ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНТЕГРОВАНИЙ КОМПЛЕКС З РОЗРОБЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

Автори роботи:

БАЖИНОВ Олексій Васильович, д.т.н., професор
БАТИГІН Юрій Вікторович, д.т.н., професор
ГНАТОВ Андрій Вікторович, д.т.н., доцент
ДВАДНЕНКО Володимир Якович, к.т.н., доцент
ЛЕВТЕРОВ Андрій Іванович, к.т.н., доцент
СМИРНОВ Олег Петрович, к.т.н., доцент
ТРОПІНА Альбіна Альбертівна, д.т.н., професор
БОГАЄВСЬКИЙ Олександр Борисович, д.т.н., професор
НІКОНОВ Олег Якович, д.т.н., професор

Харьков - 2015

Мета та завдання

Метою роботи є вирішення задач підвищення ефективності енергозберігаючих, екологічно чистих та інформаційних технологій на автомобільному транспорті за рахунок поліпшення його екологічної безпеки та паливної економічності.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано такі завдання:

- створено унікальний інтегрований науково-практичний комплекс з розроблення, експлуатації, обслуговування та ремонту гібридних автомобілів;
- розроблено концепцію створення екологічно чистих АТЗ з альтернативними силовими установками. Розроблені декілька варіантів гібридних автомобілів, що працюють у режимах: електромобіля, гібридного автомобіля, базового автомобіля, які пройшли випробування в дорожніх умовах експлуатації та показали високу економічність та екологічність;
- розроблено основи теорії керування енергетичними потоками для гібридної силової установки автомобіля та проведений формалізований опис потоків потужності при різних режимах роботи;
- розроблено основні положення концепції створення екологічно чистих автотранспортних засобів, яка враховує доцільність використання альтернативних силових установок та джерел енергії різноманітної природи (електричної, механічної, пневматичної та ін.);
- запропоновано та сформульовано основи наукового напрямку відновлення кузовних панелей автомобілів, які відрізняється від існуючих тим, що рихтування проводиться із зовнішнього боку кузовної панелі з використанням енергії імпульсних магнітних полів;
- запропоновано та сформульовані основи наукового напрямку теорії процесів горіння, стимульованих рівноважною та нерівноважною плазмою розрядів;
- розроблено концепцію системи інтелектуального управління гібридних силових установок на основі застосування методів математичного програмування і нейро-нечіткого управління;
- запропоновано схему електромобіля та гібридного автомобіля з мехатроним накопичувачем енергії та можливістю використання мотор-коліс.

Наукова новизна отриманих результатів

- вперше науково обґрунтовано напрямок створення економічних та екологічно чистих АТЗ, що, на відміну від відомих серійних електромобілів та гібридних автомобілів, може бути реалізований у сегменті Low Cost;
- вперше розроблено концепцію створення екологічно чистих легкових автомобілів на базі принципового нового типу гібридної силової установки, натурні випробування якої підтверджують високу екологічну та паливну ефективність в порівнянні з базовим автомобілем та з закордонними аналогами;
- вперше розроблені методи адаптації стратегії управління ГСУ до тяговошвидкісного режиму руху автомобіля на основі концепції нейромережевого і нейронечіткого управління – система інтелектуального управління автомобіля;
- вперше розроблено рекомендації з вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку акумуляторних батарей в залежності від швидкості, маси гібридного автомобіля і бажаної дальності пробігу на електричній тязі;
- вперше запропоновані та сформульовані основи наукового напрямку відновлення кузовних панелей автомобілів, які відрізняється від існуючих тим, що рихтування проводиться із зовнішнього боку кузовної панелі з використанням енергії імпульсних магнітних полів;
- вперше визначено принципи притягання тонкостінних металів, які основано на процесі дифузії магнітних полів у листовий метал для магнітно-імпульсних технологій ремонту кузовних панелей автомобілів;
- вперше визначено принципи та закономірності протікання електродинамічних процесів притягання тонкостінних металів при рихтуванні, які основано на силовій взаємодії електромагнітних полів з провідними середовищами в низькочастотному режимі;
- вдосконалено наукові основи розробки нових методів створення гібридних автомобілів та шляхів поліпшення економічних і екологічних показників АТЗ;
- вдосконалено синергетичний підхід щодо створення гібридних силових установок автомобілів та систему рекуперації гальмівної енергії автомобіля за рахунок застосування маховичного та конденсаторного накопичувачів енергії;
- вдосконалено метод силової взаємодії інструменту з листовим металом при зовнішньому безконтактному магнітно-імпульсному рихтуванні кузовних панелей, як з феромагнітних, так і з неферомагнітних металів, що відрізняється урахуванням зміни їх магнітної проникності;
- вдосконалено методи створення інструментів для зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування кузовних панелей автомобілів, які дозволяють враховувати індукційні явища при інтенсивній дифузії магнітних полів.

Напрями підвищення екологічної безпеки автомобілів і аналіз альтернативних джерел енергії

Напрями підвищення паливної економічності автомобілів

- Вдосконалення ДВЗ
- Альтернативні джерела енергії
- Гібридні автомобілі
- Електромобілі

Питома енергоємність сучасних накопичувачів енергії для транспорту

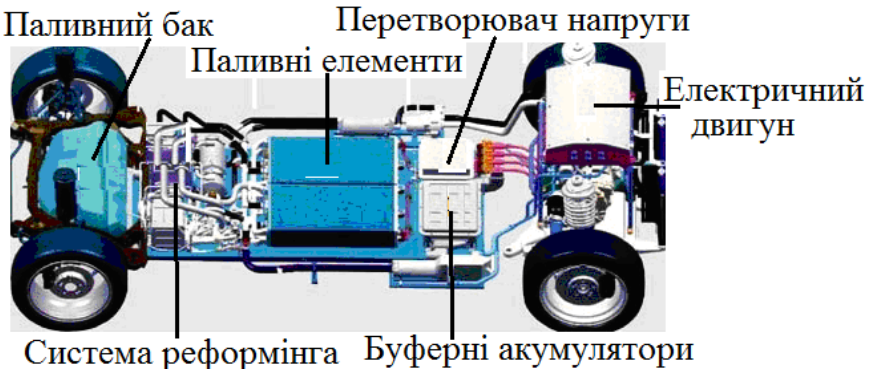
Джерело енергії	ККД, %	Питома енергоємність, кВт·год./кг	Питома енергоємність з урахуванням ККД, кВт·год./кг
Водень	50...60	38	20...23
Бензин	25...30	13...14	3,25...4,2
Свинцева-кислотна АКБ	50...60	0,025...0,04	0,0125...0,024
Нікель-метал-гідридна АКБ	70...80	0,06...0,08	0,042...0,064
Літій-іона АКБ	80...95	0,09...0,15	0,072...0,1425
Натрій-метал-хлорідні АКБ	80…90	0,08…0,12	0,064…0,108
Маховики різного типу	80...95	0,05...4,17	0,04...3,9615
Електричні іоністори	95...98	0,003...0,006	0,003...0,006

Порівняльний розрахунок вартості витрат на силові установки електромобіля та автомобіля з ДВЗ

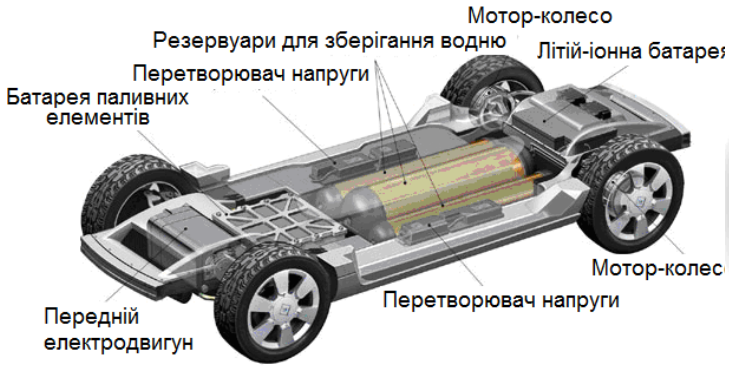
Структура витрат на силову установку електромобіля		Структура витрат на силову установку автомобіля з ДВЗ	
Елемент	Вартість, €	Елемент	Вартість, €
АКБ, 18 кВт·год.	9600	ДВЗ та система керування	1300
Електропривод	1500	КПП, трансмісія	400
Система заряду АКБ	200	Оптимізація CO_2	300
Зміна у конструкцію	4500		
Всього	15800	Всього	2000

Перспективні напрямки розвитку екологічно чистого автомобілебудування

Автомобілі з водневими паливними елементами



Компоновка перспективного автомобіля Honda FCX-V1



Структура автомобіля Chevy Sequel

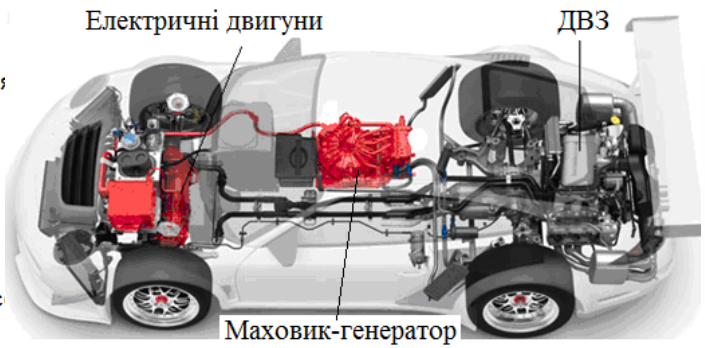
Автомобілі з маховічним накопичувачами енергії

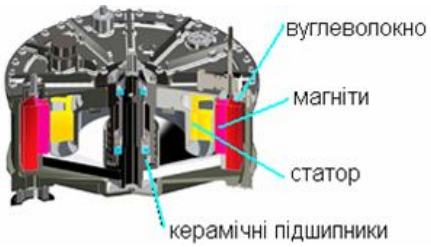
Кінетична енергія обертання, накопичена в обертовому тілі (маховику), Дж

$$E = \frac{J\omega^2}{2}$$

де $J = \frac{1}{2}mR^2$ – момент інерції маси щодо осі обертання маховика, кг·м2;

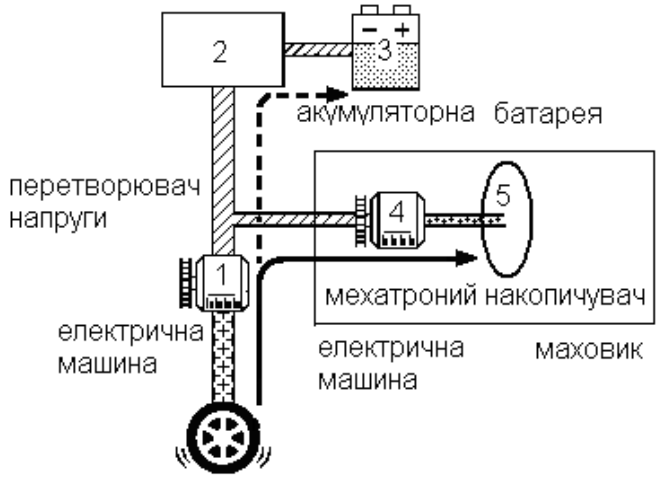
ω – кутова швидкість, рад/с.



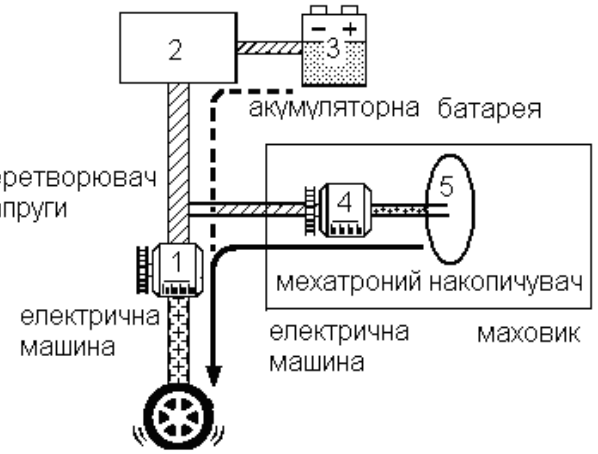


Спортивний автомобіль Porsche GT3 R Hybrid та його маховик

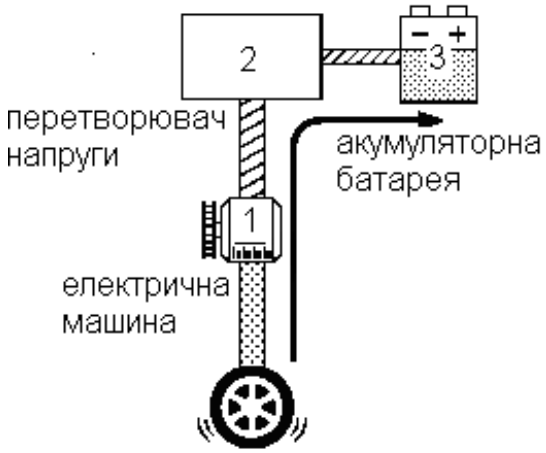
Розробка маховичного (мехатронного) накопичувача енергії



Гальмівне зусилля



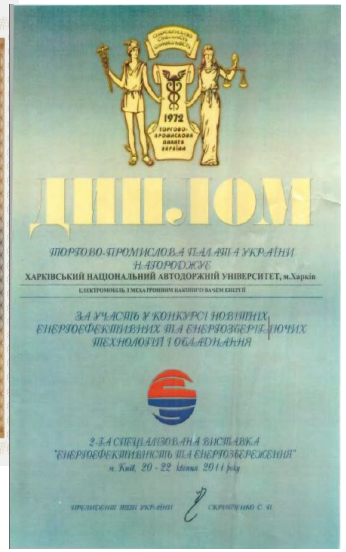
Прискорення



Гальмівне зусилля

Рекуперативне гальмування **Розгін автомобіля** **Рекуперативне гальмування з АКБ**

Переваги маховика в порівнянні з акумуляторними батареями: можливість 100% віддачі енергії, практично необмежену кількість циклів заряду-розряду (більше 10 млн.), Можливість швидкого розгону маховика (до 10 с.), Можливість швидкої віддачі енергії маховика (до 10 с.) , відсутність обмежень по навантаженню, відсутність забруднення навколишнього середовища, як при експлуатації, так і при утилізації, висока питома енергоємність (до 500 Втч/кг), високий ККД (до 99,8%), тривалий термін служби (більше 20 р.)



Автомобілі с конденсаторними накопичувачами енергії

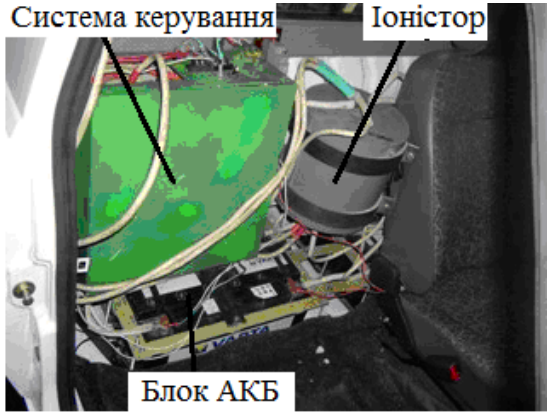
Розробка гібридного ЗАЗ «Таврія» с суперконденсатором

Енергія, накопичена у конденсаторі, Дж

$$E = \frac{C \cdot U_C^{\,2}}{2}$$

де С – ємність конденсатора, Ф;

$U_C = \frac{1}{C}\int_0^t i\,dt$ – напруга на конденсаторі, В

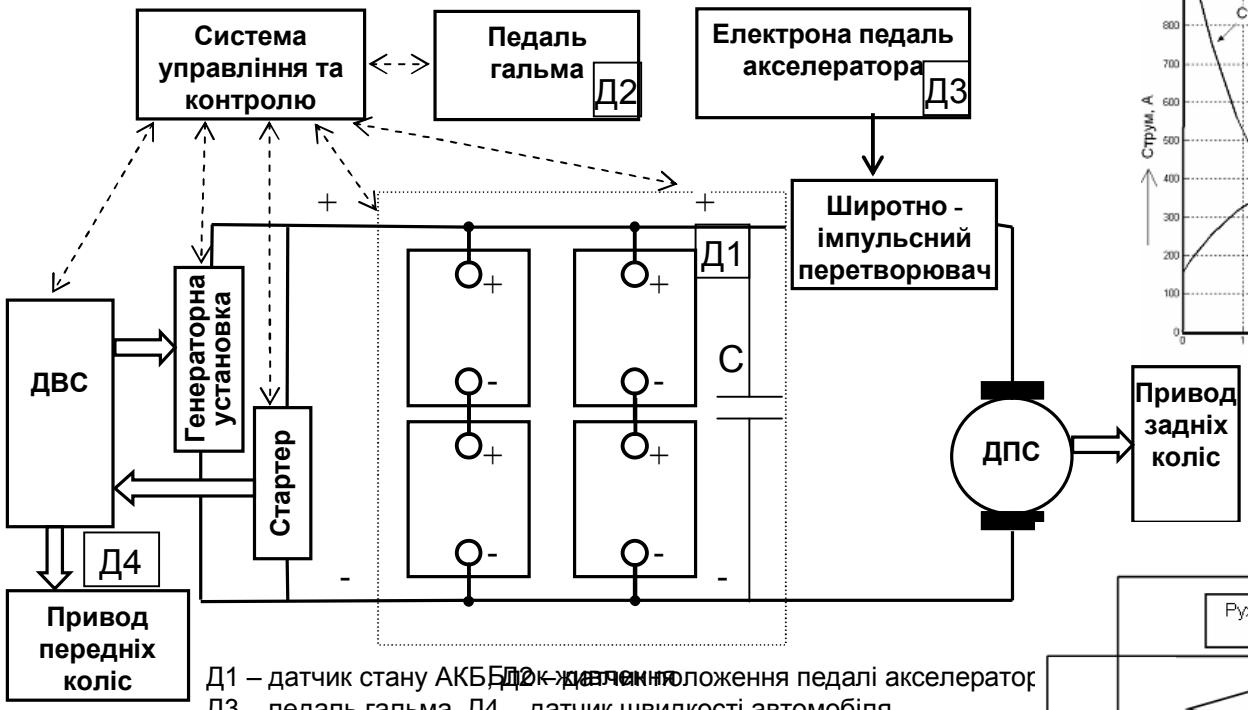


Основні технічні характеристики суперконденсатора ІКЄ 40-28

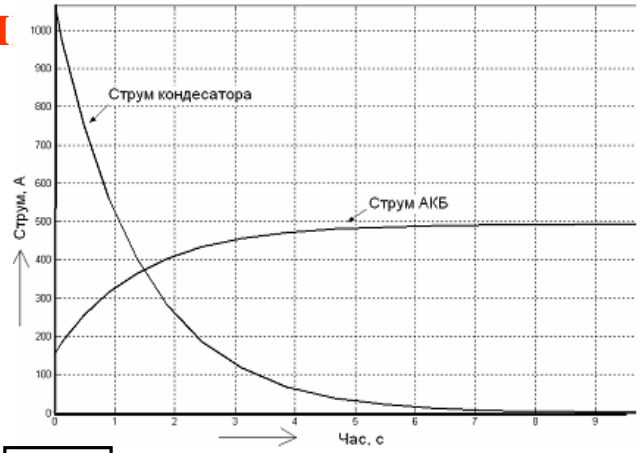
Технічні характеристики	Величина параметра
Номінальна напруга , В	28
Номінальна ємність , Ф	100
Енергія, кДж	40
Час повного заряду, с	10
Кількість циклів заряд/розряд	1000000
Робочий діапазон температур, °С	- 50 … + 60
Вага, кг	30
Строк служби, р	10

Суперконденсатори в гібридному автомобілі

Електромеханічна трансмісія гібридної силової установки автомобіля «Таврія

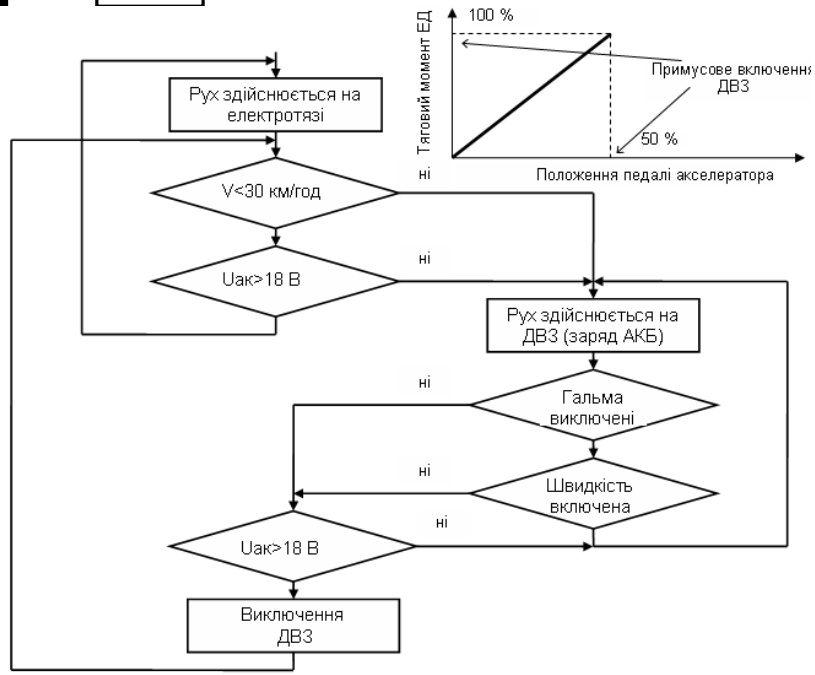


Д1 – датчик стану АКБ, Д2 – датчик положення педалі акселератор
Д3 – педаль гальма, Д4 – датчик швидкості автомобіля



Результати математичного моделювання

Для визначення навантаження спільної роботи 4 акумуляторів 110 А · год і суперконденсатора емністю 100 Ф побудована математична модель у середовищі Matlab Simulink. Результати моделювання показують, що в перші 5 с роботи джерела живлення струм суперконденсатора компенсує ток акумуляторних батарей



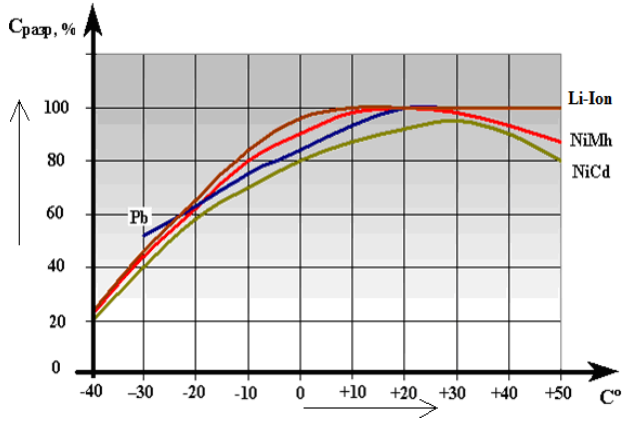
Алгоритм роботи

Використання акумуляторних батарей на автотранспорті

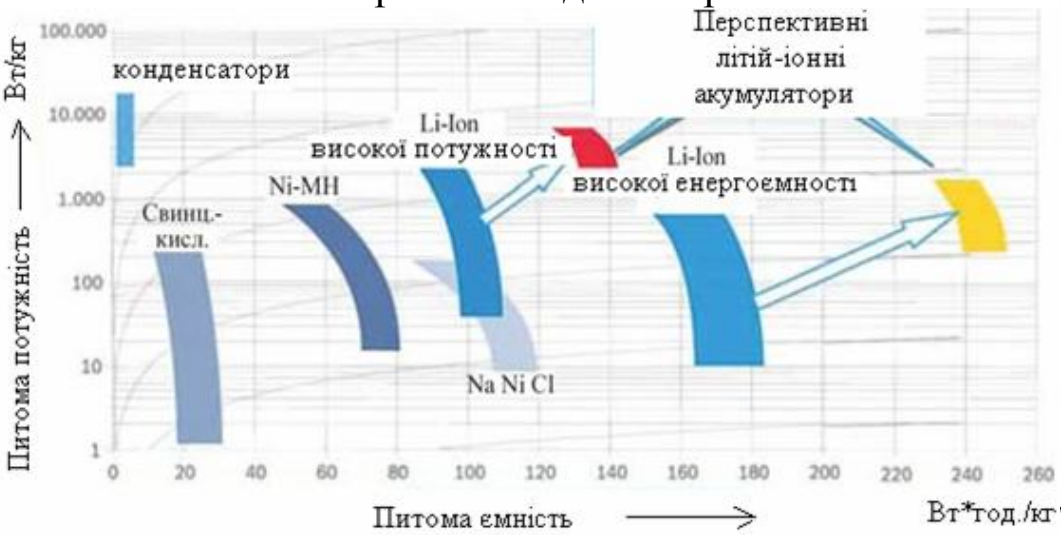
Порівняння параметрів акумуляторів різних електрохімічних систем

Тип батареї / Параметр акумуляторів	Pb	NiMH	Li-Ion, Li-pol	ZEBRA	Ni-Cd
Питома енергоємність: практична, Вт·год./кг теоретична, Вт·год./кг	25…40 130	60…80 300	90…150 450	80…120 788	45…65 237
Питома потужність, Вт/кг	180	1000	5000	200	500
Напруга елемента, В	2,10	1,2	3,6	2,58	1,2
Ресурс, кількість циклів	2000	3000	15000	2500	4000
Швидкий заряд, год.	6…8	2…4	0,5	6…8	0,5
Саморозряд, % за місяць	5	30	5…10	100	10
Температурний діапазон, °С	-30…+60	-20…+60	-30…+60	+270… +350	-50…+40

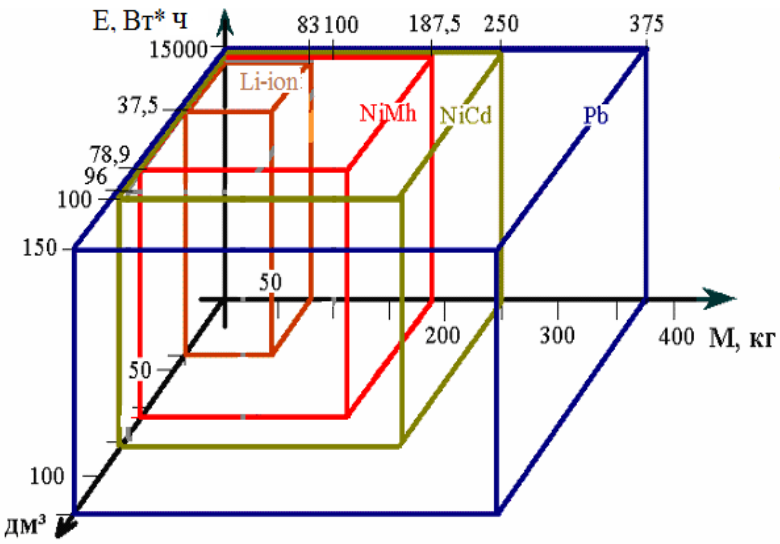
Ефективність розряду струмом 1 С при різних температурах



Порівняльні характеристики акумуляторних батарей та конденсаторів



Габаритно-масові показники акумуляторів



Дослідження високовольтної акумуляторної батареї гібридної силової установки

Технические характеристики тяговой аккумуляторной батареи Prius-1

Тип	Герметична нікель-метал-гідридна батарея
Кількість елементів	240 (40 модулів по 6 елементів)
Тип елементу	Пластмасова ємність
Номінальна напруга, В	288
Ємність, А·год	6
Енергоємність, кВт·год	1,73
Маса, кг	57

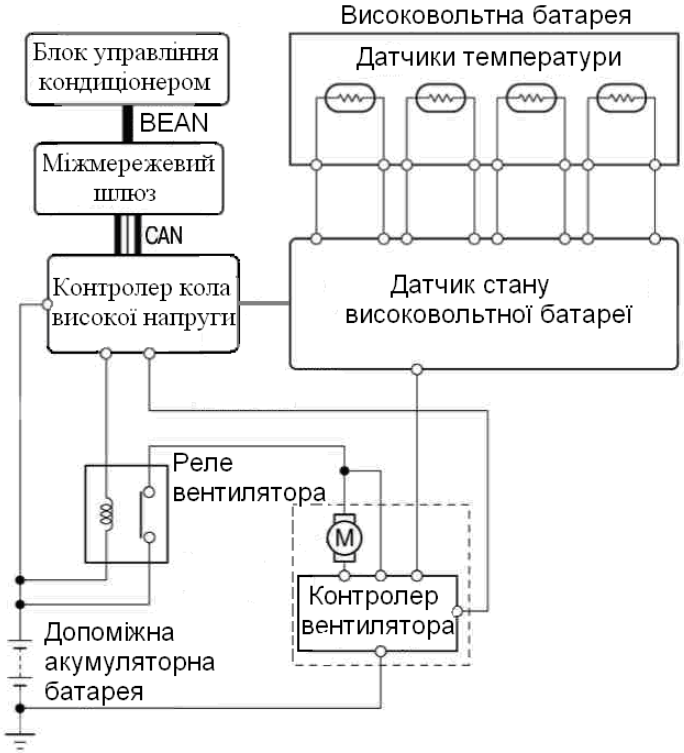
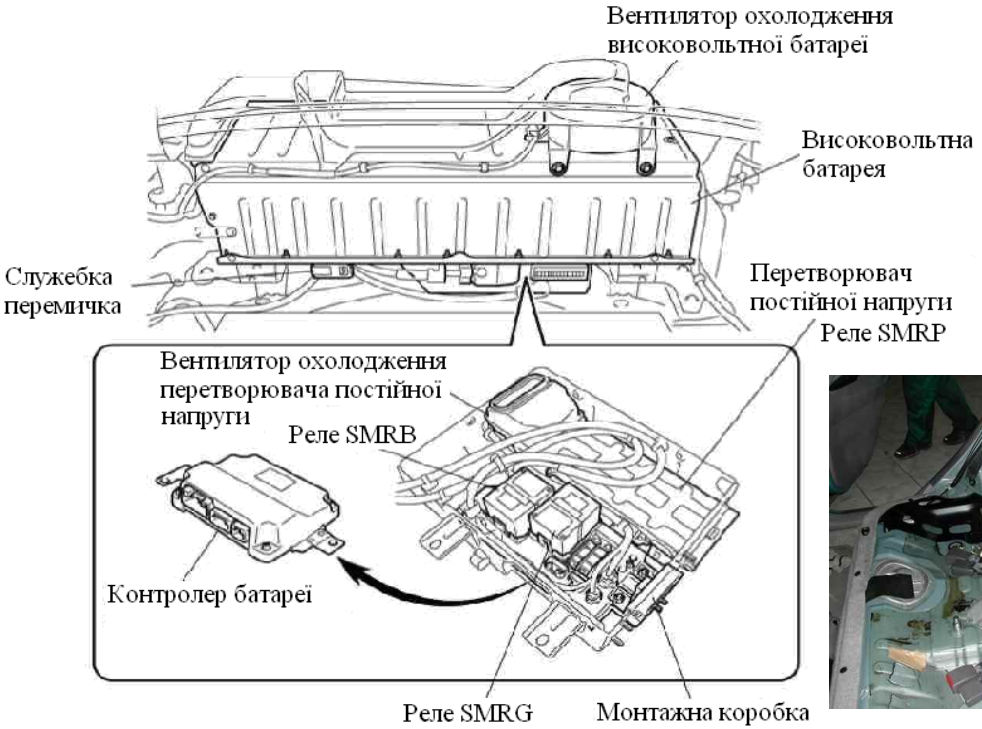
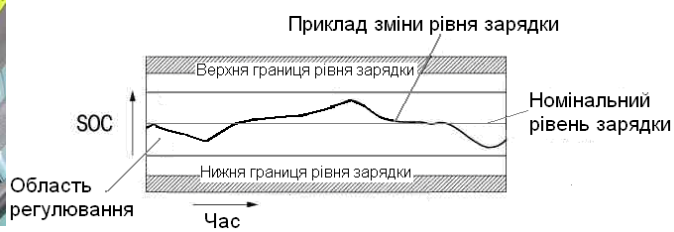


Схема системи керування вентилятором охолоджування високовольтної батареї



Блок високовольтної акумуляторної батареї



Приклад керування зарядкою і розрядкою високовольтної батареї

Дослідження системи рекуперації гібридної силової установки

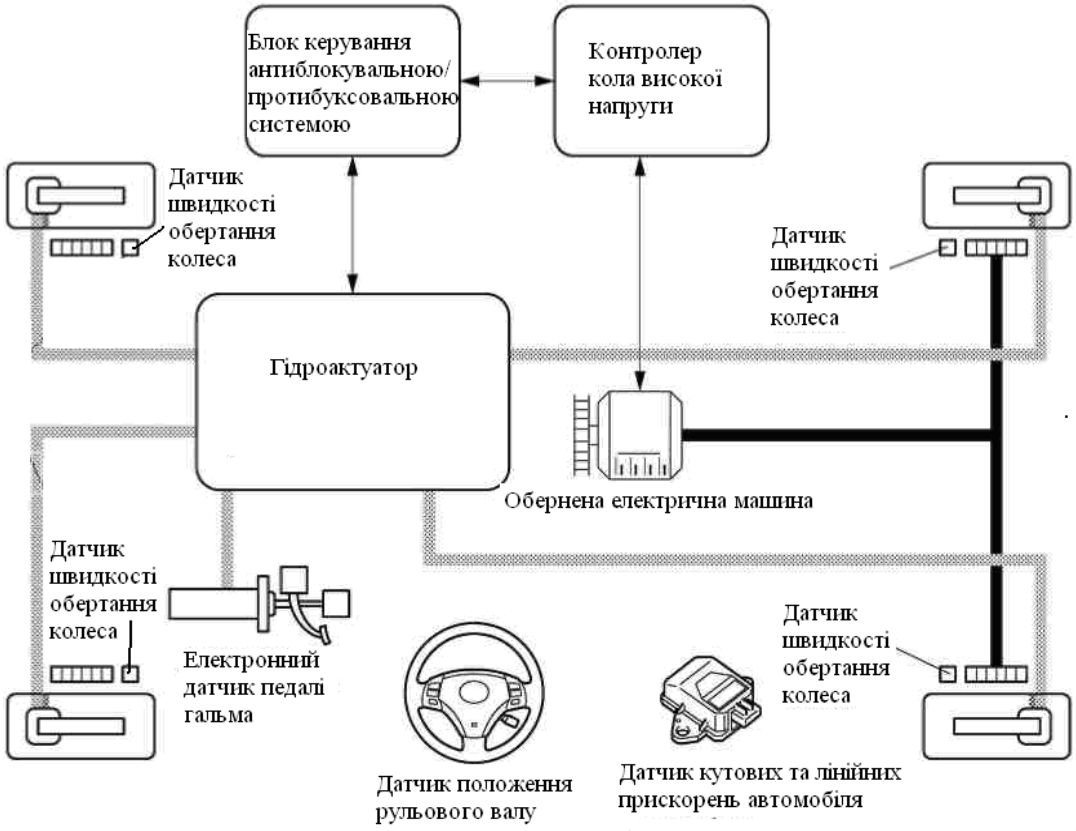
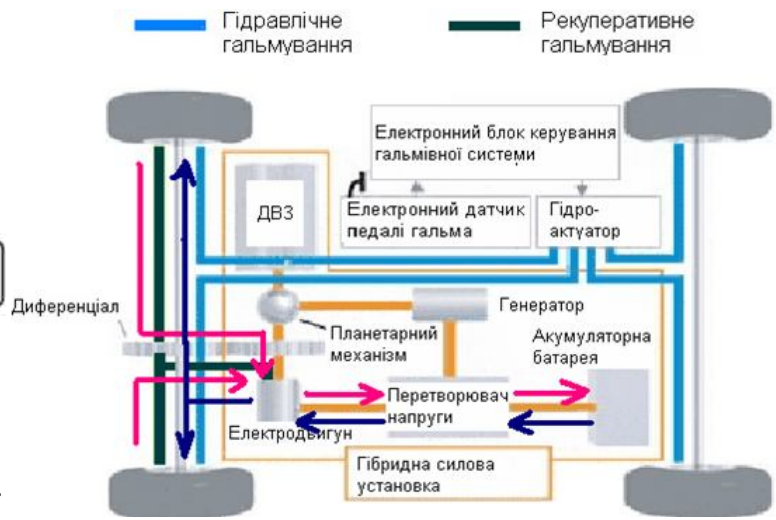


Схема функціональна рекуперативної гальмівної системи



Перетворення рекуперативної енергії

Графік синергетичної дії рекуперативної і фрикційної гальмівних систем

Інформаційно-вимірювальний комплекс для дослідження робочих процесів гібридної силової установки автомобіля

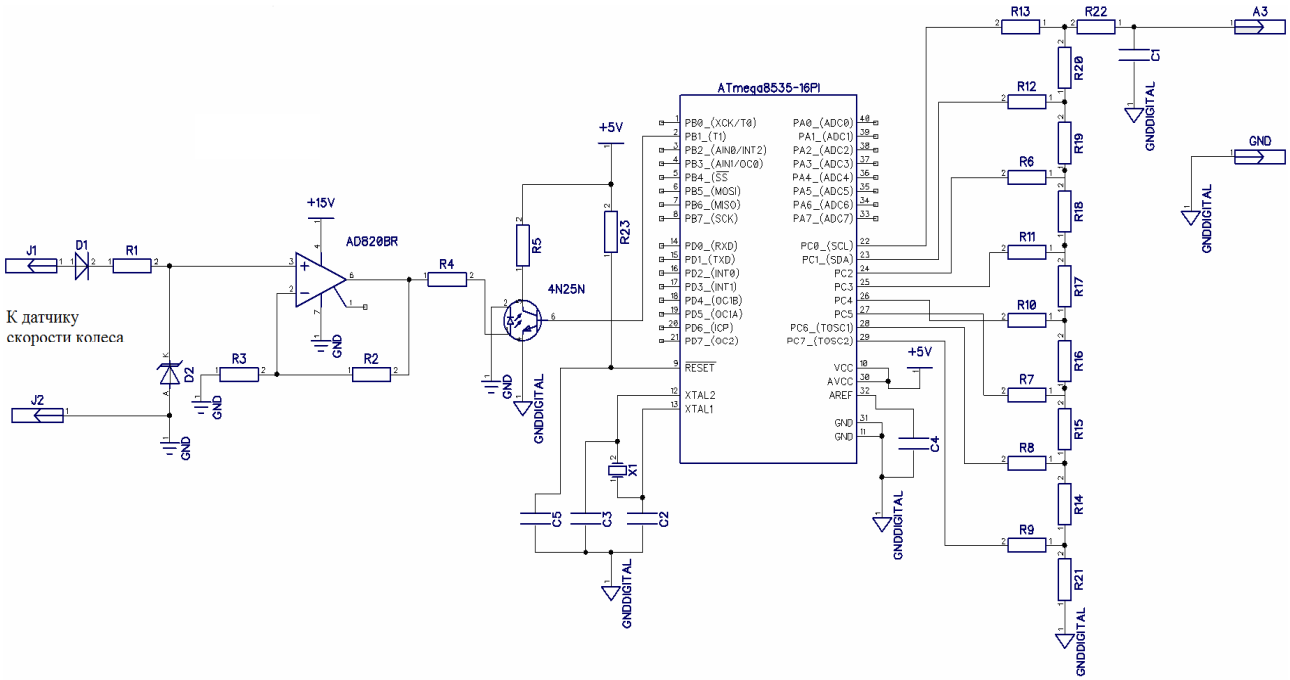
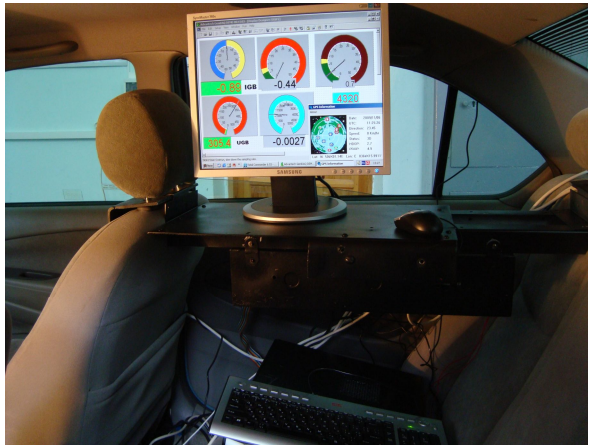


Схема електрична каналу вимірювання швидкості



Место оператора

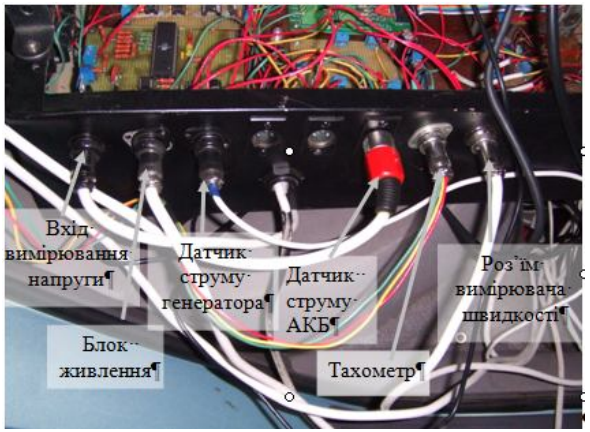


Схема підключення датчиків

Залежність струму акумуляторної батареї від швидкості

Швидкість автомобіля, км/год.	10	20	30	40
Струм батареї, А	5,86	10,07	13,65	17,92
Потужність, кВт	1,69	2,9	3,93	5,16
Витрата електроенергії, Вт·год./км	167	145	131	129

Математичне моделювання тягово-динамичних характеристик гібридного автомобіля ЗАЗ «Таврія»

Потужність ДВЗ, кВт

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

де N_e- поточне значення потужності, кВт;
n - частота обертання вала ДВЗ, об/хв.;
n_N - частота обертання вала при максимальній потужності ДВЗ, об/хв.;
N_{Emax} - максимальна потужність ДВЗ, кВт;
A_1, A_2 - емпіричні коефіцієнти.

Момент обертання ДВЗ, Н·м

$$M_e = 9550\frac{Ne}{n}$$

Тягове зусилля на ведучих колесах, Н

$$P_к = \frac{M_e U_{ki} U_o \eta}{r_\partial}$$

де U_{ki} - передаточне число коробки передач;
U_0 - передаточне число головної передачі;
η – ККД трансмісії;
r_∂ – динамічний радіус колеса, м.

Швидкість автомобіля, км/год.

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

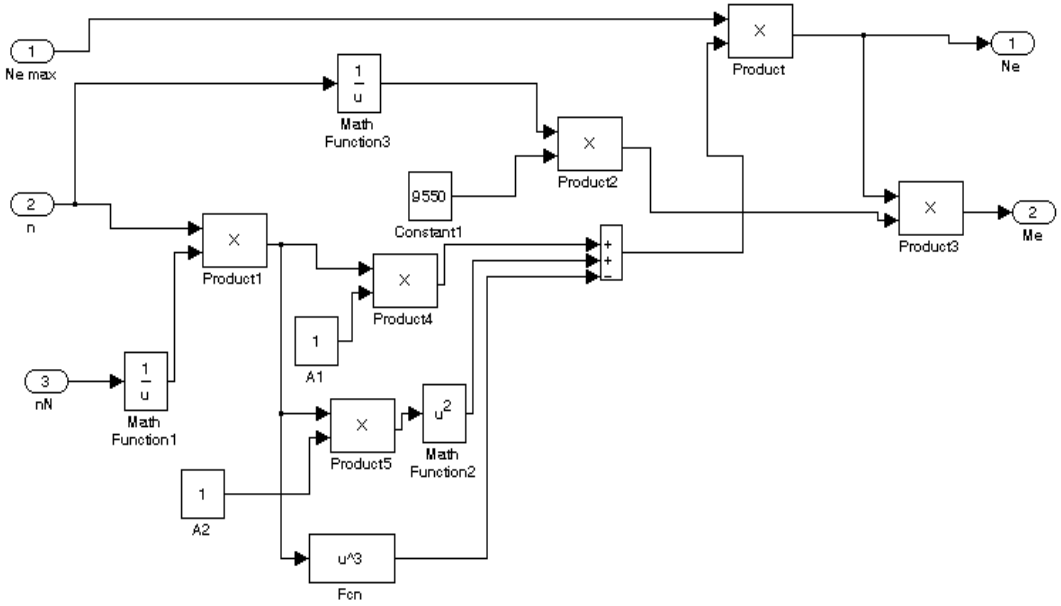


Схема структурна моделі коробки передач

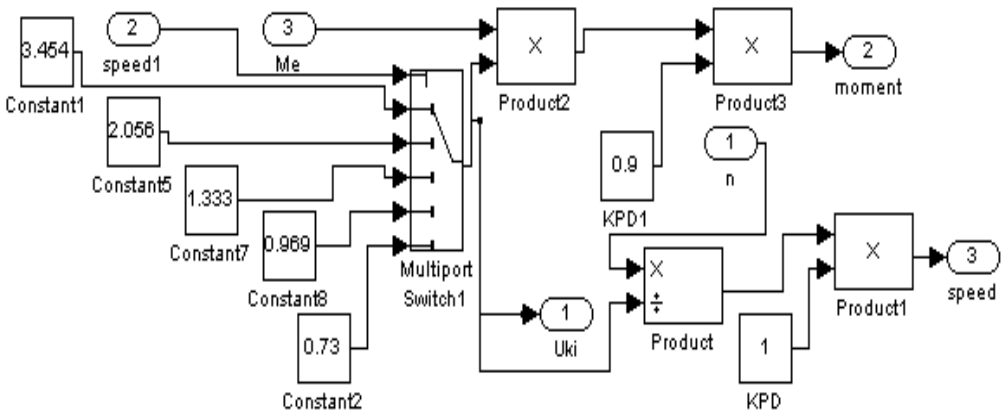


Схема структурна моделі коробки передач

Математична модель гібридного автомобіля

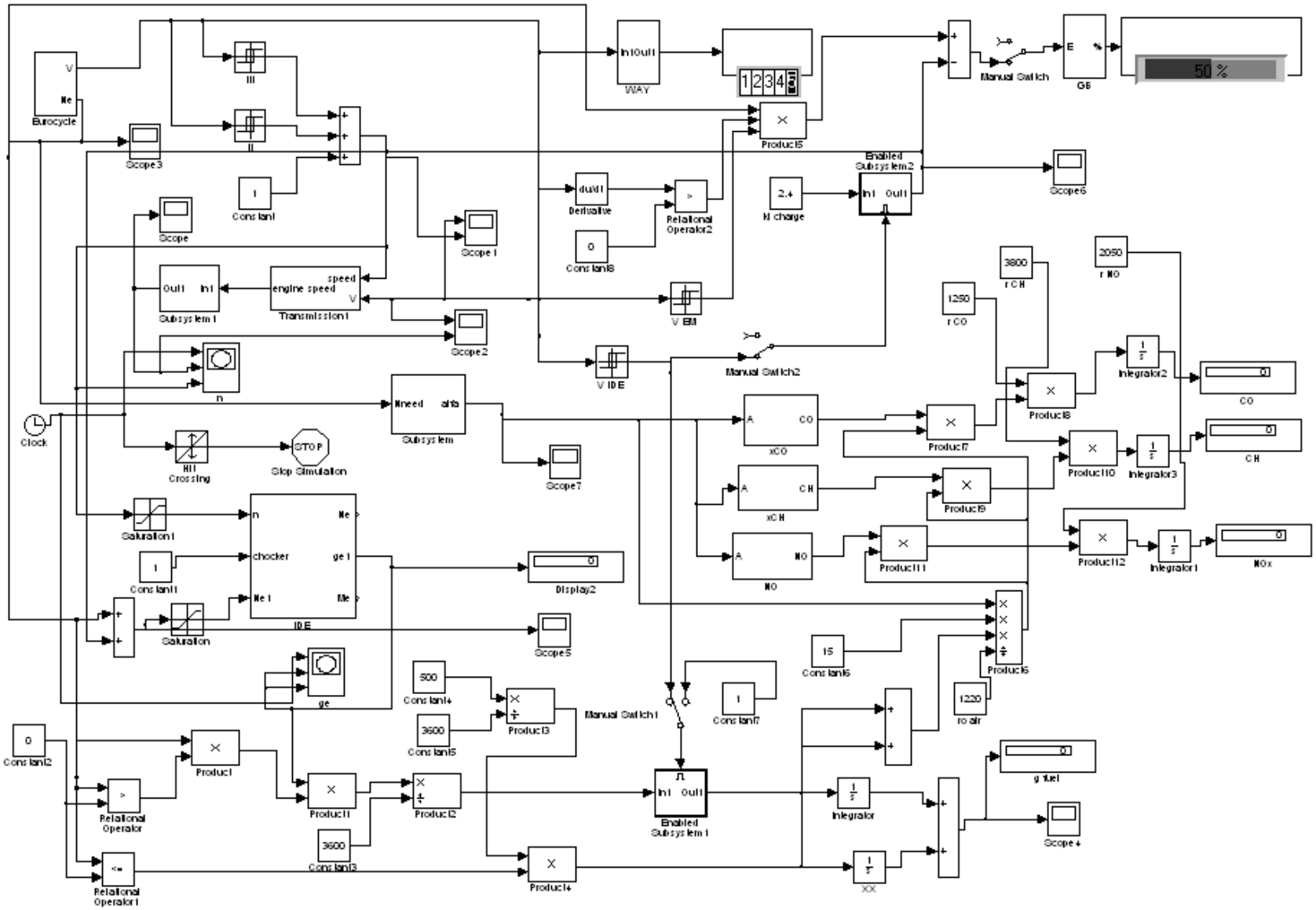
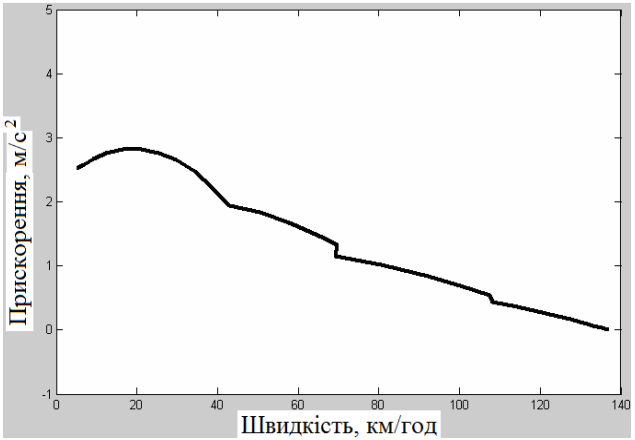
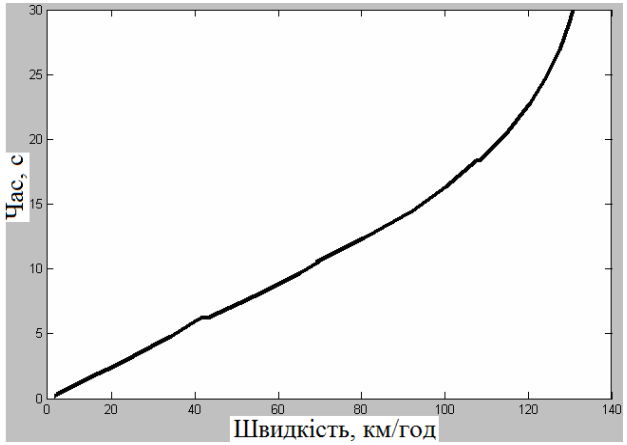


Схема структурна системи “automobile”

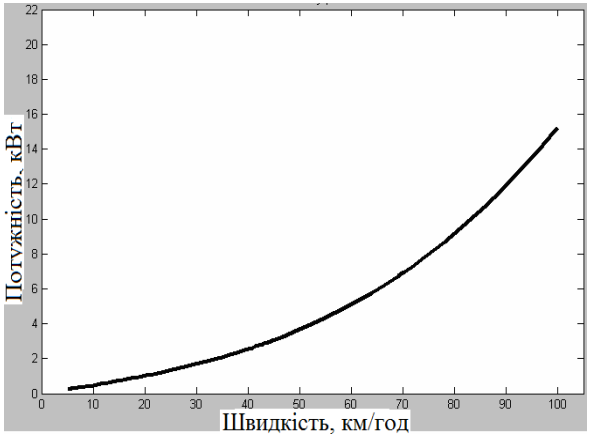
Результаты математичного моделювання тягово-динамичних характеристик гібридного и базового автомобилей



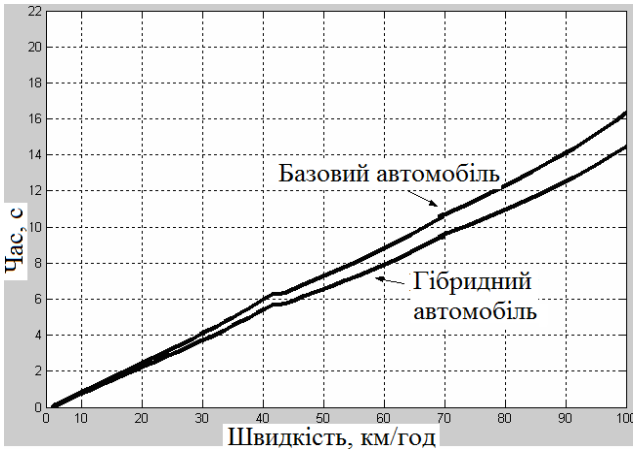
Графік прискорення автомобіля при налаштованій системі управління



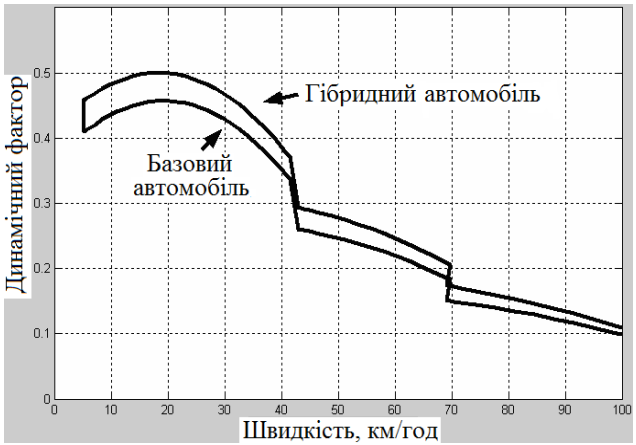
Графік часу розгону автомобіля



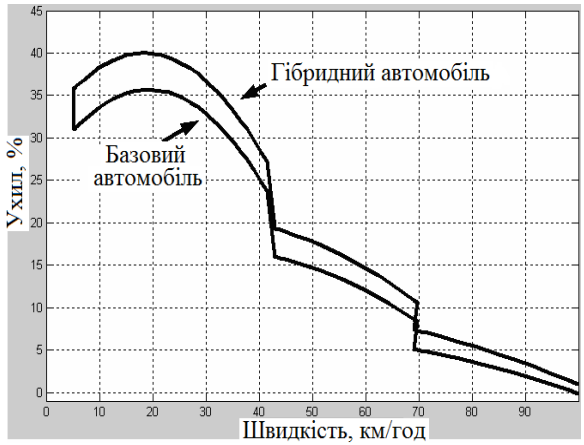
Мінімально необхідна потужність для руху с заданої швидкістю



Графік порівняння динаміки розгону базового та гібридного автомобіля



Графік порівняння динамічних характеристик базового та гібридного автомобіля



Графік порівняння максимального ухилу, що можуть подолати гібридний та базовий автомобіль

Система управління тяговим електроприводом

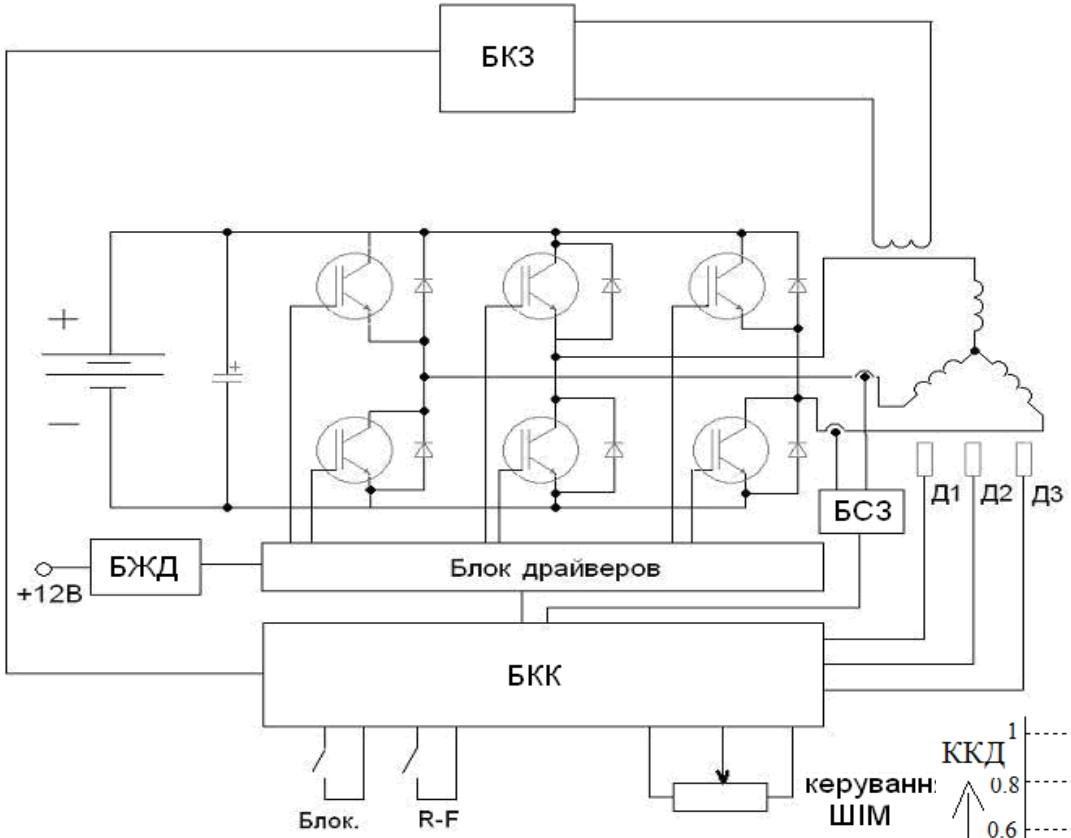


Схема функціональна системи керування (інвертування): БЖД – блок живлення драйверів; БКК – блок керування ключами; R-F – перемикач напряму обертання; Блок. – блокування керування; Д1…Д3 – датчики положення ротора; БКЗ – блок управління збудженням; БСЗ – блок струмового захисту, керування ШІМ – датчик положення дросельної заслінки

Залежність ККД від швидкості обертання ротора

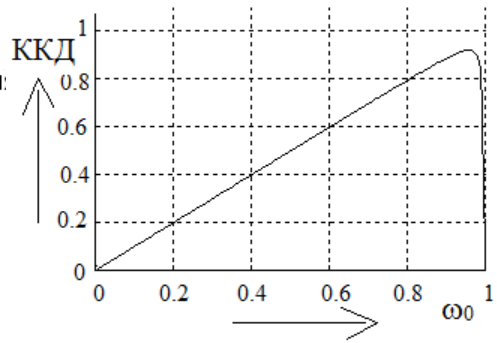
$$\eta = \frac{(1-\omega_0)\omega_0}{f(\vartheta_k)-\omega_0}$$

$$f(\vartheta_k) = \left(1+\frac{\sin\vartheta_k}{\vartheta_k}\right)\frac{\vartheta_k^2}{8\sin^2\frac{\vartheta_k}{2}}$$

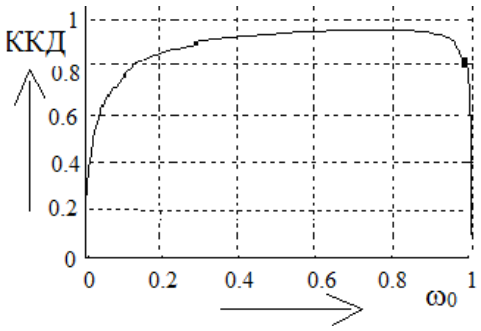
де $\omega_0 = \omega/\omega_{max}$ -нормована швидкість обертання ротора;

ω_{max} – максимальна швидкість обертання ротора при ідеальному ХХ;

ϑ_k - величина міжкомутаційного періоду



$U_я = \text{const}$



$I_я = \text{const}$

Залежність ККД вентильного електричного двигуна від нор $\vartheta_k = \pi/3$ швидкості обертання ротора при фіксованій напрузі та струмі якоря

Практична реалізація системи управління тяговим електроприводом

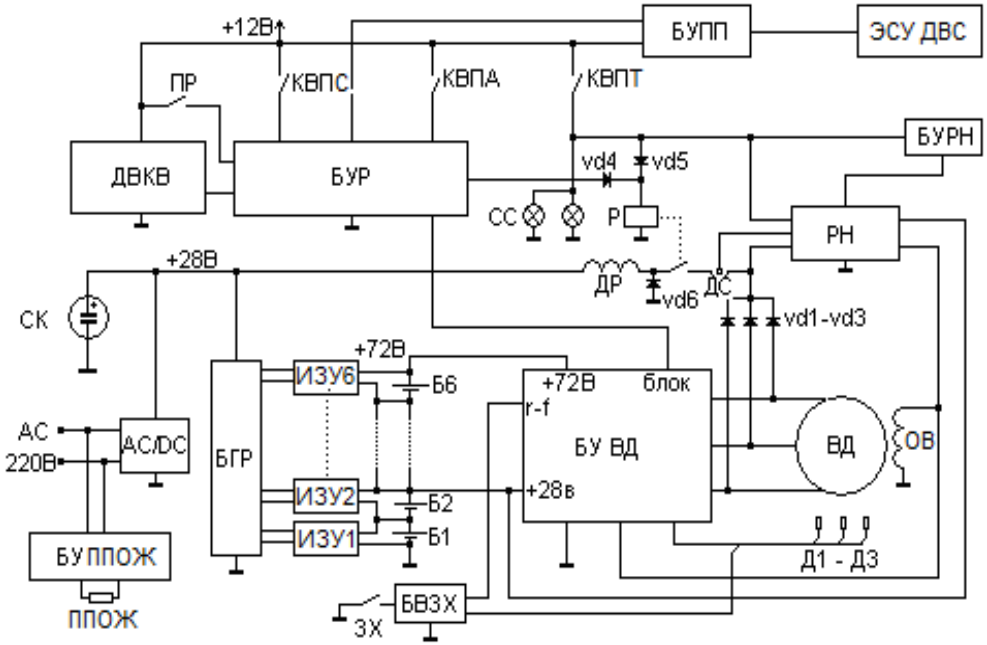
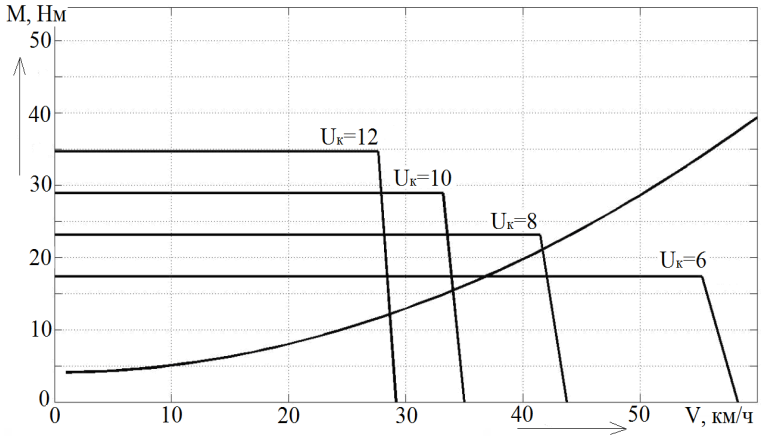
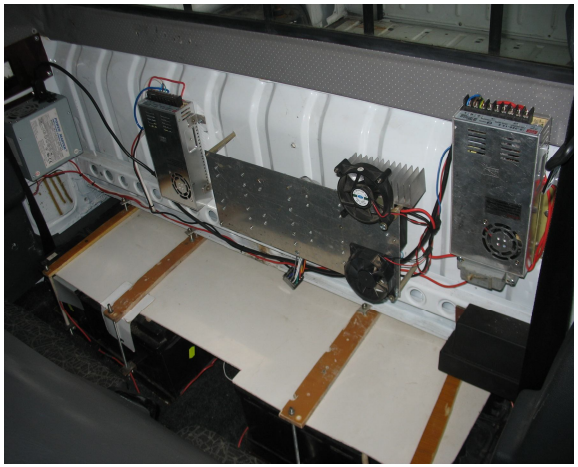


Схема функціональна системи управління електроприводом



Зовнішні механічні характеристики вентильного двигуна для чотирьох значень передавального числа механічної передачі між валом двигуна і колесами автомобіля Uк = 6, Uк = 8, Uк = 10 і Uк = 12

Розташування електричного двигуна



Розташування системи живлення

Натурні випробування гібридного автомобіля Таврія Пікап

Результати проведення натурних випробувань гібридного автомобіля Таврія Пікап у режимі «електромобіль»

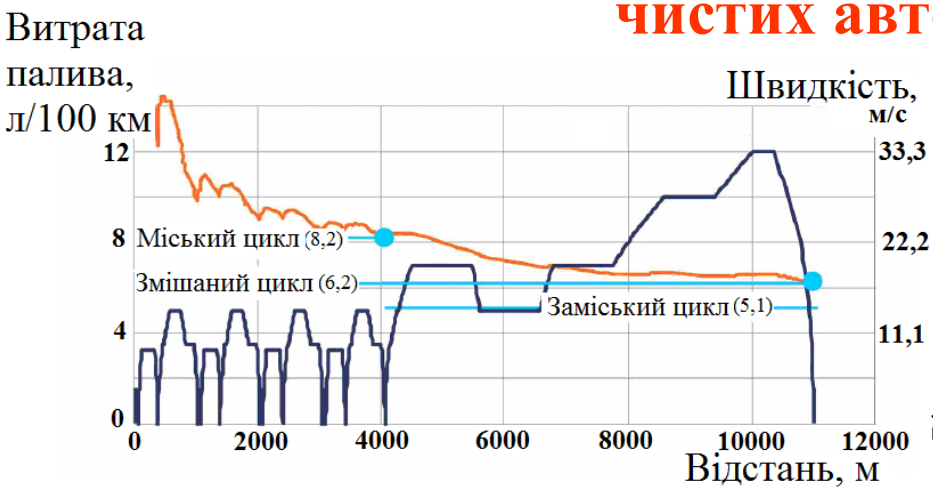
№ пп	Пробіг км	Час в дорозі с / хв.	Середня швидкість м/с / км/год.
1	14	1380 / 23	10 / 36
2	16	2040 / 34	7,78 / 28
3	20,1	3300 / 55	5,28 / 19

Гібридний автомобіль Таврія Пікап та його силова установка

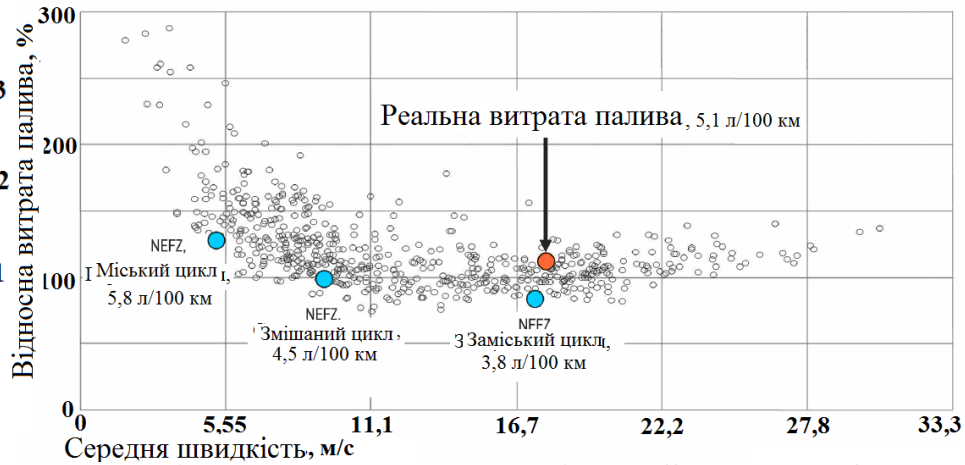
Результати проведення натурних випробувань гібридного автомобіля Таврія Пікап у режимі «гібридний автомобіль»

N	Пробіг, км	Час в дорозі, с / хв.	Середня швидкість, м/с / км/год.	Витрата бензину, л/100км	Витрата електроенергії, кВт·год./км	Вартість одного км пробігу, грн
1	47	5100 / 85	9,17 / 33	4.1	0,08	0,63
2	19	1920 / 32	10 / 36	4.3	0,07	0,67
3	26	4920 / 82	5,28 / 19	3.2	0,11	0,51
4	17	2100 / 35	8,06 / 29	3.9	0,095	0,61

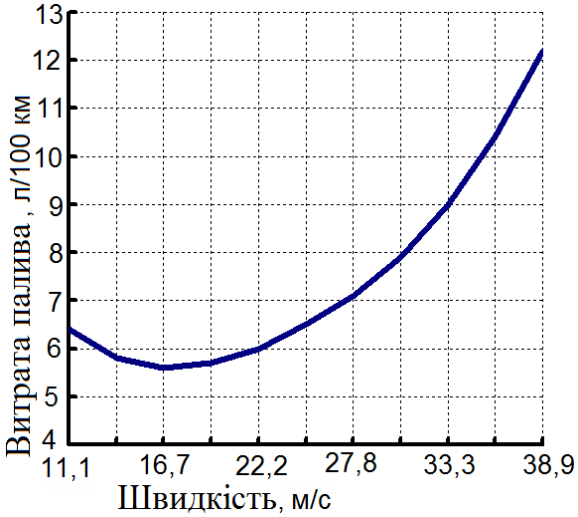
Вихідні положення концепції створення екологічно чистих автомобілів



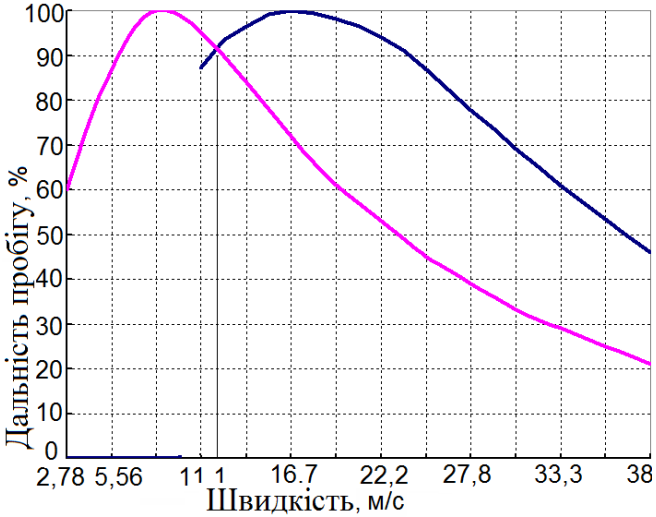
Випробування автомобіля Volkswagen Golf з бензиновим ДВС об'ємом 1,4 л потужністю 90 кВт (122 к.с.) і 6-ступінчастою механічною КПП



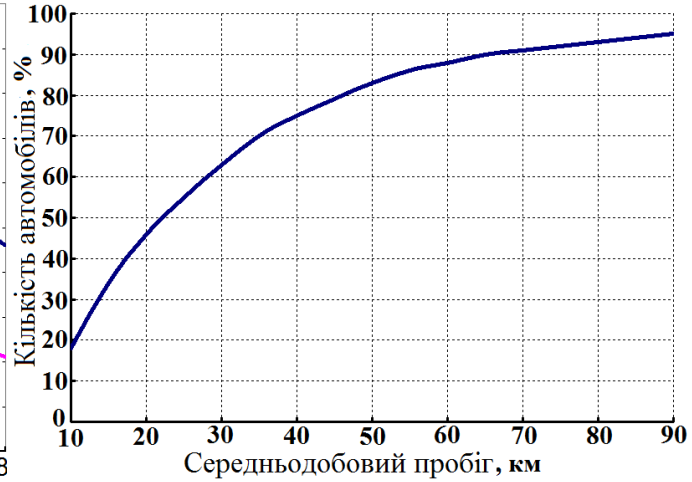
Реальні випробування автомобіля Volkswagen Polo 1,4 TDI на паливну економічність



Типова паливна характеристика сталого руху автомобіля з ДВС

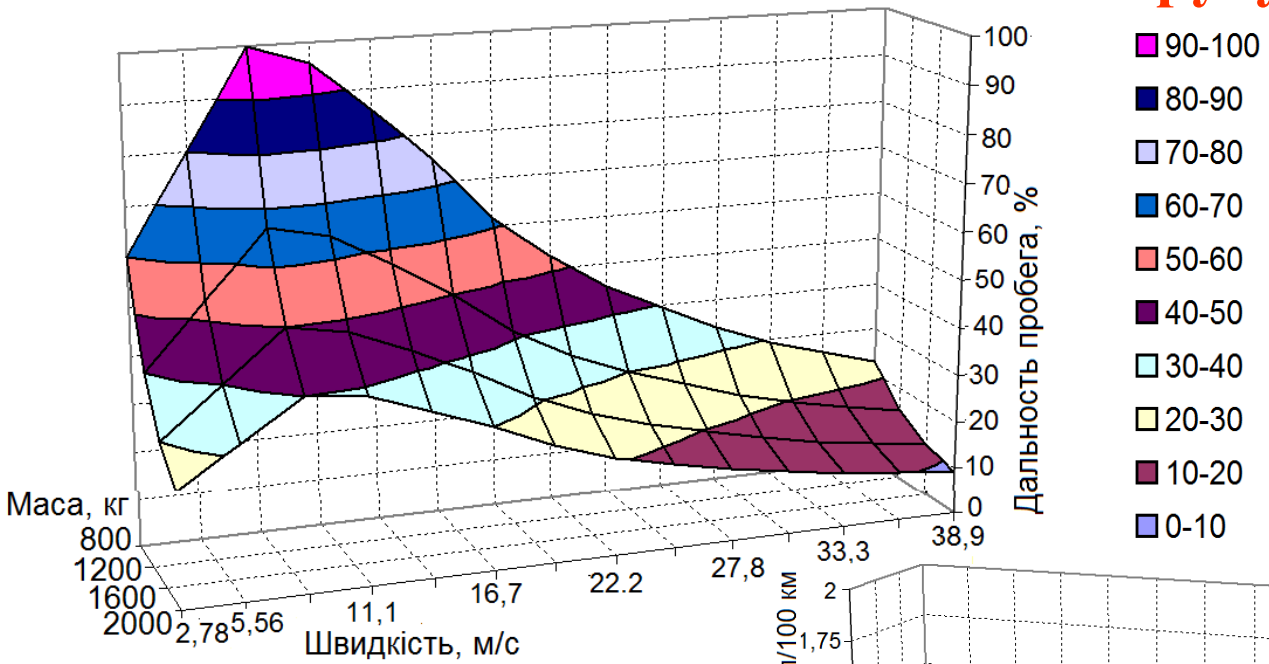


Порівняння графіків залежності дальності пробігу електромобіля і автомобіля з ДВС від сталої швидкості

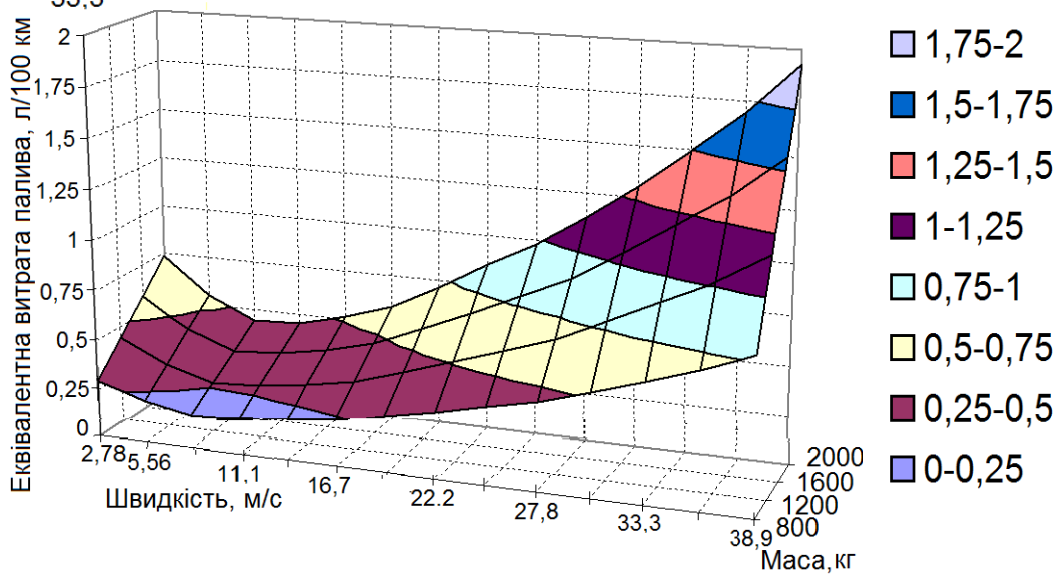


Статистика щоденного пробігу легкових автомобілів в Європі

Залежність дальності пробігу на електричній тязі і еквівалентної витрати палива від маси гібридного автомобіля і швидкості його руху



Залежність дальності пробігу від маси автомобіля і швидкості його руху при ідентичному запасі енергії в блоці АКБ



Залежність еквівалентної витрати палива від маси автомобіля і швидкості його руху

Розрахунок і розробка джерела електричної енергії для електроприводу автомобіля

Питома енергоємність акумуляторaTS-LFP90AHA, Вт·год/кг

$$E_{уд} = \frac{U_{ел} \cdot I \cdot t}{m_{АКБ}}$$

де $U_{ел}$ –середня напруга на елементі , В;

I -розрядний струм, А;

t – час розряду, год;

$m_{АКБ}$ – маса акумуляторної батареї, кг.

Ємність акумуляторної батареї, Ач

$$C = I \cdot t$$

Дальності пробігу автомобіля на електричної тязі , км

$$S_e = \frac{E_{уд} \cdot n \cdot m_{АКБ}}{K_E \cdot (m_{Авто} + m_{АКБ})}$$

де $E_{уд}$ – питома енергоємність акумулятора, Вт·год/кг;

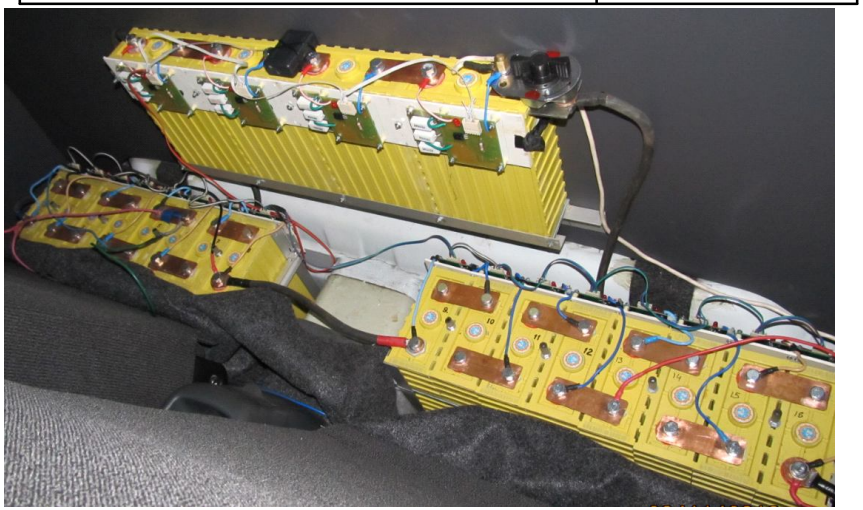
n – кількість акумуляторних батарей, шт.;

K_E –питоме споживання енергії автомобіля, що рухається на електричної тязі, Вт·год/(кг·км);

$m_{Ел}$ – споряджена маса автомобіля, кг.

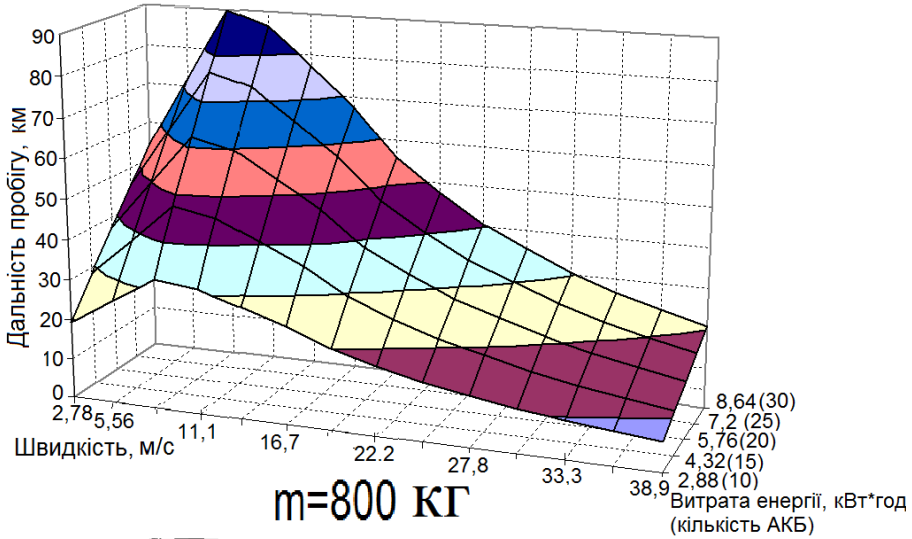
Основні експлуатаційні характеристики акумулятора TS-LFP90AHA

Тип	літій-залізо-фосфатний
Ємність С, А·год	90
Струм заряду, А	0,5·С
Макс струм розряду, А	3·С
Робоча напруга, В	2,5…4,25
Кількість циклів заряд-розряд	3000...5000
Діапазон робочих температур, ^{0}С	- 45...+ 85
Маса, кг	3,2

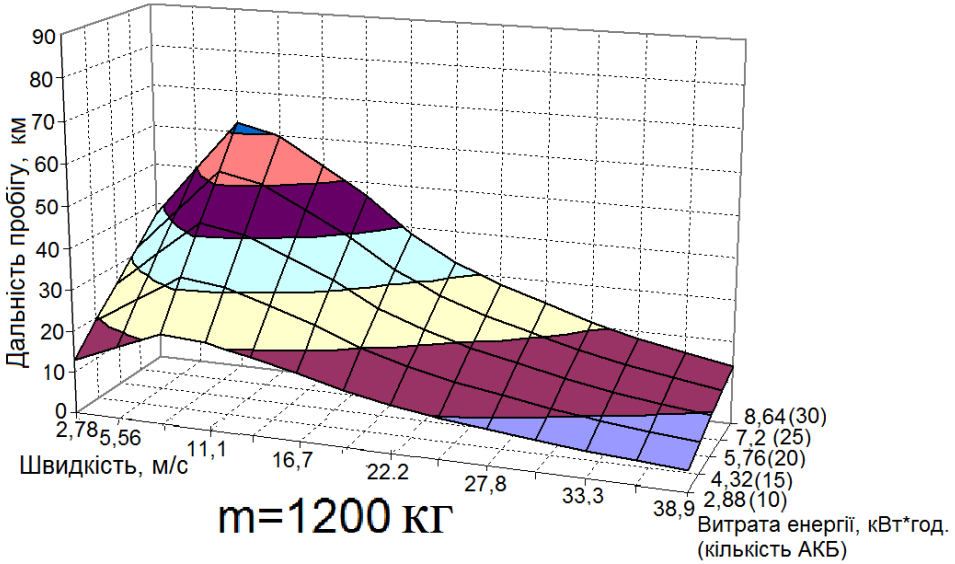


Для подолання 30…40 км у середніх умовах руху достатньо застосовувати 20 акумуляторних батарей типа LFP090AHA 3.2V/90Ah

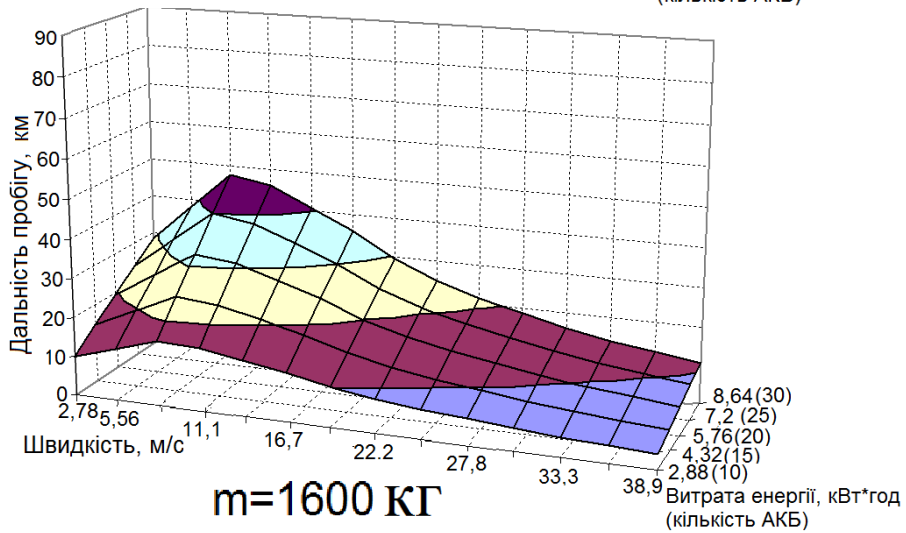
Вибір енергоємності блоку АКБ залежно від бажаної дальності пробігу на електричній тязі, швидкості і маси гібридного автомобіля



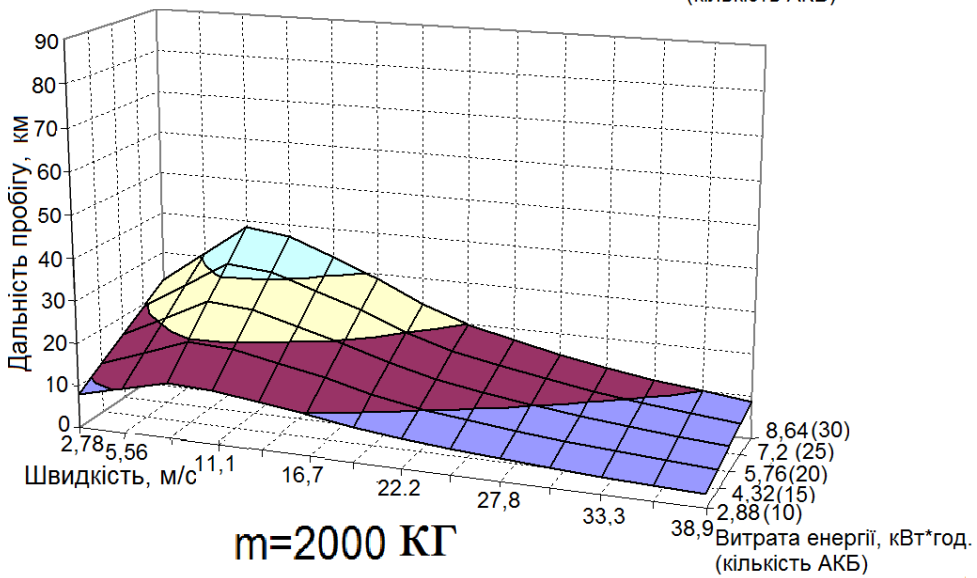
m=800 кг



m=1200 кг



m=1600 кг



m=2000 кг

Екологічно чистий автомобіль ЗАЗ-ХНАДУ

Гібридний автомобіль ЗАЗ-ХНАДУ

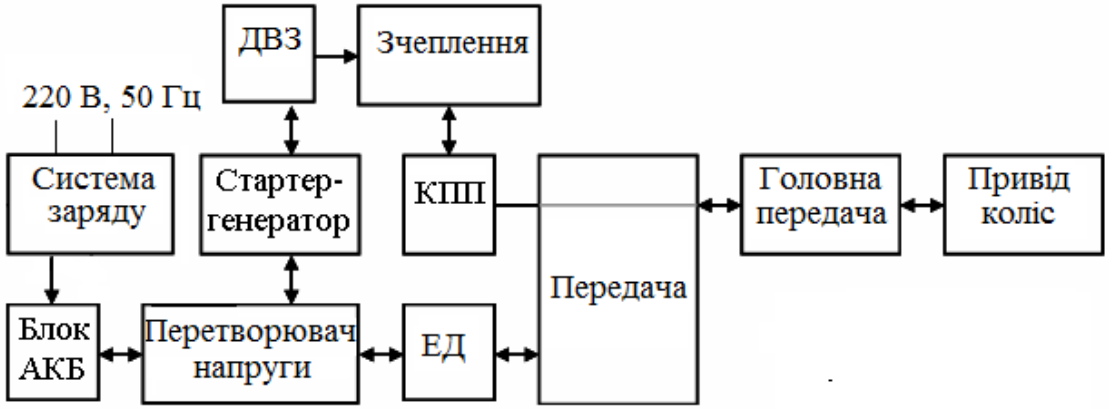
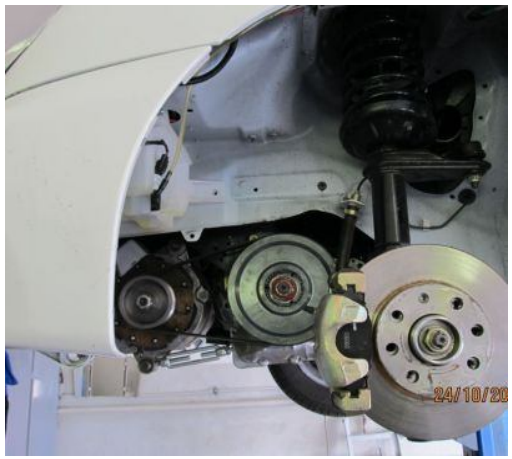


Схема структурна принципова нової гібридної силової установки

Основні характеристики електропривода

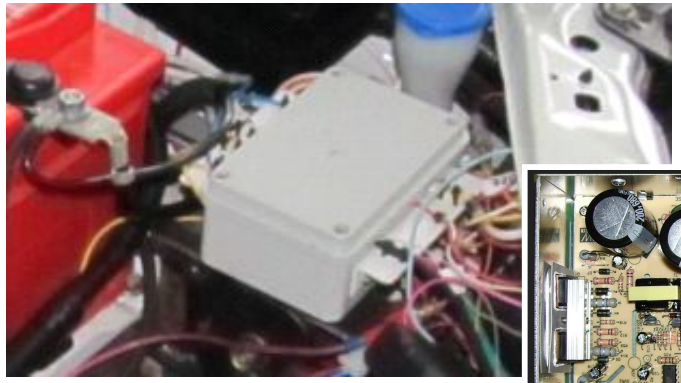
Основні характеристики електропривода		Величина
Електродвигун (ЕД)	Максимальна потужність, кВт	15
	Номінальна потужність, кВт	10
	ККД, %	85
Блок акумуляторних батарей	Енергоємність, кВт·год	5,76
	Робоча напруга, В	50...85
	Маса, кг	64
	Час заряду от 220 В, 50 Гц, год	3
	Максимальна потужність при заряді, Вт	1750



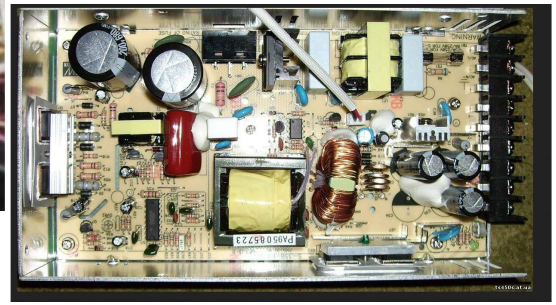
Привод тягового електродвигуна

Система управління гібридної силової установки автомобіля ЗАЗ- ХНАДУ

Гібридна силова установка



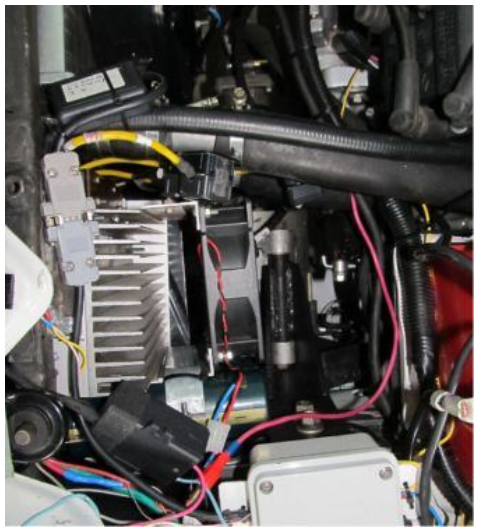
Блок переходу від руху на електроприводі к руху на ДВЗ



Система заряду АКБ

Взаємодія компонентів гібридної силової установки автомобіля на різних режимах роботи

Режими роботи	ДВЗ	Зчеплення ДВЗ	Режим Д \ Г	Зчеплення ЕМ	Стан АКБ	Величина струму
Електромобіль	Викл.	Розімкнене	Електродвигун	Вкл.	Розряд	Великий
Гібридний	Вкл.	Вкл.	Електродвигун	Вкл.	Розряд	Середній
Базовий	Вкл.	Вкл.	Викл.	Розімкнене	Заряд	Середній
Рекуперація	Викл.	Розімкнене	Генератор	Вкл.	Заряд	Великий
Стоянка-заряд	Викл.	Розімкнене	Викл.	Розімкнене	Заряд	Малий



Електронний блок системи управління електроприводом

Інформаційно-вимірювальний комплекс для дослідження робочих процесів гібридної силової установки ЗАЗ-ХНАДУ

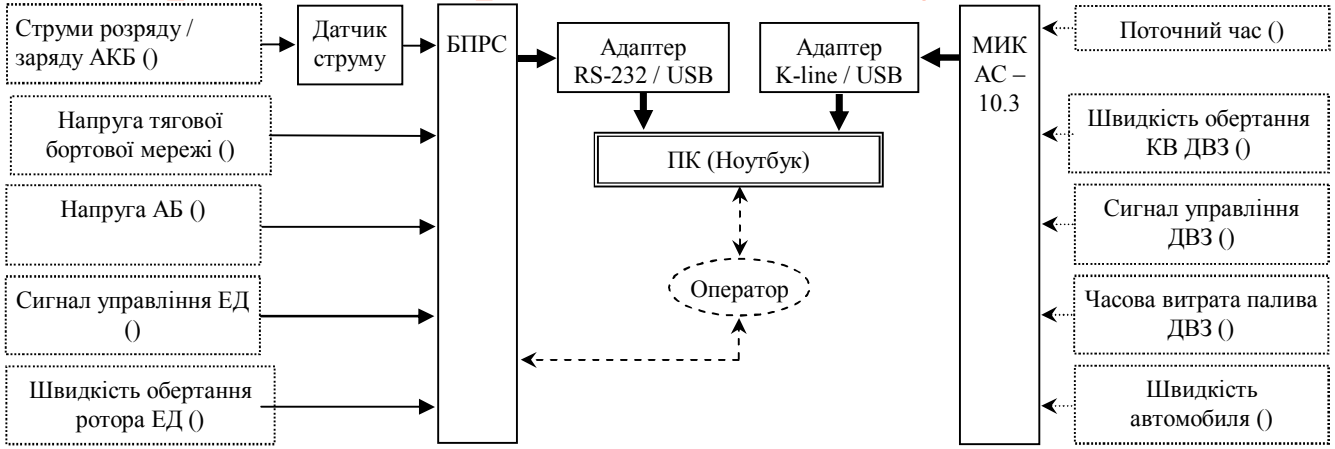
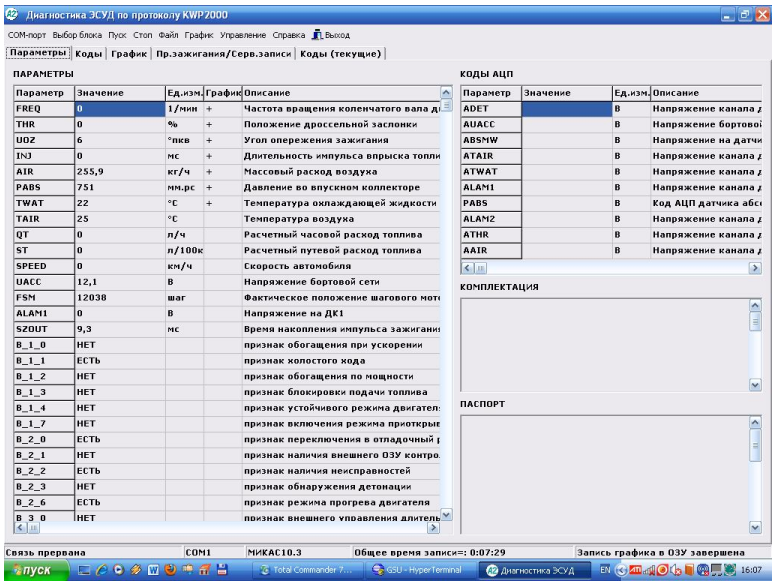


Схема структурна інформаційно-вимірювального комплексу для дослідження робочих процесів гібридної силової установки



Екран при реєстрації діагностичних параметрів системи керування ДВЗ

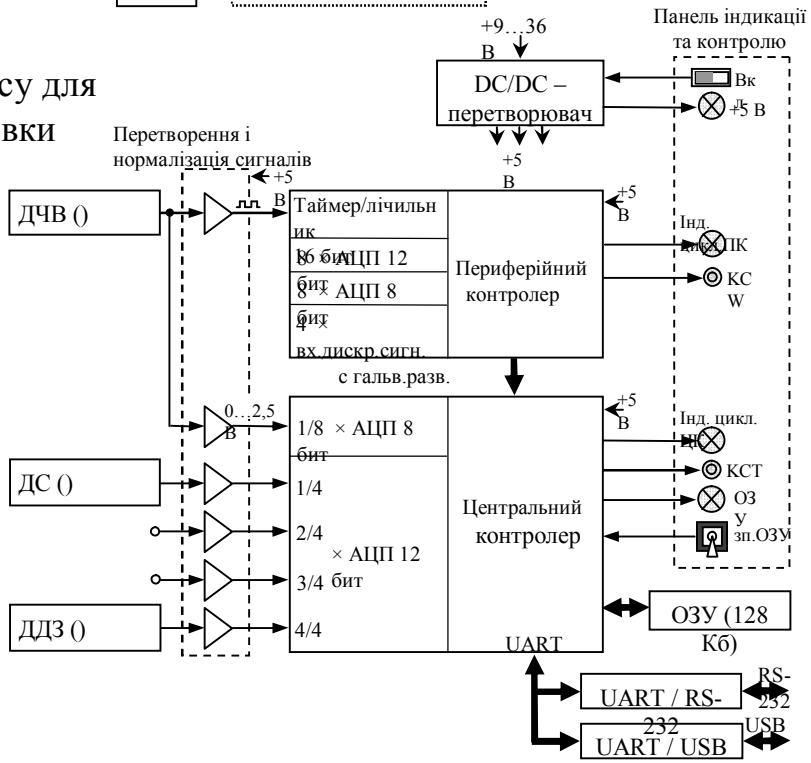
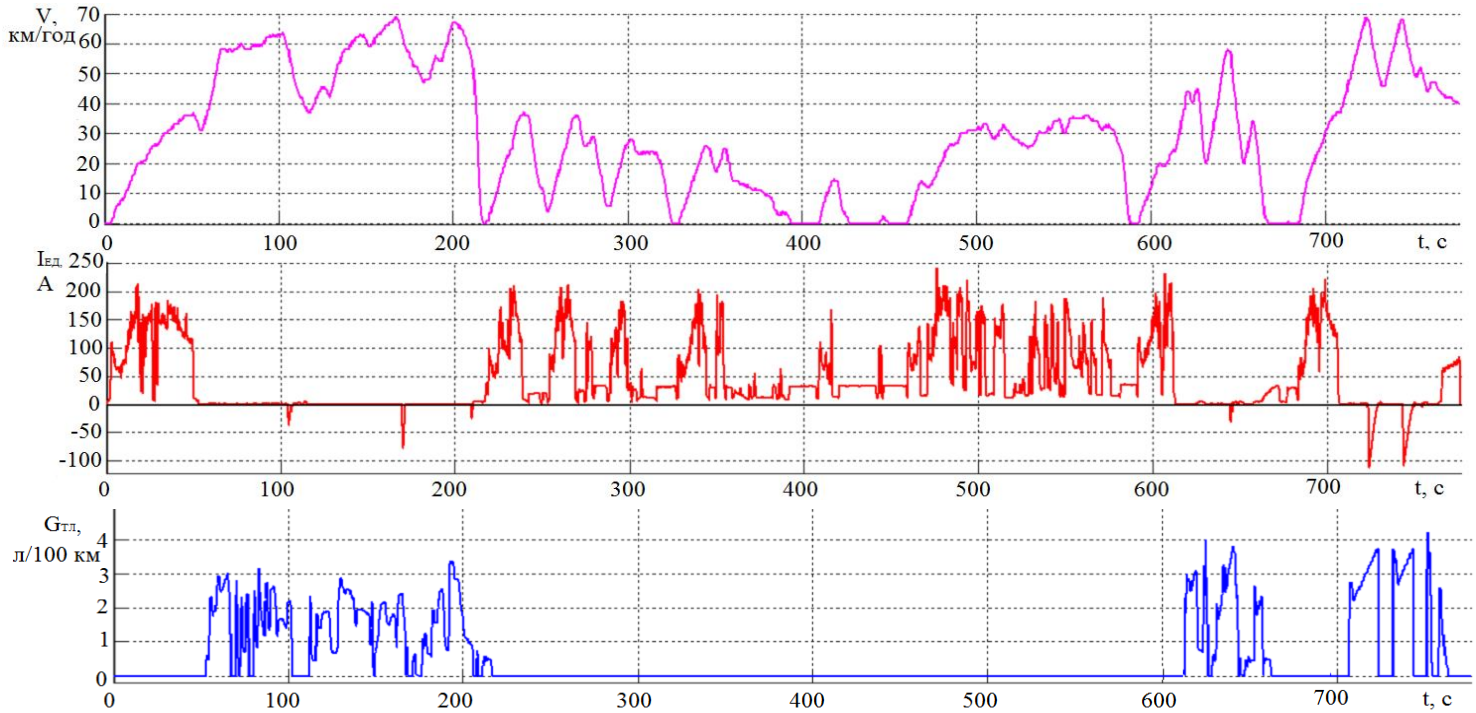


Схема структурна блоку перетворення і реєстрації сигналів

Результати натурних випробувань гібридного автомобіля ЗАЗ-ХНАДУ



Діаграми швидкості, струму електричного двигуна та годинна витрата палива гібридного автомобіля

Основні характеристики ЗАЗ-ХНАДУ

Режим роботи / Характеристики	Електромобіль	Гібридний	Базовий
Пробіг у міському режимі руху, км	40	490	450
Швидкість на електроприводі, км/год	40	40	-
Час заряду от 220 В, 50 Гц, год	2…3	2..3	-
Втрата палива у міському режимі, л/100 км	-	3,8	10,5
Витрата електроенергії, кВт·год/100 км	18	18	-
Витрати на енергоносії, грн/100 км	7	65	178
Максимальна потужність , кВт	15	15 / 51,5	65

Технології кузовного ремонту автомобілів з використанням енергії імпульсних магнітних полів

Магнітно-імпульсна обробка металів

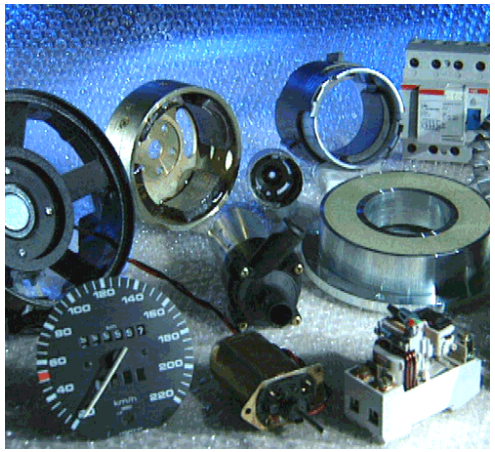
Традиційний напрям (масивні метали)

- Зварювання
- Пресовка
- Штампування
- Обжим
- Роздача
- Вирізка
- Вирубка

Новий напрямок (тонкостінні метали)

- Відділення металу від діель. плівки
- Магнітно-імпульсне рихтування
- Визначення ел.маг. властивостей металів
- Безконтактна формовка
- Утворення об'ємних малюнків на металі

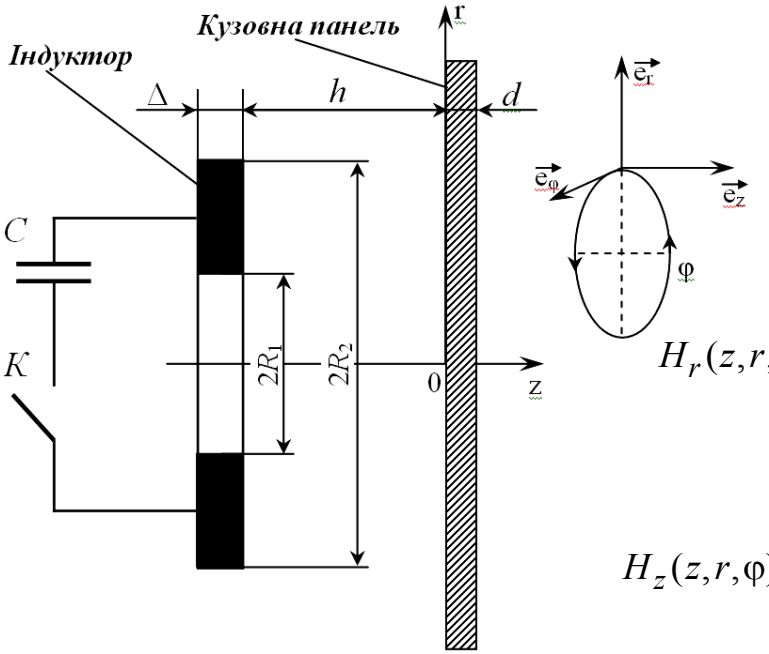
ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ТЗ



Аналіз електромагнітних процесів при зовнішньому магнітно-імпульсному рихтуванні

ІНДУКТОРНІ СИСТЕМИ – ІНСТРУМЕНТИ РИХТУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

Схема індукторної системи



Густина індукованого струму

$$j_\varphi(z,r,\varphi) = \frac{2J_m}{d}\int_0^\infty f(x)\cdot e^{-x\cdot\frac{h}{d}} x J_1\left(x\frac{r}{d}\right)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\beta_k F_{1k}\left((\mu_r\cdot x),z\right)}{\Phi_k(\mu_r\cdot x)}\cdot f_{1k}(x,\varphi)dx.$$

Тангенціальна складова *H*

$$H_r(z,r,\varphi) = -\frac{2J_m}{(\omega\cdot\tau)}\int_0^\infty f(x)e^{-x\cdot\frac{h}{d}}\cdot x\cdot J_1\left(x\frac{r}{d}\right)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\beta_k^2\cdot F_{2k}\left((\mu_r\cdot x),z\right)}{\Phi_k(\mu_r\cdot x)}\cdot f_{2k}(x,\varphi)dx.$$

Нормальна складова *H*

$$H_z(z,r,\varphi) = -\frac{2J_m}{(\omega\cdot\tau)}\int_0^\infty f(x)e^{-x\cdot\frac{h}{d}}\cdot x^2\cdot J_0\left(x\frac{r}{d}\right)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\beta_k\cdot F_{1k}\left((\mu_r\cdot x),z\right)}{\Phi_k(\mu_r\cdot x)}\cdot f_{2k}(x,\varphi)dx.$$

Поверхнева щільність сил, яка обумовлена магнітними властивостями об'єкта обробки

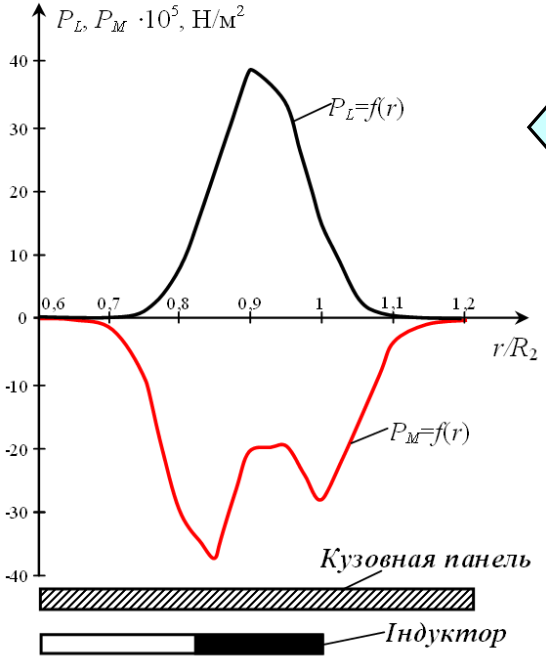
$$P_M = -\frac{(\mu_0\cdot\mu_r)}{2}\cdot(\mu_r-1)\cdot\left[\left(H_{1n}^2-H_{2n}^2\right)+\frac{1}{\mu_r}\cdot\left(H_{1\tau}^2-H_{2\tau}^2\right)\right].$$

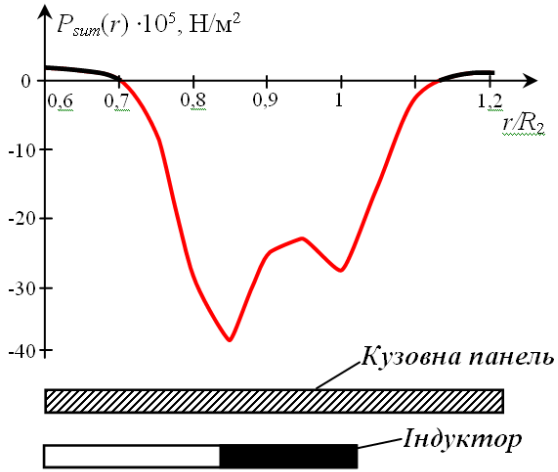
Сумарна сила при магнітно-імпульсному рихтуванні

$$P_S(r,t) = \mu_1\left(\int_0^d j_\varphi(z,r,t)\cdot H_r(z,r,t)dz - \frac{(\mu_r-1)}{2}\cdot\left[\left(H_{1n}^2-H_{2n}^2\right)+\frac{1}{\mu_r}\cdot\left(H_{1\tau}^2-H_{2\tau}^2\right)\right]\right).$$

Сили, що діють при магнітно-імпульсному рихтуванні

Частота 2 кГц

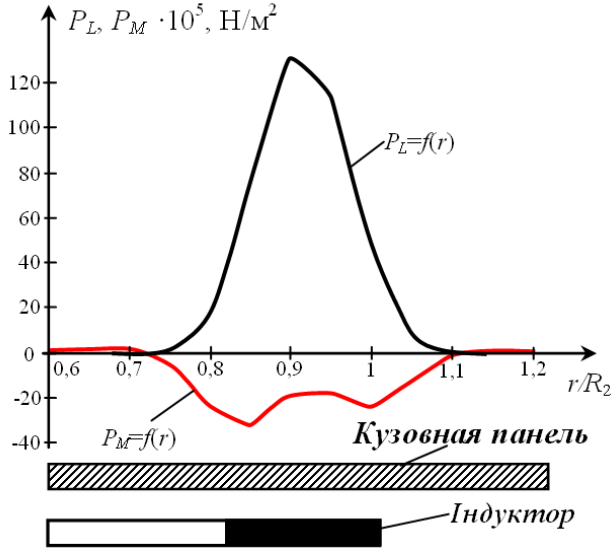


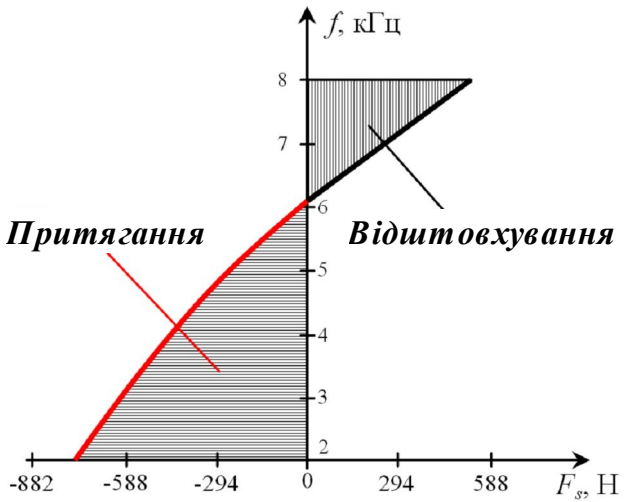


Сили Лоренца та сили, що зумовлені магнітними властивостями метала

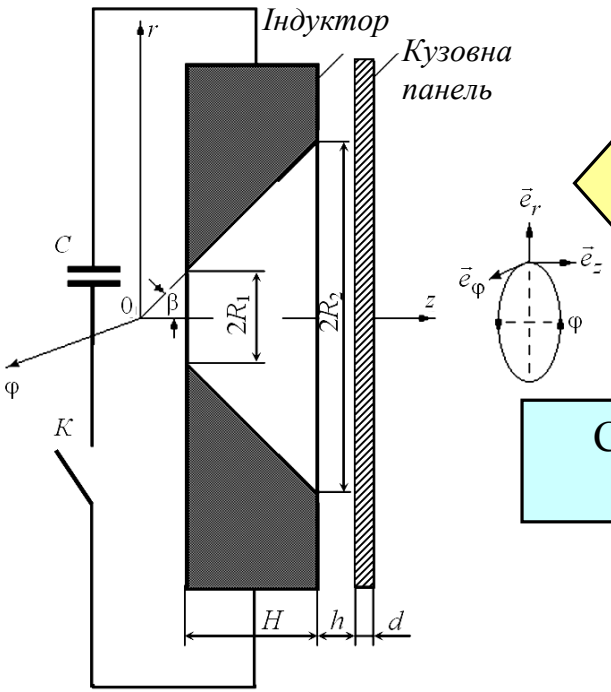
Сумарні сили при магнітно-імпульсному рихтуванні

Частота 8 кГц





Індукторного система – інструмент рихтування з конічною формою силового елемента



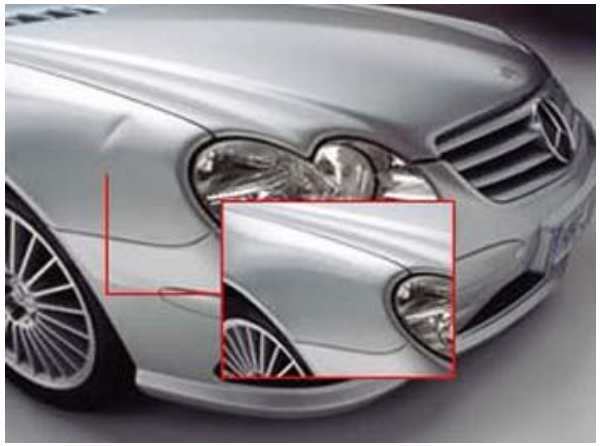
Розрахун-кова модель

Фізична модель

Сила притягання при магнітно-імпульсному рихтуванні

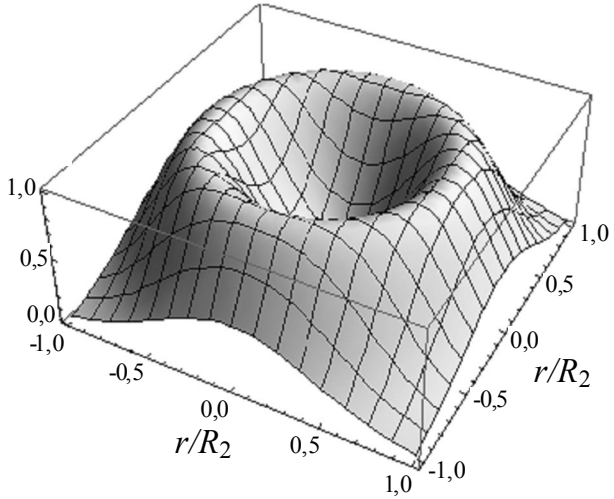
$$P_M(\rho,t) = -\left(1-\frac{1}{\mu_r}\right)\cdot\frac{\mu_0\cdot H_m^2}{8}\cdot\frac{j^2(t)}{(1-\cos(\beta))^2}\cdot\left\{\left[\frac{\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h}{R_2}\right)^2}{\left(\rho^2+\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h}{R_2}\right)^2\right)^2}-\frac{\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h+d}{R_2}\right)^2}{\left(\rho^2+\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h+d}{R_2}\right)^2\right)^2}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{\rho}{\mu_r}\cdot\left[\frac{1}{\left(\rho^2+\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h}{R_2}\right)^2\right)^2}-\frac{1}{\left(\rho^2+\left(\mathrm{ctg}(\beta)+\frac{h+d}{R_2}\right)^2\right)^2}\right]\right\}$$

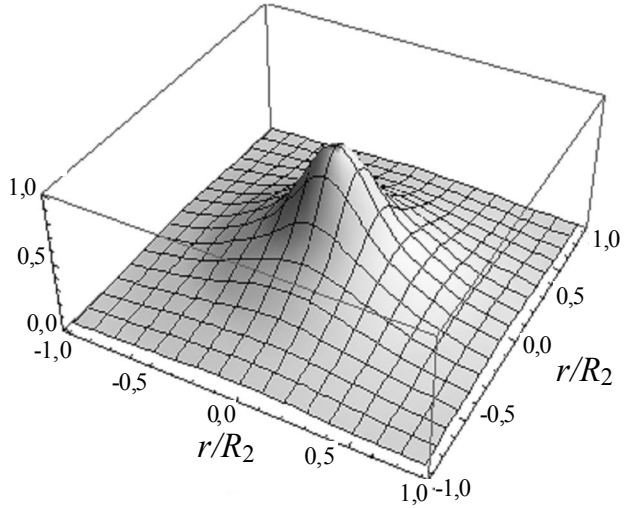


Розподіл сил притягання при магнітно-імпульсному рихтуванні

Об'ємна епюра радіального розподілу сили притягання до робочої поверхні індуктора



З циліндричним отвором



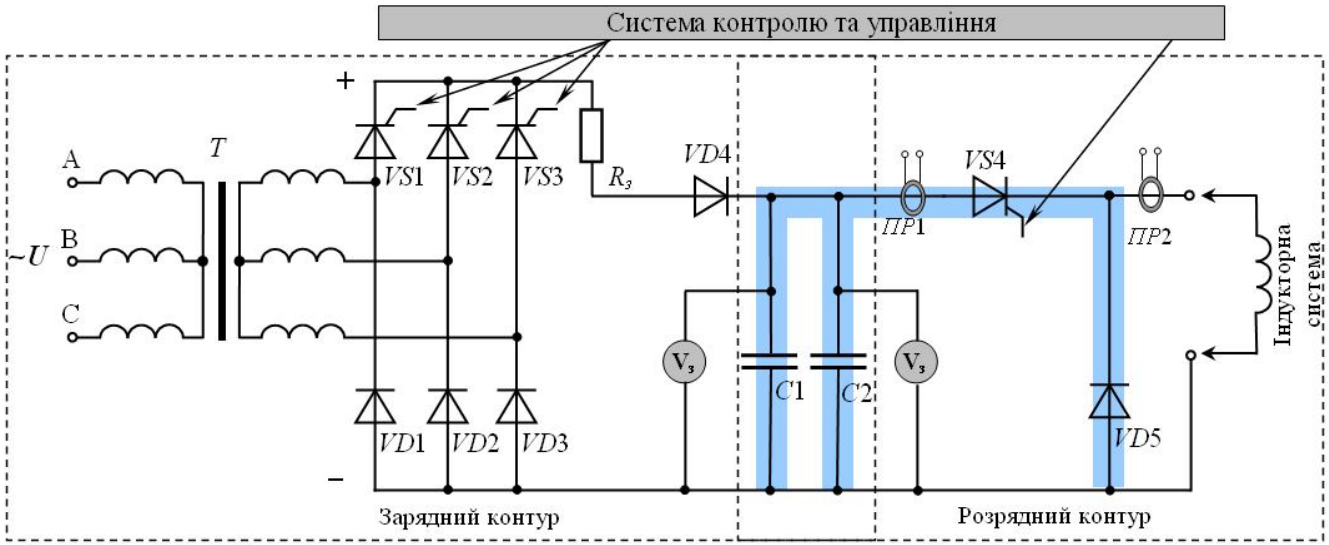
З конічним отвором при β = 60°

Перехід до конічної формі внутрішнього вікна індуктора істотно змінює характер радіального розподілу поля і сил, що діють:

магнітний потік концентрується в центральній області внутрішнього вікна, на відміну від плоского циліндричного індуктора, де максимум напруженості мав місце на кордоні внутрішнього отвору витка.

Джерело потужності – магнітно-імпульсна установка

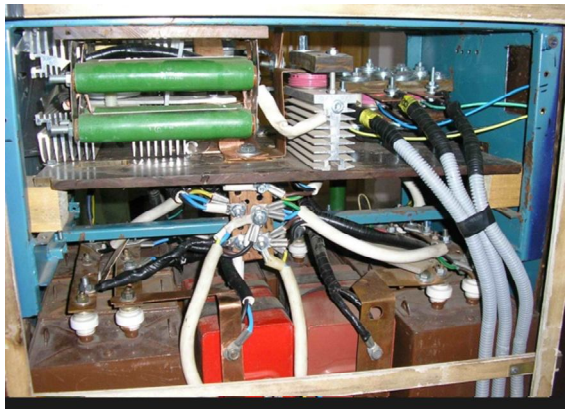
Зовнішній вид



$V_з$ – Вольтметр, що показує рівень заряду конденсаторів.
ПР – Пояс Роговського.

Електрична схема установки

Розміщення елементів всередині установки



Аналіз електромагнітних процесів при роботі джерела потужності

Зарядна напруга на ємнісному накопичувачі установки

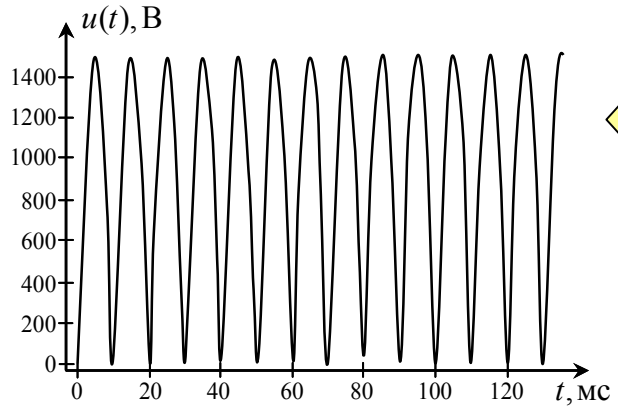
$$u_c(t_n) = U_{0n} + \frac{U_m}{\tau} \cdot \int_{t_{ni}}^{t_{ne}} \exp\left(\frac{x - t_n}{\tau}\right) \cdot \left| \sin(\omega \cdot x) \right| \cdot dx, \quad n = 1, 2, 3.....$$

Напруга і струм у навантаженні

$$u_{Li}(t) \approx U_{Cm} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t);$$

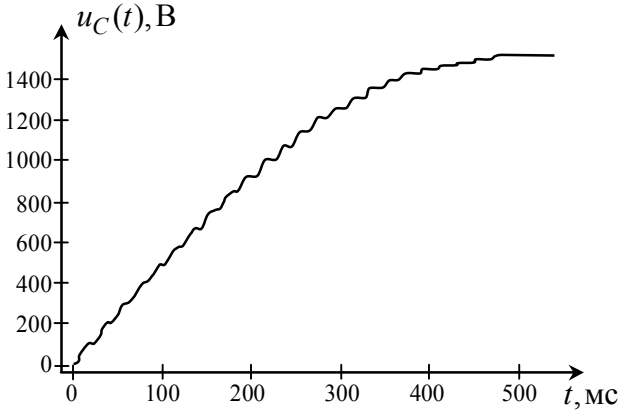
$$i_{Li}(t) \approx \frac{U_{Cm}}{Z} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t).$$

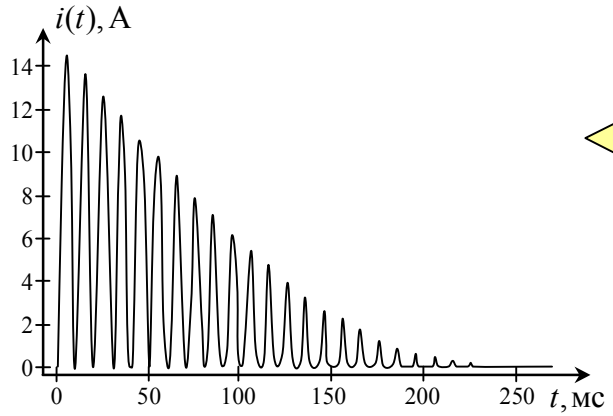
Заряд ємнісного накопичувача у часі при R_1 = 100Ом



Напруга на виході випрямляча

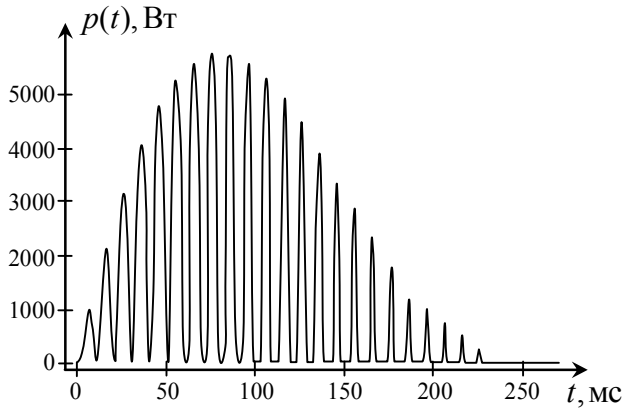
Напруга на ємності





Зарядний струм

Миттєва потужність



Аварійний режим роботи джерела потужності

Напруга на ємнісному накопичувачі установки

$$u_{c\,отн}(t)=\begin{cases} e^{-\delta_{10}\cdot\omega_1\cdot t}\cdot\cos(\omega_1\cdot t), & t\in[0,t_0] \\ \cos(\omega_1\cdot t_0)\cdot e^{-\delta_{10}\cdot\omega_1\cdot t_0}\cdot\left[e^{-\delta_{20}\cdot\omega_2\cdot(t-t_0)}\cdot\left(\cos(\omega_2(t-t_0))+(\delta_{20}-k)\sin(\omega_2(t-t_0))\right)\right], & t\in[t_0,\infty) \end{cases}$$

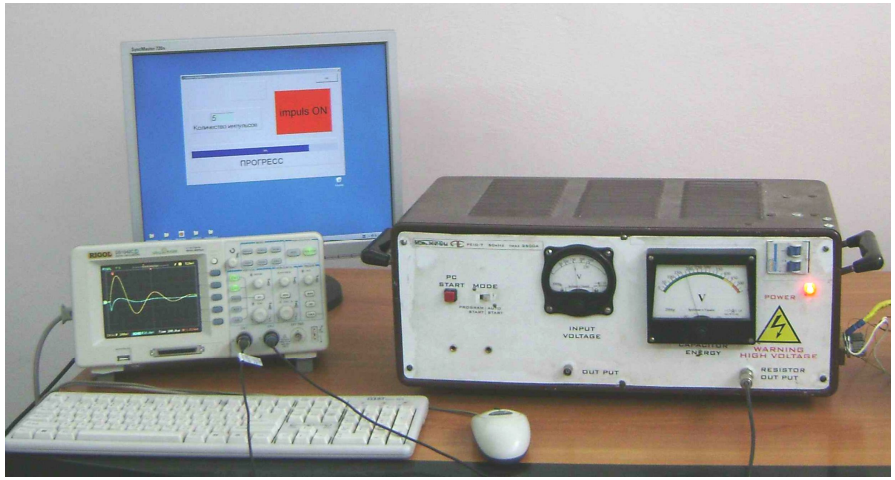
где $u_{c\,отн}(t)=\dfrac{u_c(t)}{u_N}, u_N=u_{c0}.$

Струм в розрядному контурі установки

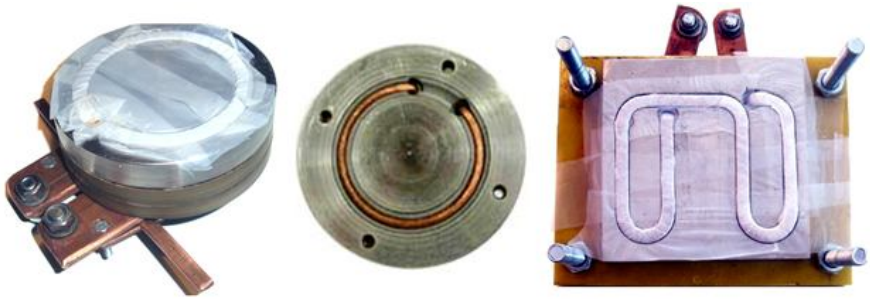
$$i_{отн}(t)=\begin{cases} \dfrac{e^{-\delta_{10}\cdot\left(\omega_1\cdot t-\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}}{\sin\left(\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}\cdot\sin(\omega_1\cdot t),\ t\in[0,t_0] \\ \dfrac{\omega_2}{\omega_1}\cdot\dfrac{\cos(\omega_1\cdot t_0)}{(1+\delta_{10}^2)}\cdot\dfrac{e^{-\delta_{10}\cdot\left(\omega_1\cdot t_0-\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}}{\sin\left(\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right)}\left[e^{-\delta_{20}\omega_2(t-t_0)}\left(k\cos(\omega_2(t-t_0))+\left(1+\delta_{20}(\delta_{20}-k)\right)\sin(\omega_2(t-t_0))\right)\right], & t\in[t_0,\infty), \end{cases}$$

где $i_{отн}(t)=\dfrac{i(t)}{i_N}$, $\quad i_N=-u_{c0}\cdot(\omega_1\cdot C)\cdot(1+\delta_{10}^2)\cdot e^{-\delta_{10}\cdot\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)}\cdot\sin\left(\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\delta_{10}}\right)\right).$

Експериментальні дослідження інструментів зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування



Комплекс для імітації та моделювання процесів в інструментах



а) б) в)

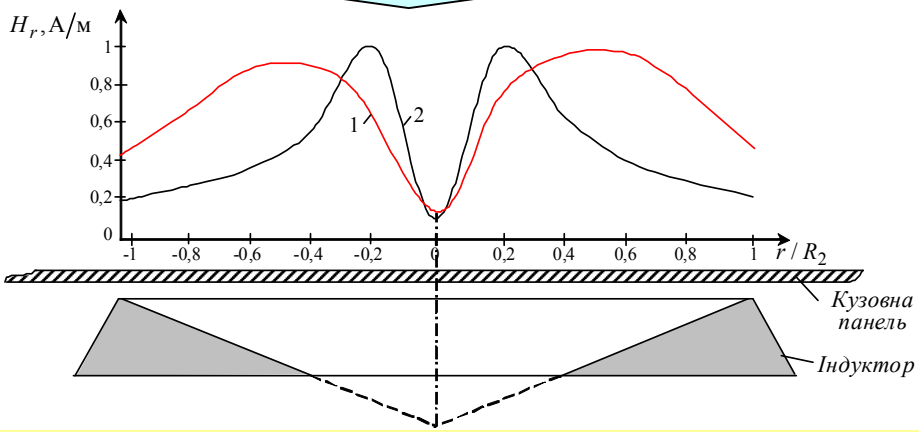
г) д)

Індукторні системи - інструменти зовнішнього безконтактного рихтування

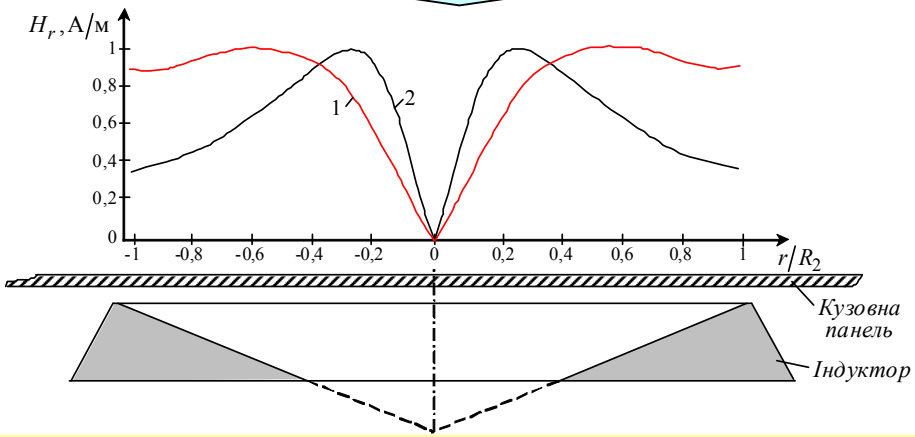
а – з масивним додатковим екраном і циліндровим індуктором;
б – з тонкостінним додатковим екраном і циліндровим індуктором;
в – з тонкостінним додатковим екраном і індуктором прямокутної форми;
г – робоча область якого в перерізі має форму усіченого конуса;
д – з масивним додатковим екраном і двохвитковим циліндричним індуктором.

Експериментальні дослідження інструментів з конічною формою силового елемента

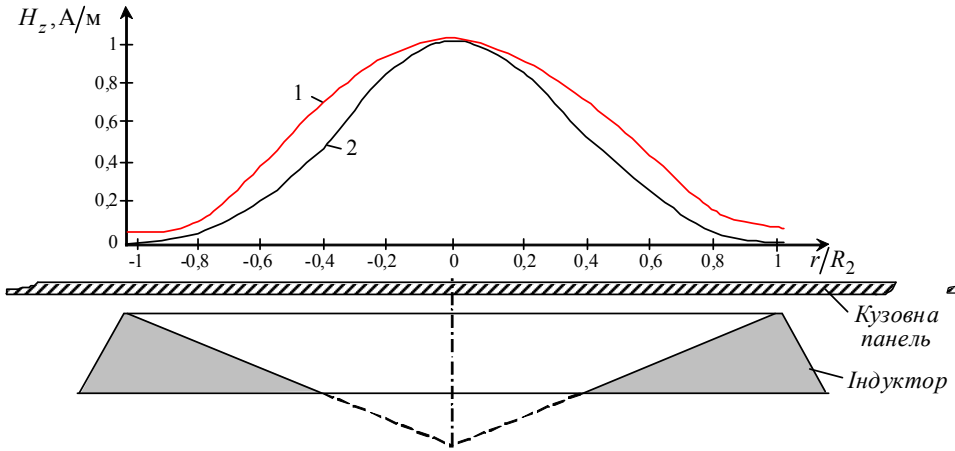
Результати вимірювань

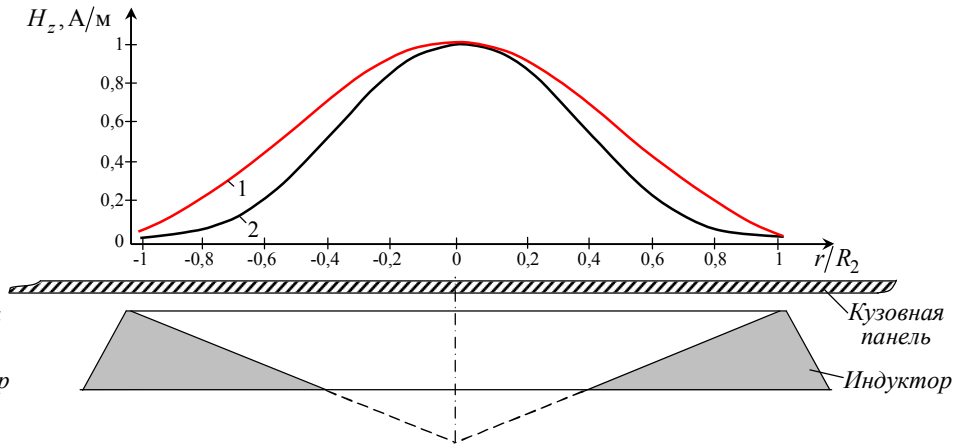


Результати розрахунку



Радіальний розподіл тангенціальної компоненти напруженості магнітного поля у відносних одиницях (нормування на максимум): 1 - кут нахилу твірної конічного отвору індуктора 60˚, 2 - кут нахилу твірної конічного отвору індуктора 75˚





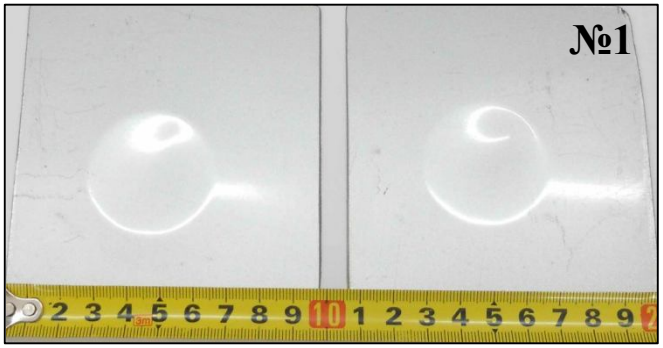
Радіальний розподіл нормальної компоненти напруженості магнітного поля

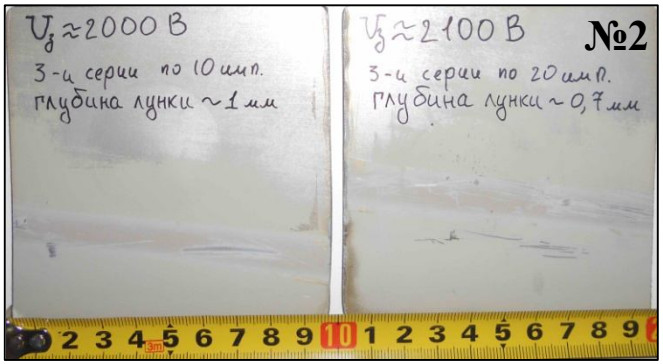
Експериментальний варіант комплексу зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування

Технічні характеристики:

- робота від мережі ~ 380/380 В;
- зарядна напруга до 2 кВ;
- енергія, що запасається до 2 кДж;
- власна частота в імпульсі ~ 7 кГц,
  в комплекті з погоджувальними пристроями ~ 1 … 2 кГц;
- частота повторення розрядних імпульсів до 10 Гц.

Експерименти по зовнішньому магнітно-імпульсному рихтуванні кузовних панелей автомобілів

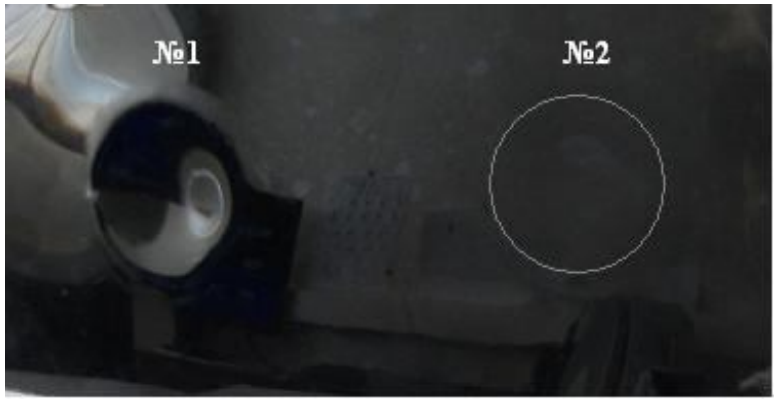




Кузовна панель автомобіля Citroen, товщина ~ 1,0 мм

Кузовна панель автомобіля Subaru, товщина ~ 0,8 мм

Результат рихтування



Позиція **№1** – вм'ятина створена
Позиція **№2** – вм'ятина видалена

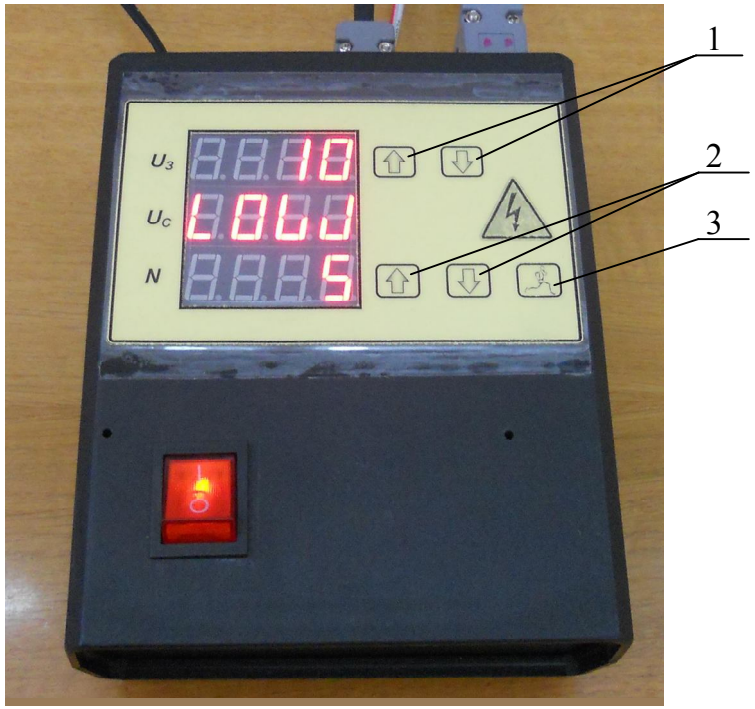
Кузовна панель двері автомобіля Audi, товщина ~ 1,0 мм

До рихтування

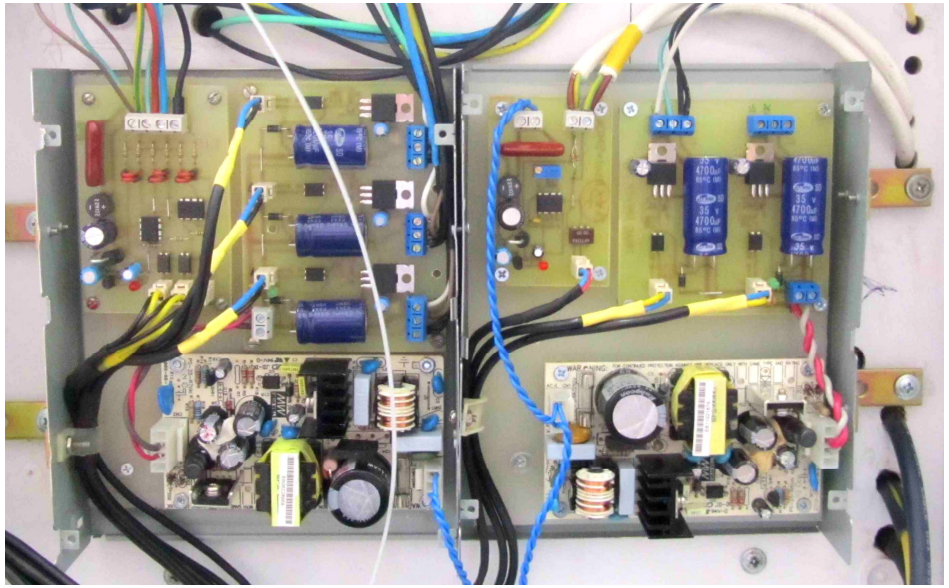
Після рихтування

Елементи системи контролю та управління

Пульт управління



Електричні плати з боку системи контролю та управління



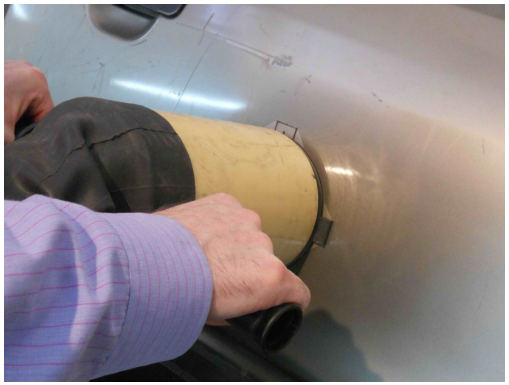
1 – Кнопки збільшення/зменшення напруги заряду конденсаторних батарей;
2 – Кнопки збільшення/зменшення кількості розрядних імпульсів;
3 – Кнопка «Пуск» – заряду/розряду конденсаторних батарей

Технологічний маршрут операції зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування

а)

б)

в)



г)

д)

е)

а - визначення вм'ятини; б - позначення її граничних розмірів; в - фіксація інструменту над вм'ятиною; г - магнітно-імпульсна рихтування; д - видалення маркерних позначень; е - панель двері автомобіля після рихтування

Результати роботи

- Результати роботи інтегрованого комплексу, відображено в **11 монографіях**, **5 навчальних** посібниках, більш ніж **250 статтях**. Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено **43 патентами**. За даною тематикою захищені **3 докторських** та **6 кандидатських** дисертацій. Матеріали дослідження є основою для підготовки ще **3 докторських** та **7 кандидатських** дисертацій, які будуть захищені протягом двох років.
- За результатами представленої роботи розроблено і підготовлений **5 бізнес-проектів**, які стали фіналістами та переможцями у Міжнародних конкурсах та інвест-проектах.
- Результати, отримані в роботі, були багаторазово представлені на Міжнародних науково-технічних виставках і конкурсах протягом 2008-13 р. Нагороджені **10-ма дипломами** переможця та фіналіста міжнародних конкурсів.

Висновки

1. В Україні створено і впроваджено інтегрований комплекс з розроблення, експлуатації, обслуговування та ремонту гібридних автомобілів, електромобілів та звичайних автотранспортних засобів.
2. Вперше в Україні вирішені важливі науково-технічні проблеми пов’язані з розробленням концепції створення енергозберігаючих та екологічно чистих транспортних засобів, створенням новітніх магнітно-імпульсних технологій ремонту автотранспортних засобів, конверсії базового автомобіля у гібридний варіант з різноманітними альтернативними енергоустановками, а також у електромобіль з автономною зарядкою тягових акумуляторних батарей, підвищенням якості підготовки фахівців.
3. Вперше створено низку електронних систем управління синергетичного автомобіля, а також методи адаптації стратегії управління гібридною силовою установкою до тягово-швидкісного режиму руху автомобіля на основі концепції нейромережевого і нейронечіткого управління з адаптивним критиком і моделлю об’єкта управління.
4. Розроблено наукові основи з визначенню основних параметрів і характеристик екологічно чистих автотранспортних засобів, порівняльного аналізу різних конструктивних рішень, дослідження впливу конструктивних і потужнісних параметрів гібридної силової установки на експлуатаційні властивості автомобіля на основі математичних моделей і методів оптимізації.
5. Теоретичні і практичні надбання, які впровадженні в інтегрований комплекс використовуються фахівцями у дослідницькій і виробничій діяльності науково-виробничих підприємств для наукового обґрунтування та порівняльного аналізу нових технічних рішень синергетичних автомобілів та їх силових установок; автомобільних та автотранспортних заводах для дослідження впливу конструктивних параметрів синергетичних силових установок на експлуатаційній властивості автомобіля в різних умовах, розробки принципів конверсії традиційних автомобілів в гібридні чи електромобілі; в навчальному процесі при підготовці бакалаврів і магістрів за відповідними напрямами.