

# АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА, ВКЛЮЧЕНИХ ПАРАЛЕЛЬНО, В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Белкін С.В., магістрант, Реуцький М.О., к.т.н., доцент  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

**Вступ.** Використання паралельно з акумуляторною батареєю (АБ) суперконденсаторів (СК) дозволяє отримати ряд суттєвих переваг в системах живлення електромобілів: можливість отриманих великих імпульсних струмів через електродвигун в момент початку руху при одночасному забезпеченні більш сприятливих умов експлуатації акумуляторів за рахунок зменшення струмів через акумулятор а також зростання ККД енергетичної установки, що дозволяє збільшити пробіг електромобіля на одній заправці. Крім цього повернення енергії в акумулятор при частих гальмуваннях електромобіля в умовах міського циклу викликає їх швидке старіння. Використання суперконденсатора в якості накопичувача енергії в режимах рекуперації дозволяє до  $1 \cdot 10^6$  циклів заряд-розряд.

**Метою роботи** є аналіз ефективності використання суперконденсатора, включеного паралельно з акумуляторною батареєю в системі живлення універсального транспортного пристрою «Трик» в пусковому режимі роботи.

**Результати дослідження.** Представлені результати моделювання в системі Matlab Simulink перехідних процесів в системі акумулятор та акумулятор з паралельно підключеним суперконденсатором, від яких здійснюється живлення асинхронного двигуна (рис. 1). Суперконденсатор слугує джерелом енергії, яка обмежує струм акумулятора під час пуску АД за рахунок меншого внутрішнього опору.

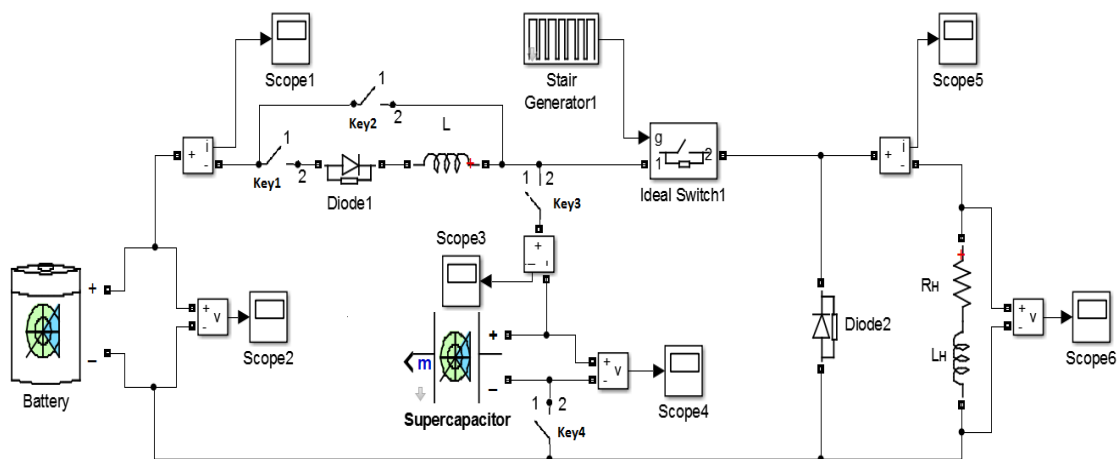


Рисунок 1 – Схема живлення електродвигуна

Асинхронний двигун представлений у вигляді R-L навантаження з параметрами  $R_H$  та  $L_H$ , які відповідають реальній машині фірми АВВ серії М2 АА080С2 потужністю 1100 Вт, номінальний струм 2.4 А, ККД 0.806,  $\cos\phi$  0.8.

Для спрощення розрахунків ємності акумуляторній літій-іонній батареї на початковому етапі було прийнято, що розряд проходить по лінійному закону. В подальшому модель процесу розряду АБ може бути уточненим.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї.

Для проходження максимальної відстані 100 км в «економічному» режимі роботи, при якому для оціночних розрахунків можна вважати споживається третина номінальної потужності, на один двигун необхідна наступна енергія:

$$W = \frac{P_{2н}}{3 \cdot \eta} \cdot t = \frac{P_{2н}}{3 \cdot \eta} \cdot \frac{S}{v_{ек}} = \frac{1100}{3 \cdot 0,806} \cdot \frac{100}{30} = 1516,4 \text{ Вт} \cdot \text{час} ,$$

де:  $P_{2н} = 1100$  Вт – номінальна потужність АД;  $\eta = 0,806$  – ККД двигуна;  $S = 100$  км – необхідна відстань;  $V_{ек} = 30$  км/год – швидкість, при якій досягається максимальна відстань.

Отже, необхідна ємність однієї батареї акумуляторів:

$$Q = \frac{W}{U} = \frac{1516,4}{230} = 6,6 \text{ А} \cdot \text{час} ,$$

де  $U=230$  В – напруга батареї акумуляторів.

Для живлення електроприводу, враховуючи високі вимоги з питомої енергії, енергоефективності, низького внутрішнього опору, було вибрано 5 підключених послідовно батарей літій-іонних акумуляторів з наступними параметрами: напруга – 48 В; ємність – 11,6 А\*час; внутрішній опір – 0,5 Ом; Заряджений акумулятор 11,6 А\*час. теоретично здатен забезпечити силу струму 11,6 А упродовж однієї години чи 1 А упродовж 11,6 годин. На практиці надто великий струм розряду акумулятора зменшує ефективність віддачі електроенергії, що зменшує час його роботи. Було розраховано скільки годин зможе пропрацювати АБ ( $U = 230$  В;  $Q = 11,6$  А\*час;  $R = 0,5$  Ом) при різних струмах розряду.

За наведеними характеристиками розряду АБ при різних струмах (рис. 2) можна розрахувати падіння ємності АБ струму розряду та часу його протікання.

Наприклад маємо струм розряду 7,7 А, час протікання цього струму 0,5 год, то падіння ємності складає 2,5 А\*год. Це означає що підчас протікання струму 7,7 А через заряджений АБ протягом 0,5 год, його ємність стане 9,1 А\*год ( $11,6 - 2,5 = 9,1$  А\*час).

Таблиця 1 – Тривалість роботи АБ при різних струмах розряду

I (А)	13,8	13	12,6	12,4	12,3	11,9	10,8	10,4	10	7,7	5,9	4	3,6	3	0,15	0,05
T (час)	0,84058	0,892308	0,920635	0,935484	0,943089	0,97479	1,074074	1,115385	1,16	1,506494	1,966102	2,9	3,222222	3,866667	77,33333	232

Розглянемо послідовно кількість можливих пусків АД при наявності в блоці живлення тільки одного літій-іонного повністю зарядженого акумулятора з вихідними даними:  $Q = 11,6$  А\*час;  $U = 230$  В.

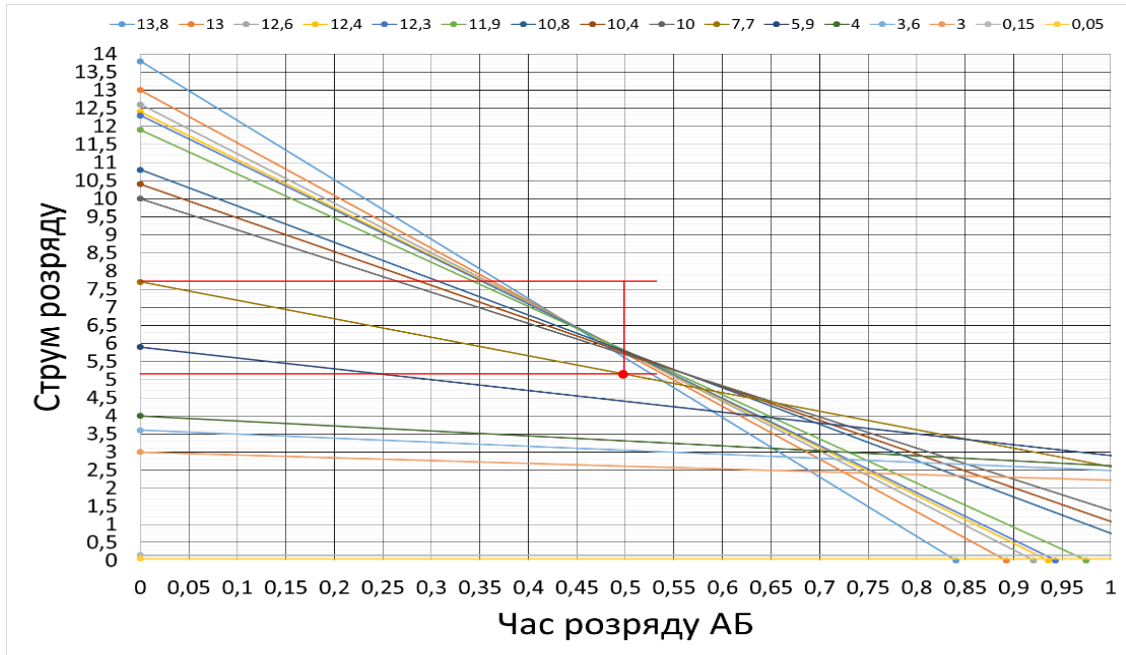


Рисунок 2 – Тривалість роботи АБ при різних струмах розряду (лінійний закон)

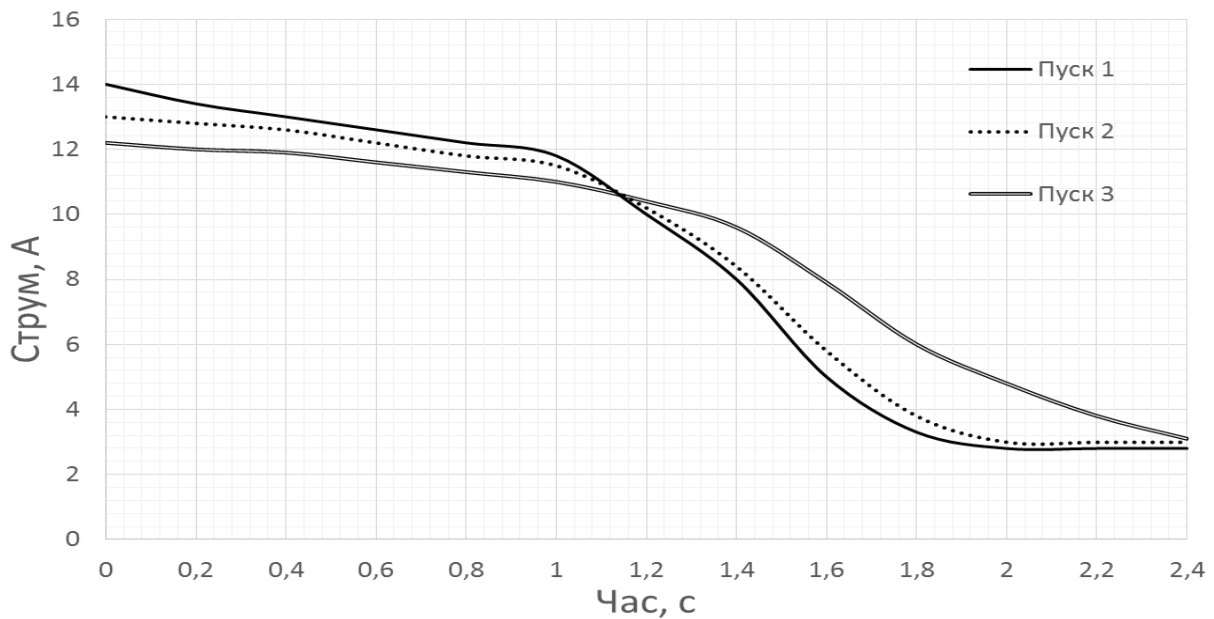


Рисунок 3 – Струм розряду акумулятора при пуск АД

*Розглянемо перший пуск* АД від акумулятора (рис. 3) з вихідними даними:  $Q = 11,6 \text{ А}\cdot\text{час}$ ;  $U = 230 \text{ В}$ .

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на чотири рівні ділянки де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 2.

Таблиця 2 – Зміна параметрів АБ при першому пуску

Ділянка	I [А]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А·час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	13,8	0,5	6,9	11,52	286156,8		
2	12,6		6,3	11,527	261432,36		
3	10		5	11,558	208044	W(аб1) [Дж]	8765682,84
4	4		2	11,595	83484	U(аб1) [В]	210,814883
$\Sigma$				11,55	839117,16	$\Delta U$ [В]	19,1851169

де: I – струм однакової амплітуди при пуску АД; R – внутрішній опір АБ;  $\Delta U$  – падіння напруги на ділянці;  $\Delta Q$  – ємність АБ при протіканні відповідного струму;  $\Delta W$  – падіння енергії на ділянці; W(аб1) – енергія котра залишилася в АБ після пуску; U(аб1) – напруга котра залишилася в АБ після пуску;  $\Delta U$  – падіння напруги під час пуску.

Падіння напруги на ділянці знаходимо за формулою:

$$\Delta U = I * R = 13,8 * 0,5 = 6,9 \text{ [В]}$$

Ємність АБ знаходимо відповідно графіку розряду АБ при відомому струму розряду і часу його протікання. Наприклад струм розряду 13,8 А, час протікання 0,5 с, знаходимо пряму струму розряду 13,8 А, за час 0,5 с. ємність впаде на 0,08 А·час, це означає, що ємність АБ на ділянці де протікає струм 13,8 буде мати 11,52 А·час. Інші ділянки розраховуються за аналогічною методикою.

Падіння енергії на ділянці знаходимо за формулою:

$$\Delta W = \Delta U * \Delta Q * 3600 = 6,9 * 11,52 * 3600 = 286156,8 \text{ [Дж]}$$

Інші ділянки розраховуються за аналогічною формулою.

Для знаходження енергії, яка залишилася в АБ після пуску достатньо відняти сумарне падіння енергії на ділянці від енергії АБ до пуску:

$$W(\text{аб1}) = W - \Sigma \Delta W = 9604800 - 839117,16 = 8765682,84 \text{ [Дж]}$$

де  $W = Q * U * 3600 = 11,55 * 230 * 3600 = 9604800 \text{ [Дж]}$ .

Для знаходження напруги, яка залишилася в АБ після пуску використаємо формулу:

$$U(\text{аб1}) = \frac{W(\text{аб1})}{\Delta Q \text{с}} = \frac{8765682,84}{11,55} = 210,814883 \text{ [В]}$$

де  $\Delta Q \text{с} = \frac{\Sigma \Delta Q}{4} = \frac{(11,52 + 11,527 + 11,558 + 11,595)}{4} = 11,55 \text{ [А·час]}$ .

**Другий пуск** АД від літій-іонного акумулятора (рис. 3). Розглянемо другий пуск АД від акумулятора:  $Q = 11,55 \text{ А·час}$ ;  $U = 210,81 \text{ В}$ .

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на п'ять рівних ділянок де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 3.

Таблиця 3 – Зміна параметрів АБ при другому пуску

Ділянка	I [А]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А·час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	13	0,5	6,5	11,47	268398		
2	12,3		6,15	11,48	254167,2		
3	10,4		5,2	11,5	215280		
4	5,9		2,95	11,535	122501,7	W(ак2) [Дж]	7843019,94
5	3		1,5	11,54	62316	U(ак2) [В]	189,362595
$\Sigma$				11,505	922662,9	$\Delta U$ [В]	21,4522886

**Третій пуск** АД від літій-іонного акумулятора (рис. 3). Розглянемо третій пуск АД від акумулятора:  $Q = 11,51$  А·час;  $U = 189,36$  В.

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на шість рівних ділянок де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 4.

Таблиця 4 – Зміна параметрів АБ при третьому пуску

Ділянка	I [А]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А·час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	12,4	0,5	6,2	11,44	255229,20		
2	11,9		5,95	11,45	245151,90		
3	10,8		5,4	11,46	222685,20		
4	7,7		3,85	11,47	158974,20		
5	3,6		1,8	11,50	74545,92	W(ак3)[Дж]	6824344,32
6	3	1,5	11,50	62089,20	U(ак3) [В]	165,30	
$\Sigma$				11,47	1018675,62	$\Delta U$ [В]	24,06

**Четвертий пуск** АД є неможливий, так як напруга акумуляторної батареї знизилася до критичної межі (165,3В) при якій час розгону до номінальної швидкості електрокару прямує до нескінченності.

**Комбіноване живлення АД від АБ з паралельно підключеним до нього суперконденсатором (іоністором).**

Виходячи із закону збереження енергії знаходимо ємність суперконденсатора [1].

$$\eta \cdot \left( \frac{2c \cdot U_1^2}{2} - \frac{2c \cdot U_2^2}{2} \right) = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$c = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_1^2 - U_2^2)} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_n^2 - (U_p - \Delta U)^2)} = \frac{115 \cdot 8^2}{2 \cdot 0,806 \cdot (230^2 - (229,8 - 0,5)^2)} = 14,2 \text{ Ф},$$

де  $\eta = 0,806$  – ККД двигуна;  $m = 45 + 70 = 115$  кг – маса транспортного засобу «Трик» з масою середньостатистичного водія;  $v = 30$  км/год = 8 м/с – максимальна швидкість транспортного засобу «Трик»;  $\Delta U = 0,5$  В – допустиме тимчасове «просідання» напруги.

Для живлення була вибрана батарея суперконденсаторів, що складається із 90-ти з'єднаних послідовно суперконденсаторів Yunasko з наступними

параметрами кожен: номінальна напруга – 2,75 В; ємність – 1275 Ф; внутрішній опір –  $0,11 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Параметри батареї: номінальна напруга – 230 В; ємність – 15 Ф; внутрішній опір –  $9,9 \cdot 10^{-3}$  Ом.

**Перший запуск двигуна** (рис.4, рис.5) відбувається при паспортних даних СК ( $C=15$  F;  $U=230$  В;  $R=0.0099$  Ом); АБ ( $Q=11,6$  А\*час;  $U=230$  В).

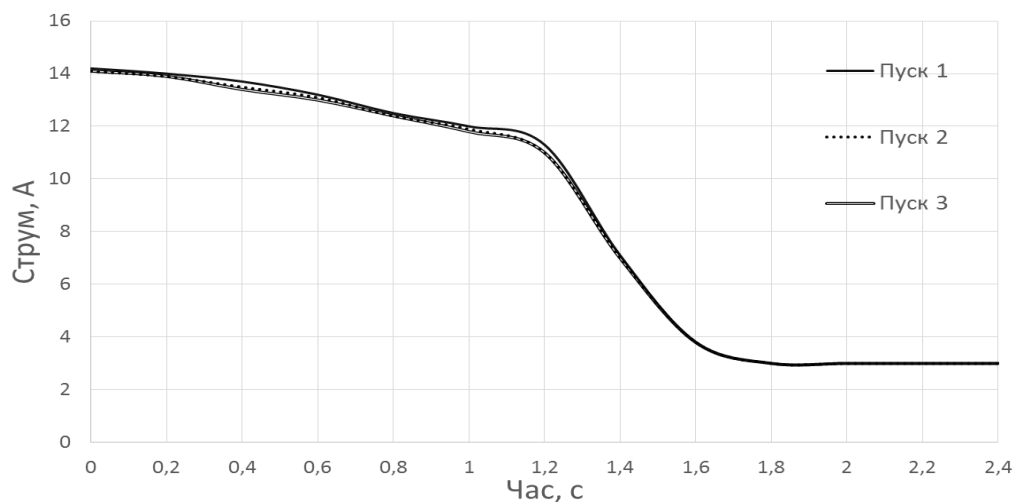


Рисунок 4 – Струм розряду суперконденсатора при пуску АД

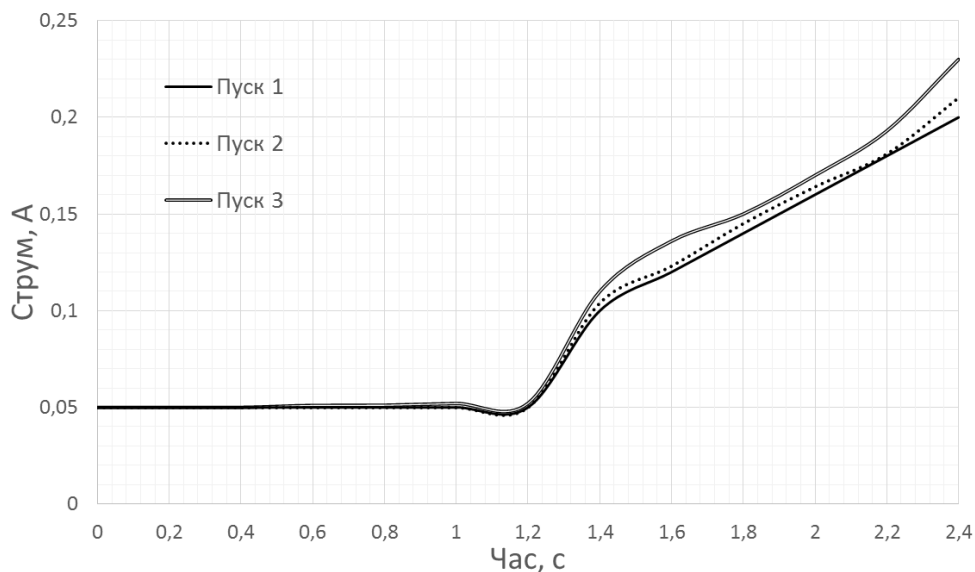


Рисунок 5 – Струм розряду акумулятора при пуску АД

Аналізуючи рисунок 5 маємо, що протягом першої секунди пуску практично всю енергію АД споживає від СК

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на дві рівних ділянки, а для зміни параметрів СК на чотири ділянки, де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 5 та 6 відповідно:

Таблиця 5 – Зміна параметрів АБ при першому пуску

Ділянка	I [A]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А·час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	0,05	0,5	0,025	11,6	1044	W(ак1) [Дж]	9600624
2	0,15		0,075	11,6	3132	U(ак1) [В]	229,9
$\Sigma$				11,6	4176	$\Delta U$ [В]	0,1

Таблиця 6 – Зміна параметрів СК при першому пуску

Ділянка	I [A]	T [с]	U [В]	W [Дж]		
1	14	0,5	230	1610	$\Delta U$ [В]	33,115
2	13			1495		
3	10			1150		
4	3,7			425,5		
$\Sigma$				4680,5	W(ск1) [Дж]	312735,169
					C [Ф]	13,851598

де: I – струм однакової амплітуди при пуску АД; T – струм протікання струму певної амплітуди через СК; U – напруга СК на ділянці;  $\Delta W$  – падіння енергії на ділянці;  $\Delta U$  – падіння напруги відповідно сумі падінь енергії; U(ск1) – напруга котра залишилася на СК після пуску; W(ск1) – енергія котра на СК після пуску; C – падіння ємності після пуску.

Початкову енергію СК при номінальних параметрах до моменту пуску розраховуємо за формулою [1]:

$$W = \frac{C_0 * U^2}{2} + \frac{2\xi * U^3}{3} = \frac{7 * 230^2}{2} + \frac{2 * 0,034 * 230^3}{3} = 467424,4 \text{ [Дж]}$$

де  $C_0$  – мінімальна ємність СК;  $\xi$  – коефіцієнт заряду СК.

Падіння енергії на кожній ділянці пуску знаходимо за формулою:

$$\Delta W = I * T * U = 14 * 0,5 * 230 = 1610 \text{ [Дж]}$$

Падіння напруги знаходимо з виразу для знаходження енергії з номінальними параметрами, при відомому значенні енергії, затраченої на пуск АД ( $\Sigma W = 4680,5$  Дж).

Для знаходження напруги, яка залишилася на СК достатньо від напруги до пуску (номінальна напруга СК) відняти падіння напруги:

$$U_{(ск1)} = U_n - \Delta U = 230 - 33,115 = 196,885 \text{ [В]}$$

Залишкову енергію після першого пуску розраховуємо за формулою [2]:

$$W_{(ск1)} = \frac{C_0 * U_{(ск1)}^2}{2} + \frac{2\xi * U_{(ск1)}^3}{3} = \frac{7 * 196,885^2}{2} + \frac{2 * 0,034 * 196,885^3}{3} = 312735,2 \text{ [Дж]}$$

Ємність СК після пуску розраховуємо [3]:

$$C = C_0 + \xi * U_{(ск1)} = 7 + 0,0348 * 196,885 = 13,8 \text{ [Ф]}$$

Після пуску відбувається зарядка СК від АБ процес заряду відбувається до зменшення струму до нуля.

Для початку заряду СК після пуску різниця напруги між АБ та СК:

$$\Delta U = U_{(аб1)} - U_{(ск1)} = 229,9 - 196,885 = 33,015 \text{ [В]}$$

Кількість енергії котра залишиться в АБ після заряду СК:

$$\Delta W = W_{(аб1)} - \Sigma W = 9600624 - 4680,5 = 9595944 \text{ [Дж]}$$

Напруга АБ після зарядки СК:

$$U = \frac{(\Delta W / 3600)}{\Delta Q} = \frac{(\frac{9595944}{3600})}{11,6} = 229,78 \text{ [В]}$$

Напруга на СК рівна напругі АБ, енергія СК після зарядки [2]:

$$W = \frac{C_0 * U^2}{2} + \frac{2\xi * U^3}{3} = \frac{7 * 229,78^2}{2} + \frac{2 * 0,034 * 229,78^3}{3} = 466261 \text{ [Дж]}$$

**Другий пуск** АД при комбінованому живленні.

Другий пуск відбувається при наступних початкових даних джерел живлення: СК (C= 14,99 F; U = 229,78 В); АБ (Q = 11,6 А\*час; U = 229,78 В).

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на дві рівних ділянки, а для зміни параметрів СК на чотири ділянки, де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 7 та 8 відповідно

Таблиця 7 – Зміна параметрів АБ підчас другого пуску АД

Ділянка	I [А]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А*час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	0,05	0,5	0,025	11,6	1044	W(ак2)[Дж]	9591725,74
2	0,152		0,076		3173,76	U(ак2)[В]	229,686919
$\Sigma$				11,6	4217,76	$\Delta U$ [В]	0,101

Таблиця 8 – Зміна параметрів СК підчас другого пуску АД

Ділянка	I [А]	T [с]	U [В]	W [Дж]				
1	14	0,5	229,78	1608,46	$\Delta U$ [В]	33		
2	12,9			1482,081				
3	9,9			1137,411			U(ск2) [В]	196,78
4	3,6			413,604			W(ск2) [Дж]	312307,363
$\Sigma$				4641,556	C [Ф]	13,847944		

Після пуску відбувається зарядка СК від АБ.

Різницю напруги між АБ та СК після пуску:

$$\Delta U = U_{(аб2)} - U_{(ск2)} = 229,68 - 196,78 = 32,9 \text{ [В]}$$

Кількість енергії, яка залишиться в АБ після заряду СК:

$$\Delta W = W_{(аб2)} - \Sigma W = 9591726 - 4641,55 = 9587084 \text{ [Дж]}$$



Напруга АБ після зарядки СК:

$$U = \frac{(\Delta W/3600)}{\Delta Q} = \frac{\left(\frac{9587084}{3600}\right)}{11,6} = 229,57 \text{ [В]}$$

Напруга на СК рівна напругі АБ, енергія СК після зарядки [2]:

$$W = \frac{C_0 * U^2}{2} + \frac{2\xi * U^3}{3} = \frac{7 * 229,47^2}{2} + \frac{2 * 0,034 * 229,57^3}{3} = 465153 \text{ [Дж]}$$

**Третій пуск** АД при комбінованому живленні.

Третій пуск відбувається при наступних початкових даних джерел живлення: СК (C = 14,98 F; U = 229,51 В; R = 0.0099 Ом); АБ (Q = 11,6 А\*час; U = 229,51В).

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на дві рівних ділянки, а для зміни параметрів СК на чотири ділянки, де протікає струм однакової амплітуди, дані приведені до таблиці 9 та 10 відповідно:

Таблиця 9 – Зміна параметрів АБ підчас третього пуску АД

Ділянка	I [А]	R [Ом]	$\Delta U$ [В]	$\Delta Q$ [А·час]	$\Delta W$ [Дж]		
1	0,052	0,5	0,026	11,60	1085,76	W(ак3) [Дж]	9582804
2	0,153	0,5	0,0765	11,60	3194,64	U(ак3) [В]	229,4733
$\Sigma$				11,6	4280,40	$\Delta U$ [В]	0,1025

Таблиця 10 – Зміна параметрів СК підчас третього пуску АД

Ділянка	I [А]	T [с]	U [В]	W [Дж]		
1	14	0,5	229,57	1606,99		
2	12,9	0,5	229,57	1480,7265	$\Delta U$	32,9
3	9,8	0,5	229,57	1124,893	U(ск2)	196,67
4	3,5	0,5	229,57	401,7475	W(ск2)	311859,592
$\Sigma$				4614,357	C	13,844116

Після пуску відбувається зарядка СК від АБ.

Різницю напруги між АБ та СК після пуску:

$$\Delta U = U_{(аб3)} - U_{(ск3)} = 229,47 - 196,67 = 32,8 \text{ [В]}$$

Кількість енергії, яка залишиться в АБ після заряду СК:

$$\Delta W = W_{(аб3)} - \Sigma W = 9582804 - 4614,357 = 9578189 \text{ [Дж]}$$

Напруга АБ після зарядки СК:

$$U = \frac{(\Delta W/3600)}{\Delta Q} = \frac{\left(\frac{9578189}{3600}\right)}{11,6} = 229,36 \text{ [В]}$$

Напруга на СК рівна напругі АБ, енергія СК після зарядки [1]:

$$W = \frac{C_0 * U^2}{2} + \frac{2\xi * U^3}{3} = \frac{7 * 229,36^2}{2} + \frac{2 * 0,034 * 229,36^3}{3} = 464046 \text{ [Дж]}$$

Після трьох моделювань пусків АД з комбінованим живленням маємо, що середнє падіння напруги АБ складає 0,32 В, виходячи з цього маємо 200 можливих пусків допоки напруга не сягне критичної, після якої пуск є неможливий.

**Висновки.** Аналіз показав, що використовуючи в системі живлення суперконденсатор паралельно із акумулятором можна досягти низки переваг при пуску АД:

- зменшення максимального струму, що проходить через акумулятор під час пуску АД з 14 А до 0,3 А, що збільшує його ресурс;
- зменшення часу на розгін до усталеної швидкості від 38 да 60%;
- збільшення кількості пусків від 3 до 200, за рахунок покриття СК великих пускових струмів АД.

#### Перелік посилань

1. Бойко Э. П. и др. АД общ. назн. – М.: Энергия, 1980. – 488с., ил.
2. А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий. Энергетичні характеристики суперконденсаторів при їхньому заряді від джерела напруги та розряді на резистивне навантаження./// С. 6, Ф. 12
3. А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий. Энергетичні характеристики суперконденсаторів при їхньому заряді від джерела напруги та розряді на резистивне навантаження./// С. 2, Ф. 1.
4. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Моделювання електромеханічних систем в «Simulink»: Навчальний посібник. – К.: ВД «Стилос», 2008. – 528 с.