то $dMtr = PM$;
10. Якщо $ErW = PB$ і $dErW = NS$ і $iErW = PS$ то $dMtr = PB$;
11. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = NS$ і $iErW = \text{не}PS$ то $dMtr = NB$;
12. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = NS$ і $iErW = PS$ то $dMtr = NM$;
13. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = PS$ і $iErW = \text{не}NS$ то $dMtr = PB$;
14. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = PS$ і $iErW = NS$ то $dMtr = PM$;
15. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = Z$ і $iErW = \text{не}NS$ то $dMtr = NM$;
16. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = Z$ і $iErW = NS$ то $dMtr = NB$;
17. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = Z$ і $iErW = \text{не}PS$ то $dMtr = PM$;
18. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = Z$ і $iErW = PS$ то $dMtr = PB$;
19. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = PS$ і $iErW = \text{не}PS$ то $dMtr = NM$;
20. Якщо $ErW = NM$ і $dErW = PS$ і $iErW = PS$ то $dMtr = Z$;
21. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = NS$ і $iErW = \text{не}NS$ то $dMtr = PM$;
22. Якщо $ErW = PM$ і $dErW = NS$ і $iErW = NS$ то $dMtr = Z$;
23. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = NS$ і $iErW = PS$ то $dMtr = Z$;
24. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = NS$ і $iErW = Z$ то $dMtr = NM$;
25. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = NS$ і $iErW = NS$ то $dMtr = NB$;
26. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = Z$ і $iErW = PS$ то $dMtr = PM$;
27. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = Z$ і $iErW = Z$ то $dMtr = Z$;
28. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = Z$ і $iErW = NS$ то $dMtr = NM$;
29. Якщо $ErW = Z$ і $dErW = PS$ і $iErW = PS$ то $dMtr = PB$;
30. Если $ErW = Z$ и $dErW = PS$ і $iErW = Z$ то $dMtr = PM$;
31. Если $ErW = Z$ и $dErW = PS$ і $iErW = NS$ то $dMtr = Z$;

Для нечіткого виводу в заданій базі правил будемо використовувати алгоритм Мамдани [17].

Процес створення моделі в термінах нечіткої логіки полягає в послідовному виконанні операцій фазифікації вхідних змінних, агрегування підумов у правилах нечітких продукцій, активації

підвисновків, акумуляції висновків правил нечітких продукцій, дефазифікації вихідних змінних.

Аналогічно складаються моделі для визначення інших змінних: бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ; запасу енергії в контурі рекуперації; стану контуру рекуперації; прирощень керуючих впливів на агрегати силової установки.

В результаті фазифікації встановлюється відповідність між конкретним значенням кожної вхідної змінної системи нечіткого виводу і значенням функцій приналежності відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної. Після закінчення цього етапу для всіх вхідних змінних повинні бути визначені конкретні значення функцій приналежності по кожному із лінгвістичних термів, які використовуються в підумовах бази правил нечіткого виводу.

Під час визначення результату нечітких кон'юнкцій (зв'язка «і») нечітких висловлювань A и B будемо використовувати вираження

$$T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\},$$

де $T(\bullet)$ - ступень істинності відповідного висловлювання.

Під час визначення результату логічних диз'юнкцій (зв'язка «чи») нечітких висловлювань A и B будемо використовувати вираження

$$T(A \vee B) = \max\{T(A), T(B)\}.$$

Для визначення ступеню істинності логічного заперечування (нечітке висловлювання «НЕ») будемо використовувати вираження

$$T(\bar{A}) = 1 - T(A).$$

Для визначення чіткого значення вихідної змінної ΔM_{TP} блоку нечіткого керування будемо використовувати метод центра ваги. Для випадку, що розглядається, одержимо

$$\Delta M_{TP} = \frac{\int x \cdot \mu'_{dMr}(x) dx}{\int_x \mu'_{dMr}(x) dx},$$

де x - змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній $dMtr$; $\mu'_{dMtr}(x)$ - функція приналежності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній $dMtr$ після етапу акумуляції.

На рис. 7.8 представлені поверхні нечіткого виводу, які відображають залежності вихідної змінної ΔM_{TP} ($dMtr$), від вхідних змінних e , e' і $\int e dt$ (ErW , $dErW$ і $iErW$).

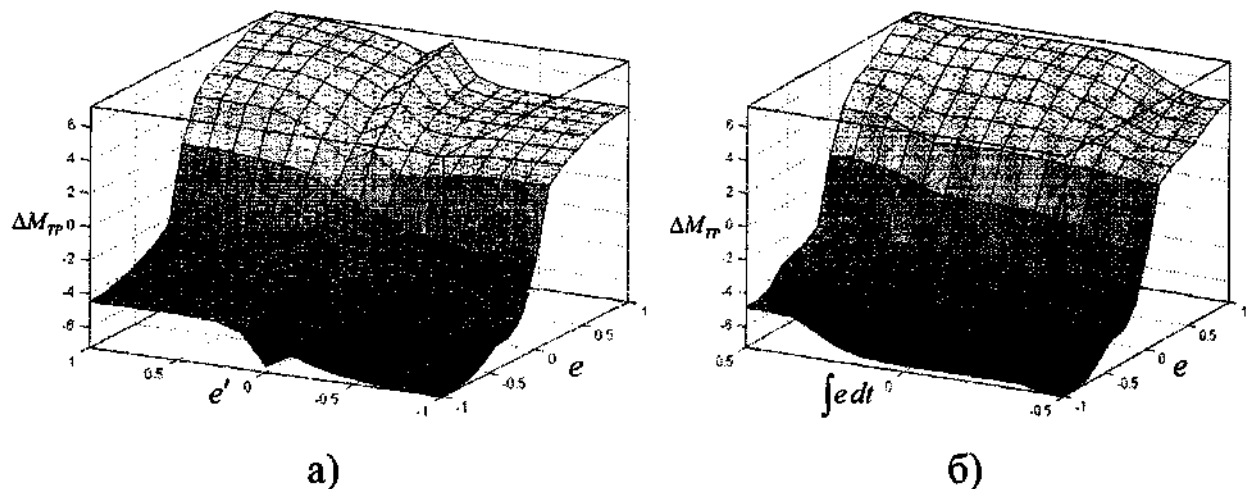


Рис.7.8 Поверхні нечіткого виводу при обчисленні необхідного прирощення моменту обертання силової установки: $\Delta M_{TP} = f(e, e')$, $\int e dt = 0$ (а); $\Delta M_{TP} = f(e, \int e dt)$, $e' = 0$ (б)

7.6 Визначення бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ

Бажане прирощення моменту обертання ДВЗ, наближає його режим до оптимального та визначається поточним моментом обертання $M_{ДВЗ}^{об}$ й поточним відхиленням моменту обертання від оптимального значення

$$\Delta M_{ДВЗ} = M_{ДВЗ}^{опт} - M_{ДВЗ}^{об}.$$

Для завдання нечіткої моделі визначення бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ задамо наступні вхідні та вихідні лінгвістичні змінні.

1). Вхідна лінгвістична змінна dM_{dvs} - «Відхилення моменту обертання ДВЗ від оптимального» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dM_{dvs}} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.9,а.

2). Вхідна лінгвістична змінна M_{dvs} - «Момент обертання ДВЗ»: $\mathfrak{Z}_{M_{dvs}} = \{ZP, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.9,б.

3). Вихідна лінгвістична змінна dM_{dvsG} - «Бажане прирощення моменту обертання ДВЗ»: $\mathfrak{Z}_{dM_{dvsG}} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.9,в.

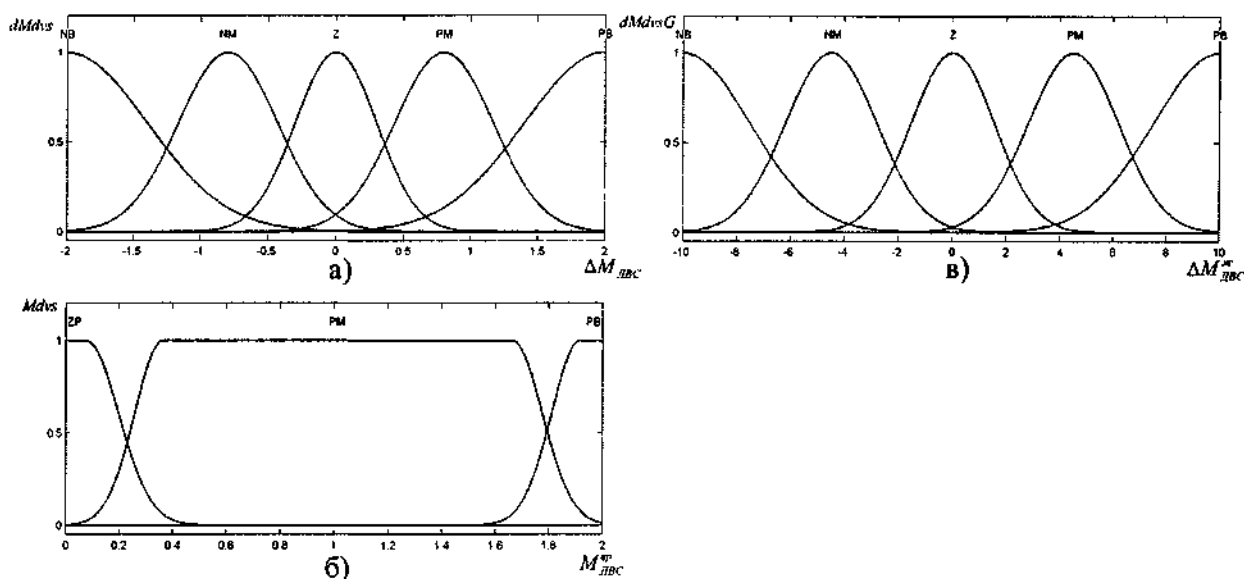


Рис.7.9 Функції приналежності для термів лінгвістичних змінних dM_{dvs} (а), M_{dvs} (б), dM_{dvsG} (в)

Базу правил системи нечіткого виводу для визначення бажаного прирощення моменту обертання силової установки можна представити у вигляді таблиці (див. табл. 7.3).

Як видно із даної таблиці, можуть бути складені наступні дев'ять правил нечітких продукцій:

1. Якщо $dM_{dvs}=Z$ то $dM_{dvsG}=Z$;
2. Якщо $dM_{dvs}=NM$ і $M_{dvs}=\text{не}ZP$ то $dM_{dvsG}=NM$;
3. Якщо $dM_{dvs}=NB$ і $M_{dvs}=\text{не}ZP$ то $dM_{dvsG}=NB$;
4. Якщо $dM_{dvs}=PM$ і $M_{dvs}=\text{не}PB$ то $dM_{dvsG}=PM$;

5. Якщо $dM_{dvs}=PB$ і $M_{dvs}=неPB$ то $dM_{dvs}G=PB$;
6. Якщо $dM_{dvs}=NB$ і $M_{dvs}=ZP$ то $dM_{dvs}G=Z$;
7. Якщо $dM_{dvs}=NM$ і $M_{dvs}=ZP$ то $dM_{dvs}G=Z$;
8. Якщо $dM_{dvs}=PM$ і $M_{dvs}=PB$ то $dM_{dvs}G=Z$;
9. Якщо $dM_{dvs}=PB$ і $M_{dvs}=PB$ то $dM_{dvs}G=Z$.

Таблиця 7.3.

База правил нечіткого виводу для визначення бажаного приращення моменту обертання ДВЗ

dM_{dvs}		NB	NM	Z	PM	PB
M_{dvs}	ZP	Z	Z	Z	PM	PB
	PM	NB	NM	Z	PM	PB
	PB	NB	NM	Z	Z	Z

Поверхню нечіткого виводу, що відображає зв'язок вихідної змінної $\Delta M_{ДВЗ}^6$, що відповідає лінгвістичній змінній $dM_{dvs}G$, з вхідними змінними $\Delta M_{ДВЗ}$ і $M_{ДВЗ}^{об}$, які відповідають лінгвістичним змінним dM_{dvs} і M_{dvs} , наведено на рис. 7.10.

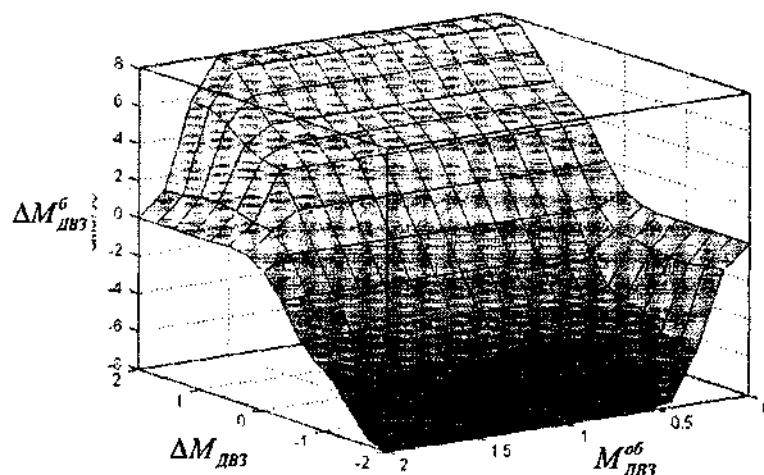


Рис.7.10 Поверхня нечіткого виводу при обчисленні бажаного приращення моменту обертання ДВЗ

7.7 Оцінка запасу енергії в контурі рекуперації

Запас енергії в контурі рекуперації, що може бути використаний у силовій установці гібридного автомобіля під час перерозподілу потужності, залежить не тільки від ступеня заряду

аккумуляторних батарей (для випадку електричного допоміжного двигуна) але й від витрати енергії додатковими споживачами, які не пов'язані зі створенням тягового моменту.

Для оцінки ефективного запасу енергії за допомогою нечіткої моделі введемо наступні лінгвістичні змінні:

1). Вхідна лінгвістична змінна U_{ab} - «Ступінь зарядженості аккумуляторної батареї» з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{U_{ab}} = \{PS, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.11,а.

2). Вхідна лінгвістична змінна I_{dp} - «Додаткова витрата енергії»: $\mathfrak{Z}_{I_{dp}} = \{PS, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.11,б.

3). Вихідна лінгвістична змінна $EnZp$ - «Запас енергії в контурі рекуперації»: $\mathfrak{Z}_{EnZp} = \{ZP, PS, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.11,в.

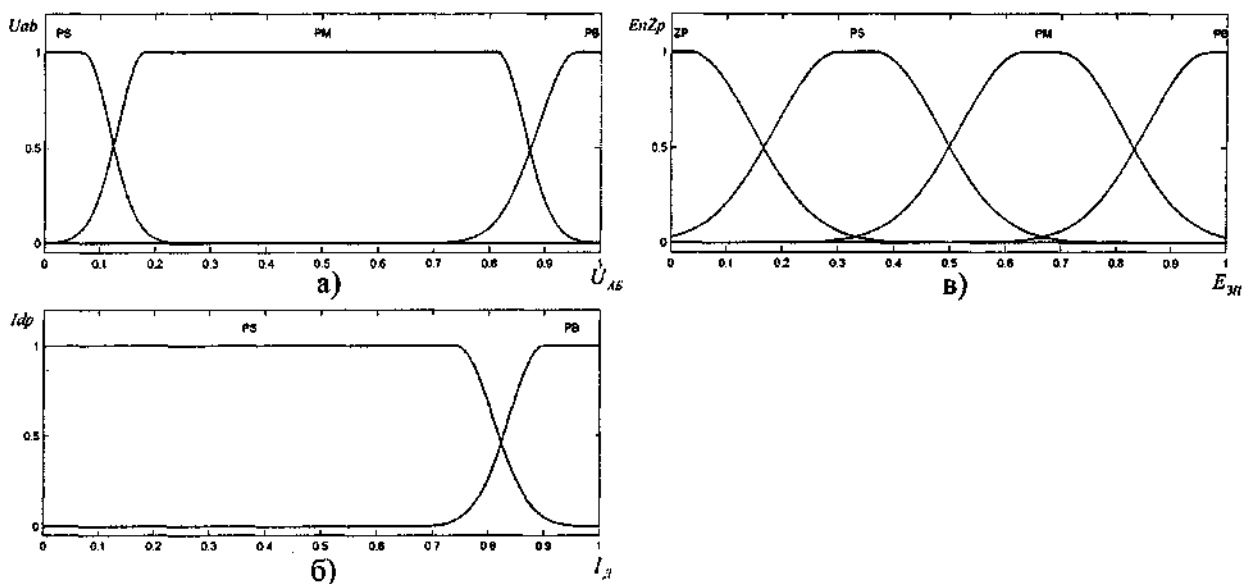


Рис.7.11 Функції приналежності для термів лінгвістичних змінних U_{ab} (а), I_{dp} (б), $EnZp$ (в)

Базу правил системи нечіткого виводу для визначення запасу енергії в контурі рекуперації можна представити у вигляді таблиці (див. табл. 7.4).

Таблиця 7.4.

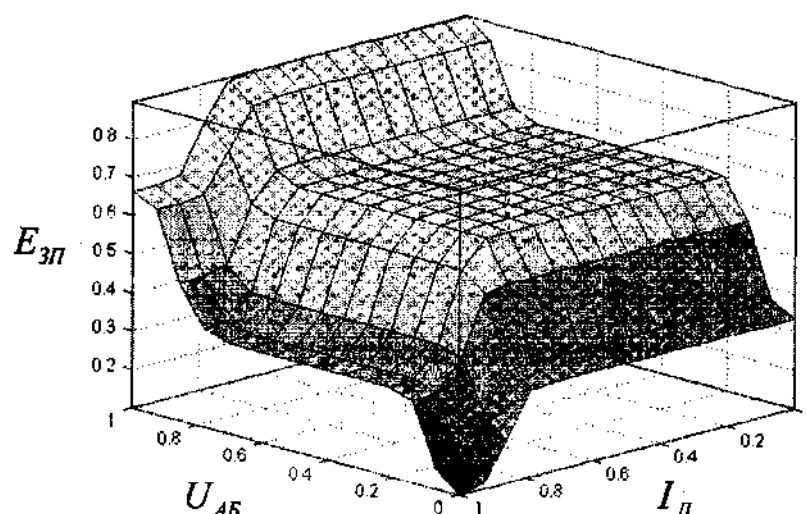
**База правил нечіткого виводу для визначення
запасу енергії в контурі рекуперації**

U_{ab}		PS	PM	PB
I_{dp}	PS	PS	PM	PB
	PB	ZP	PS	PM

Роботу даної системи нечіткого виводу описують шість правил нечітких продукцій:

1. Якщо $U_{ab}=PS$ і $I_{dp}=PS$ то $EnZp=PS$;
2. Якщо $U_{ab}=PS$ і $I_{dp}=PB$ то $EnZp=ZP$;
3. Якщо $U_{ab}=PM$ і $I_{dp}=PS$ то $EnZp=PM$;
4. Якщо $U_{ab}=PM$ і $I_{dp}=PB$ то $EnZp=PS$;
5. Якщо $U_{ab}=PB$ і $I_{dp}=PS$ то $EnZp=PB$;
6. Якщо $U_{ab}=PB$ і $I_{dp}=PB$ то $EnZp=PM$.

Поверхня нечіткого виводу, яку породжає розглянута база правил, приведена на рис.7.12. Ця поверхня задає залежність вихідної змінної $E_{зп}$, що відповідає лінгвістичній змінній $EnZp$, від ступеню зарядженості акумуляторної батареї U_{AB} , що визначається лінгвістичною змінною U_{ab} і додаткового розходу енергії I_D , якому відповідає лінгвістична змінна I_{dp} .



**Рис.7.12 Поверхня нечіткого виводу при обчисленні
запасу енергії в контурі рекуперації**

7.8 Ідентифікація стану контуру рекуперації енергії

Стан контуру рекуперації енергії визначається можливістю забезпечення необхідного прирощення моменту обертання гібридної установки без використання ДВЗ.

Для нечіткої ідентифікації стану контуру рекуперації енергії введемо наступні входні лінгвістичні змінні:

- M_{gnr} - «Момент опору генератора» з базовою термножиною $\mathfrak{Z}_{M_{gnr}} = \{ZP, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13, а.

- M_{eldv} - «Момент обертання електродвигуна»: $\mathfrak{Z}_{M_{eldv}} = \{ZP, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13, б.

- $EnZp$ - «Запас енергії в контурі рекуперації»: $\mathfrak{Z}_{EnZp} = \{ZP, PS, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13, в.

Можливі прирощення моменту обертання електродвигуна і моменту опору генератора при різних значеннях введених входних лінгвістичних змінних, а також умовні позначки різних станів контуру рекуперації енергії (значення лінгвістичної змінної $SKnRes$ - «Стан контуру рекуперації енергії») наведені в табл. 7.5. При цьому символи $\uparrow$, $\downarrow$ і b означають можливі прирощення моменту, символи $\uparrow\uparrow$ і $\downarrow\downarrow$ - необхідні прирощення, а символ $\uparrow_*$ - бажене прирощення.

На множені станів контуру рекуперації задамо підмножини, кожна з яких включає стани, що входять у вигляді диз'юнкції значень лінгвістичної змінної $SKnRes$ в правила нечітких продукцій визначення керуючих впливів на агрегати силової установки (див. табл. 7.6, 7.7, 7.8).

Задамо три вихідні лінгвістичні змінні модуля нечіткої ідентифікації стану контуру рекуперації енергії, базові термножини яких включають у якості своїх термів нечіткі змінні, що відповідають заданим нечітким підмножинам:

Можливі стани контуру рекуперації енергії

M_{gnr}		ZP			PM			PB		
$EnZp$		ZP	PS, PM	PB	ZP	PS, PM	PB	ZP	PS, PM	PB
$M_{el dv}$	ZP	$M_{генер}^{он} \uparrow$	$M_{генер}^{он} \uparrow$ $M_{эл.дв}^{об} \uparrow$	$M_{эл.дв}^{об} \uparrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$
		NG	NGPE	PE	NGPG	NGPG	PGC	PG	PG	PGC
	PM	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$ $M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$ $M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$
		NEC	NEPE	NEPE	NEC	NEPG	PGC	NEC	NEPG	PGC
	PB	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$ $M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$	$M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$ $M_{эл.дв}^{об} \downarrow$	$M_{генер}^{он} \downarrow$
		NEC	NE	NE	NEC	NEPG	PGC	NEC	NEPG	PGC

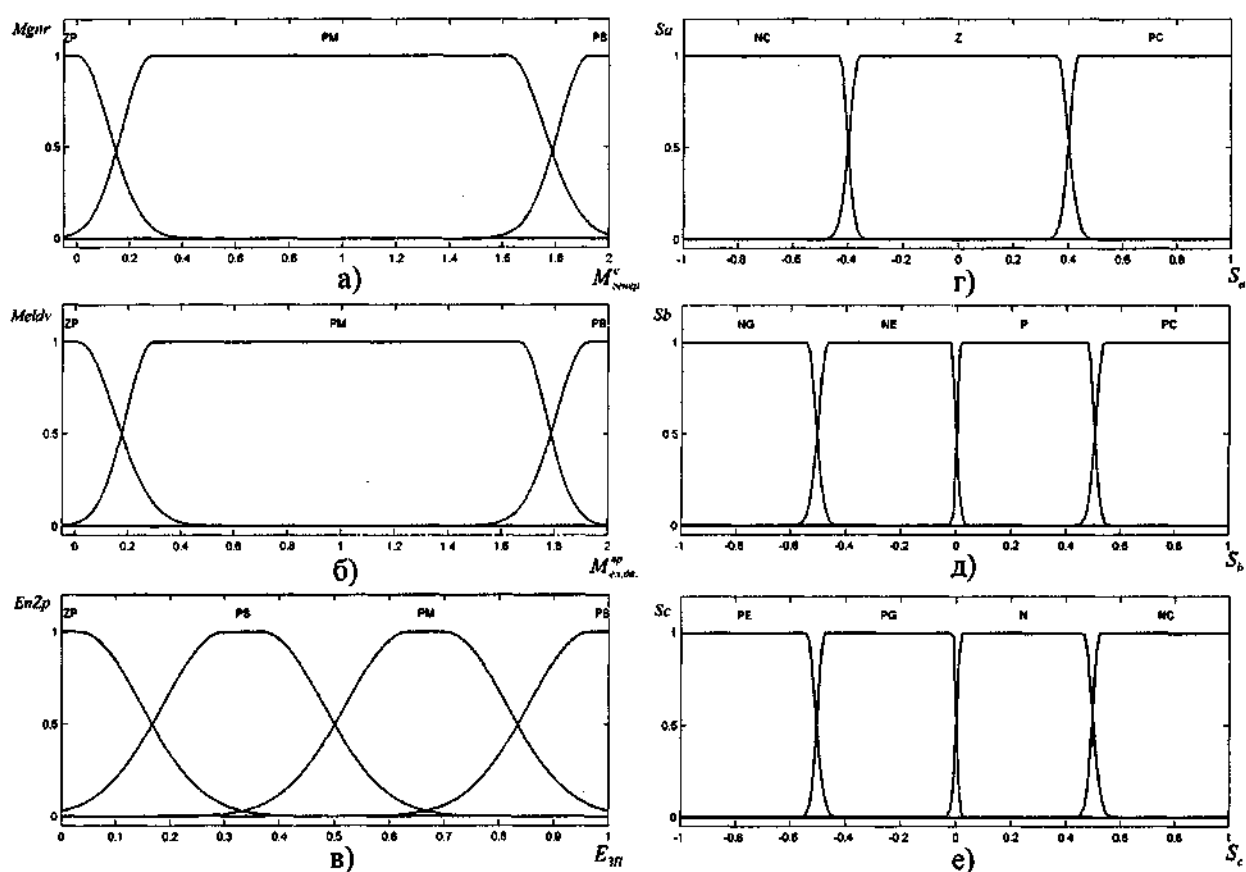


Рис.7.13. Функції приналежності для термів лінгвістичних змінних: «Момент опоры генератора» (а), «Момент вращения электродвигуна» (б), «Запас энергии в контуре рекуперації» (в), складові вектора стану контуру рекуперації енергії S_a (г), S_b (д), S_c (е)

- Sa - з базовою терм-множиною $\mathfrak{S}_{Sa} = \{NC, Z, PC\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13,г;
- Sb : $\mathfrak{S}_{Sb} = \{NG, NE, P, PC\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13,д;
- Sc : $\mathfrak{S}_c = \{PE, PG, N, NC\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.13,е.

Таблиця 7.6

Співвідношення термів вихідних лінгвістичних змінних

$SKnRec$	$M_{ев.дн}^{об}$	$M_{генер}^{оп}$	Sa	Sb			Sc			Sa, Sc	Sa, Sb
			Z	NG	NE	P	PE	PG	N	NC	PC
NEC	↓				*					*	
NE	↓		*		*				*		
NG		↑.	*	*					*		
NEPE	b		*		*		*				
NGPG		b	*	*				*			
NGPE	↑	↑	*	*			*				
NEPG	↓	↓	*		*			*			
PG		↓	*			*		*			
PE	↑		*			*	*				
PGC		↓						*			*

Роботу розглянутої системи нечіткого виводу описують наступні дванадцять правил нечітких продукцій:

1. Якщо $Meldv = \text{не}ZP$ і $EnZp = ZP$ то
 $SKnRec = NEC$ і $Sa = NC$ і $Sb = NE$ і $Sc = NC$;
2. Якщо $Mgnr = \text{не}ZP$ і $EnZp = PB$ то
 $SKnRec = PGC$ і $Sa = PC$ і $Sb = PC$ і $Sc = PG$;
3. Якщо $Mgnr = \text{не}ZP$ і $Meldv = \text{не}ZP$ і $EnZp = PS$ то
 $SKnRec = NEPG$ і $Sa = Z$ і $Sb = NE$ і $Sc = PG$;
4. Якщо $Mgnr = \text{не}ZP$ і $Meldv = \text{не}ZP$ і $EnZp = PM$ то
 $SKnRec = NEPG$ і $Sa = Z$ і $Sb = NE$ і $Sc = PG$;
5. Якщо $Mgnr = ZP$ і $Meldv = PM$ і $EnZp = \text{не}ZP$ то
 $SKnRec = NEPE$ і $Sa = Z$ і $Sb = NE$ і $Sc = PE$;

6. Якщо $M_{gnr}=ZP$ і $M_{eldv}=PB$ і $EnZp=heZP$ то $SKnRec=NE$ і $Sa=Z$ і $Sb=NE$ і $Sc=N$;
7. Якщо $M_{gnr}=PB$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=hePB$ то $SKnRec=PG$ і $Sa=Z$ і $Sb=P$ і $Sc=PG$;
8. Якщо $M_{gnr}=PM$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=hePB$ то $SKnRec=NGPG$ і $Sa=Z$ і $Sb=NG$ і $Sc=PG$;
9. Якщо $M_{gnr}=ZP$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=ZP$ то $SKnRec=NG$ і $Sa=Z$ і $Sb=NG$ і $Sc=N$;
10. Якщо $M_{gnr}=ZP$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=PB$ то $SKnRec=PE$ і $Sa=Z$ і $Sb=P$ і $Sc=PE$;
11. Якщо $M_{gnr}=ZP$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=PS$ то $SKnRec=NGPE$ і $Sa=Z$ і $Sb=NG$ і $Sc=PE$;
12. Якщо $M_{gnr}=ZP$ і $M_{eldv}=ZP$ і $EnZp=PM$ то $SKnRec=NGPE$ і $Sa=Z$ і $Sb=NG$ і $Sc=PE$.

Розглянута база правил нечітких продукцій визначає поверхні нечіткого виводу (рис.7.14), які відображають залежність вихідної змінної S_{KnR} , що характеризує стан контуру рекуперації енергії, від моменту обертання електродвигуна $M_{ел.дв}^{об}$, моменту опору генератора $M_{генер}^{оп}$ і запасу енергії в контурі рекуперації $E_{зп}$.

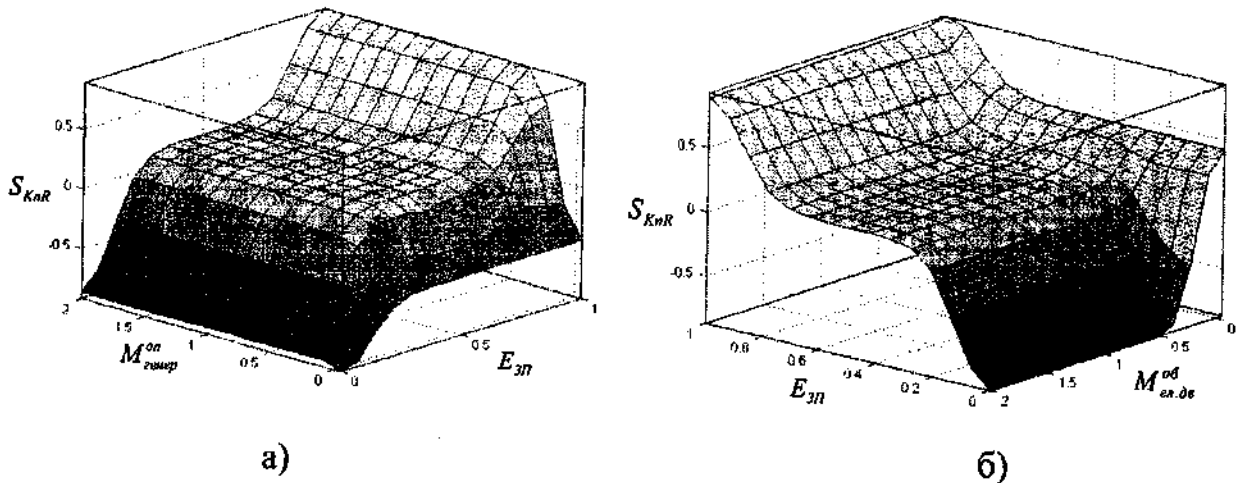


Рис.7.14. Поверхні нечіткого виводу ідентифікації стану контуру рекуперації енергії

$$S_{KnR} = f(M_{генер}^{оп}, E_{зп}), M_{ел.дв}^{об}=0,975 \quad (а);$$

$$S_{KnR} = f(M_{ел.дв}^{об}, E_{зп}), M_{генер}^{оп}=0,975 \quad (б)$$

Аналогічні поверхні нечіткого виводу можна побудувати для вихідних змінних S_a , S_b і S_c .

7.9 Визначення прирощень керуючих впливів на агрегати силової установки

Перерозподіл навантаження між агрегатами гібридної установки здійснюється на підставі значень необхідного прирощення моменту обертання силової установки dM_{tr} , бажаного прирощення моменту обертання ДВЗ dM_{dvsG} і стану контуру рекуперації енергії S_a , S_b , S_c . При цьому, для збільшення додаткового моменту (моменту, що створюється електродвигуном або генератором) спочатку варто зменшити момент опору генератора, а тільки потім збільшити момент обертання електродвигуна. Для зменшення додаткового моменту починають зменшувати момент обертання електродвигуна, а потім збільшують момент опору генератора.

Вхідні лінгвістичні змінні модуля обчислення керуючих впливів є аналогами відповідних вихідних змінних відповідних модулів. Функції належності термів цих лінгвістичних змінних наведені на рис. 7.15, а-д.

Вихідні лінгвістичні змінні задані наступним чином:

- dM_{eldvZd} - «Задане прирощення моменту обертання електродвигуна» - з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dM_{eldvZd}} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.15, е;

- dM_{dvsZd} - «Задане прирощення моменту обертання ДВЗ» - з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dM_{dvsZd}} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.15, ж;

- dM_{gnrZd} - «Задане прирощення моменту опору генератора» - з базовою терм-множиною $\mathfrak{Z}_{dM_{gnrZd}} = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$, з функціями приналежності наведеними на рис. 7.15, з.

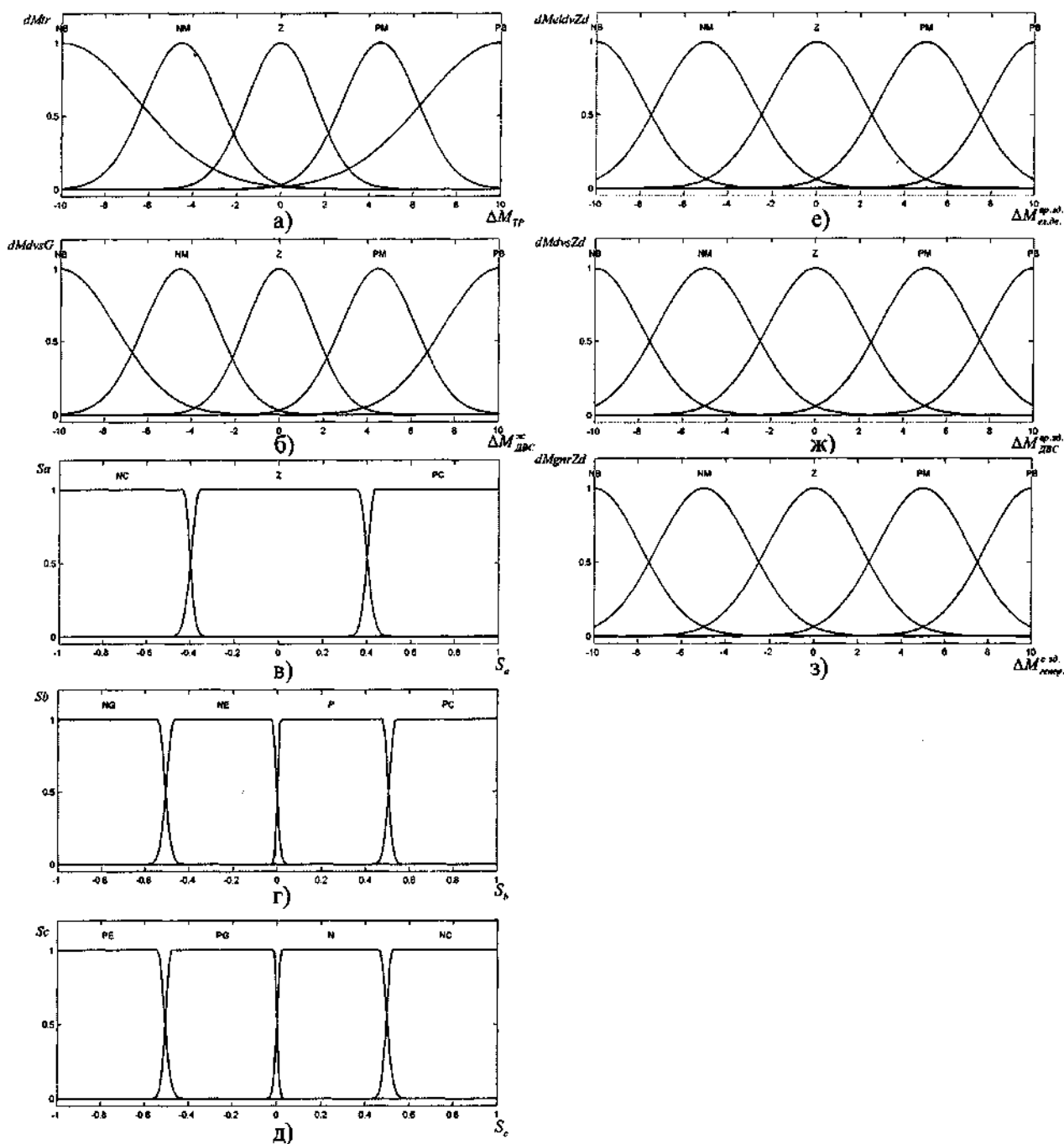


Рис.7.15 Функції належності для термів вхідних лінгвістичних змінних $dMtr$ (а), $dMdvG$ (б), складових вектору стану контуру рекуперації енергії Sa (в), Sb (г), Sc (д), вихідних лінгвістичних змінних $dMeldvZd$ (е), $dMdvZd$ (ж), $dMgvrZd$ (з)

База правил нечітких продукцій, що описують роботу модуля обчислення керуючих впливів, складається із 95 правил, які зведені в таблицю 7.7.

Таблиця 7.7

**База правил нечітких продукцій
модуля обчислення керуючих впливів**

№ п/п	Вхідні лінгвістичні змінні					Вихідні лінгвістичні змінні			Примітка
	<i>dMtr</i>	<i>dMdvSg</i>	<i>Sa</i>	<i>Sb</i>	<i>Sc</i>	<i>dMeldvZd</i>	<i>dMdvSzd</i>	<i>dMgnrZd</i>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	NB	NB	NC			NM	NM	Z	
2	NB	NB	PC			Z	NB	NM	<i>dMtr</i> не заб.
3	NB	NB	Z			Z	NB	Z	
4	NB	NM		NE		NM	NM	Z	
5	NB	NM	PC			Z	NB	NM	<i>dMtr</i> не заб.
6	NB	NM		NG		Z	NM	PM	
7	NB	NM		P		Z	NB	Z	
8	NB	Z		NE		NB	Z	Z	
9	NB	Z		NG		Z	Z	PB	
10	NB	Z	PC			Z	NB	NM	<i>dMtr</i> не заб.
11	NB	Z		P		Z	NB	Z	
12	NB	PM		NE		NB	Z	Z	
13	NB	PM		NG		Z	Z	PB	
14	NB	PM	PC			Z	NB	NM	<i>dMtr</i> не заб.
15	NB	PM		P		Z	NB	Z	
16	NB	PB		NE		NB	Z	Z	
17	NB	PB		NG		Z	Z	PB	
18	NB	PB	PC			Z	NB	NM	<i>dMtr</i> не заб.
19	NB	PB		P		Z	NB	Z	
20	NM	NB			PE	PM	NB	Z	
21	NM	NB			PG	Z	NB	NM	
22	NM	NB	NC			NM	Z	Z	
23	NM	NB			N	Z	NM	Z	
24	NM	NM	Z			Z	NM	Z	
25	NM	NM	NC			NM	Z	Z	
26	NM	NM	PC			Z	NB	NM	
27	NM	Z		NE		NM	Z	Z	
28	NM	Z		NG		Z	Z	PM	
29	NM	Z	PC			Z	NB	NM	
30	NM	Z		P		Z	NM	Z	
31	NM	PM		NE		NB	PM	Z	
32	NM	PM		NG		Z	PM	PB	
33	NM	PM	PC			Z	NB	NM	
34	NM	PM		P		Z	NM	Z	
35	NM	PB		NE		NM	Z	Z	
36	NM	PB		NG		Z	Z	PM	
37	NM	PB	PC			Z	NB	NM	
38	NM	PB		P		Z	NM	Z	
39	Z	NB	NC			NM	PM	Z	
40	Z	NB			PG	Z	NB	NB	
41	Z	NB			PE	PB	NB	Z	
42	Z	NB			N	Z	Z	Z	
43	Z	NM			PG	Z	NM	NM	
44	Z	NM			PE	PM	NM	Z	
45	Z	NM	NC			NM	PM	Z	
46	Z	NM			N	Z	Z	Z	

Продовження табл. 7.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
47	Z	Z	Z			Z	Z	Z	
48	Z	Z	NC			NM	PM	Z	
49	Z	Z	PC			Z	NM	NM	
50	Z	PM		NE		NM	PM	Z	
51	Z	PM		NG		Z	PM	PM	
52	Z	PM	PC			Z	NM	NM	
53	Z	PM		P		Z	Z	Z	
54	Z	PB		NE		NB	PB	Z	
55	Z	PB		NG		Z	PB	PB	
56	Z	PB	PC			Z	NM	NM	
57	Z	PB		P		Z	Z	Z	
58	PM	NB			PE	PM	Z	Z	
59	PM	NB			PG	Z	Z	NM	
60	PM	NB	NC			NM	PB	Z	
61	PM	NB			N	Z	PM	Z	
62	PM	NM			PE	PB	NM	Z	
63	PM	NM			PG	Z	NM	NB	
64	PM	NM	NC			NM	PB	Z	
65	PM	NM			N	Z	PM	Z	
66	PM	Z			PE	PM	Z	Z	
67	PM	Z			PG	Z	Z	NM	
68	PM	Z	NC			NM	PB	Z	
69	PM	Z			N	Z	PM	Z	
70	PM	PM	Z			Z	PM	Z	
71	PM	PM	NC			NM	PB	Z	
72	PM	PM	PC			Z	Z	NM	
73	PM	PB		NE		NM	PB	Z	
74	PM	PB		NG		Z	PB	NM	
75	PM	PB	PC			Z	Z	NM	
76	PM	PB		P		Z	PM	Z	
77	PB	NB			PG	Z	Z	NB	
78	PB	NB			PE	PB	Z	Z	
79	PB	NB	NC			NM	PB	Z	dMtr не заб.
80	PB	NB			N	Z	PB	Z	
81	PB	NM			PG	Z	Z	NB	
82	PB	NM			PE	PB	Z	Z	
83	PB	NM	NC			NM	PB	Z	dMtr не заб.
84	PB	NM			N	Z	PB	Z	
85	PB	Z			PG	Z	Z	NB	
86	PB	Z			PE	PB	Z	Z	
87	PB	Z	NC			NM	PB	Z	dMtr не заб.
88	PB	Z			N	Z	PB	Z	
89	PB	PM			PG	Z	PM	NM	
90	PB	PM			PE	PM	PM	Z	
91	PB	PM	NC			NM	PB	Z	dMtr не заб.
92	PB	PM			N	Z	PB	Z	
93	PB	PB	Z			Z	PB	Z	
94	PB	PB	NC			NM	PB	Z	dMtr не заб.
95	PB	PB	PC			Z	PM	NM	

Таблиця 7.8 відображає компактну запись представленої бази правил, де для кожної комбінації значень вхідних змінних дається посилання на відповідне правило.

Таблиця 7.8

**Компактна запись бази правил нечітких продукцій
модуля обчислення керуючих впливів**

<i>dMtr</i>					<i>SKnRec</i>	<i>dMdvG</i>
NB	NM	Z	PM	PB		
1	2	3	4	5	6	7
1	22	39	60	79	NEC	NB
3	23	42	61	80	NE	
					NG	
	20	41	58	78	NEPE	
	21	40	59	77	NGPG	
	20	41	58	78	NGPE	
	21	40	59	77	NEPG	
					PG	
	20	41	58	78	PE	
2	21	40	59	77	PGC	NM
4	25	45	64	83	NEC	
6	24	46	65	84	NE	
					NG	
4					NEPE	
6					NGPG	
					NGPE	
4					NEPG	
					PG	
7					PE	
5	26	43	63	81	PGC	
8	27	48	68	87	NEC	Z
9	28	47	69	88	NE	
8	27		66	86	NG	
					NEPE	
9	28		67	85	NGPG	
			66	86	NGPE	
8	27		67	85	NEPG	
					PG	
11	30		66	86	PE	
10	29	49	67	85	PGC	
12	31	50	71	91	NEC	PM
			70	92	NE	
13	32	51			NG	
12	31	50		90	NEPE	
				89	NGPG	
13	32	51		90	NGPE	
					NEPG	
12	31	50		89	PG	
15	34	53		90	PE	
14	33	52	72	89	PGC	

Продовження табл. 7.8

1	2	3	4	5	6	7
16	35	54	73	94	NEC	PB
17	36	55	74	93	NE	
16	35	54	73		NG	
17	36	55	74		NEPE	
16	35	54	73		NGPG	
19	38	57	76		NGPE	
18	37	56	75		NEPG	
					PG	
					PE	
				95	PGC	

Треба відзначити, що в деяких випадках стан ДВЗ і контуру рекуперації енергії не дозволяє забезпечити потрібного прирощення моменту обертання силової установки. В цьому випадку не виконується рівність

$$dMtr = dMdvZd + dMeldvZd - dMgnrZd.$$

Відповідні правила нечітких продукцій помічені в графі «Примітка» табл. 7.7, а також штриховкою в табл. 7.8.

В силу незначної кількості таких правил і їх локалізації тільки в області $dMtr = PB \vee NB$, дане явище не буде мати значного впливу на процес керування. Може спостерігатись тільки деяке зниження швидкості реакції на великі керуючі впливи.

На рис.7.16 наведені поверхні нечіткого виводу для вихідних змінних $\Delta M_{ДВЗ}^{об.зд}$, $\Delta M_{ел.дв}^{об.зд}$ і $\Delta M_{генер}^{оп.зд}$, які відповідають лінгвістичним змінним $dMdvZd$, $dMeldvZd$ і $dMgnrZd$, що відображають їх залежність від змінних ΔM_{TP} и $\Delta M_{ДВЗ}^6$, які відповідають лінгвістичним змінним $dMtr$ и $dMdvG$. Ці поверхні одержані для стану контуру рекуперації, що відповідає значенню лінгвістичної змінної $SKnRec=NEPG$ ($Sa=Z$, $Sb=NE$, $Sc=PG$; $S_a=0$, $S_b=-0.2$, $S_c=-0.2$).

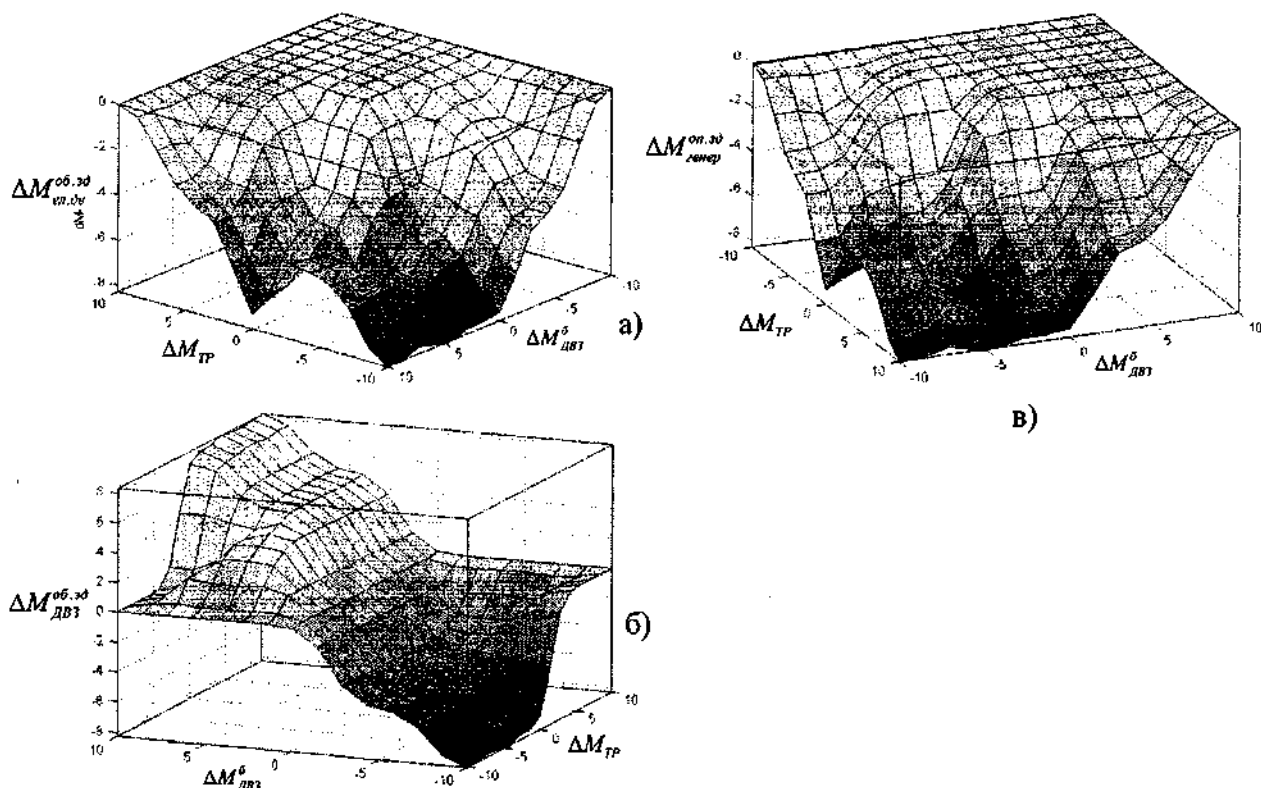


Рис.7.16 Поверхні нечіткого виводу при обчисленні керуючих впливів на агрегати силової установки $\Delta M_{ел.дв}^{об.зд} = f(\Delta M_{ТР}, \Delta M_{ДВЗ}^б)$ (а), $\Delta M_{ДВЗ}^{об.зд} = f(\Delta M_{ТР}, \Delta M_{ДВЗ}^б)$ (б), $\Delta M_{генер}^{оп.зд} = f(\Delta M_{ТР}, \Delta M_{ДВЗ}^б)$ (в), при $S_a=0$, $S_b=-0.2$, $S_c=-0.2$

7.10 Моделювання нечіткої системи керування

Об'єднавши згідно рис.7.5 нечіткі моделі, окремих компонентів одержимо нечітку модель системи керування в цілому. Така модель системи розроблена з використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox програми MATLAB. Для нечіткого виводу використані алгоритми Mamdani й Sugeno. Simulink - модель даної системи керування наведена на рис. 7.17.

В зображеній моделі модуль обчислення потрібного прирощення моменту обертання $\Delta M_{ТР}$ замінений ПІД (пропорційно –інтегрально –дери́ваційним) регулятором, який оптимізовано за допомогою пакета Nonlinear Control Design Blockset системи MATLAB. В подальшому характеристики регулятора були

апроксимовані гібридною нейронною мережею ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) для забезпечення адаптивних можливостей САК.

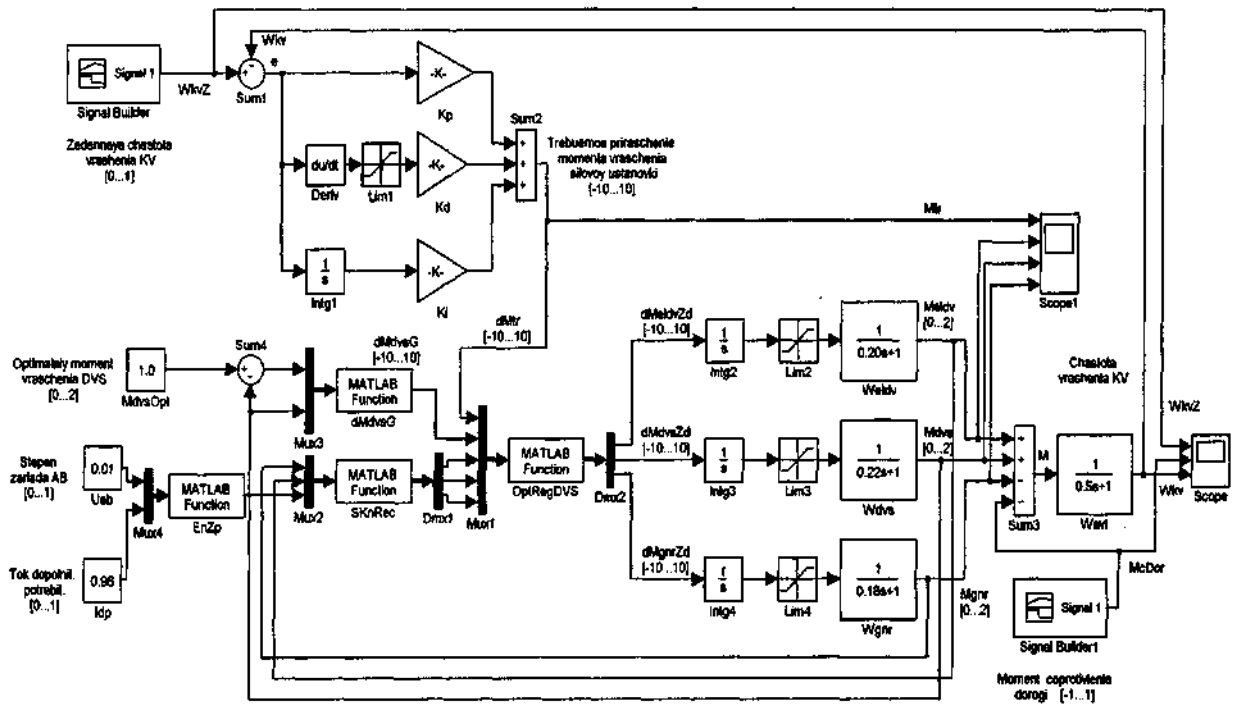


Рис.7.17. Simulink - модель системи керування

Для опису об'єкта керування в складі електродвигуна, двигуна внутрішнього згоряння, генератора й автомобіля використані аперіодичні ланки першого порядку з відповідними постійними часу.

Для дослідження моделі використовувались керуючий ω_3 і збурюючий $M_{дор}^{on}$ впливи східчастого виду. На рис.7.18 наведено результат моделювання при середньому запасу енергії в контурі рекуперації, коли $U_{AB} = 0,5$ і $I_D = 0,1$. Силова установка в цьому випадку після закінчення перехідного процесу відпрацьовує керуючі впливи, утримуючі значення моменту $M_{ДВЗ}^{об}$ близьким до оптимального ($M_{ДВЗ}^{opt} = 1$).

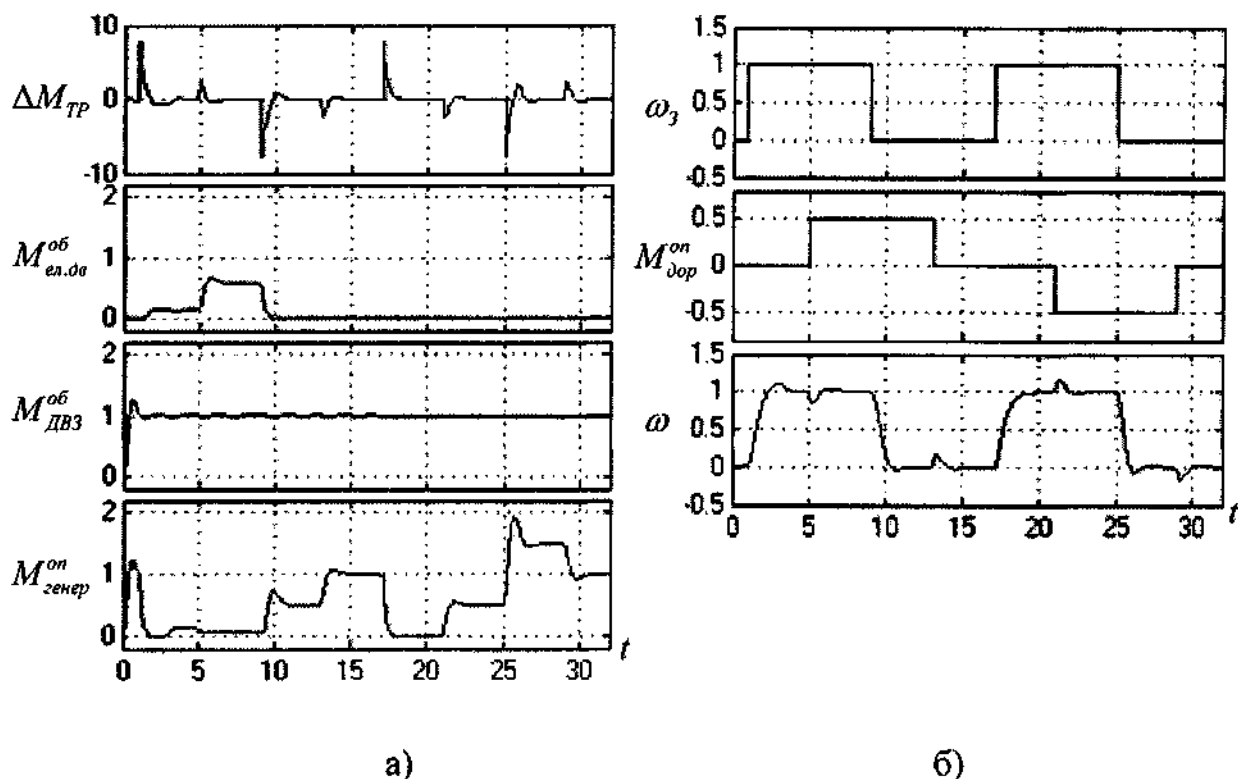


Рис.7.18. Результат моделювання роботи САК для випадку східчастих керуючого і збурюючого впливів при середньому запасі енергії в контурі рекуперації ($U_{AB} = 0,5$, $I_D = 0,1$)

Рис. 7.19,а ілюструє реакцію установки при надлишковому запасі енергії в контурі рекуперації ($U_{AB} = 0,98$; $I_D = 0,01$). Слід зазначити, що на окремих ділянках керуючий вплив не відпрацьовується цілком без домішки механічного гальмування (неможливість гальмувати генератором).

На рис.7.19,б представлена реакція гібридної силової установки на керуючі і збурюючі впливи при недостатньому запасі енергії в контурі рекуперації ($U_{AB} = 0,01$; $I_D = 0,98$). У цьому випадку на окремих режимах неможливо задіяти електродвигун для збільшення моменту обертання. Отже не вдається підтримувати оптимальне значення моменту обертання ДВЗ.

Незважаючи на прийняті припущення, результати моделювання дозволяють зробити висновки про можливість використання нечіткого керування для вирішення поставлених завдань.

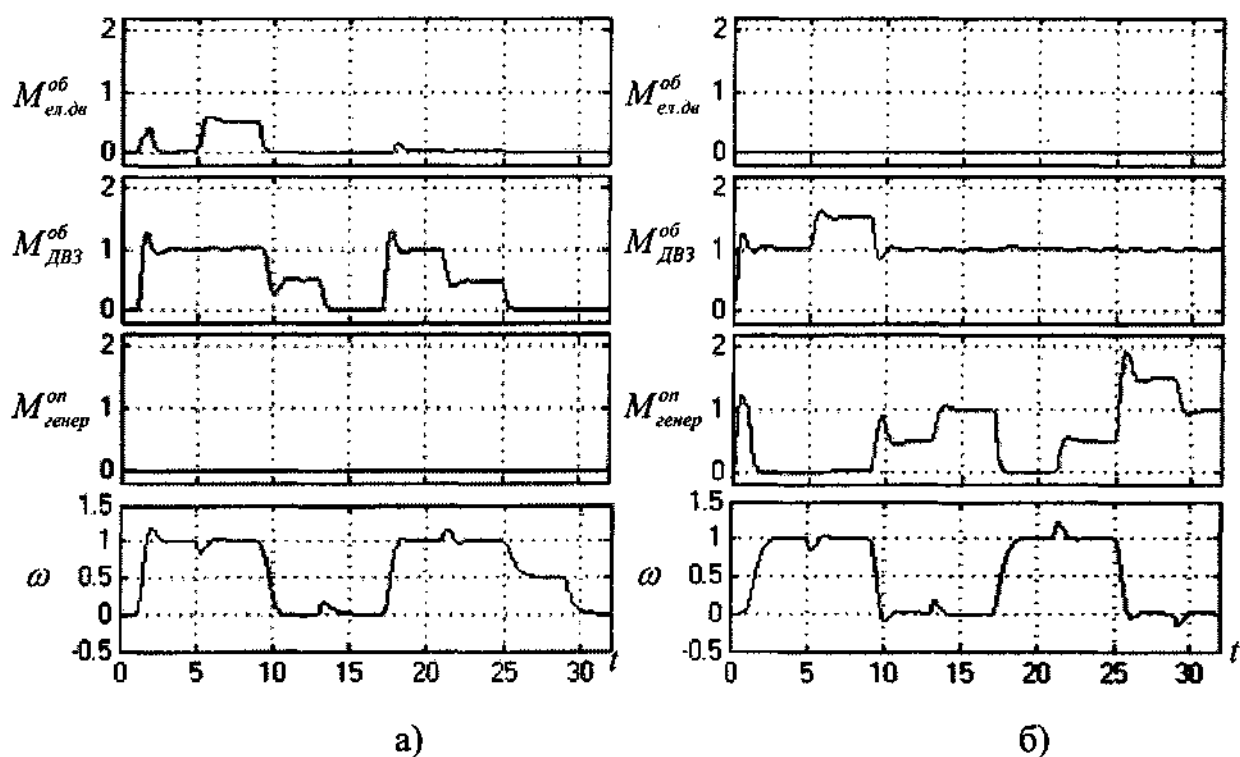


Рис.7.19. Результат моделювання роботи САК при надлишковому ($U_{AB} = 0,98$; $I_D = 0,01$) (а) і недостатньому ($U_{AB} = 0,01$; $I_D = 0,98$) (б) запасі енергії в контурі рекуперації

Перевагою даного методу є можливість формалізувати та використовувати досвід фахівців різного профілю при підготовці бази правил нечітких продукцій.

8 ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ

Одним з можливих принципів побудови гібридної силової установки є використання пневматичного двигуна у якості допоміжного. Така технічна реалізація трансмісії гібридного автомобіля має деякі переваги, хоч вона і не набула великого поширення в світовому автомобілебудуванні.

Між цим ідея використання стиснутого повітря у якості енергоносія дуже стара. Один з таких патентів було видано у Великобританії ще в 1799 році. Пізніше такі машини набули деякого поширення в Європі і США у якості внутрішньозаводського технологічного транспорту і навіть як грузовики для внутрішньо міських перевезень. В 2000-му році на виставці Auto Africa Expo2000, яка відбулась в Йоганнесбурзі, був представлений автомобіль під назвою e.Volution. Французька фірма MDI (Motor Development International) теж заявила про намір розпочати серійний випуск автомобіля з пневмодвигуном конструкції французького інженера-моторобудівника Ги Негре (Guy Negre). Австралійська компанія Engineair під керівництвом Анджело Ді Пьетро (Angelo Di Pietro) побудувала пневмоавтомобіль, який надійшов у комерційну експлуатацію в Мельбурні.

Однак переважна більшість незалежних експертів налаштована скептично щодо перспектив автомобілів з пневмодвигуном. Це обумовлено дуже низькою енергоємністю стиснутого повітря, особливо у порівнянні з бензином. Крім того ряд великих автомобілебудівних концернів, наприклад «Фольксваген», вели дослідження в цьому напрямку, але згорнули їх зважаючи на повну безперспективність.

Однією з переваг використання пневматичного двигуна у якості допоміжного двигуна гібридної силової установки є простота вирішення питання утилізації теплової енергії відпрацьованих газів ДВЗ. Аналіз властивостей пневматичних двигунів, проведений в ХНАДУ на кафедрі ДВЗ, дозволяє зробити висновок, що економічно доцільним може бути використання пневмодвигуна замість ДВЗ на тих режимах роботи гібридної силової установки, де

останній працює з низькою економічністю. Паралельна робота на ведучі колеса ДВЗ і пневмодвигуна не може бути економічно вигідною.

8.1 Модель об'єкту управління

Динамічні властивості автомобіля з пневматичною трансмісією з достатньою для практичних цілей точністю можуть бути відображені у вигляді

$$\begin{cases} J_{pr}(u_i, s_c) \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{pnv}(\omega, p) - M_{dor_pr}(V_A, \alpha, u_i, s_c) \\ V_A = f_A(\omega, u_i, s_c) \end{cases}$$

де ω – частота обертання колінчастого валу пневмодвигуна, rad/c ;

u_i – передаточне відношення механічної трансмісії $u_i = u_g \cdot u_n$;

u_g – передаточне відношення головної передачі;

u_n – обране передаточне відношення коробки передач;

p – тиск у вхідній магістралі пневмодвигуна (на виході модулятора тиску), H/m^2 , (Па);

V_A – швидкість автомобіля, m/c ;

α – ухил дороги, rad ;

s_c – стан зчеплення, що може змінюватись у діапазоні $[0K1]$ в залежності від тиску на педаль зчеплення;

J_{pr} – сумарний момент інерції, приведений до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна, $kg \cdot m^2$;

M_{pnv} – момент обертання пневмодвигуна, $H \cdot m$;

M_{dor_pr} – сумарний момент опору, приведений до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна, $H \cdot m$;

$f_A(\bullet)$ – функція, що відображає залежність швидкості автомобіля від своїх аргументів.

Водій, натискаючи на педаль газу, обирає необхідну частоту обертання колінчастого валу пневмодвигуна. Здачами системи управління є:

1. Забезпечення зміни кутової швидкості колінчастого валу згідно керуючим впливам збоку водія;

2. Забезпечення параметрів перехідних процесів, під час зміни кутової швидкості, не гірших від допустимих значень. Розглядаються такі параметри, як тривалість перехідних процесів, перерегулювання, ступінь коливань;

3. Забезпечення похибки регулювання в усталеному режимі не гіршої максимально – допустимого значення;

4. Забезпечення стабілізації заданої кутової швидкості колінчастого валу під час дії збурюючі впливів.

Таким чином задачею синтезу системи керування пневматичною та механічною трансмісіями є синтез робастного регулятора, що забезпечить керуючі впливи (p) на пневмодвигун, зважаючи на поточний стан трансмісії (u_i) та силової установки автомобілю (ω) і керуючі впливи з боку водія (β), з урахуванням задач системи керування, перелічених раніше:

$$\begin{cases} p = \operatorname{Re} g(\omega, \omega_s, u_i) \\ \omega_s = f_{pd}(\beta) \end{cases},$$

де ω_s - частота обертання колінчастого валу пневмодвигуна, що задана, rad/c ;

β - керуючий вплив з боку водія (кутове положення педалі газу), град. кут .

Структурну схему системи керування наведено на рис.8.1.

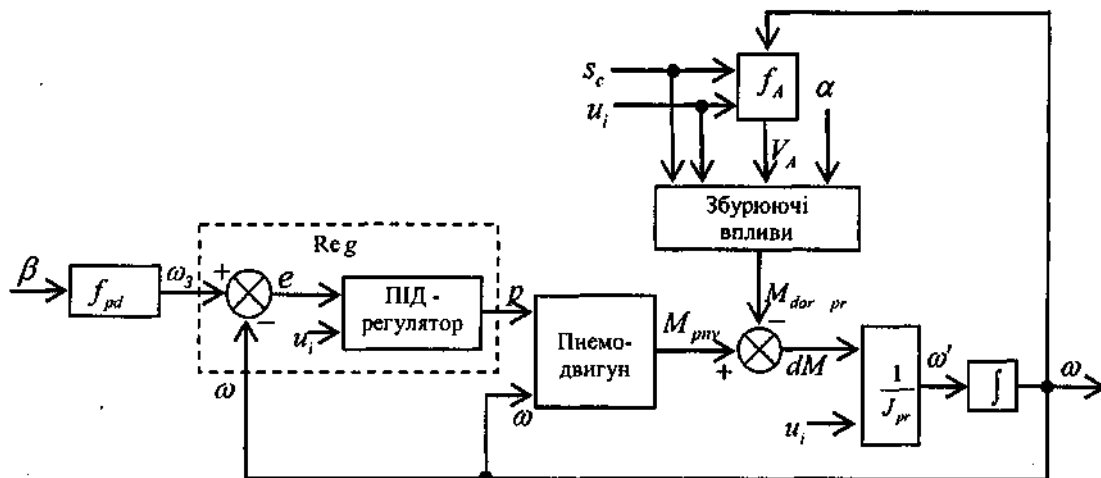


Рис.8.1. Структурна схема системи керування

8.2 Регулятор частоти обертання колінчастого валу

Зважаючи на особливості об'єкта керування та сучасний розвиток електроніки найбільш доцільним є реалізація регулятора системи керування у цифровому вигляді у той час, як усі керуючі та збуджуючі впливи за своєю природою є безперервними функціями часу.

Можливі два підходи до синтезу цифрового регулятора:

1. Розробка математичних моделей об'єкта управління, керуючих та збуджуючих впливів у дискретному вигляді. На підставі одержаних дискретних моделей синтез дискретного регулятора, який у подальшому може бути реалізований засобами цифрової електроніки, або у вигляді програми для мікро контролеру;

2. Синтез безперервного регулятора з використанням математичної моделі об'єкта керування у вигляді диференціальних рівнянь. На другому етапі безперервний регулятор перетворюється до дискретного вигляду.

У подальшому будемо використовувати останній підхід.

Найбільш поширеною структурою регулятора, який використовується для управління процесами і системами рухомих об'єктів є трьох канальний ПІД – регулятор, який виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної, інтегральної та диференційної складових частин від похибки регулювання ($e(t) = \omega_s(t) - \omega(t)$):

$$p(t) = p_0 + K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right],$$

де p_0 - зміщення, що задає середній рівень вихідного сигналу регулятора;

K_p - коефіцієнт посилення регулятора (коефіцієнт посилення пропорційної складової);

T_i - постійна часу інтегрування;

T_d - постійна часу диференціювання.

За умовами правильної настройки такої регулятор забезпечує достатньо гарну якість регулювання та грубість до похибок моделей об'єкта керування та зовнішніх впливів.

Часто ПІД – регулятор представляють в іншому вигляді:

$$p(t) = p_0 + K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt},$$

де $K_i = \frac{1}{T_i}$ - коефіцієнт посилення інтегрального каналу;

$K_d = \frac{1}{T_d}$ - коефіцієнт посилення диференційного каналу.

Передавальну функцію ПІД – регулятора можна представити у вигляді

$$W_{PID}(s) = \frac{K_i + K_p \cdot s + K_d \cdot s^2}{s}.$$

Звідси видно, що включення послідовного ПІД-регулятора вносить в контурну передавальну функцію два нулі та один полюс, що знаходиться на початку координат та збільшує ступінь астатизму контуру на одиницю.

Для цифрової реалізації ПІД – регулятора його рівняння можна записати в кінцевих різницях шляхом заміни $t = k \cdot T_k$, де T_k - період квантування; $k = 1, 2, 3, K$ - номер періоду квантування:

$$p(k \cdot T_k) = p_0 + K_p \cdot \left[e(k \cdot T_k) + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^k T_k \cdot e(i \cdot T_k) + T_d \cdot \frac{e(k \cdot T_k) - e((k-1) \cdot T_k)}{T_k} \right] =$$

$$p(k) = p_0 + K_p \cdot \left[e(k) + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^k T_k \cdot e(i) + T_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T_k} \right].$$

За умовами вибору частоти квантування $f_k = \frac{1}{T_k}$ в шість – десять разів вищої за верхню частоту смуги пропускання об'єкта

керування дискретний закон управління забезпечує майже ту ж саму якість процесів управління, що і безперервний закон.

На практиці зручніше замість абсолютних значень керуючих впливів $p(k)$ обчислювати їх прирощення на кожному такті квантування. Одержимо швидкісний алгоритм управління:

$$\begin{aligned}\Delta p(k) &= p(k) - p(k-1) = \\ &= K_p \cdot \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_k}{T_i} \cdot e(k) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_d}{T_k} \cdot [e(k) - e(k-1) - (e(k-1) - e(k-2))]] \right].\end{aligned}$$

Таким чином, одержимо

$$p(k) = p(k-1) + K_p \cdot [a_0 \cdot e(k) + a_1 \cdot e(k-1) + a_2 \cdot e(k-2)],$$

де

$$a_0 = 1 + \frac{T_k}{T_i} + \frac{T_d}{T_k};$$

$$a_1 = -1 - 2 \cdot \frac{T_d}{T_k};$$

$$a_2 = \frac{T_d}{T_k}.$$

Останнє рівняння дає можливість реалізувати в цифровій формі ПД – регулятор за умовою оптимізації його аналогової форми.

У випадку реалізації регулятора у цифровому вигляді необхідно передбачити встановлення на його виході екстраполятора, який забезпечить перетворення імпульсного сигналу $p(k \cdot T_k)$ в безперервний керуючий вплив $p(t)$.

Передавальна функція екстраполятора нульового порядку має вигляд

$$W_{EXT}(s) = \frac{1}{s} \cdot (1 - e^{-T_k \cdot s}).$$

На період, рівний такту квантування T_k цей екстраполятор фіксує миттєве значення вхідного дискретного сигналу та формує на своєму виході ступінчастий сигнал. Функції екстраполятору нульового порядку може виконувати цифро аналоговий перетворювач (ЦАП).

Одна з головних проблем, що виникають під час синтезу ПІД - регуляторів, пов'язана з реалізацією диференційного каналу. Посилення цього каналу лінійно збільшується разом з збільшенням частоти сигналу похибки. Це приводить до значного посилення високочастотних складових сигналу похибки, які носять в основному шумовий характер. Це приводить до зменшення співвідношення сигнал/шум на виході регулятора, що надає дестабілізуючий вплив на об'єкт керування.

Другім наслідком збільшення коефіцієнту посилення диференційного каналу є виникнення імпульсів великої амплітуди на виході регулятора в моменти стрибкоподібної зміни сигналу похибки. За деяких умов це може призвести до виходу з ладу об'єкта керування або виконавчих пристроїв.

Для запобігання негативним наслідкам розглянутих ефектів будемо використовувати фільтр низьких частот з передавальною функцією

$$W_F(s) = \frac{1}{T_F \cdot s + 1}$$

для зменшення високочастотних шумів. Постійну часу фільтру оберемо з умови $T_F = T_d$, щоб не компенсувати вплив на об'єкт керування диференційного каналу.

За умовою установки фільтру в диференційний канал одержимо передавальну функцію регулятора у вигляді

$$W_{PID}(s) = \frac{K_i}{s} + K_p + \frac{K_d \cdot s}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)} =$$

$$= \frac{K_i + (K_p + K_i \cdot T_F) \cdot s + (K_d + K_p \cdot T_F) \cdot s^2}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)}$$

Ми бачимо зміну ефективних значень коефіцієнтів посилення пропорційного та диференційного каналів:

$$K'_p = K_p + K_i \cdot T_F;$$

$$K'_d = K_d + K_p \cdot T_F,$$

що дещо утруднює розрахунки.

Запобігти такій зміні ефективних значень коефіцієнтів можна шляхом встановлення фільтру послідовно з ПІД – регулятором. В цьому випадку маємо:

$$W_{PID}(s) = \frac{K_i + K_p \cdot s + K_d \cdot s^2}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)}.$$

Диференційне рівняння фільтру низьких частот

$$T_F \cdot \frac{d p_F(t)}{dt} + p_F(t) = p(t),$$

де $p_F(t)$ - керуючий сигнал пневмотрансмісії на виході фільтру, може бути приведений до дискретної форми

$$T_F \cdot \frac{p_F(k \cdot T_k) - p_F((k-1) \cdot T_k)}{T_k} + p_F(k \cdot T_k) = p(k \cdot T_k),$$

звідки маємо:

$$p_F(k) = a_{F0} \cdot p(k) + a_{F1} \cdot p_F((k-1)),$$

де

$$a_{F0} = \frac{T_k}{T_F + T_k};$$

$$a_{F1} = \frac{T_F}{T_F + T_k}.$$

Структурна схема ПД - регулятору в безперервній формі з послідовним фільтром низьких частот наведена на рис. 8.2.

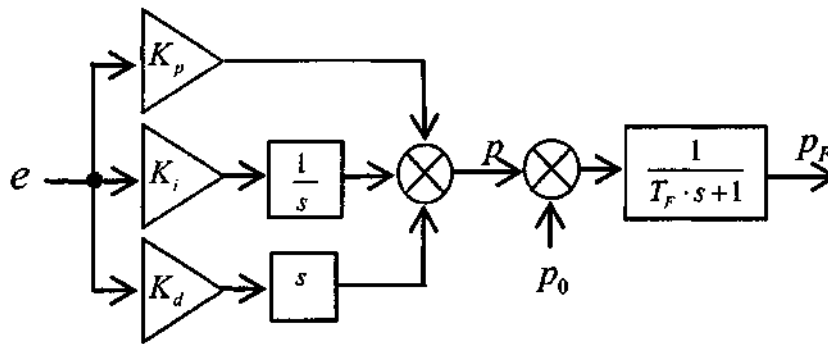


Рис. 8.2. Структурна схема ПД - регулятору в безперервній формі

Структурна схема ПД - регулятору в дискретній формі наведена на рис. 8.3.

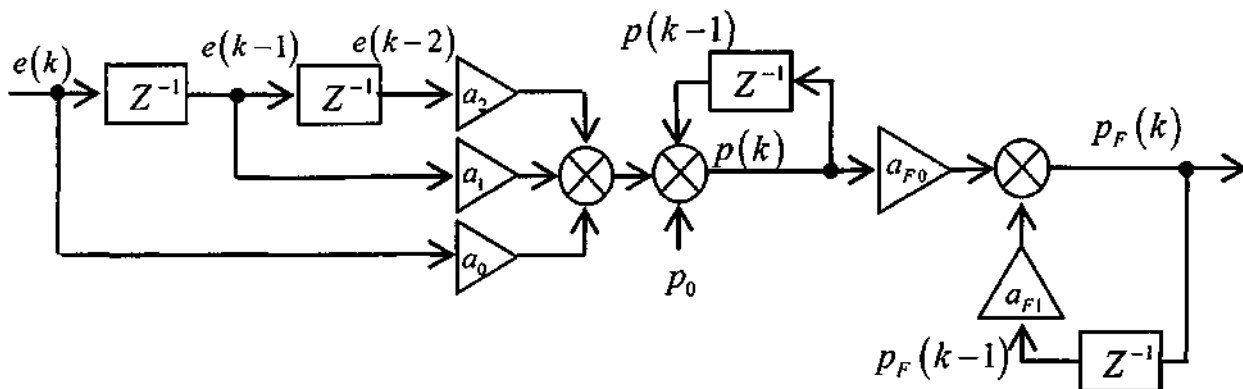


Рис. 8.3. Структурна схема ПД - регулятору в дискретній формі

Для оптимізації параметрів ПД - регулятору необхідно провести структурну та параметричну ідентифікацію об'єкту керування.

8.3 Модель пневмодвигуна

Зовнішня та часткові швидкісні характеристики пневмодвигуна були одержані в ХНАДУ на кафедрі автомобілів у результаті аналітичних досліджень його конструктивних особливостей та фізичних процесів, що протікають. Результати цього аналізу зведені у табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Залежність моменту обертання пневмодвигуна ($H \cdot m$) від частоти обертання колінчастого валу та тиску у вхідній магістралі

		Частота обертання колінчастого валу, об/хв..							
		50	100	150	200	300	400	500	600
Тиск, кПа	500	42.56	41.68	40.92	40.28	39.048	40.04	40.56	40.8
	1000	105	103.56	102.28	101.08	98.8	101.44	102.84	103.6
	1500	167.08	165.16	163.36	161.64	158.36	162.72	165.12	166.4

Залежність $M_{pny}(\omega, p)$ в аналітичній формі була отримана шляхом поліноміальної апроксимації табличних даних.

Сумарний момент інерції ($J_{pr}(u_i, s_c)$), приведений до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна, характеризує здібність транспортного засобу та його силової установки акумулювати в собі механічну енергію. Можна вважати, що він складається з двох частин: приведенного моменту інерції мас двигуна (J_D) та приведенного моменту інерції мас споживача (J_P)

$$J_{pr} = J_D + J_P.$$

В свою чергу приведений момент інерції мас двигуна (в $кг \cdot м^2$)

$$J_D = J_D' + J_M,$$

де
$$J_D' = k_D \cdot (i_D \cdot (m_h + m_\omega) \cdot R^2 + J_{KB});$$

$k_D = 1,1 \text{K} 1,2$ - коефіцієнт, що враховує моменти інерції розподільчого валу, клапанів та т.ін.;

J_{KB} - момент інерції колінчастого валу та мас, що обертаються разом з ним, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

R - радіус кривошипа, м ;

m_h - приведена маса деталей, що виконують зворотно-поступальний рух, кг ;

m_ω - приведена маса частки шатуна, що віднесена до шатунної шейки валу, кг ;

i_D - число циліндрів;

J_M - приведений момент інерції маховика, який визначимо з умови:

$$J_D = (1,1 \text{K} 1,4) \cdot J_M.$$

Приведений момент інерції мас споживача, для випадку, коли в якості споживача виступає транспортний засіб, може бути обчислений з умови рівності кінетичної енергії приведеної маси

$$K_{pr} = \frac{1}{2} \cdot J_P \cdot \omega^2$$

і кінетичної енергії мас, що дійсно рухаються:

$$K = \frac{1}{2} \cdot M_A \cdot V_A^2 + K_{об},$$

де M_A - маса автомобіля, кг ;

$K_{об}$ - кінетична енергія мас, що обертаються на автомобілі (колеса та ін.). Цю кінетичну енергію будемо оцінювати приблизно та враховувати у вигляді коефіцієнту k_ω , який визначає відношення її до кінетичної енергії основної маси автомобіля.

Після перетворень одержимо

$$J_P = k_\omega \cdot M_A \cdot \left(\frac{V_A}{\omega} \right)^2.$$

Враховуючи, що швидкість автомобіля (в m/c) зв'язана з кутовою швидкістю ведучого колеса ($\omega_K, rad/c$):

$$V_A = \omega_K \cdot r_K,$$

де r_K - радіус ведучого колеса, m , яка, в свою чергу, пов'язана з кутовою швидкістю колінчастого валу

$$\omega = \omega_K \cdot u_i$$

вираз для приведенного моменту інерції мас автомобіля набуде вигляду

$$J_P(u_i) = k_\omega \cdot M_A \cdot \left(\frac{r_k}{u_i} \right)^2, \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Враховуючи, що інерційні маси автомобіля можуть впливати на швидкість обертання колінчастого валу тільки при включеному зчепленні та при $u_i \neq 0$ рівняння для сумарного моменту інерції, приведенного до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна набере вигляд

$$\begin{cases} J_{pr}(u_i, s_c) = J_D, & \text{коли } u_i = 0 \\ J_{pr}(u_i, s_c) = J_D + J_P(u_i) \cdot s_c, & \text{коли } u_i \neq 0 \end{cases}.$$

Тепер знайдемо сумарний момент опору, приведений до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна.

8.4 Приведений сумарний момент опору

Повний опір, що прикладений до двигуна транспортного засобу має три складові частини: опір перекочування ($F_K(\alpha)$), опір ухилу шляху ($F_\alpha(\alpha)$) та аеродинамічний опір ($F_L(V_A)$):

$$F_\Sigma(V_A, \alpha) = F_K(\alpha) + F_\alpha(\alpha) + F_L(V_A)$$

Опір перекочування є наслідком процесів деформації, що виникають в зоні контакту шини з дорогою

$$F_K(\alpha) = k_k \cdot M_A \cdot g \cdot \cos(\alpha), \quad H,$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння;

k_k - коефіцієнт опору перекочування, який залежить від особливостей дорожнього покриття та якостей шини.

Під час здійснення повороту опір перекочування доповнюється опором повороту, який є функцією швидкості автомобілю, радіусу повороту, геометричних характеристик підвіски автомобіля, типу шин, тиску в шинах, поведінки автомобіля під впливом поперечного прискорення.

Опір ухилу шляху обчислюється за формулою

$$F_\alpha(\alpha) = M_A \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad H.$$

Аеродинамічний опір можна знайти з вираження

$$F_L(V_A) = 0,5 \cdot \rho \cdot C_W \cdot S_A \cdot (V_A + g_0)^2, \quad H,$$

де $\rho = 1,209 \text{ кг/м}^3$ щільність повітря;

C_W - коефіцієнт лобового опору;

S_A - лобова площа найбільшого поперечного переріза, м^2 ;

g_0 - швидкість зустрічного вітру, м/с .

Оскільки робота пневмодвигуна, що виконується в одиницю часу по подоланню сумарного приведенного моменту опору ($M'_{dor_pr} \cdot \omega$) дорівнює роботі в одиницю часу транспортного засобу ($F_\Sigma \cdot V_A$), що приводиться в рух цим двигуном з урахуванням ККД трансмісії (η_{TR})

$$M'_{dor_pr} \cdot \omega \cdot \eta_{TR} = F_\Sigma \cdot V_A,$$

знайдемо сумарний момент опору, приведений до вісі обертання колінчастого валу пневмодвигуна:

$$M'_{dor_pr}(V_A, \alpha) = \frac{F_\Sigma(V_A, \alpha) \cdot V_A}{\eta_{TR} \cdot \omega}, \quad H \cdot \text{м}.$$

Швидкість автомобіля пов'язана з кутовою швидкістю обертання колінчастого валу пневмодвигуна

$$V_A = k_{df} \cdot \frac{\omega}{u_i} \cdot r_K,$$

де k_{df} - коефіцієнт деформації колеса.

Таким чином можна записати

$$M'_{dor_pr}(V_A, \alpha) = \frac{F_\Sigma(V_A, \alpha) \cdot k_{df} \cdot r_K}{\eta_{TR} \cdot u_i}, \quad H \cdot m.$$

Знайдений сумарний момент опору прикладений до вісі обертання колінчастого валу тільки при включеному зчепленні ($s_c \neq 0$) та коли $u_i \neq 0$. Остаточню одержимо:

$$M_{dor_pr}(V_A, \alpha, u_i, s_c) = \begin{cases} M_{u0}, & \text{коли } u_i = 0 \\ (M'_{dor_pr}(V_A, \alpha) - M_{sc0}) \cdot s_c + M_{sc0}, & \text{коли } u_i \neq 0 \end{cases}$$

де M_{u0} - момент опору, прикладений до вісі обертання колінчастого валу, на нейтральній передачі;

M_{sc0} - момент опору, прикладений до вісі обертання колінчастого валу, при виключеному зчепленні.

Що стосується швидкості автомобіля (V_A), то необхідно відмітити, що вона пов'язана з кутовою швидкістю колінчастого валу як це урахувалось вище тільки за умовами $s_c = 1$ та $u_i \neq 0$. При натиснутій педалі зчеплення швидкість автомобіля можна знайти вирішивши однорідне диференціальне рівняння

$$T_V \cdot \frac{dV_A(t)}{dt} + V_A(t) = 0,$$

де T_V - постійна часу автомобіля, с, за початкових умов $V_A(0) = V_{Asc0}$, де V_{Asc0} - миттєва швидкість автомобіля на момент натиснення педалі зчеплення.

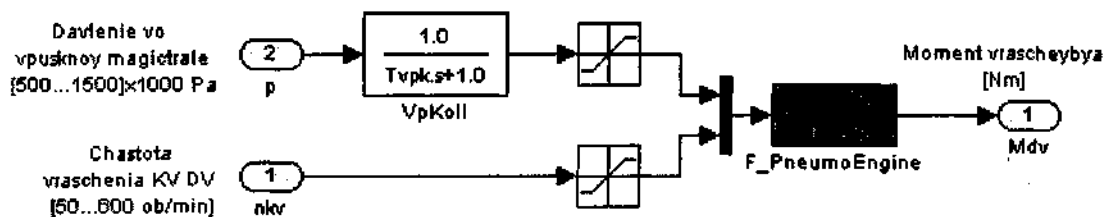


Рис. 8.5. Блок PnEngine - модель пневмодвигуна

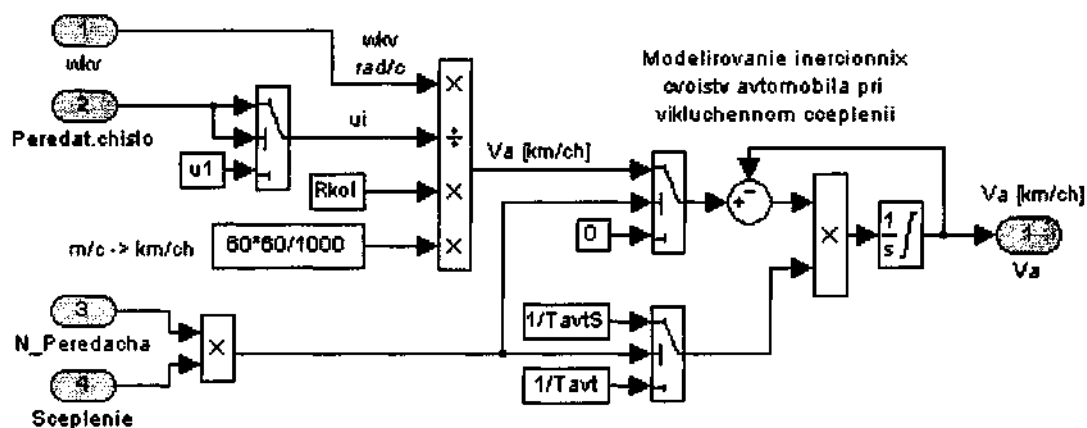


Рис. 8.6. Блок Skor.Avtomobila. Обчислення реальної швидкості автомобіля

Аперіодична ланка з постійною часу T_{VPK} блоку «PnEngine» забезпечує відтворення інерційності впускної магістралі пневмодвигуна разом з відповідними керуючими пристроями.

Вигляд блоку «Score» під час проведення моделювання наведено на рис.8.7. В результаті аналізу результатів моделювання можна зробити висновок про адекватність моделі об'єкту керування.

Для створення Simulink – моделі системи керування необхідно розробити модель регулятора, додати її до відпрацьованої моделі об'єкту керування та замкнути коло зворотного зв'язку. Одержану модель наведено на рис.8.8.

Блок «Regulator» являє собою аналоговий ПД – регулятор з послідовно включеним фільтром низьких частот «FNCh». Його структура наведена на рис.8.9.

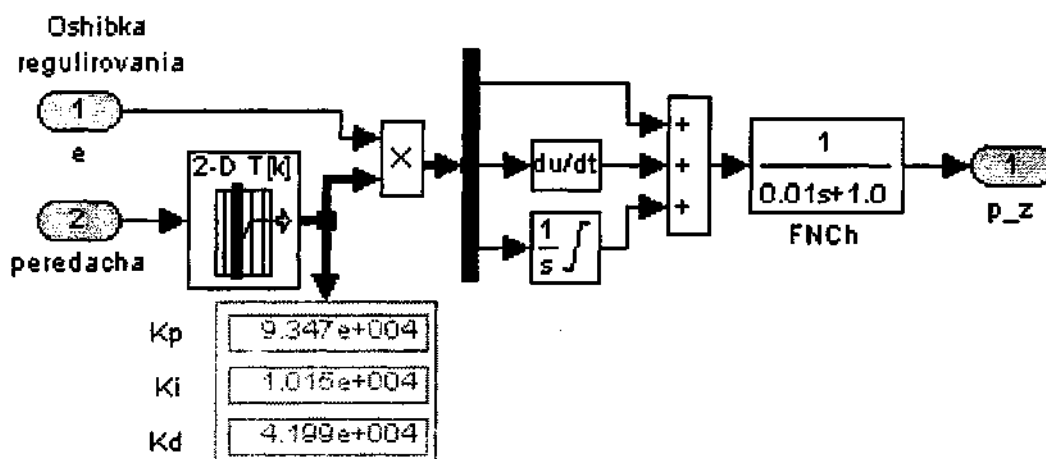


Рис. 8.9. Simulink – модель ПД - регулятора

Оскільки параметри об'єкта керування змінюються в залежності від вибраного передаточного відношення коробки передач, в моделі регулятора передбачена відповідна зміна коефіцієнтів K_p , K_d і K_i .

Керуючі впливи у вигляді заданої швидкості обертання колінчастого валу (об/хв) під час моделювання можна задавати за допомогою відповідного органу керування «ZdChVrKV», який увійшов у модель замість «Zd.davlenie».

Вигляд блоку «Scope» під час проведення моделювання наведено на рис.8.10.

Настроювання параметрів ПД-регулятора здійснювалось з використанням пакета прикладних програм Nonlinear Control Design (NCD) Blockset, що реалізує метод динамічної оптимізації для побудови нелінійних систем керування. На рис.8.11 наведена Simulink – модель, підготовлена до використання пакету NCD. Рис.8.12 ілюструє роботу з даним пакетом під час вибору обмежень на параметри перехідного процесу та параметрів регулятора, які необхідно оптимізувати.

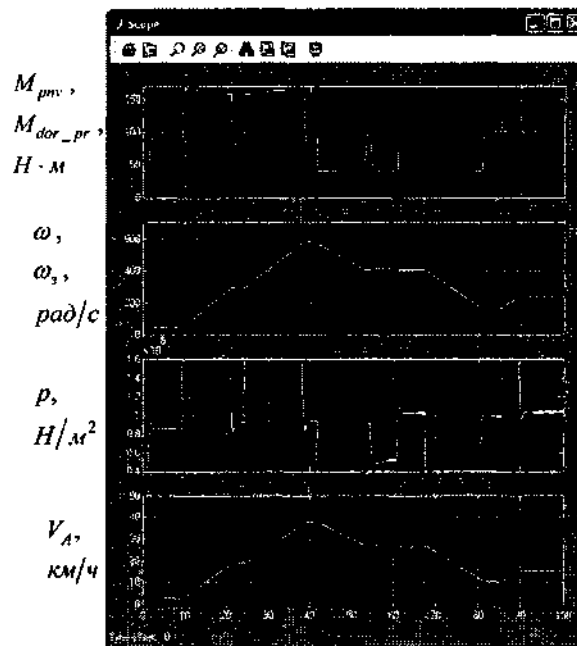


Рис. 8.10. Показання блоку Scope під час моделювання роботи системи управління

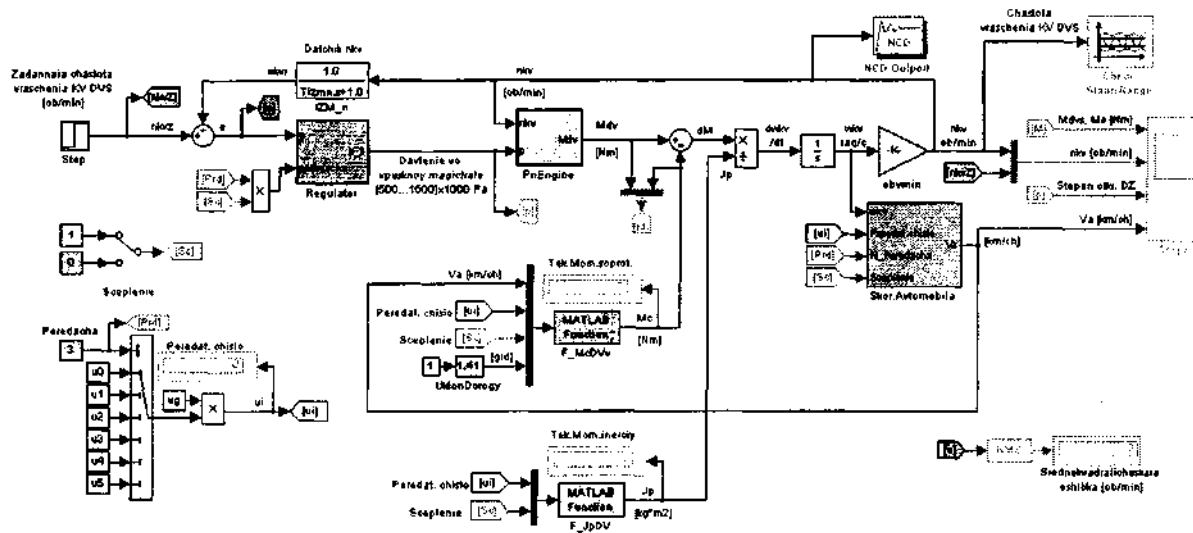


Рис. 8.11. Підготовка Simulink – моделі до використання пакету NCD

Пакет NCD вимагає завдання приблизних початкових значень параметрів, що підлягають оптимізації. Грубу оцінку параметрів ПІД-регулятора можна здійснити відповідно до методики Зіглера-Ніколса (Ziegler-Nichols method), згідно з якою:

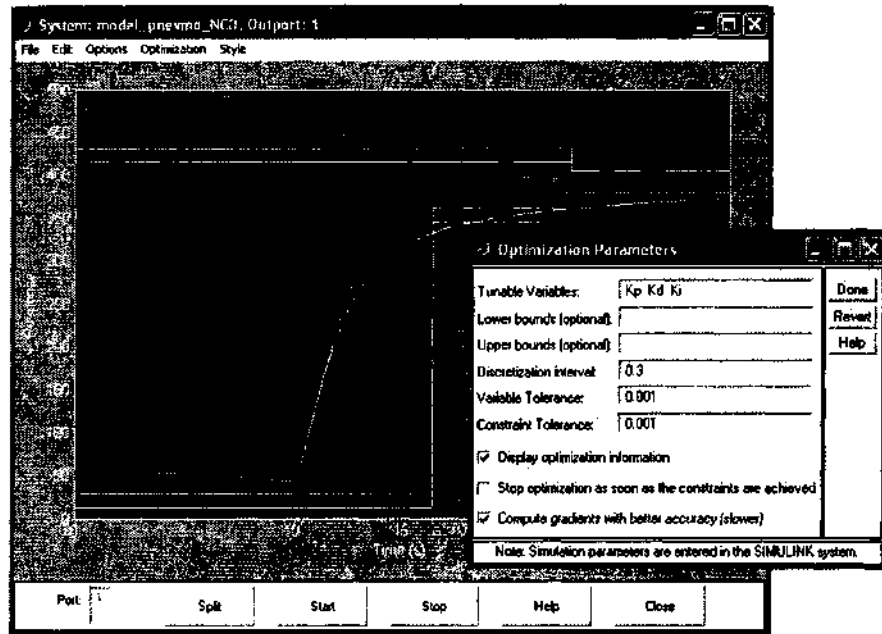


Рис. 8.12. Використання пакету NCD для оптимізації ПД регулятора

1. Коефіцієнти K_D й K_I установлюються рівними нулю, а коефіцієнт K_P збільшується доти, поки система не втратить стійкість.
2. Граничне значення K_P позначається як K_u , а період автоколивань - як P_u .
3. Задаються наступні значення коефіцієнтів регулятора:

$$K_P = \frac{3}{5} \cdot K_u;$$

$$K_D = \frac{3 \cdot K_u \cdot P_u}{40};$$

$$K_I = \frac{6 \cdot K_u}{5 \cdot P_u}.$$

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що створена математично модель системи управління пневматичною трансмісією цілком відповідає поставленим вимогам та може бути використана під час перевірки правильності технічних рішень в процесі розробки гібридного автомобіля.

9. АНАЛІЗ ЕМС ЕЛЕКТРООБ ЛАДНАННЯ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

9.1. Класифікація електромагнітних завад

Електромагнітна завада (ЕМЗ) – електромагнітний, електричний і (або) магнітний процес, який утворюється будь-яким, у тому разі природним, джерелом в просторі і (або) провідному середовищу, та який небажано впливає або може впливати на корисний сигнал при його передачі, прийомі і (або) перетворенню до заданого виду. *Ненавмисна електромагнітна завада (НЕМЗ)* – це завада, яка утворюється джерелом штучного походження, яке не призначено для порушення функціонування технічного засобу.

В області електромагнітної сумісності (ЕМС) під будь-яким джерелом розуміють лише джерело завади, яка утворюється ненавмисно або від недостатніх прийнятих технічних і організаційних мір, або із-за особливостей фізичного процесу.

Електромагнітна завада, яка утворюється у просторі, називається *випромінюваною*, а яка утворюється в провідному середовищу – *кондуктивною*. НЕМЗ утворюються, як правило, в наслідок випадкових процесів в їх джерелах. Тому особливістю НЕМЗ є імовірний характер, якщо вилучити окремі випадки. Аналіз впливу НЕМЗ на рецептори, визначення характеристик, модулювання, нормування параметрів і вимірювання НЕМЗ базується на статистичному підході.

Крім завад штучного походження на електромагнітну обстановку впливають завади природного походження. Ці завади підрозділяються на земні (*електростатичні ЕМЗ*, які обумовлені накопиченням і послідовним стіканням електростатичних зарядів від часток атмосферних осадків або пилу і *атмосферні*, які утворюються електричними розрядами під час грози, вони лежать в діапазоні частот до 30 МГц; їх максимальне значення зосереджено в області 2...30 кГц [25]) і неземні (шум неба, завади сонячної радіації, вторинний космічний шум).

По відношенню до системи або до окремого електротехнічного засобу (ЕТЗ) електромагнітна обстановка може бути зовнішньою або внутрішньою. В відповідності з цим підрозділяються й ЕМЗ.

Внутрісистемна радіозавада – ненавмисна радіозавада, яка циркулює між радіотехнічними засобами (РТЗ) одної радіосистеми.

Міжсистемна радіозавада – ненавмисна радіозавада, яка утворюється між РТЗ різних радіосистем.

Рецептор – будь-який технічний пристрій, який реагує на електромагнітний корисний сигнал і (або) на ЕМЗ. Цей термін введений для оцінки впливу НЕМЗ на різні технічні пристрої, а не тільки на радіоприймач.

Рецептор – це радіоприймальний пристрій, електронно-обчислювальна машина, радіосистема, електронний пристрій автоматики та інші. Рецептором ще може бути жива істота (біологічний об'єкт). До терміну рецептор відносяться такі поняття як: сприйнятливість, поріг сприйнятливості, завадостійкість, завадозахищеність, захисне відношення [25, 26].

Радіоелектронний засіб (РЕЗ) – сукупність радіотехнічного пристрою, який використовується для передачі (прийому) радіосигналів, і електронного пристрою, який використовується для перетворення сигналу до заданого виду. Реалізація такої сукупності дозволила отримати нові властивості технічних засобів у порівнянні з радіотехнічними засобами.

Електромагнітна обстановка (ЕМО) – в заданій області простору сукупність електромагнітних, електричних і (або) магнітних полів, а також струмів (напруги) завад і сигналу, який впливає або може впливати на функціонування рецептора.

Якість ЕМО визначається характеристиками ЕМС рецептора, який функціонує або призначеного для функціонування в заданій області простору.

При вирішенні задач організаційного і технічного характеру, які пов'язані з формуванням ЕМО, її поділяють на існуючу і припустиму. Якщо джерела електромагнітного випромінювання попередньо відомі, незмінні місця їх розташування, то ЕМО, яка формується такими джерелами, визначається як *існуюча*. На практиці приходиться мати справу в основному з припустимою ЕМО, коли до існуючих джерел електромагнітного випромінювання в будь-який момент можуть добавитися інші, які раніше не приймали участь в її формуванні, наприклад блискавки або близько розташовані високовольні

лінії електропередач, які по тій або іншій причині можуть опинитися в аварійному режимі.

Радіочастотний ресурс (РЧР) – сукупність можливих для використання радіочастотних електромагнітних полів, які створюють з метою передачі і прийому інформації або енергії.

Основні ознаки РЧР: матеріальність, відновлюваність на основі природних фізичних законів, обмеженість, доступність і неоднорідність властивостей по смугам частот. До терміну РЧР відносяться такі поняття як: радіослужба, радіоканал, виділення смуг частот, розподілення смуг частот, присвоювання частоти радіоканалів, частотно-просторе рознесення, часове рознесення.

Основою аналізу НЕМЗ є їх класифікація [25]. Але ще не існує загальноприйнятої і досить повної класифікації НЕМЗ. Тому за основу візьмемо класифікацію по ряду ознак, яка приведена в табл. 9.1.

НЕМЗ та відповідно їх джерела діляться на чотири класи: станційні, індустріальні, природні, контактні. Кожен клас має свої підкласи – випромінюючі і кондуктивні. Види НЕМЗ відносяться до всіх класів і підкласів (таблиця 9.1). Приведемо визначення класів НЕМЗ.

Станційна – відноситься до класу завад від антени різних пристроїв радіопередачі; проявляє свою дію на такий рецептор, як приймач на його робочій частоті або на сусідніх побічних каналах прийому; створюється основним випромінюванням передавача та його гармоніками, або іншими неосновними випромінюваннями.

Індустріальна – відноситься до класу завад від електротехнічних, електронних і радіоелектронних пристроїв (в останніх крім випромінювання через антену), які використовуються в побуту, промисловості, транспортних об'єктах, медицині, військовій техніці і наукових дослідженнях. Дії завад цього класу на рецептори проявляється в більшості випадків в виді імпульсних процесів, характеристики яких залежать від типу конкретного пристрою; в наслідок різноманітності джерел індустріальна завада є найбільш поширеною в діапазоні частот від десятків герц до 1 ГГц, а в ряді випадків і до більш високих частот.

Таблиця 9.1

Класифікація ненавмисних електромагнітних завад

Клас	Підклас	Вид (для всіх класів і підкласів)
Станційні	<u>Випромінюючі:</u> Основні і не основні випромінювання: позасмугові, гармоніки, субгармоніки, комбінаційні, інтермодуляційні, шумові, паразитні.	<u>По частоті і спектру:</u> низькочастотні, високочастотні, синусоїдні, модульовані, імпульсні, шумові, імпульсно-шумові <u>По часу:</u> безперервні, тривалі, короткочасні, рідко імпульсні, регулярні, нерегулярні
Індустріальні	<u>Випромінюючі:</u> електромагнітні, електрична індукція, магнітна індукція <u>Кондуктивні:</u> симетричні, не симетричні, провал напруги, перенапруга, комутаційні, індуцировані, завади віддзеркалення	<u>По відношенню завади до рецептору:</u> вузькосмугові, широкосмугові, адитивні, мультиплексні, зовнішні, внутрішні, міжсистемні, внутрисистемні, внутріапаратні, когерентна, некогерентна
Природні	<u>Випромінюючі:</u> атмосферні, космічні, електростатичні, потужний електромагнітний імпульс (EMI)	

Закінчення табл. 9.1

Клас	Підклас	Вид (для всіх класів і підкласів)
Контактні	<u>Випромінюючі:</u> від одного випромінювача, від декілька випромінювачів (інтермодуляційні контактні)	<u>По відношенню рецептору до завади:</u> допустимі, недопустимі, приємливі, блокуючі, перехресні, перехресні амплітудно-фазові, інтермодуляційні

При аналізі індустриальних завад важливе значення мають поняття ближньої і дальньої зони поширення електромагнітної енергії [27, 28] в залежності від відстані до джерел завад в припущенні, що розміри випромінювача завад $l \ll \lambda$, де λ – довжина хвилі випромінювання. В ближній зоні на відстанях від джерела $r' \leq 1$ де r' – відносна відстань до джерела завади:

$$r' = \frac{r}{r_0}, \quad (9.1)$$

де $r_0 = \lambda/2\pi$ – абсолютна відстань до джерела випромінювання завади; поле ще не сформувалось в плоску хвилю і може представляти собою (рис. 9.1) переважно поле магнітної індукції H , якщо в джерелі завади тече значний струм при відносно малої напрузі, або поле електричної індукції E , якщо в джерелі тече малий струм при відносно великої напрузі. Поняття «відносно» означає, що ближня зона характеризується двома складовими індукції H і E , але в залежності від джерела завад може переважати одна із складових. Відомо, що H і E зв'язані між собою хвильовим опором, який вимірюється в омах: $Z_{xв} = E/H$, причому обидві складові по часу знаходяться в фазі, але в просторі здвинуті на 90° .

Електромагнітне поле у вигляді плоскої хвилі (радіохвилі) для середньої зони випромінювання формується на відстанях $r' = 1 - 2$, при цьому хвильовий опір $Z_{xв} = 377$ Ом.

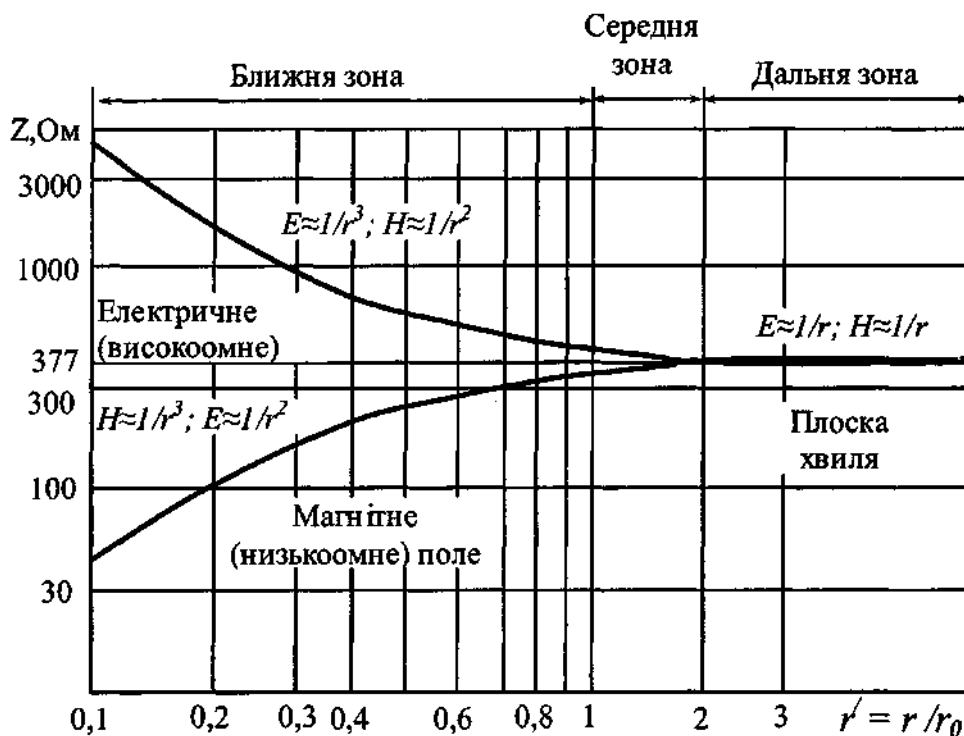


Рис. 9.1. Хвильовий опір електричної (E) і магнітної (H) складової поля ближньої зони в залежності від відстані до джерела завад $r' = r/r_0$

Порівняв хвильовий опір складових поля індукції, можна відмітити, що поле E , є високоомним по відношенню до хвильового опору плоскої хвилі, а поле H низькоомним. Що стосується напруженості поля, то воно зворотно пропорційне кубу відстані до джерела завади.

На частотах менше 100 МГц індустриальні заводи в більшості випадків визначаються ближньою зоною випромінювання при відстані від джерела завад: до 5 км на частоті 10 кГц, до 500 м на частоті 100 кГц, до 50 м на частоті 1 МГц, до 5 м на частоті 10 МГц, до 0,5 м на частоті 100 МГц. В зв'язку з цим можна визначити, що основні конструкторсько-технологічні рішення повинні базуватися на характеристиках поля ближньої зони поширення завад. Електричне поле ближньої зони впливає на рецептор через паразитний ємнісний зв'язок з джерелом, а магнітне поле – через паразитний індуктивний зв'язок. Це необхідно враховувати, наприклад при розробці монтажних схем складних технічних комплексів чи електроустаткування автомобілів.

В цілому рівень завад випромінювання, які впливають на рецептор залежить від потужності їх джерела, відстані джерело – рецептор, характеристик зони поширення (ближня, середня, дальня) і характеристик середовища поширення електромагнітної енергії.

Користуючись рис. 9.1 можна спрогнозувати розташування (по відстані) РЕЗ на автомобілі, чи виправити (скорегувати) вже існуючі комплекси РЕЗ сучасних гібридних автомобілів.

Користуючись знанням зон випромінювання, не вдаючись до складних технічних рішень, можна значно знизити рівень ЕМЗ в автомобілі. Необхідно тільки знати електромагнітні властивості кожного засобу і в залежності від його чутливості до ЕМЗ, та характеристики власних (їм же створених) завад розташувати їх так, в залежності від зон випромінювання, щоб ці технічні засоби як можна найменше впливали на працездатність інших РЕЗ автомобіля (були електромагнітно сумісні).

Індустріальні кондуктивні завади у вигляді струмів провідних середовищ розповсюджуються в мережах живлення, керування, комутації, заземлення і корисного сигналу. Головне джерело кондуктивних завад – це джерела живлення різних типів. Часто зустрічаються кондуктивні завади у вигляді наведених струмів, які обумовлені індуктивними і ємнісними зв'язками між провідниками, наприклад монтажні схеми, провідні лінії зв'язку і мережі живлення 220 В; оскільки ці завади визначаються полем індукції, їх доцільно називати індукційними.

Природна – відноситься до класу завад, які обумовлені природними фізичними процесами, в виді електромагнітних випромінювань, наприклад в атмосфері з частотами від одиниць герц до 10 МГц. До класу природних завад треба віднести електромагнітну заваду, яка виникає внаслідок електризації різних тіл, в тому числі елементів конструкції, і яка проявляється внаслідок струмів стікання накопичених електричних зарядів і (або) іскрових зарядів між елементами конструкції. Такі завади проявляються в діапазоні частот від декілька герц до 1 ГГц.

Контактна – відноситься до класу завад, які утворюються переміщенням струмопровідних механічних контактів з нелінійною струмовою провідністю при їх опроміненні полем досить потужного пристрою, який випромінює електромагнітне поле. Завади

цього класу представляють собою сукупність імпульсних і шумових процесів.

9.2 Загальні відомості EMC електрообладнання гібридного автомобіля

Проведемо аналіз EMC електрообладнання гібридного автомобіля на прикладі автомобіля Lexus GS450h.

Електрообладнання автомобіля Lexus GS450h знаходиться в досить тісних просторових умовах, це видно з рис. 9.2, на прикладі силового електроустаткування автомобіля. З цієї схеми видно, що НЕМЗ мають наступні шліхи впливу: MG1 на MG2; MG2 на MG1;

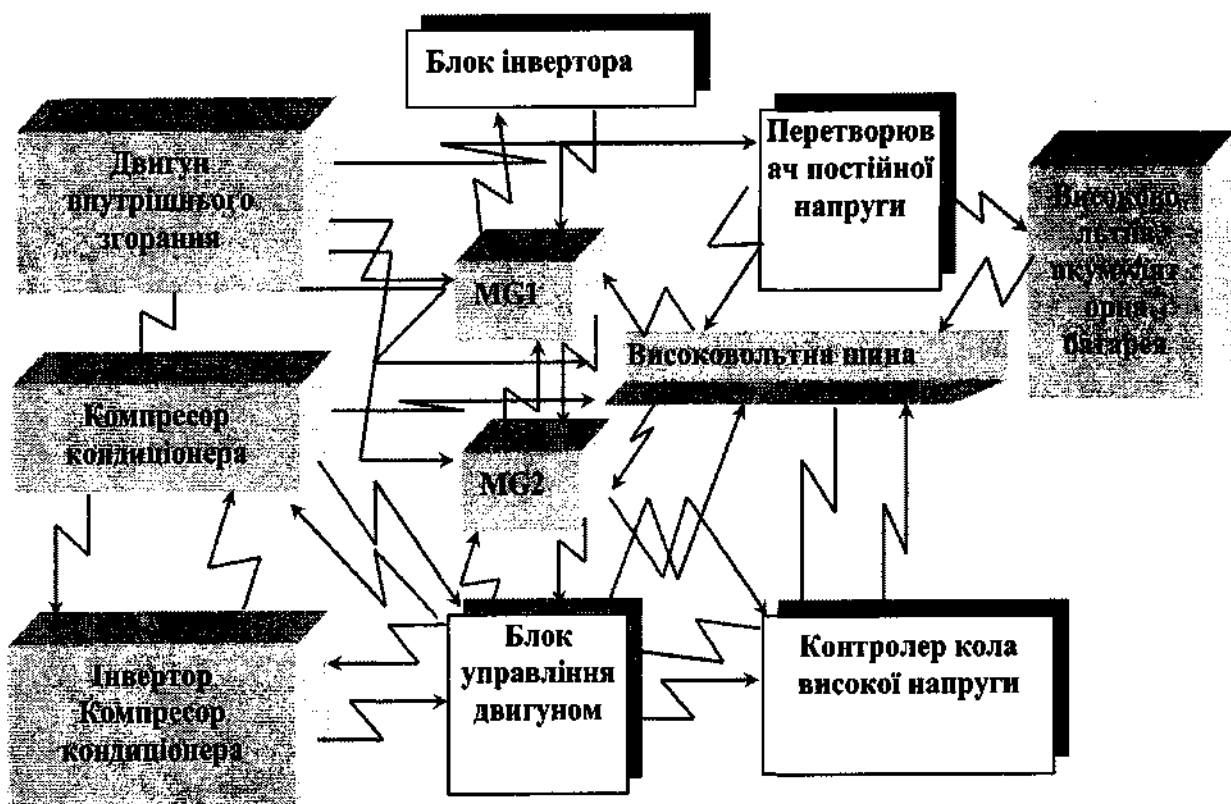


Рис. 9.2. Схема впливу НЕМЗ в силовому колі автомобіля Lexus GS450h

MG2 і MG1 на блок інвертора (як кондуктивна складова НЕМЗ, так і НЕМЗ випромінювання); також зворотній напрямом: блок інвертора на MG2 і MG1; двигун внутрішнього згорання на все без виключення електроустаткування автомобіля; компресор кондиціонера

на інвертор и та ін. Основні напрямки дії НЕМЗ представлені на рис. 9.2. І це, тільки силова частина електроустаткування автомобіля.

Аналізуючи радіотехнічне та електротехнічне устаткування автомобіля та кола управління і сигналізації (Глава 4) можна зробити висновок, що все електроустаткування автомобіля працює у дуже жорстких умовах ЕМС, де в тісних просторових умовах приходить ся функціонувати, як електротехнічним пристроям, так і радіотехнічній техніці. А тісна співпраця цих двох компонентів практично неможлива без врахування їх ЕМС, особливо у наявних просторових умовах. Бо корисні сигнали управління чи інформування в системі електрообладнання автомобіля мають досить низький рівень (від 10 мВ до 650 В), а електромагнітні завади можуть значно перевищувати цей рівень, наприклад, кондуктивна НЕМЗ від блока інвертора може приймати значення до 22 В (перехідні процеси), а складова випромінювання НЕМЗ (в залежності від відстані рецептора завади, та зони випромінювання, рис. 9.1), може дорівнювати 85 В (технічні данні блока інвертора).

Двигун внутрішнього згорання взагалі є джерелом широкосмугових електромагнітних завад, спектр яких повністю перекриває робочі діапазони всіх наявних електро- та радіозасобів автомобіля.

Неможна зневажати й тим фактом, що автомобіль Lexus GS450h, як система в цілому, є джерело потужних НЕМЗ, які впливають на функціонування інших систем (міжсистемні електромагнітні завади).

Нижче представлена методика аналізу та оцінки ЕМС електрообладнання автомобіля Lexus GS450h.

9.2.1. Визначення основних джерел та рецепторів завад.

Умовно алгоритм методики забезпечення ЕМС на електрообладнанні автомобіля можна розкласти на два етапи (рис. 9.3):

1. Підготовка до методики забезпечення ЕМС (збір і обробка даних).

2. Цикл методики забезпечення ЕМС.

9.2.2. Визначення можливих шляхів поширення ненавмисних електромагнітних завад [29].

Зв'язки між джерелом завади (ДЗ) і рецептором завади (РЗ) можуть бути досить складними і численними.

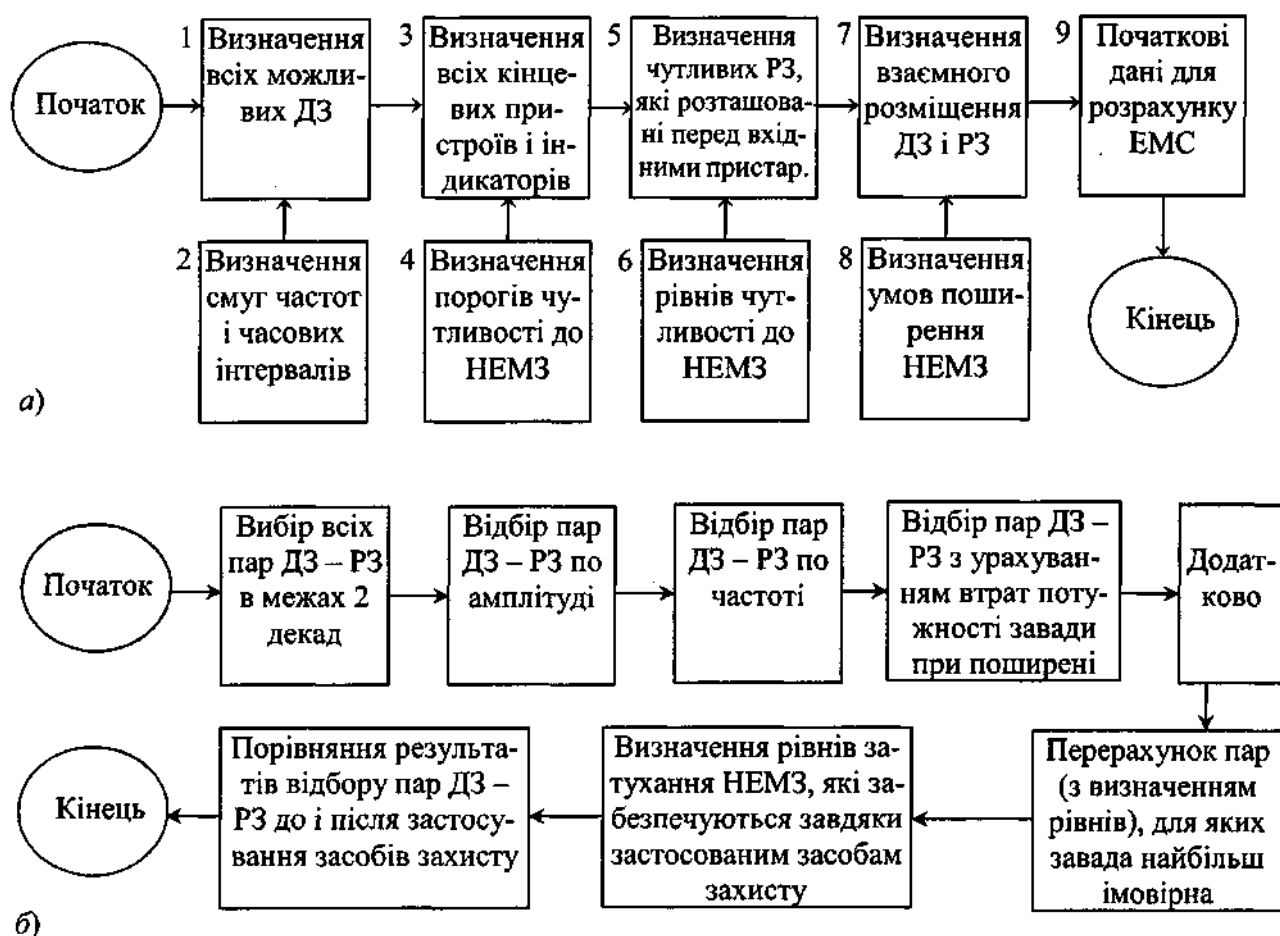


Рис. 9.3. Схема процесу виконання методики аналізу та оцінки ЕМС:

а) – підготовка до методики аналізу ЕМС (збір і обробка даних);

б) – цикл методики аналізу ЕМС

Базуючись на прикладі імовірних шляхів поширення ЕМЗ, які обумовлені випромінюванням (ЗВ) і провідністю (ЗП) (рис. 9.4), дамо їх класифікацію.

Шляхи ЗВ: антена – антена, антена – блок, антена – провід, блок – антена, блок – провід, провід – антена, провід – блок, провід – провід, блок – блок.

Шляхи ЗП: провід – провід, опір загального заземлення, внутрішній опір загального джерела.

9.2.3. Визначення комбінацій джерело завади – рецептор завади [29, 30]. На цьому етапі необхідно виявити усі можливі ДЗ в системі: передаючі пристрої, генератори, джерела живлення, модулятори системи передачі цифрових сигналів інформації і управління, колекторні двигуни, реле, соленоїди, кремнієві вентилі та ін. (рис. 9.3 операція 1). Потім слід визначити або оцінити смуги частот

і часові інтервали кожного ДЗ (рис. 9.3 операція 2). Часові характеристики дозволяють враховувати можливі моменти виникнення НЕМЗ.

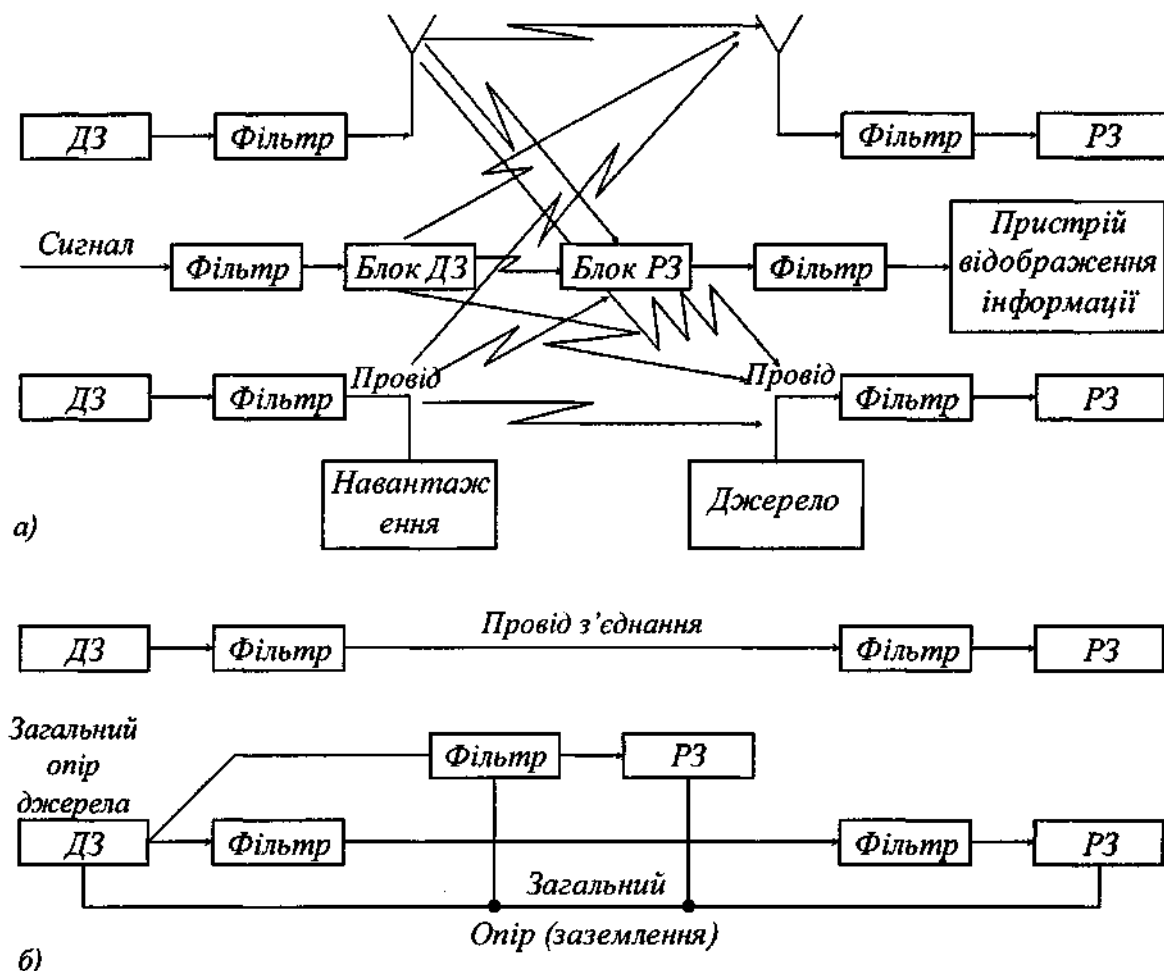


Рис. 9.4. Основні шляхи розповсюдження ЕМЗ:
а) – між антенами, блоками і проводами (ЗВ);
б) – за рахунок провідності (ЗП)

Потім необхідно виявити всі рецептори завад (РЗ), в яких можуть виникати збої і відмови (рис. 9.3 операція 3). До них відносяться, наприклад, кінцеві виконавчі пристрої, пристрої репродукування інформації, індикатори. Результатом впливу завад на ККВН може привести до короточасної або повної відмови виконавчого пристрою, що, в свою чергу, веде до виникнення аварійної ситуації.

Далі слід або визначити пороги чутливості (рис. 9.3 операція 4), або оцінити ступінь погіршення роботи при впливу завади

Так як завади звичайно не впливають безпосередньо на кінцеві пристрої, необхідно знати найбільш чутливі РЗ, з яких сигнали по-

ступують на дані пристрої. До таких РЗ, наприклад, антени і вхідні мережі УВЧ, між блочні лінії зв'язку, кабельні мережі, які виконані без екрану (рис. 9.3 операція 5). При цьому також оцінюють мінімальні рівні завад, які погіршують роботу пристроїв (рис. 9.3 операція 6).

Смути частот, про які вже згадували, можна оцінити за допомогою графіків рівнів випромінюючих та сприймаючих завад від частоти. Частотний діапазон основних ДЗ і РЗ на ВЗ лежить в межах $100 - 30 \cdot 10^6$ Гц, [25, 26]. Деякі ДЗ займають значний частотний діапазон, оскільки, або перебудовуються по частоті, або являються імпульсними пристроями. Аналогічно можна оцінити і ширину смуг частот РЗ. Деякі ДЗ являються фіксованими по частоті (наприклад мережі живлення змінного струму частотою 50 або 400 Гц), а деякі РЗ займають вузький діапазон частот.

Данні про смуги частот можна фіксувати також у вигляді таблиці або матриці. Аналізуючи технічні засоби електроустаткування автомобіля можна зробити наступні висновки:

- всі ДЗ мають більші високі рівні потужності, чим рівні чутливості віх РЗ (виконується не завжди);
- смуги частот деяких ДЗ лежать в частотному діапазоні потенційних РЗ або перекривають його;
- смуги частот деяких ДЗ не попадають в діапазон частот потенційних РЗ, однак завади можуть впливати по побічних каналах;
- різниця рівнів ДЗ і РЗ може бути відносно невелика при цьому НЕМЗ являються маловірогідними. При досить великій різниці рівнів вірогідність виникнення НЕМЗ суттєво зростає (що залежить від взаємного розташування ДЗ і РЗ).

9.2.4. Визначення смуг частот. В дійсності причиною багатьох НЕМЗ являється вплив випромінювання ДЗ поза робочою смугою частот, який попадає в робочу смугу частот РЗ, або наявність у РЗ побічних каналів, які сприймають заваду утворену ДЗ в його робочій смузі [29, 30].

При прогнозуванні НЕМЗ слід використовувати попередньо відомі данні або визначити їх за допомогою вимірювань. Якщо такі данні відсутні, то можна використати математичні моделі, що розроблені для ДЗ і РЗ, які близькі до реальних. Інколи можна спрогнозувати побічні смуги частот. Однак, якщо різниця основних частот ДЗ

і РЗ перевищує одну декаду (помилки в визначенні рівнів можуть складати 30 – 50 дБ), це не гарантує вірогідності прогнозу, оскільки можливе виникнення паразитних резонансів і гармонік вищих порядків.

9.2.5. Оцінка основних джерел завад і рецепторів завад [28, 29]. Метою оцінки основних джерел і рецепторів завад є відбір декілька найбільш імовірних пар ДЗ – РЗ, а потім лише для них прогнозують наявність НЕМЗ. Такий метод найбільш зручний.

Процес відбору полягає у наступному:

- складається матриця всіх комбінацій ДЗ – РЗ, причому до матриці заносяться відомості про рівні завад і чутливості рецепторів в незалежності від їх діапазону частот;
- відбираються пари по амплітуді (відбір являється не точним, так як при цьому не враховуються частоти);
- відбираються пари по частоті, при цьому враховуються рівні завад в основній і побічній смузі частот.

1) Розглянемо детальніше процес відбору. Складання матриці (табл. 9.2) включає записи:

Таблиця 9.2

Різниць в потужності ДЗ і чутливості РЗ, дБ·м

Можливі РЗ	Можливі ДЗ					
	ДЗ – 1	ДЗ – 2	ДЗ – 3	ДЗ – 4	...	ДЗ – N
РЗ – 1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	...	a_{1n}
РЗ – 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	...	a_{2n}
РЗ – 3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{33}	...	a_{1n}
...	...	...	...	...	...	...
РЗ – N	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	a_{n4}	...	a_{nn}

- 1) всіх можливих ДЗ в першу строку матриці;
- 2) всіх можливих РЗ в лівий стовпець матриці;
- 3) різниць рівнів ДЗ і РЗ без урахування смуг частот до стовпців матриці.

В матрицю не заносяться данні про передавачі і приймачі, які призначені для сумісної роботи. В результаті отримуємо матрицю різниць в потужності ДЗ і чутливості РЗ, загальний вид якої представлений в табл. 9.2.

Відбір по амплітуді (табл. 9.3). Для кожної з пар ДЗ – РЗ імовірні такі комбінації:

1. Завада в основній смузі частот ДЗ і РЗ (випадок ОО рис. 9.5, а). Діапазон частот випромінювання ДЗ повністю перекриває діапазон РЗ. (При цьому для РЗ смугу робочих частот необхідно збільшити з кожного краю на 20%. Для смугових підсилювачів смуги частот збільшуються на одну октаву.) Якщо перекриття існує, то верхню ліву частину відповідного квадрату табл. 9.3 записують поправку 0 дБ, в нижню частину того ж квадрату записують дані з табл. 9.2.

2.3. Основні випромінювання ДЗ попадають в побічні канали прийому РЗ (випадок ОП) і побічне випромінювання ДЗ – в основний канал РЗ (випадок ПО) (рис. 9.5, б). При цьому необхідно визначити, чи існує для кожної пари табл. 9.3 перекриття по частоті в межах однієї декади від граничних частот ДЗ і РЗ. Якщо розніс частот не перевищує однієї декади, то до верхньої лівої частини відповідного квадрату табл. 9.3 записується поправка –60 дБ, в нижню ліву частину записуються дані з табл. 9.2 з урахуванням поправки (–60 дБ).

Таблиця 9.3

Поправка і результируючий рівень НЕМЗ, дБ

Можливі РЗ	Можливі ДЗ					
	ДЗ – 1	ДЗ – 2	ДЗ – 3	ДЗ – 4	...	ДЗ – N
РЗ – 1	–х ϵ_{11}	–х ϵ_{12}	–х ϵ_{13}	–х ϵ_{14}	...	–х ϵ_{1n}
РЗ – 2	–х ϵ_{21}	–х ϵ_{22}	–х ϵ_{23}	–х ϵ_{24}	...	–х ϵ_{2n}
РЗ – 3	–х ϵ_{31}	–х ϵ_{32}	–х ϵ_{33}	–х ϵ_{34}	...	–х ϵ_{3n}
...	...	...	...	...	...	...
РЗ – N	–х ϵ_{n1}	–х ϵ_{n2}	–х ϵ_{n3}	–х ϵ_{n4}	...	–х ϵ_{nn}

4. Побічне випромінювання ДЗ попадає в побічний канал прийому РЗ (випадок ПП) (рис. 9.5, в). В цьому випадку для урахування перекриття по частоті смуга ДЗ повинна бути відсунена відносно смуги РЗ на 1 – 2 декади. При відсутності перекриття до верхньої

лівої частини відповідного квадрату табл. 9.3 записується поправка -120 дБ, а в нижню праву записуються дані з табл. 9.2 з урахуванням поправки (-120 дБ).

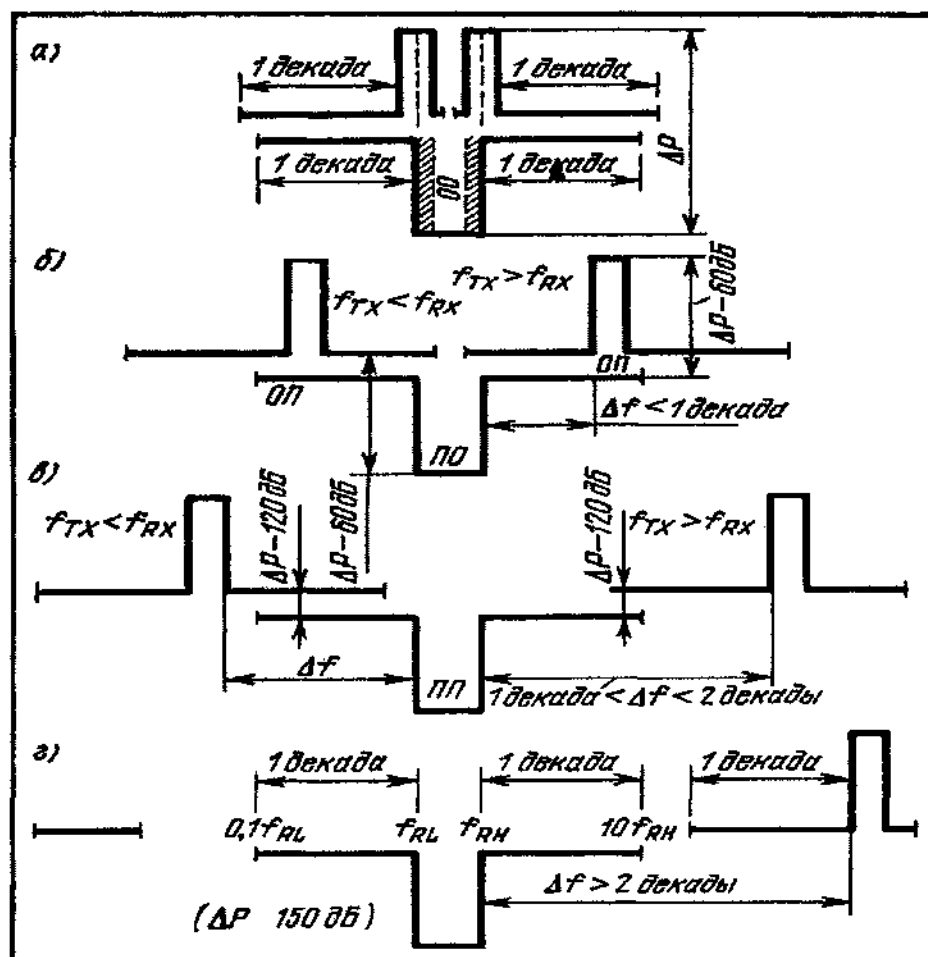


Рис. 9.5. П'ять ситуацій при відборі пар ДЗ – РЗ по амплітуді:
а) – ситуація 1 (ОО); б) – ситуація 2 (ОП) і 3 (ПО); в) – ситуація 4 (ПП);
г) – ситуація 5 f_{RL} (f_{RH}) – нижня (верхня) частота настройки приймача

5. Завади, які випромінюють джерела потужних полів, електромагнітних імпульсів та ін. (рис. 9.5, з). Якщо при цьому смуги частот ДЗ і РЗ зміщені одна відносно одної більше, чим на 2 декади, то в табл. 9.3 вноситься поправка (-150 дБ).

В результаті отримуємо матрицю поправок і результуючий рівень НЕМЗ в децибелах, де:

$$\theta_{nn} = a_{nn} - x, \quad (9.2)$$

де $x = 0$, або 60, або 120, або 150 дБ, в залежності від комбінацій (рис. 9.5).

Відбір по амплітуді дозволить зменшити кількість можливих пар ДЗ – РЗ. При цьому також будуть зменшені рівні завад для пар, які залишилися.

Відбір по частоті [5]. Наступним етапом в процесі відбору є подальше зменшення пар ДЗ – РЗ з урахуванням двох можливих випадків:

1) Розбіжність між ДЗ і РЗ відсутня (їх смуги суттєво перекриваються);

2) Розбіжність між ДЗ і РЗ значна, і тому в смугу РЗ попадає невелика частина потужності, яка випромінюється ДЗ.

При відборі пар ДЗ – РЗ по частоті складається матриця табл. 9.4.

Таблиця 9.4

Поправка і сумарний рівень НЕМЗ, дБ

Можливі РЗ	Можливі ДЗ					
	ДЗ – 1	ДЗ – 2	ДЗ – 3	ДЗ – 4	...	ДЗ – N
РЗ – 1	$-Y$ c_{11}	$-Y$ c_{12}	$-Y$ c_{13}	$-Y$ c_{14}	...	$-Y$ c_{1n}
РЗ – 2	$-Y$ c_{21}	$-Y$ c_{22}	$-Y$ c_{23}	$-Y$ c_{24}	...	$-Y$ c_{2n}
РЗ – 3	$-Y$ c_{31}	$-Y$ c_{32}	$-Y$ c_{33}	$-Y$ c_{34}	...	$-Y$ c_{3n}
...	...	...	...	...	...	...
РЗ – N	$-Y$ c_{n1}	$-Y$ c_{n2}	$-Y$ c_{n3}	$-Y$ c_{n4}	...	$-Y$ c_{nn}

В випадку 1 смуга частот РЗ може бути:

- більша смуги ДЗ або дорівнює їй ($B_R = B_T$); РЗ приймає всю потужність, яка випромінюється і поправку вносити не потрібно;

- менша смуги ДЗ ($B_R < B_T$); РЗ сприймає тільки частину потужності, яка випромінюється, що враховується поправкою по смузі. Ця поправка для $\Delta f = 0$ залежить від співвідношення смуг:

$$Y(\Delta f = 0) = k \lg(B_R/B_T), \text{ дБ} \quad (9.3)$$

де B_R і B_T – смуги частот РЗ і ДЗ по рівню 3 дБ, Гц;

k – постійна для цієї пари ДЗ – РЗ ([26, 29], наприклад $k = 10$ для шумоподібних (некогерентних) випромінювань, $k = 20$ для імпульсних сигналів або перехідних процесів (когерентних випромінювань)).

Отримані результати поправок (Y) заносяться до табл. 9.4 в верхню частину відповідного квадрату, а до нижньої частини того ж квадрату записується рівень завади ($c_{\text{нм}}$) з урахуванням поправки. Відбір по частоті дозволяє убрати ще декілька пар ДЗ – РЗ, а для тих, що залишились, зменшити рівень завад.

9.2.6. Врахування втрат енергії при поширенні ненавмисних електромагнітних завад [26, 29] (перехідного загасання). На попередніх етапах відбору не враховувався вплив просторової ізоляції для відібраних пар ДЗ – РЗ. При цьому передбачалось, що перехідне загасання між ДЗ і РЗ відсутнє, а це не відповідає дійсності (втрати при розповсюдженні НЕМЗ для пари паралельних дротів [27]). На цьому етапі з початку визначають просторове розташування пар ДЗ – РЗ, а також розташування стін, блоків, відсіків, перегородок, монтажних жмутів, кабелів та ін. Потім виявляють шляхи розповсюдження НЕМЗ для кожної з пар, які залишились. Поле випромінювання завади може бути ближнім і дальнім. В процесі відбору враховуються також і дальні поля, які в меншій мірі схильні до зміни.

Після визначення величин втрат проводяться розрахунки рівнів завад (вноситься поправка величини втрати) для кожної пари ДЗ – РЗ. На підставі проведеного відбору і розрахунків робиться висновок щодо очікування від конкретної пари електромагнітної несутимності (чи перевищує рівень завад допустимий). Ці розрахунки та висновки по ним являються початковими даними для наступного етапу методики оцінки ЕМС.

Формули для врахування втрат при поширенні НЕМЗ.

$$20 \lg \left(\frac{\lambda_p}{4\pi h_B} \right), \quad (9.4)$$

$$10 \lg \left(\frac{S_p}{4\pi h_B^2} \right) + kH, \quad (9.5)$$

$$10 \lg \left(\frac{l_p \omega_p}{4 \pi h_B^2} \right), \quad (9.6)$$

де λ_p – довжина хвилі, яка відповідає найвищій частоті прийому рецептору;

h_B – відстань від випромінювача (антени, блоку або проводів);

S_p – площа поверхні блоку РЗ, яка повернута до РЗ (антени, блоку або проводів);

H – мінімальна ефективність екранування металевих блоку, дБ, $H = 10$ або 40 дБ при впливу магнітного і електричного поля (або електромагнітного) відповідно;

$k = 2$ при зв'язку між металевими блоками, $k = 1$ якщо випромінювач не являється блоком;

l_p – довжина кабелю (проводу), який являється РЗ;

ω_p – відношення вихідних і вхідних проводів, які являються РЗ.

Таблиця 9.5

Втрати при розповсюдженні ЕМЗ для пари паралельних проводів ($R = 50$ Ом)

Втрати V , дБ		Частота f , Гц												
		$3 \cdot 10^2$	10^3	$3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	10^5	$3 \cdot 10^5$	10^6	$3 \cdot 10^6$	10^7	$3 \cdot 10^7$	10^8	$3 \cdot 10^8$
Без екрану	I	80	68	58	48	39	30	21	12	8	7	7	7	7
	II	93	82	72	62	52	43	34	26	18	11	8	7	7
	III	0	89	80	69	60	50	41	32	26	20	17	13	12
Один провід екранований	I	80	68	58	48	39	30	21	12	8	7	7	7	7
	II	93	82	74	71	70	70	70	70	70	68	56	46	42
	III	0	89	80	69	60	50	41	32	26	20	17	13	12
Проводи екрановані	I	80	68	58	48	39	30	21	12	8	7	7	7	7
	II	93	82	74	78	85	95	102	115	120	118	110	74	70
	III	0	89	80	69	60	50	41	32	26	20	17	13	12

Формула (9.4) справедлива для визначення втрат між такими парами РЗ – ДЗ, як антена – антена, антена – блок, антена – провід; формула (9.5) – блок – антена, блок – блок, блок – провід; формула (9.6) – провід – антена, провід – блок. Для РЗ – ДЗ, провід – провід втрати енергії НЕМЗ можна визначити по табл. 9.5.

В табл. 9.5 приведені дані втрат потужності ЕМЗ при їх поширенні для пари паралельних проводів в децибелах [26, 27],

де I- $l=10$ м, $d=1$ см або $l=1$ м, $d=1$ мм;

II- $l=2,2$ м, $d=1$ см;

III- $l=1$ м, $d=1$ см або $l=0,1$ м, $d=1$ мм; для інших l, d, R III справедлива з врахуванням поправки $-20 \lg (50 l / dR)$.

Врахування втрат при розповсюдженні ЕМЗ дозволяють зменшити кількість імовірних пар ДЗ – РЗ до найменшого значення.

У підрозділу 9.4 приведений приклади аналізу та оцінки ЕМС елементів системи електрообладнання автомобіля Lexus GS450h у відповідності до представленої методики.

9.3. Визначення параметрів електромагнітних завад від провідника

Крім розгляданої методики оцінки ЕМО в автомобілі, далі пропонується визначення основних параметрів наведених електромагнітних завад і через електрорушійну силу (ЕРС). Це дає змогу провести електромагнітну оцінку з урахуванням реальних геометричних розмірів провідників. Представимо визначення ЕРС, через розрахунок індукції провідника, в якому наводиться НЕМЗ.

З метою спрощення розрахунку індуктивності “товстого” провідника (який має кінцевий розмір) будимо вважати, що контур має прямокутну форму (рис. 9.6) довжиною $l+m$ і висотою $m-r$. Індуктивністю іншої частини контуру можна зневажати, маючи на увазі, що найбільшого значення магнітне поле досягає у поверхні “товстого” провідника. Струм $i(t)$ в проміжку часу τ змінюється лінійно (рис. 9.7).

У відповідності з законом повного струму значення напруженості магнітного поля H на відстані Y від центру товстого провідника може бути знайдено з рівняння:

$$i(t)=H2\pi y, \quad (9.7)$$

де $i(t)$ – струм, який протікає по “товстому” провіднику;

H – напруженість магнітного поля;

y – відстань від центру “товстого” провідника до розгляданої точки.

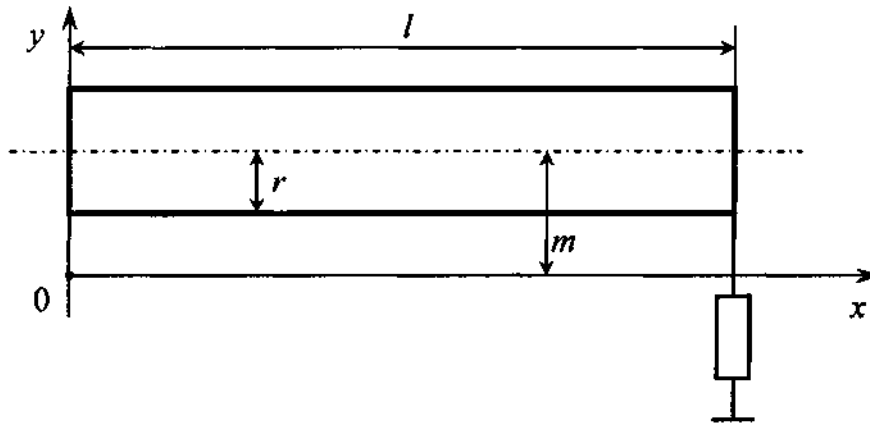


Рис. 9.6. До пояснення розрахунку “товстого” провідника

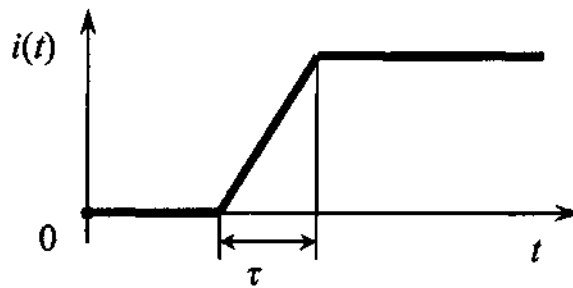


Рис. 9.7. Закон зміни струму в “товстому” провіднику в проміжки часу τ

Тоді магнітне поле H знаходиться: $H = \frac{i(t)}{2\pi y}$, а індукція в розгляданій точці:

$$B = \mu_0 H, \quad (9.8)$$

А значить потік зачеплення Φ з контуром буде визначатися:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \int_r^{l+m} \int_0^m \frac{dy}{y} dx = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} (l+m) \int_r^m \frac{dy}{y} = \frac{\mu_0 i(t)(l+m)}{2\pi} \ln y \Big|_r^m = \\ &= \frac{\mu_0 i(t)(l+m)}{2\pi} (\ln m - \ln r) = \frac{\mu_0 i(t)(l+m)}{2\pi} \ln \frac{m}{r}; \end{aligned} \quad (8.9)$$

Визначимо ЕРС завади:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{\mu_0 (l+m)}{2\pi} \ln \frac{m}{r} \cdot \frac{di(t)}{dt};$$

$$\begin{aligned}\frac{di(t)}{dt} &= \frac{I}{\tau}; \quad e = -\frac{\mu_0(l+m)I}{2\pi} \ln \frac{m}{r} \cdot \frac{di(t)}{dt}; \\ e &= -L \frac{di(t)}{dt}; \quad L = \frac{e}{\frac{I}{\tau}} = \frac{e\tau}{I}; \\ e &= -\frac{\mu_0(l+m)}{2\pi} \ln \frac{m}{r},\end{aligned}\tag{9.10}$$

де μ_0 – магнітна стала;

m – відстань від землі до центральної осі проводу;

r – радіус проводу;

l – довжина проводу;

$i(t)$ – струм, який протікає по товстому провіднику;

y – відстань від центру товстого провідника до розгляданої точки;

Φ – потік зачеплення;

τ – проміжок часу;

e – електрорушійна сила;

L – індукція товстого провідника.

Запропонована методика оцінки ЕМЗ передбачає, що всі РЕЗ автомобіля працюють в сталому режимі. Але ЕМЗ утворюються і при різних перехідних імпульсних процесах, які діють або випадково, або у відповідності з алгоритмом роботи даної апаратури.

Частотний діапазон таких завад може бути відносно вузьким (менше одної октави) або частіше широким (багато октав). Рівень їх залежить від частоти, амплітуди і тривалості імпульсу, а також від крутизни його фронту і зрізу.

В табл. 9.6 приведені типові значення параметрів імпульсних завад, які виникають при перехідних процесах в різних джерелах.

Таблиця 9.6

Параметри імпульсних завад

Джерело завад	Частота повторення, с ⁻¹	Тривалість імпульсу, с
Люмінесцентні лампи	10 ²	10 ⁻⁷
Системи запалення: на холостому ходу в робочому режимі	10 ² 10 ³	10 ⁻⁸
Реле і соленоїди зви- чайні	10 ³	10 ⁻⁷
Колекторні двигуни	10 ³	10 ⁻⁸
Вмикачі	10 ⁻⁴ 10 ⁻³	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷

9.4. Приклади оцінки ЕМС елементів системи електрообладнання гібридного автомобіля

У зв'язку з тим, що всі лінії живлення, сигналізації та управління прокладені в одному загальному жмуті, то виникає необхідність розрахувати їх електромагнітну сумісність.

Нижче приведені необхідні розрахунки з урахуванням номінальних електротехнічних характеристик, як джерела завади, так і її рецептора [26 - 32].

Розрахунок наведеної напруги в колі через ємкісний зв'язок (для неекранованого провідника)

Модель ємнісного зв'язку між двома провідниками. Один провід, позначено 1 на рис. 9.8 є мережа, яка впливає і другий, позначено 2 на рис. 9.8 – мережа, яка підпадає під вплив.

На моделі і її схемі заміщення позначено:

$$C_{12} = \frac{\pi \epsilon'}{\ln\left(\frac{d}{a}\right)}; \quad (9.11)$$

де C_{12} – паразитна ємність між провідниками 1 і 2;

ε – діелектрична проникливість середовища, яка навколо провідників;

C_1 і C_2 – ємності провідників на «землю»;

Z_H – сумарний опір проводу 2 на землю, який не є паразитним елементом, а представляє собою робочий опір схеми.

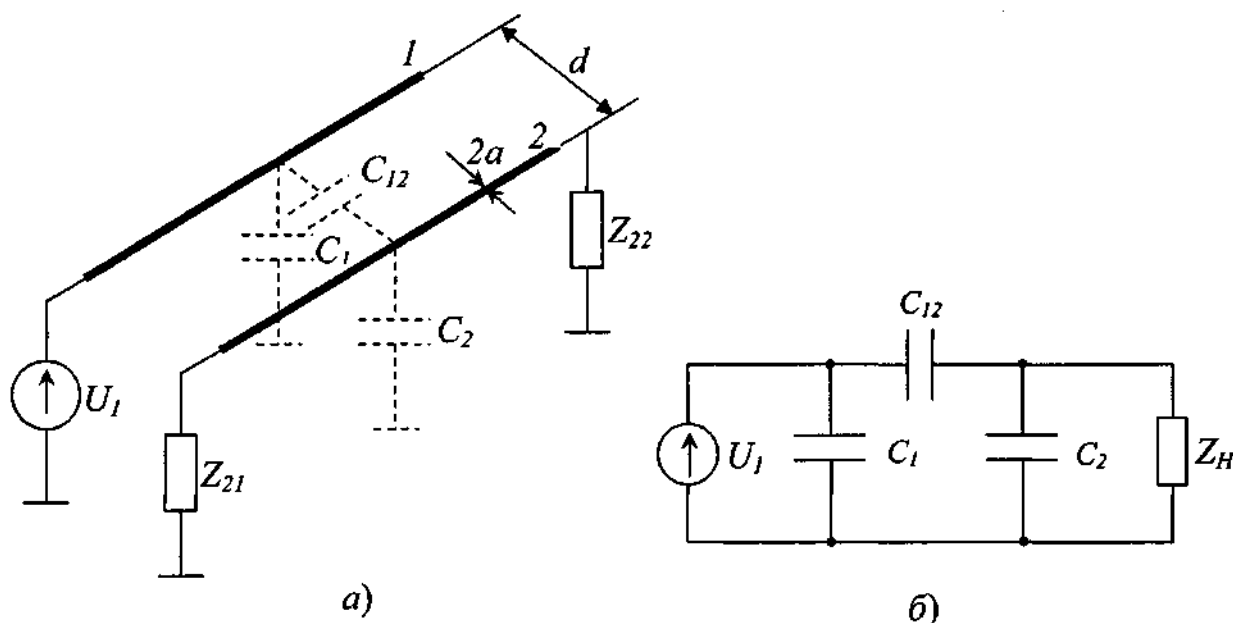


Рис. 9.8. Ємнісний зв'язок між провідниками:

а) – фізична модель;

б) – еквівалентна схема заміщення.

Якщо врахувати, що ємністю C_1 можна зневажати, так як вона не впливає на електричний зв'язок провідників в виду того, що джерела завад з'єднуються в паралель, то напругу відносно «землі» мережі 2, яка підпадає під вплив, можна вивести з рівняння чотириполюсників.

Таким чином величини U_1 і U_2 зв'язані виразом:

$$U_2 = U_1 \frac{j\omega \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2}}{j\omega + \frac{1}{Z_H(C_{12} + C_2)}} \quad (9.12)$$

Для випадку низькочастотного впливу, коли формула (9.12) приймає вигляд:

$$U_2 = U_1 j\omega Z_H C_{12}. \quad (9.13)$$

Якщо ємнісний зв'язок здійснюється по високій частоті, коли $Z_H \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_2)}$, тоді:

$$U_2 = U_1 \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2}. \quad (9.14)$$

Розрахунок напруги наведеної електромагнітної завади від мережі живлення з номінальною напругою 650 В на інші кола.

Початкові дані:

Відстань провідників від мережі живлення $d = 0,005$ м; радіус дроту $a = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м; сумарний опір дроту на землю $Z_H = 100$ Ом; напруга мережі живлення дорівнює $U_{ж} = 650$ В змінного струму, частота (згідно режимів роботи): $f_1 = 17$ Гц, $f_2 = 33$ Гц, $f_3 = 50$ Гц, $f_4 = 94$ Гц.

Знайдемо паразитарну ємність між провідниками по [33], де $\epsilon = \epsilon \cdot \epsilon_0$, ϵ – діелектрична проникливість середовища (для повітря дорівнює 1). Тоді:

$$\epsilon = 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Знайдемо паразитарну ємність між провідниками згідно з виразом (9.11):

$$C_{12} = \frac{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{0,005}{0,15 \cdot 10^{-3}}\right)} = 7,925 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Оскільки низькочастотний випадок [4], тоді кутова частота для вибраних режимів роботи (табл. 9.7):

$$\omega = 2\pi f; \quad (9.15)$$

Таблиця 9.7

Визначення кутової частоти

ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	ω_4 , рад/с
106,76	207,24	314	590,32

Визначимо наведену напругу в колі 2 (рис. 9.8). Згідно з виразом (6.13) для вибраних режимів роботи: $U_{\&} = U_{\&_{ж}} j\omega Z_H C_{12}$, табл. 9.8.

Таблиця 9.8

Визначення наведеної напруги

U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	U_4 , В
5,49938E-05	0,000106753	0,000161747	0,000304083

Переведемо одержаний результат наведення напруги в децибели (табл. 9.9):

$$\mathcal{G}_U = 20 \lg U_{\text{мкВ}} ; \quad (9.16)$$

Таблиця 9.9

Визначення рівня завад в децибелах

$\mathcal{G}_1$, дБ	$\mathcal{G}_2$, дБ	$\mathcal{G}_3$, дБ	$\mathcal{G}_4$, дБ
34,80627653	40,5675769	44,17669819	49,65985518

Висновок: Розрахунки указують на те, що допустимий рівень [31 - 33] не втримується. Лише з початку розгону автомобіля рівень завад має допустимі значення (до 40 дБ).

Розрахунок наведеної напруги в колі через індуктивний зв'язок

В процесі протікання струму завади в мережі, яка впливає на інші кола, навколо провідника 1 (рис. 9.9) буде існувати магнітне поле, яке охоплює мережу 2 і наводить в ній індукційований струм (струм наводки). Струм наводки може бути визначений по формулі взаємно зв'язаних електричних контурів:

$$i_2(t) = - \frac{M_{12}}{Z_{21} + Z_{22}} \cdot \frac{di_1(t)}{dt}, \quad (9.17)$$

де M_{12} – взаємна індуктивність (коефіцієнт взаємної індукції), між провідниками 1 і 2, Гн;

$i_1(t)$ – струм в мережі в функції від часу, А;

Z_{21} і Z_{22} – опір мережі, яка підпадає під вплив, Ом.

Визначити взаємну індуктивність можна у вигляді [4]:

$$M_{12} = \frac{\mu l}{2\pi \ln\left(\frac{l}{d}\right)}, \quad (9.18)$$

де μ – магнітна пронизливість простору, який навколо провідника, Гн/м.

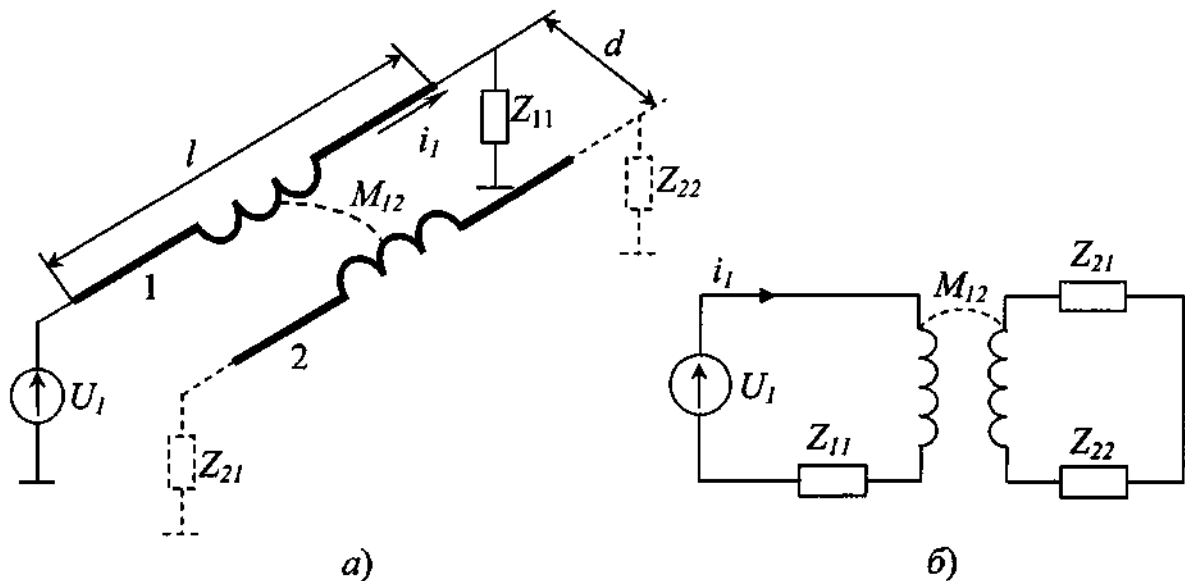


Рис. 9.9. Магнітний зв'язок між провідниками:

- а) – фізична модель;
б) – еквівалентна схема заміщення.

Якщо прийняти, що опори Z_{21} і Z_{22} мають активний характер, то форма наведеного струму в мережі 2 буде відповідати похідної від форми струму в мережі 1.

Коли провідник 1 з струмом завади $i_1(t)$ здійснює вплив на контур «провід – земля» площиною $A=hl$, причому магнітне поле проводу 1 перпендикулярне площині цього контуру (рис. 9.10), то формулу (9.17) можна переписати у вигляді:

$$i_2(t) = \frac{\mu l}{2\pi(Z_{21} + Z_{22})} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (9.19)$$

З формули (9.19) видно, що якщо опори Z_{21} і Z_{22} прийняти активними, то наведений в мережі 2 струм по формі буде також відповідати похідної по часу від струму завади в мережі 1.

Якщо врахувати, що згідно з символічним методом $\frac{di(t)}{dt} = j\omega I$, тоді вираз (9.19) прийме вид:

$$\dot{I} = \frac{\mu l}{2\pi(Z_{21} + Z_{22})} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) j\omega I. \quad (9.20)$$

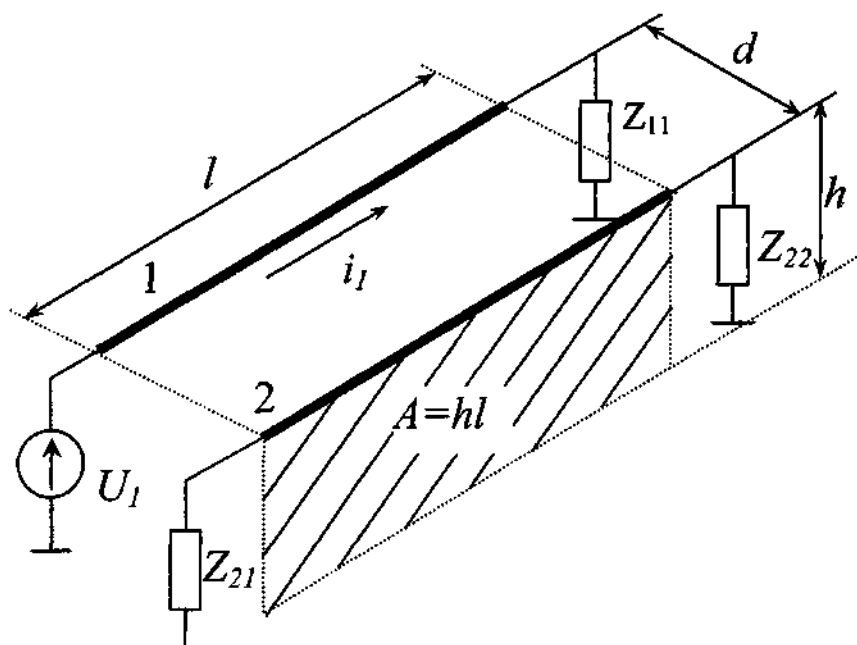


Рис. 9.10. Магнітний зв'язок між проводами з струмом завади і контуром РЕЗ

Розрахуємо струм наведеної ЕМЗ, який наводиться від мережі живлення $U_1 = 288/650$ В змінного струму, частота (згідно режимів роботи): $f_1 = 17$ Гц, $f_2 = 33$ Гц, $f_3 = 50$ Гц, $f_4 = 94$ Гц, на кола управління та сигналізації враховуючи магнітний зв'язок між провідниками.

Початкові дані:

Відстань провідників від мережі живлення $d = 0,3$ м; опір провідників на землю $Z_{21} = Z_{22} = 50$ Ом; струм мережі живлення дорівнює $I = 76,9$ А при номінальному навантаженні; відстань від «землі» до провідників $h = 0,005$ м; довжина провідників $l = 0,8$ м; кутова частота для вибраних режимів роботи згідно з виразом (9.15) приведена у табл. 9.9.

Розрахуємо величину струму згідно з виразом (9.20) для вибраних режимів роботи, при відповідній кутовій частоті, табл. 9.10:

Таблиця 9.10

Визначення наведеного струму

I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A
0,021414	0,041568	0,06298253	0,118407152

Розрахуємо наведену напругу від ЕМЗ для вибраних режимів роботи [28] (табл. 9.11):

$$U_{12} = \sqrt{Z_1 + Z_2}. \quad (9.21)$$

Таблиця 9.11

Визначення наведеної напруги

U_1, B	U_2, B	U_3, B	U_4, B
2,141405949	4,156846843	6,298252792	11,84071525

Переведемо одержаний результат наведення напруги в децибели у відповідності з виразом (9.16), табл. 9.12:

Таблиця 9.12

Визначення рівня завад в децибелах

$\mathcal{G}_1, дБ$	$\mathcal{G}_2, дБ$	$\mathcal{G}_3, дБ$	$\mathcal{G}_4, дБ$
126,6139801	132,3752805	135,9844018	141,4675587

Висновок: Розрахунки указують на те, що допустимий рівень [31 - 33] не тільки не витримується, а й перевищує у декілька разів витримується.

Розрахунок впливу електричної складової електромагнітного поля завади

Для розрахунку впливу електричної складової електромагнітного поля завади, яка наведена випромінювачем для симетричної мережі звернемося до [28, 29], рис. 9.11.

Якщо врахувати, що провідність Y_{12} в основному визначається ємністю між провідниками, то нескладно визначити повний струм мережі, який створюється еквівалентним джерелом [29],

$$i(t) = 2C_{12} l h \frac{dE(t)}{dt}, \quad (9.22)$$

де $C_{12} = \pi \varepsilon_0 \ln(2h/a)$ – внутрішня ємність двопровідної лінії на одиницю її довжини, Ф/м;

$2h$ – відстань між проводами, м;

a – радіус провідника, м;

l – довжина провідника, м;

$E(t)$ – напруженість електричного поля завади, В/м.

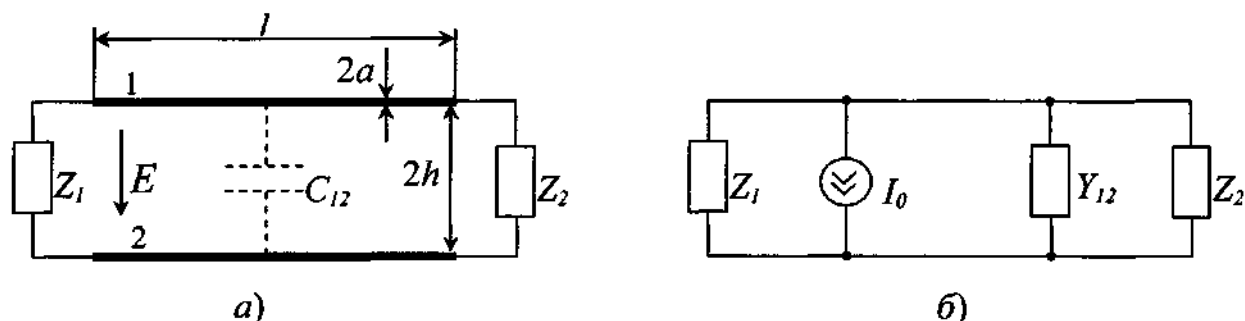


Рис. 9.11. Вплив електричного поля на провідник:

а) – фізична модель;

б) – еквівалентна схема заміщення

У зв'язку з тим, що електротехнічні засоби в автомобілі працюють на частотах живлення (згідно режимів роботи): $f_1 = 17$ Гц, $f_2 = 33$ Гц, $f_3 = 50$ Гц, $f_4 = 94$ Гц. або на постійній напрузі знайдемо відповідну їм довжину хвилі (табл. 9.13):

$$\lambda = \frac{c}{f}, \text{ м.} \quad (9.23)$$

де λ – довжина хвилі, м;

c – швидкість світла ($c = 3 \cdot 10^8$) м/с;

f – частота.

Таблиця 9.13

Визначення довжини хвилі

$\lambda_1, \text{ м}$	$\lambda_2, \text{ м}$	$\lambda_3, \text{ м}$	$\lambda_4, \text{ м}$
17647059	9090909	6000000	3191489

Середня відстань в між колами впливу та іншим електроустановкою автомобіля, складає $r = 2$ м.

$$\text{Отже } r < \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Це говорить про те, що вся електрообладнання автомобіля, знаходиться в ближній зоні випромінювання (див рис. 9.1). Для визначення напруженості електричного поля скористаємося співвідношеннями з [25, 29]:

$$E = \left(\frac{I \cdot l_0}{2\pi\epsilon\omega \cdot r^3} \right) \cdot \cos\varphi, \quad (9.24)$$

де I – струм в проводі антени, А;

l_0 – довжина провідника, м;

$\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$, де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – електрична постійна, ϵ' – відносна діелектрична проникливість повітря, Ф/м;

ω – кутова частота, Рад/с;

r – відстань від випромінювача до міста спостереження, м;

φ – кут орієнтації вектору напруженості по відношенню до контуру, який розглядається.

Візьмемо випадок, коли, $\varphi = 45^\circ$, $I = 76.9$ А, $l_0 = 0,8$ м, $r = 2$ м, В результаті отримаємо (табл. 9.14):

Таблиця 9.14

Визначення напруженості електричного поля заводи

E_1 , В/м	E_2 , В/м	E_3 , В/м	E_4 , В/м
681037064	350837275	231552602	123166277

Переведемо одержаний результат напруженості електричного поля заводи в децибели у відповідності з виразом (9.25), табл. 9.15:

$$\mathcal{G}_E = 20 \lg E_{\text{мкВ/м}}, \quad (9.25)$$

Таблиця 9.15

Визначення рівня завод в децибелах

$\mathcal{G}_{E1}$, дБ	$\mathcal{G}_{E2}$, дБ	$\mathcal{G}_{E3}$, дБ	$\mathcal{G}_{E4}$, дБ
296,663415	290,902115	287,29299	281,80984

Висновок: Знайдена напруженість електричного поля, яка створюється електротехнічними засобами силового електроустаткування автомобіля, не задовольняє вимогам нормативних документів [31]. Це свідчить про те, що умови ЕМС по даному параметру невиконані.

Розрахунок впливу магнітної складової електромагнітного поля завади

Для розрахунку впливу магнітної складової електромагнітного поля завади, яка наведена випромінювачем, звернемося до еквівалентної схеми, яка приведена на рис. 9.12.

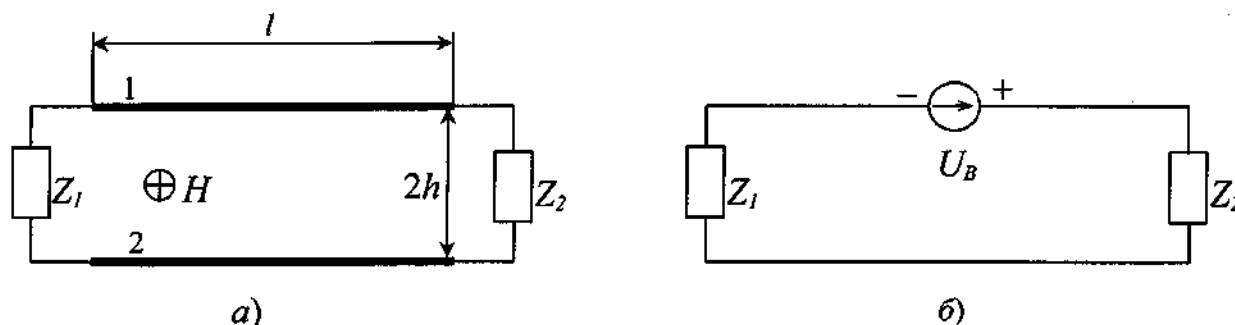


Рис. 9.12. Вплив магнітного поля на провідник:

- а) – фізична модель;
б) – еквівалентна схема заміщення.

Під впливом ЕРС в контурі протікає струм:

$$i(t) = \frac{2\mu_0 l h}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{dH(t)}{dt}, \quad (9.26)$$

де Z_1 і Z_2 – опір навантаження лінії, Ом;

l – довжина провідника, м;

$2h$ – відстань між проводами, м;

$H(t)$ – напруженість магнітного поля завади в функції часу, А/м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Оскільки враховуючи, що згідно з символічним методом $\frac{dH(t)}{dt} = j\omega H$, то формула (9.26) буде мати вигляд:

$$I = \frac{2\mu_0 lh}{Z_1 + Z_2} \cdot j\omega H. \quad (9.27)$$

Раніше було визначено, що електрообладнання автомобіля знаходиться у ближній зоні випромінювання (рис. 9.1 та табл. 9.13), тому для розрахунку напруженості магнітного поля завади використаємо співвідношення з [25, 29].

$$H = \left(\frac{I \cdot l_0}{4\pi\omega \cdot r^2} \right) \cdot \cos \varphi. \quad (9.28)$$

Візьмемо випадок, коли, $\varphi = 45^\circ$, $I = 76.9 \text{ А}$, $l_0 = 0,8 \text{ м}$, $r = 2 \text{ м}$, В результаті отримаємо (табл. 9.16):

Таблиця 9.16

Визначення напруженості магнітного поля завади

$H_1, \text{ А/м}$	$H_2, \text{ А/м}$	$H_3, \text{ А/м}$	$H_4, \text{ А/м}$
0,00602718	0,00310491	0,0020492	0,00109

Перерахунок отриманого результату напруженості магнітного поля завади в децибели у відповідності з виразом (9.29), табл. 9.17:

$$\mathcal{H} = 20 \lg H_{\text{мкА/м}} \quad (9.29)$$

Таблиця 9.17

Визначення рівня завад в децибелах

$\mathcal{H}_1, \text{ дБ}$	$\mathcal{H}_2, \text{ дБ}$	$\mathcal{H}_3, \text{ дБ}$	$\mathcal{H}_4, \text{ дБ}$
75,6022807	69,8409804	66,231859	60,748702

Висновок: Знайдена напруженість магнітного поля, яка створюється електротехнічними засобами силового електроустаткування автомобіля задовольняє вимогам нормативних документів [31 - 33]. Це свідчить про те, що вимоги ЕМС по даному параметру виконані.

Література

1. Туренко А.Н., Пятак А.И., Кудрявцев И.Н. и др. Экологически чистый криогенный транспорт: современное состояние проблемы // Вестник ХГАДТУ / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХГАДТУ. – 2000. – Вып. № 12-13. – С. 42-47.
2. Богомоллов В.А., Кудрявцев И.Н., Пятак А.И. и др. Развитие новейших криогенных технологий для перспективных видов автомобильного транспорта // Автомобильный транспорт. Вып. № 12 – Харьков: РИО ХНАДУ. – 2004. – С. 67-69.
3. Смирнов О.П. Тенденція створення екологічно чистого транспортного засобу // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2005. – Вып. № 17. – С. 103-105.
4. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долгунов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: Підручник. – К.: Арістей, 2004. – 476 с.
5. Розанов Ю.К. Электронные устройства электромеханических систем / Ю.К. Розанов, Е.М. Соколова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 272 с.
6. Смирнов О.П. Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля // Вестник ХНАДУ / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2007. – Вып. 37. – С. 131-133.
7. Смирнов О.П., Калмиков В.І., Боженков В.С., Быков А.М., Воробьев Д.А. Исследование функциональных возможностей вентильных машин в электроприводе автомобилей. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник / АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». – Горлівка, 2007. № 1(4), С. 129-132.
8. Смирнов О.П., Калмиков В.І. Обоснование использования вентильных электрических машин в гибридных силовых установках автомобилей // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2007. – Вып. № 21. – С. 31-33.
9. [www. AutoZine Technical School - Engine.htm](http://www.AutoZineTechnicalSchool-Engine.htm)
10. Смирнов О.П. Аналіз схемних рішень побудови автомобіля з гібридною енергетичною установкою. // Вестник ХНАДУ / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. - Вып. № 32 – 2006. – С. 41-43.
11. Смирнов О.П., Калмиков В.І., Характерні режими роботи гібридної силової установки автомобіля // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2006. – Вып. 18. – С. 13-15.

12. Бажинов А.В., Смирнов О.П. Концепция создания экологически чистого автомобиля. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. Луганськ, 2006. - №7, С. 15-19.

13. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.

14. Смирнов О.П. Теоретические основы повышения топливной экономичности автомобиля за счет использования гибридной энергетической установки. Материалы доклада в техническом университете г. Варна (Болгария) на XII научно-технической конференции с международным участием на тему: «Транспорт, экология – устойчивое развитие» 18-20 мая 2006 года, Варна, 2006. – с. 80-85.

15. Смирнов О.П., Боженков В.С. Математичне моделювання тягово-швидкісних характеристик гібридного автомобіля // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2006. – Вып. № 2(8). – С. 46-49.

16. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.

17. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

18. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер.с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

19. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егунова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.

20. Дорф Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р.Бишоп; Пер. с англ.. Б.И.Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004.-832 с.

21. Власов К.П. Теория автоматического управления. Х.: Изд-во Гуманитарный центр, 2007, 526 с.

22. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем / Учеб.пособие для вузов. – СПб.: БХВ - Петербург, 2004. -640 с.

23. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.

24. Автомобильный справочник. Пер.с англ. Первое русское издание. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.

25. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 250 с.

26. Гнатов А.В. Параметри електромагнітних завад, як предмет діагностування Системи обробки інформації // Зб. наук. пр. ХУПС.– Х.: ХУПС, 2007. – В.3(61). – С. 23 – 25.

27. Самойленко Б.Ф., Гнатов А.В., Гнатова Щ.В. Методика оцінки електромагнітних завад для комплексу радіотехнічних засобів // Вісник НТУ "ХП"– Х.: "ХП", 2003. – №7. – Т.3. – С. 40 – 44.

28. Гнатов А.В. Удосконалена методика оцінки електромагнітної сумісності для перспективної системи радіотехнічних засобів вузла зв'язку // Зб. наук. пр. ХВУ.– Х.: ХВУ, 2003. – В.4(47). – С. 194.

29. Гнатов А.В. Методика відбору пар джерело завад – рецептор завад з урахуванням втрат потужності завад при їх поширенні для комплексу електротехнічних засобів // Зб. наук. пр. ХВУ.– Х.: ХВУ, 2003. – В.3. – С.143 – 148.

30. Гнатов А.В. Математична модель корисних сигналів та завад на комплексі технічних засобів //Системи обробки інформації // Зб. наук. пр. ХУПС.– Х.: ХУПС, 2005. - В. 3(43). – С.175 – 183.

31. МЭК 61000-6-3-96 Совместимость технических средств электромагнитная. Помехозащита от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Нормы и методы испытаний.

32. МЭК 61000-6-1-97 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний.

33. Нормы 9-72 Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех.

Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В.

ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ

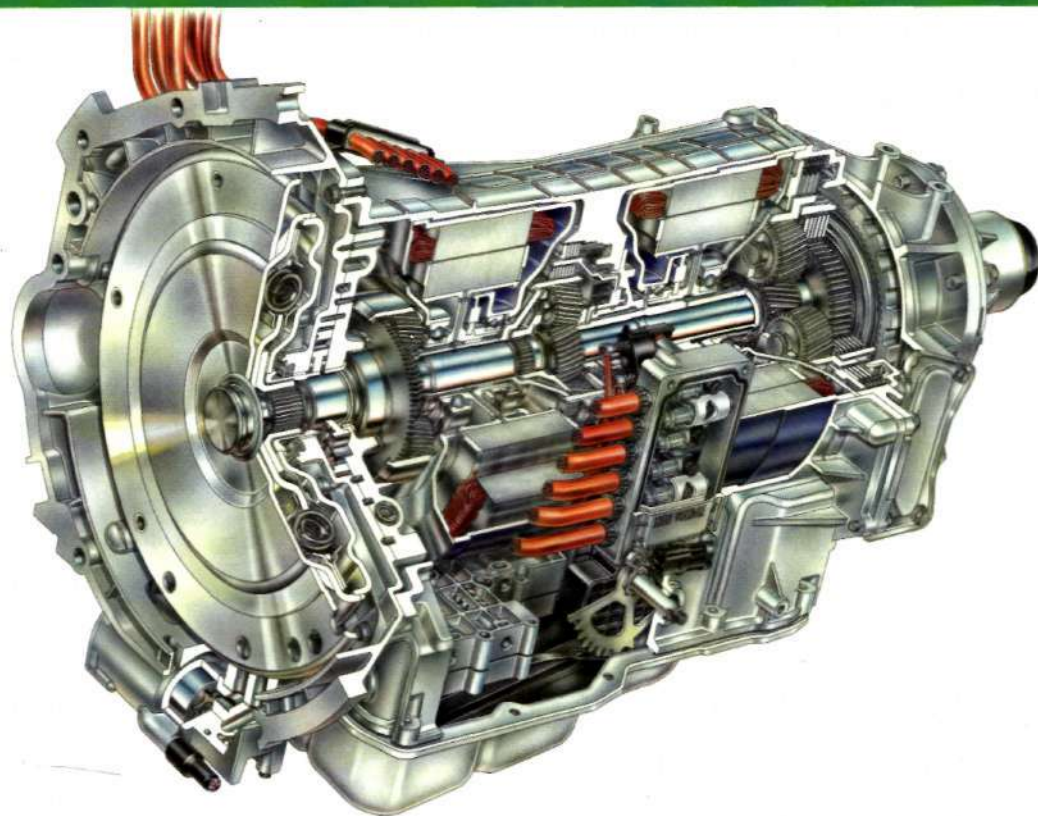
Підписано до друку 14.03.2008.

**Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк офсет.
Умов. друк. арк. 10,2 Наклад 1000 прим. Зам.№81**

**Виготовлено в друкарні ФОП Костинський А.В.
61024 м.Харків, вул. Лермонтовська,27**

Рассматриваются схемные решения и особенности построения автомобилей с гибридной силовой установкой, электрические системы и комплексы гибридного автомобиля.

Монография предназначена для научных работников, связанных с проектированием, эксплуатацией и ремонтом машин, докторантов и аспирантов, которые занимаются исследованием и разработкой современных экологически чистых транспортных средств, студентов автомобильного, механического, электрического и компьютерного профиля, а также может быть полезной для специалистов по продаже, ремонту и техническому обслуживанию автомобилей



Центр обслуживания
гибридных автомобилей
ООО "РЕАЛ"

Харьков, ул. Сумская 130-А
тел. (057) 704 22 21
hybrids@i.ua

HYBRID