

## РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД

### РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Гузенко П.В., студент, Ковбаса С.М., д.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Розвиток електромобільності є загальносвітовою тенденцією спрямованою на зменшення викидів CO<sub>2</sub>, шумового навантаження, а також залучення інвестицій на проекти з електромобільності та зниження використання транспортних засобів на ДВЗ. Одним з можливих варіантів переходу на використання електромобіля є модернізація існуючого транспортного засобу з традиційним двигуном внутрішнього згорання.

В даній статті на основі проведеного аналізу існуючих моделей було вирішено обрати модель Renault Logan для подальшого переведення з існуючого двигуна внутрішнього згорання на електропривод, так як ця модель є досить бюджетною та популярною.

Dacia Logan – компактні автомобілі В-Класу, що виробляються румунською компанією Dacia з 2004 р. У 2008 р. модель пройшла фейсліфт. З 2009 р. імпортується до України під назвою Renault Logan. Всього виготовлено 2,5 млн автомобілів Logan першого покоління. Для дослідження використаємо версію [1] з двигуном на 1,0 л та трансмісією типу SCe 75.

**Мета роботи.** Розрахунок та вибір електричного двигуна, акумуляторної та батареї суперконденсаторів для подальшого їх впровадження в нову електромеханічну систему автомобіля на основі електропроводу.

**Матеріали і результати досліджень.** Вихідні дані використаємо з брошури [1]. Основні характеристики автомобіля зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні дані Renault Logan

Параметр	Значення
Максимальна маса автомобіля $m_{\max}$ , кг	1491
Довжина автомобіля $B$ , м	4.346
Ширина автомобіля зі складеними дзеркалами зад. огляду $L_1$ , м	1.733
Висота автомобіля $H$ , м	1.517
Загальне передатне число $V$ -ої передачі $GR_V$	3.81
Діаметр колеса $d_k$ , м	0.63
Максимальна лінійна швидкість автомобіля $V_{\max}$ , км / год	158
Розгін до 100 км/год $t_{100}$ , с	15,1

Тягове зусилля, що діє на транспортний засіб:

$$F_{TR} = F_{fr} \cos \alpha + F_a + F_{mg} + m_{v_{max}} \cdot a, \quad (1)$$

де  $F_{TR}$  – тягове зусилля;  $\alpha = 0$  – кут нахилу;  $F_{fr}$  – сила опору тертя-кочення;  $F_{aero}$  – сила аеродинамічного опору;  $F_{mg}$  – сила тяжіння;  $a$  – прискорення.

Сила опору тертя-кочення розраховується як [2]:

$$F_{fr} = P \cdot f_r, \quad (2)$$

де  $P = m_{max} \cdot g$  – нормальне навантаження, що діє на центр кочення;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $f_r = 0.013$  – коефіцієнт тертя-кочення.

Нормальне навантаження:

$$P = m_{v_{max}} \cdot g = 1491 \cdot 9.81 = 14626.71 \text{ Н.} \quad (3)$$

Тоді значення сили опору тертя кочення, згідно з (2):

$$F_{fr} = P \cdot f_r = 14626.71 \cdot 0.013 = 190.147 \text{ Н.}$$

Сила аеродинамічного опору:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V - V_w)^2, \quad (4)$$

де  $\rho = 1.29 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ ;  $V$  – швидкість електромобіля;  $V_w = 0$  – сила вітру,  $C_D = 0.4$  [2].

Площа фронтального перерізу автомобіля:

$$A_f = L1 \cdot H = 1.733 \cdot 1.517 = 2.629 \text{ м}^2. \quad (5)$$

Отже, закон зміни сили аеродинамічного опору, згідно з (4):

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.29 \cdot 2.629 \cdot 0.4 \cdot V^2 = 0.678V^2. \quad (6)$$

Складова сили тяжіння розраховується як:

$$F_{mg} = m_{max} \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (7)$$

Прийmemo, що автомобіль рухається по горизонтальній поверхні, тоді  $F_{mg} = 0$ .

Отже, закон зміни тягового зусилля, згідно з (1).

$$F_{TR} = F_{fr} + F_{aero} + F_{mg} + m_{\Sigma} \cdot a = 190.147 + 0.678V^2 + 1491 \cdot a. \quad (8)$$

В законі (8) маємо невідомі значення лінійної швидкості та прискорення. Відповідно до цього закону створюємо так званий «driving cycle», або тахограму руху автомобіля протягом 1000 с, (рис. 1).

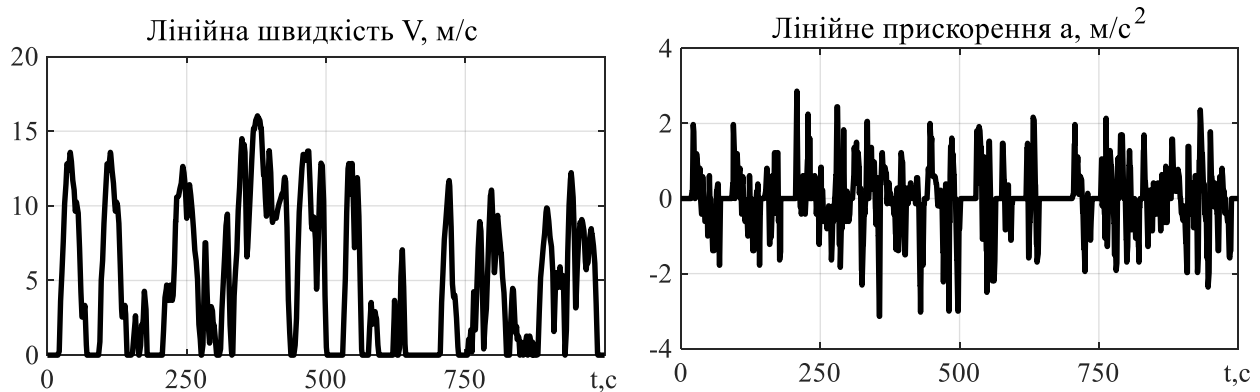


Рисунок 1 – Driving cycle та його похідна (лінійне прискорення)

Механічна потужність  $P_{мех}(t)$  розраховується як:

$$P_{мех}(t) = F_{TR}(t) \cdot V(t). \quad (9)$$

Використаємо для розрахунків значення загального передатного числа  $GR_V$  з табл. 1, тобто

$$i_p = GR_V = 3.81. \quad (10)$$

Для побудови  $\omega_{дв}(t)$ ,  $M_{дв}(t)$  необхідно виконати наступні розрахунки.

Кутова швидкість колеса:

$$\omega_k(t) = \frac{V(t)}{r_k} \quad (11)$$

де  $r_k = d_k / 2 = 0.63 / 2 = 0.315$  м – радіус колеса.

Момент колеса:

$$M_k(t) = F_{TR}(t) \cdot r_k. \quad (12)$$

Момент двигуна:

$$M_{дв}(t) = \frac{M_k(t)}{i_p \eta_p}, \quad (13)$$

де  $\eta_p = 0,97$  – ККД редуктора.

Кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{дв} = \omega_k(t) \cdot i_p. \quad (14)$$

В результаті отримаємо відповідні залежності  $\omega_{дв}(t)$ ,  $M_{дв}(t)$  (рис. 2).

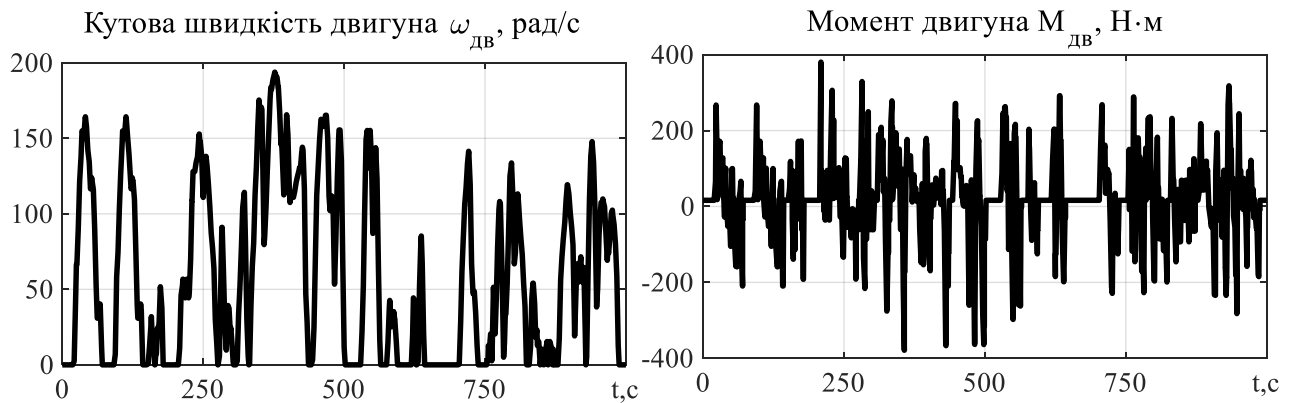


Рисунок 2 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості та моменту двигуна

Опираючись на (9) механічна потужність двигуна  $P_{дв мех}(t)$  буде:

$$P_{дв мех}(t) = \frac{P_{мех}(t)}{\eta_p}. \quad (15)$$

І відповідно потужність що споживатиметься від батареї:

$$P_{бат}(t) = \frac{P_{дв мех}(t)}{\eta_{дв} \eta_{inv}}, \quad (16)$$

де  $\eta_{inv} = 0,97$  – ККД інвертора.

Проінтегруємо графік  $V(t)$  (рис. 1), отримаємо шлях (рис. 3).

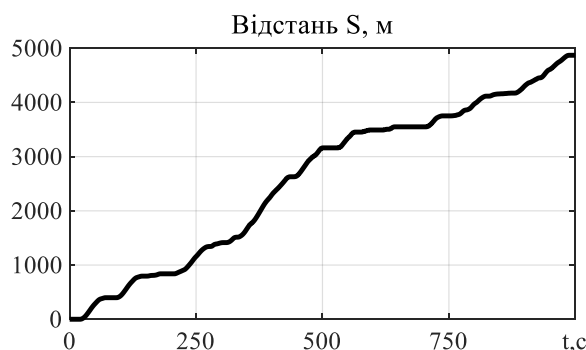


Рисунок 3 – Шлях, який пройшов електромобіль за 1000 с

Згідно з графіку, маємо  $S_{1000s} \approx 5$  км. Нехай, максимальний пробіг від батареї буде  $S_{\max} = 200$  км, тобто коефіцієнт масштабування буде:

$$K_{\text{мштб}} = \frac{S_{\max}}{S_{1000s}} = \frac{200}{5} = 40. \quad (17)$$

Проінтегрувавши (16) отримаємо кількість енергії, яку необхідно витратити на пробіг 5 км (рис. 4).

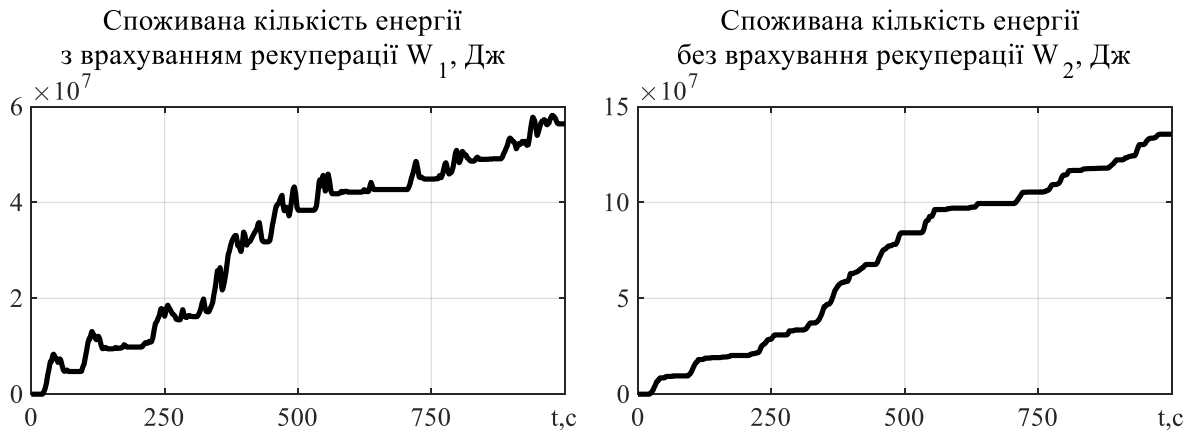


Рисунок 4 – Графіки енергії з врахування та без врахуванням рекуперації

З графіків маємо:

$$W_1 = 5.639 \cdot 10^7 \text{ Дж} \approx 56,4 \text{ МДж}, \quad W_2 = 1.356 \cdot 10^8 \text{ Дж} \approx 135,6 \text{ МДж}.$$

Потужність АКБ, яку віддає протягом години розраховується як:

$$P_{\text{БАТ}} = U_{\text{БАТ}} I_{\text{БАТ}}. \quad (18)$$

де  $I_{\text{БАТ}}$  – ємність батареї, виражена як струм, який протікає в батареї протягом однієї години, А · год.

Тоді, енергія батареї:

$$W_{\text{БАТ}} = 3600 P_{\text{БАТ}}. \quad (19)$$

$W_s$  – необхідна кількість енергії для АКБ. Так як АКБ мають обмежену здатність поглинати енергію від рекуперації, тому розглядається найгірший випадок, коли:  $W_s = W_2$ .

Прийmemo напругу ланки постійного струму перетворювача  $U_{\text{dc}} = 540$  В. Тоді, будуть вірними наступні нерівності:

$$U_{\text{АКБ}} \geq U_{\text{dc}}, \quad W_{\text{БАТ}} \geq W_s, \quad I_{\text{БАТ}} \geq \frac{W_s}{3600 U_{\text{dc}}}. \quad (20)$$

Ємність АКБ:

$$I_{\text{BAT}} = \frac{W_2}{3600 U_{\text{АКБ}}} = \frac{1.356 \cdot 10^8}{3600 \cdot 540} = 69.74 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (21)$$

Провівши аналіз наявних моделей LiFePO4 акумуляторів, вибір зосередився на моделях з табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри обраних акумуляторних батарей

Параметр	Назва Shenzhen GTech LiFePO4 3.2V 25Ah [3]	LogicPower LP LiFePO4 6V - 12 Ah [4]
Напруга $U_{\text{CELL}}$ , В	3.2	6
Ємність $I_{\text{CELL}}$ , А · ГОД	25	12
Маса $m_{\text{CELL}}$ , кг	0.63	0.71
Габаритні розміри $L_{\text{CELL}} \times W_{\text{CELL}} \times H_{\text{CELL}}$ , мм	26 × 70 × 180	151 × 50 × 96
Вартість $Q_{\text{CELL}}$ , \$	29.59	27.92

Розрахуємо параметри АКБ для двох типів елементів.

Кількість послідовних елементів:

$$N_{\text{CELL}}^{3.2V25Ah} = \frac{U_{\text{dc}}}{U_{3.2V25Ah}} = \frac{540}{3.2} = 168,75 \approx 169 \text{ шт,} \quad (22)$$

$$N_{\text{CELL}}^{6V12Ah} = \frac{U_{\text{dc}}}{U_{6V12Ah}} = \frac{540}{6} = 90 \text{ шт.}$$

Кількість паралельних елементів:

$$N_I^{3.2V25Ah} = \frac{I_h}{I_{\text{CELL}}^{3.2V25Ah}} = \frac{69.74}{25} = 2.79 \approx 3 \text{ гілки,} \quad (23)$$

$$N_I^{6V12Ah} = \frac{I_h}{I_{\text{CELL}}^{6V12Ah}} = \frac{69.74}{12} = 5.81 \approx 6 \text{ гілок.}$$

Отже, сумарна кількість елементів буде:

$$N_{\Sigma}^{3.2V25Ah} = N_{\text{CELL}}^{3.2V25Ah} \cdot N_I^{3.2V25Ah} = 169 \cdot 3 = 507 \text{ шт,} \quad (24)$$

$$N_{\Sigma}^{6V12Ah} = N_{\text{CELL}}^{6V12Ah} \cdot N_I^{6V12Ah} = 90 \cdot 6 = 540 \text{ шт.}$$

Загальна маса акумуляторної батареї:

$$m_{\text{АКБ}}^{3.2V25Ah} = N_{\Sigma}^{3.2V25Ah} \cdot m_{\text{CELL}}^{3.2V25Ah} = 0.63 \cdot 507 = 319.41 \text{ кг,} \quad (25)$$

$$m_{\text{АКБ}}^{6V12Ah} = N_{\Sigma}^{6V12Ah} \cdot m_{\text{CELL}}^{6V12Ah} = 0.71 \cdot 540 = 362.1 \text{ кг.}$$

Об'єм акумуляторної батареї:

$$V_{\text{АКБ}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = L_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} W_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} H_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 26 \cdot 70 \cdot 180 \cdot 507 \approx 0.17 \text{ м}^3, \quad (26)$$

$$V_{\text{АКБ}}^{6\text{V}12\text{Ah}} = L_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} W_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} H_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 151 \cdot 50 \cdot 96 \cdot 540 \approx 0.39 \text{ м}^3.$$

Вартість АКБ:

$$Q_{\text{АКБ}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = Q_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} \cdot N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 29.59 \cdot 507 = \$15002.13, \quad (27)$$

$$Q_{\text{АКБ}}^{6\text{V}12\text{Ah}} = Q_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} \cdot N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 27.92 \cdot 540 = \$15076.8.$$

Аналізуючи результати обираємо Shenzhen GTech LiFePO4 3.2V 25Ah, оскільки при однаковій вартості вони легші та займають менший об'єм.

Для вибору електродвигуна необхідно проаналізувати графік моменту (рис. 2). На основі пікового значення  $M_{\text{max}} = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$  було вибрано синхронний двигун з постійними магнітами EMRAX 268 Medium Voltage LC [5].

Таблиця 3 – Технічні характеристики EMRAX 268 Medium Voltage LC

Параметр	Значення
Максимальна напруга ланки постійного струму $U_{\text{dc max}}^{\text{ДБ}}$ , В	680
Максимальний ККД $\eta_{\text{max}}^{\text{ДБ}}$	0.96
Максимальна потужність $P_{\text{max}}^{\text{ДБ}}$ , кВт (при $n = 4500$ об/хв)	210
Номінальна потужність $P_{\text{ном}}^{\text{ДБ}}$ , кВт	100
Максимальний момент $M_{\text{max}}^{\text{ДБ}}$ , Н·м	500
Номінальний момент $M_{\text{ном}}^{\text{ДБ}}$ , Н·м	213
Максимальна швидкість обертання ротора $n_{\text{max}}^{\text{ДБ}}$ , об / хв	5500
Номінальна швидкість обертання ротора $n_{\text{ном}}^{\text{ДБ}}$ , об / хв	4500
Максимальний струм статора $i_{\text{max}}^{\text{ДБ}}$ , А	500
Номінальний струм статора $i_{\text{ном}}^{\text{ДБ}}$ , А	220
Активний опір статора R1, мОм (при 25 °С)	9.85
Індуктивний опір статора L1, мкГн	70
Магнітний потік від постійних магнітів $L_m i_f$ , Вб	0.06099
Кількість пар полюсів $p_n$ , шт	10
Момент інерції $J_{\text{дв}}$ , кг·м <sup>2</sup>	0.05769

**Висновки.** Для автомобіля Renault Logan та заданої тахограми руху розраховано параметри тягової електромеханічної системи. Встановлено, що для забезпечення запасу ходу в 200 км необхідно використати АКБ на базі елементів LiFePO4 3.2V 25Ah в кількості 507 шт., при цьому маса батареї складає 319.41 кг, об'єм 0,17 м<sup>3</sup>, вартість \$15002.13. По максимальному моменту навантаження

вибрано синхронний двигун з постійними магнітами EMRAX 268, який забезпечує максимальну потужність 210 кВт. Результати розрахунків можуть бути використані при модернізації існуючих автомобілів, що використовують двигуни внутрішнього згорання.

#### Перелік посилань

1. Каталог брошур на весь модельний ряд Renault Україна (Рено Україна). Renault Ukraine | Офіційний імпортер Renault в Україні. URL: <https://www.renault.ua/range-brochure.html> (дата звернення: 29.11.2022).
2. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles / M. Ehsani et al. Taylor & Francis Group, 2018. 546 p.
3. Аккумулятор LiFePO4 3.2V 25Ah – купити в Україні. GreenTech. URL: <https://greent.com.ua/akkumulyator-lifepo4-3-2v-25ah-art-2003> (дата звернення: 29.11.2022).
4. Аккумулятор LogicPower LP LiFePO4 6V - 12 Ah купити в Україні, низкая цена в Киеве. Интернет-магазин электротехники Home-Energy: ↗ Гарант надежного электропитания. URL: <https://home-energy.com.ua/akkumulyatory/1934-logicpower-lp-lifepo4-6-12-ah.html> (дата звернення: 29.11.2022).
5. 268 (210kW | 500Nm) - EMRAX. EMRAX. URL: <https://emrax.com/e-motors/emrax-268/> (date of access: 29.11.2022).