

ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКУ СУПЕРКОНДЕНСАТОР- АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ В АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОВУЗЛАХ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Будь-яка автономна система електрозабезпечення (АСЕ) на основі відновлюваних джерел енергії має в своєму складі акумуляторні батареї (АБ). Це пов'язано із значними варіаціями надходження в часі енергії вітру та сонця. Зокрема, максимальний виробіток фотоелектричною батареєю (ФЕБ), що входить до складу АСЕ, припадає на 12⁰⁰-14⁰⁰ години доби. Тому необхідно в цей час максимально накопичити енергію в АБ, а в період під'єднання навантаження (або при коливанні напруги на вводах зовнішньої мережі) вони віддаватимуть накопичену енергію. Такий самий принцип використання вітроелектричних установок (ВЕУ) в АСЕ. В періоди номінальної швидкості вітру, а також в періоди відсутності зовнішнього навантаження АБ накопичують енергію. В періоди відсутності вітру, а також в періоди коливання напруги АБ віддають накопичену енергію.

При високих значеннях пускових струмів, в момент під'єднання зовнішнього навантаження, наприклад асинхронних двигунів (АД) або двигунів постійного струму (ДПС), відбувається провал напруги на АБ із подальшим виходом її на стаціонарне значення [1]. Велика кількість таких провалів призводить до значних втрат енергії та зниження ємності АБ [2].

Відомо, що основним навантаженням, яке визначає значні коливання струмів від АБ, є електропривод різних механізмів, в склад якого можуть входити АД та ДПС. При цьому навіть в умовах застосування напівпровідникових перетворювачів та регуляторів пусковий струм може вдвічі перевищувати значення номінального струму, а при прямому запуску, наприклад ДПС, якірний струм, який буде споживатись від АБ, може досягати більш значної величини (від 10 до 20 I_H) [3].

Слід також відмітити, що великі стрибки струмів можуть виникати і в інших споживачів енергії, наприклад, при включенні потужних нагрівальних приладів, великих освітлювальних площадок з лампами розжарювання і т.ін.

Таким чином, характер функціонування перерахованих вище навантажень негативно відіб'ється на ємності АБ (накопичувача енергії АСЕ), ККД та інших характеристиках джерела живлення.

Метою даної роботи є встановлення залежностей між типом зовнішнього навантаження та величиною втрат в джерелі живлення суперконденсатор-акумуляторна батарея (СК-АБ) та оцінка цих втрат для конкретного обладнання, що використовується в автономних системах електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

На сьогоднішній день, як показано в багатьох роботах, вирішення проблеми зняття пускових навантажень із АБ в АСЕ на основі відновлюваних джерел енергії можливе при використанні в буферному режимі суперконденсаторів [4-6].

Суперконденсатори (іоністори, СК) – це конденсатори з великою електричною ємністю, що накопичують енергію в подвійному електричному шарі на поверхні високопористої структури. До переваг СК слід віднести високу питому ємність (до 3200 Ф), велику питому потужність (до 6500 Вт/кг), низькі струми витікання, велику кількість циклів заряду-розряду ($1 \cdot 10^6$), широкий робочий діапазон температур (від -40 до +75°C), малий внутрішній опір (до 1 мОм і менше), швидкодію (досягнення максимальної потужності складає 10...30 мкс). Поряд з цим існує ряд недоліків, які обмежують широкомасштабне використання СК. Зокрема, це дуже мала питома енергія (в кращих зразках до 5...6 Вт·год/кг при 30...40 Вт·год/кг для свинцево-кислотних АБ), висока вартість (до \$0,3 США за 1 Вт·год) накопиченої енергії, що пов'язано із малосерійним виробництвом), низька напруга одиничного елемента (3...6 В) [7-8].

Враховуючи можливості СК з нарощення високої потужності, в початковий період пуску двигунів вони прийматимуть на себе пікове навантаження, при цьому виключатиметься можливість провалу напруги на АБ, навантаження яких залишається в межах номінальних величин за весь період функціонування.

Розглянемо питання зменшення витрат енергії АБ при використанні СК в системі АСЕ з відновлюваними джерелами енергії.

Необхідно також відмітити, що характер пускових струмів навантаження частіше за все може мати вигляд імпульсних струмів різної конфігурації – прямокутний, піковий та імпульс більш складної форми. При цьому, як показано в роботі [4], форма розрядних імпульсів суттєво впливає на величину витрат в АБ.

Наведений аналіз показує, що найбільше значення енергетичного ККД АБ характерне для розряду АБ постійним струмом. При переході до імпульсних методів розряду відбувається значне зниження ККД за рахунок збільшення відносної величини I^* , яка в основному визначається величиною (амплітудою) імпульсного джерела, а також у випадку пульсуючої напруги розряду при умові збільшення коефіцієнта пульсацій α .

Виходячи із [9], ККД джерела живлення (в нашому випадку АБ) при його розряді прямокутними імпульсами визначається як:

$$\eta = 1 - I^*, \tag{1}$$

де I^* - відносна величина, що визначається за наступним рівнянням:

$$I^* = \frac{I_H}{I_{К.З.}}, \tag{2}$$

де $I_{К.З.}$ – струм короткого замикання джерела живлення, А;
 I_H – номінальне амплітудне значення розрядного струму, А.
 В свою чергу:

$$I_{К.З.} = \frac{E}{r}, \tag{3}$$

де E – електрорушійна сила АБ, В;
 r – активний внутрішній опір джерела живлення, Ом.

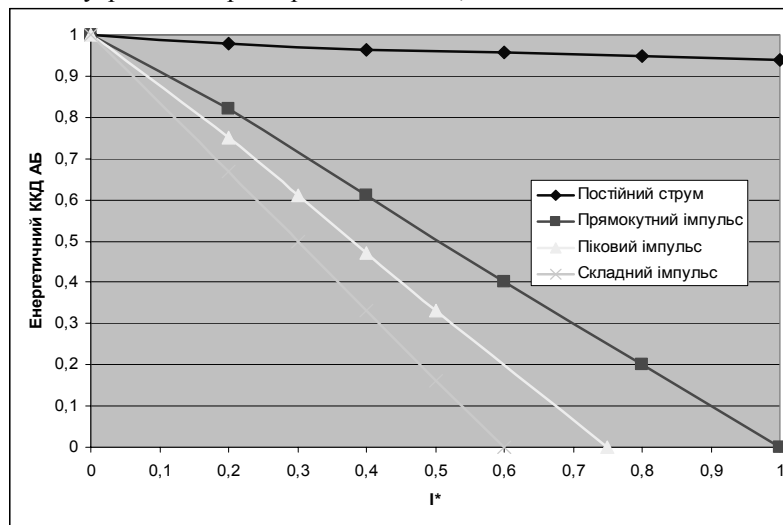


Рис. 1. Залежність енергетичного ККД АБ від типу розряду

При розряді АБ прямокутними імпульсами в номінальному режимі роботи енергетичний ККД буде становити:

$$\eta_H^П = 1 - I^*_{H} = 1 - \frac{I_H}{I_{К.З.}}. \tag{4}$$

В пусковий період він матиме вигляд:

$$\eta_{Пуск}^П = 1 - I^*_{Пуск} = 1 - \frac{I_{Пуск}}{I_{К.З.}}. \tag{5}$$

Зважаючи на те, що $I_{Пуск} > I_H$, отримаємо:

$$\eta_{Пуск} < \eta_H. \tag{6}$$

Енергія, що відбирається від АБ при її розряді імпульсами прямокутної форми буде становити:

$$W_H^{III} = \frac{U \cdot I_H \cdot t}{\eta_H}. \quad (7)$$

При пусковому імпульсному режимі розряду:

$$W_{ПУСК}^{III} = \frac{U \cdot I_{ПУСК} \cdot t}{\eta_{ПУСК}}. \quad (8)$$

За умови виключення пускових режимів розряду АБ прямокутними імпульсами при використанні в початковий момент СК як джерела енергії та енергія (ΔW), яка не буде споживатися від АБ (тобто яку можна зекономити в АБ) в даному режимі становитиме:

$$\Delta W^{IP} = W_{IОНЕ}^{IP} - W_H^{IP} = \frac{U \cdot I_{ПУСК} \cdot t}{\eta_{ПУСК}} - \frac{U \cdot I_H \cdot t}{\eta_H};$$

$$\Delta W^{IP} = U \cdot t \cdot \left(\frac{I_{ПУСК}}{\eta_{ПУСК}} - \frac{I_H}{\eta_H} \right). \quad (9)$$

Якщо підставити в рівняння (9) значення ККД, то отримаємо:

$$\Delta W^{IP} = U \cdot t \cdot \left[\frac{I_{ПУСК}}{\left(1 - \frac{I_{ПУСК}}{I_{КЗ}}\right)} - \frac{I_H}{\left(1 - \frac{I_H}{I_{КЗ}}\right)} \right]; \quad (10)$$

При розряді АБ імпульсами у вигляді піків енергетичний ККД матиме вигляд [9]:

$$\eta_H = 1 - I^* \left(1 + \frac{\alpha^2}{3} \right), \quad (11)$$

де $\alpha = \Delta I_H / I_H$ – коефіцієнт пульсацій.

В такому разі енергія, яку можна буде зекономити в АБ при виключенні пускового режиму розряду АБ піковими імпульсами, становитиме:

$$\Delta W^{II} = U \cdot t \cdot \left[\frac{I_{ПУСК}}{1 - \frac{I_{ПУСК}}{I_{КЗ}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2}{3} \right)} - \frac{I_H}{1 - \frac{I_H}{I_{КЗ}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2}{3} \right)} \right]. \quad (12)$$

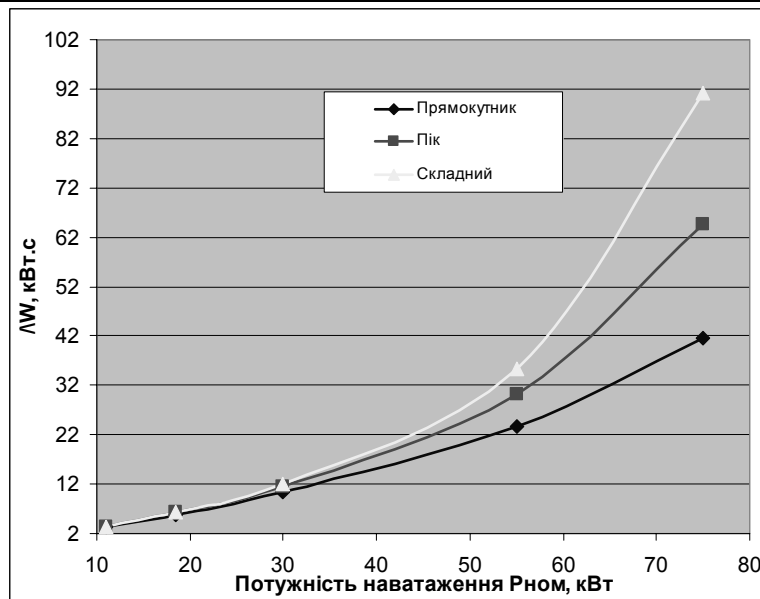
У випадку імпульсів більш складної форми енергетичний ККД розряду АБ визначається як [9]:

$$\eta_{ПУСК} = 1 - I^* \left(1,5 + \frac{\alpha^2}{6} \right). \quad (13)$$

Відповідно:

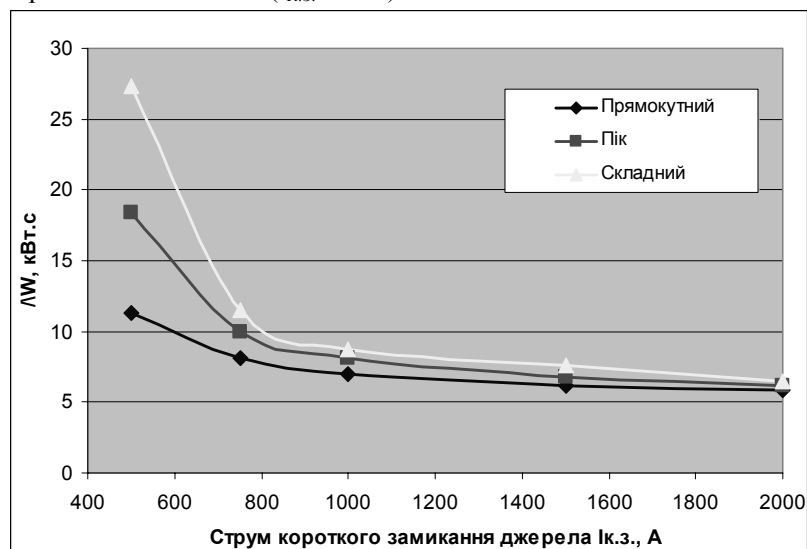
$$\Delta W^{СК} = U \cdot t \cdot \left[\frac{I_{ПУСК}}{1 - \frac{I_{ПУСК}}{I_{КЗ}} \cdot \left(1,5 + \frac{\alpha^2}{6} \right)} - \frac{I_H}{1 - \frac{I_H}{I_{КЗ}} \cdot \left(1,5 + \frac{\alpha^2}{6} \right)} \right]. \quad (14)$$

На основі наведених рівнянь розглянемо загальну зміну ΔW для різних типів розрядних імпульсів при порівнянні пускового режиму із номінальним (рис.2). Вихідні умови: $t=0,1$ с; $I_{КЗ}=\text{const}=2000$ А; $U=220$ В. Як навантаження будемо використовувати АД типу АІР різної номінальної потужності [10].

Рис. 2. Залежність ΔW від номінальної потужності зовнішнього навантаження

Аналіз результатів розрахунків показує, що при розряді джерела живлення прямокутними та піковими імпульсами на першій ділянці кривої (до 20 кВт) відбувається майже лінійне зростання втрат енергії ΔW від потужності навантаження $P_{ном}$. В подальшому залежність набуває експоненціального вигляду. Темп її зростання залежить від форми імпульсу у відповідності до розглянутих вище закономірностей.

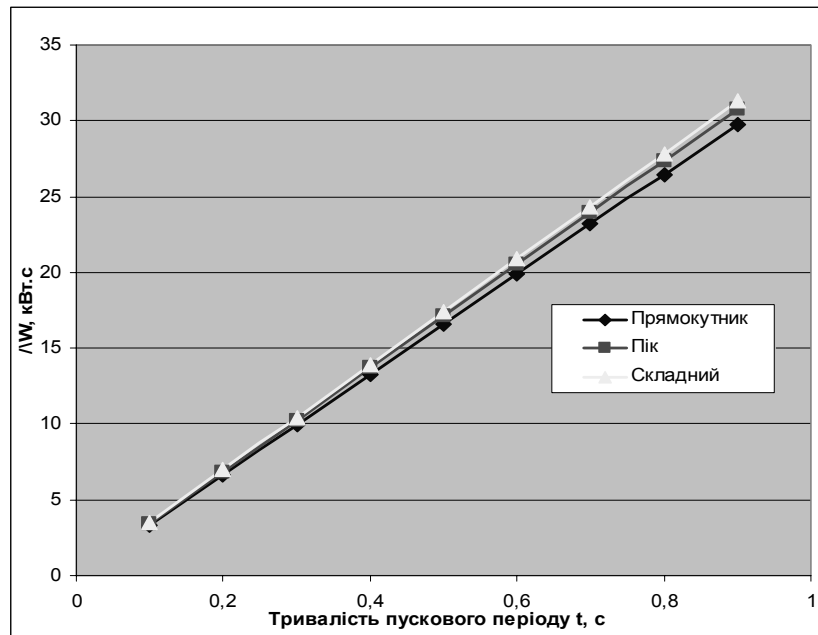
Різде зростання ΔW в міру збільшення навантаження пояснюється тим, що струм короткого замикання був прийнятий постійним ($I_{к.з.} = \text{const}$).

Рис. 3. Залежність ΔW від струму короткого замикання джерела для навантаження із $P_{ном}=18,5$ кВт

Залежність втрат електричної енергії від струму короткого замикання джерела енергії (рис. 3) наведена в зв'язку з тим, що останній параметр ($I_{к.з.}$) у рівняннях (11;13;15) виступає основним, який пов'язує тип джерела енергії (в нашому випадку АБ) із зовнішнім навантаженням.

На початковому етапі (до 1000А) значення ΔW для всіх типів розряду нелінійно знижується. Це пояснюється зростанням величини $I_{к.з.}$, внаслідок чого збільшується значення знаменника. В подальшому залежність набуває пологого характеру в зв'язку із малим значенням I^* , в результаті чого увесь знаменник наближається до 1.

Вплив тривалості пускового режиму на втрати енергії в АБ має лінійний характер, що видно із залежності, наведеної на рис. 4.

Рис.4. Залежність ΔW від тривалості пускового періоду для навантаження із $R_{ном}=11$ кВт

Оскільки енергія, яка відбирається від АБ в постійно струмовому режимі, визначається як:

$$W^{ПС} = \frac{U \cdot I^{ПС} \cdot t}{\eta^{ПС}}, \quad (15)$$

де

$$\eta^{ПС} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4U_{CP}^* \cdot I_{CP}^*}}{2}, \quad (16)$$

де $U_{CP}^* = \frac{U_{CP}}{E}$, для АБ становить $\approx 0,9 \dots 0,95$; $I_{CP}^* = \frac{I_{CP}}{I_{кз}}$ [4].

За умови виключення імпульсного режиму розряду АБ прямокутними імпульсами енергія, яка буде зекономлена, визначається різницею:

$$\Delta W^{III} = W_{пуск}^{III} - W^{ПС}, \quad (17)$$

$$\Delta W = U \cdot t \left[\frac{I_{пуск}^{III}}{1 - \frac{I_{пуск}^{III}}{I_{кз}}} - \frac{I^{ПС}}{1 + \frac{\sqrt{1 - 4U_{CP}^* \cdot I_{CP}^*}}{2}} \right]. \quad (18)$$

Енергія, яку можна буде зекономити за винятком розряду АБ в пусковому режимі імпульсами у вигляді піків, матиме вигляд:

$$\Delta W_{пуск}^{II} = U \cdot t \left[\frac{I_{пуск}^{II}}{1 - \frac{I_{пуск}^{II}}{I_{кз}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{3}\right)} - \frac{I^{ПС}}{1 + \frac{\sqrt{1 - 4U_{CP}^* \cdot I_{CP}^*}}{2}} \right]. \quad (19)$$

Відповідно, збережена енергія за умови виключення розряду імпульсами складної форми, становитиме:

$$\Delta W^{C\Phi} = U \cdot t \left[\frac{I_{пуск}^{C\Phi}}{1 - \frac{I_{пуск}^{C\Phi}}{I_{кз}} \left(1,5 + \frac{\alpha^2}{6}\right)} - \frac{I^{ПС}}{1 + \frac{\sqrt{1 - 4U_{CP}^* \cdot I_{CP}^*}}{2}} \right]. \quad (20)$$

Зміна ΔW від потужності зовнішнього навантаження P (кВт), тривалості пускового періоду t (с) та струму короткого замикання джерела енергії $I_{КЗ}$ (А) при порівнянні імпульсного режиму розряду із постійно струмовим показала аналогічний характер попередніх залежностей, а абсолютне відхилення не перевищувало 3...5%.

Враховуючи залежність втрат енергії ΔW від потужності зовнішнього навантаження для розряду АБ імпульсами різної форми (рис.2), досліджено вплив коефіцієнта пульсацій на ККД процесу розряду АБ із використанням як навантаження АД із $P_{ном}=11$ кВт (рис. 5).

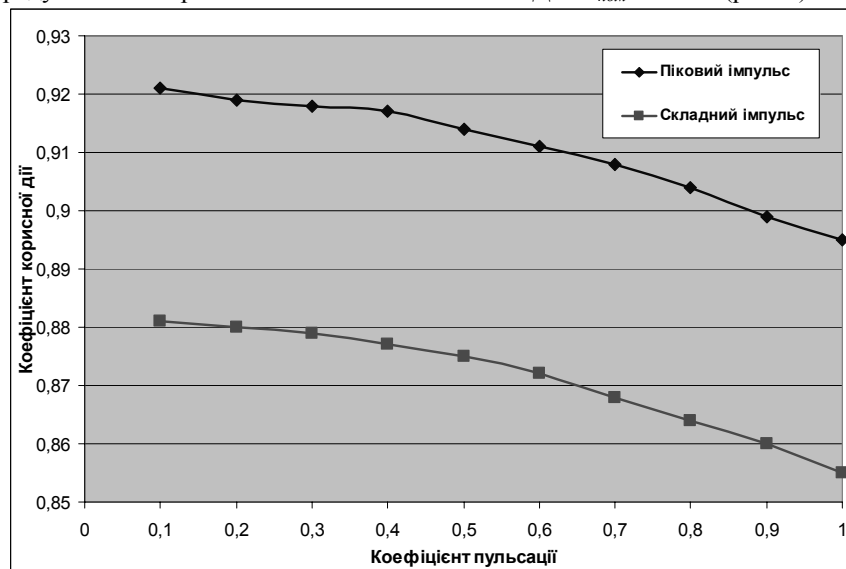


Рис. 5. Залежність енергетичного ККД джерела від коефіцієнта пульсацій

Складова α має місце тільки для розряду піковими та складними імпульсами, що ілюструє рис.5.

Враховуючи той факт, що втрати енергії мають обернено пропорційну залежність від енергетичного ККД джерела, то збільшення коефіцієнта пульсацій α для імпульсного розряду піковими та складними імпульсами, призводитиме до відповідного зростання ΔW (рис. 6).

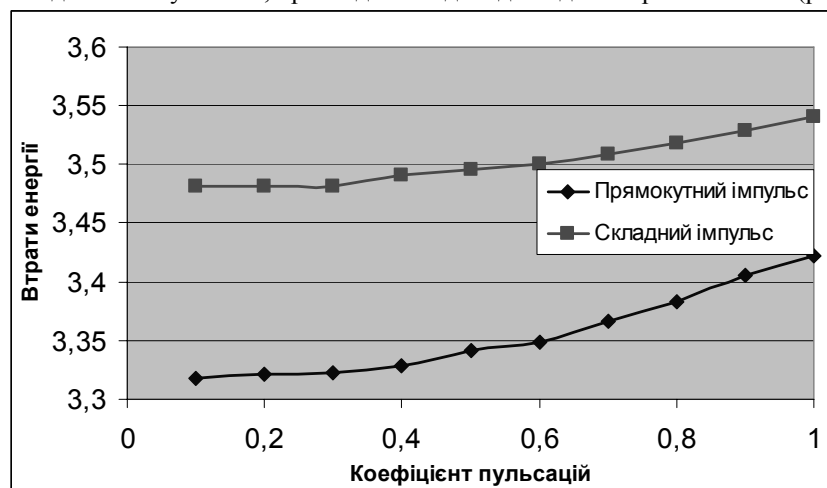


Рис. 6. Залежність ΔW від коефіцієнта пульсацій

Висновки

1. На основі аналізу ККД акумуляторної батареї дана оцінка енергетичних показників джерела живлення СК-АБ.
2. Показаний характер зміни втрат енергії АБ для різних форм розрядних імпульсів в навантаженні, струму короткого замикання АБ та різних значень коефіцієнта пульсацій.
3. Встановлено, що, крім тривалості пускового періоду та форми імпульсного струму, значний вплив чинить встановлена енергоємність акумуляторної батареї, тобто струм короткого

замикання, що необхідно враховувати при погодженні джерела живлення та потужності навантаження.

4. Отримані аналітичні вирази дозволяють визначити втрати енергії для конкретних параметрів та типів навантаження, встановлених в автономних системах електрозабезпечення із суперконденсаторами.

Література

1. DIN 72310-1:1970-01 «Lead storage battery; starter batteries; marking, type number and its structure».
2. Amato C.J. Latent Losses in Electric Lizzies. – IEEE Trans., 1969, IGA-5, N5, p.558-565.
3. <http://www.elpri.ru/?page=10450&mode=prod>.
4. Л.А. Ашкинази «Конденсатор без диэлектрика», - Химия и жизнь, 2005, №5, С. 30-31.
5. http://news.schem.net/articles/circuit_28.php.
6. А.И.Шихатов «Суперконденсаторь», - Мастер 12 вольт, 2003, №50 С. 18-37.
7. <http://www.powerinfo.ru/supercapacitor.php>.
8. <http://sdisle.com/battery/ultracap/>.
9. А.К.Шидловский, В.Б.Павлов, В.М.Скиданов, В.А.Рычков «Эффективность использования энергии аккумуляторной батареи как функция нормы разрядного тока при импульсном регулировании», - сборник научных трудов «Повышение качества электрической энергии» АН УССР, К.: Наукова думка, 1983, С.14-20.
10. http://www.rper.ru/item_219.html.