

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

Ю. О. Шепетов

**ЕНЕРГОБАЛАНСНИЙ РОЗРАХУНОК
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
КОСМІЧНОГО АПАРАТА**

Навчальний посібник

Харків "ХАІ" 2021

УДК 629.7.064.5
Ш48

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. В. М. Борщов,
д-р фіз.-мат. наук С. С. Зуб

Шепетов, Ю. О.

Ш48 Енергобалансний розрахунок системи електрозабезпечення космічного апарата [Текст] : навч. посіб. / Ю. О. Шепетов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 32 с.

ISBN 978-966-662-847-6

Подано теоретичний і практичний матеріал, необхідний для проведення енергобалансного розрахунку системи електрозабезпечення космічного апарата. Викладено методику й послідовність енергобалансного розрахунку, наведено відомості про загальні принципи організації тривалої автономної роботи й загальні критерії роботоздатності системи електрозабезпечення космічного апарата, описано необхідні математичні моделі.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (освітня програма «Супутники, двигуни та енергетичні установки»).

Іл. 8. Бібліогр.: 4 назви

УДК 629.7.064.5

ISBN 978-966-662-847-6

© Шепетов Ю. О., 2021
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2021

1. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ЕНЕРГОБАЛАНСНОГО РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОСМІЧНОГО АППАРАТА

1.1. Характер енергоспоживання навантаження

Характер енергоспоживання навантаження можна зобразити циклограмою навантаження (рис. 1.1) – залежністю потужності, спожитої навантаженням W_H , від часу тривалості деякого циклу, що повторюється. Залежно від тривалості циклу навантаження розрізняють виткову, добову та інші циклограми навантаження. Циклограму навантаження також можна подати залежністю струму навантаження I_H від часу.

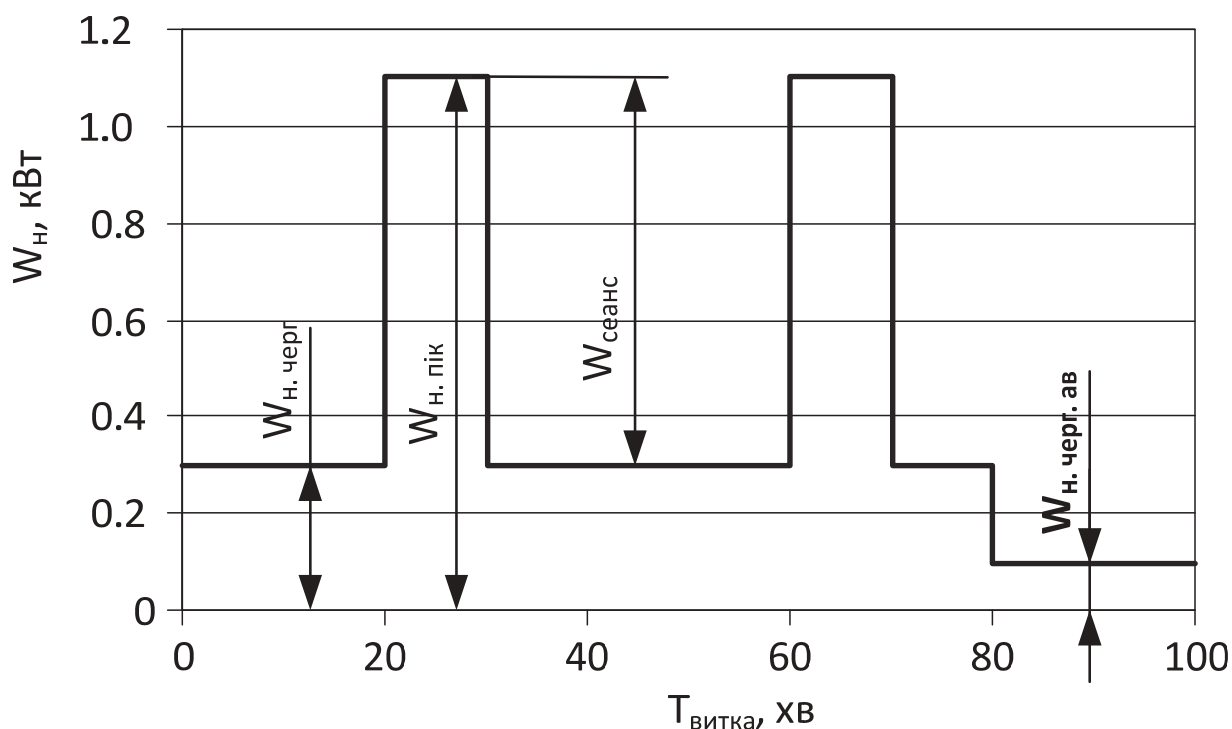


Рис. 1.1. Приклад циклограми навантаження (виткової)

Сьогодні строго детерміновані циклограми навантаження практично не використовуються. Насправді дуже важко передбачити, що, скажімо, через три роки після запуску саме цього витка і саме в цей час має включитися в роботу той чи інший споживач електроенергії на борту КА. Для опису характеру енергоспоживання навантаження найчастіше використовуються такі параметри:

- середня потужність навантаження $W_{H, \text{сєр}}$;
- пікова потужність навантаження $W_{H, \text{пїк}}$ (передбачається максимальне споживання протягом витка або доби, наприклад, 3 рази на добу протягом 10 хв, двічі за виток тривалістю до 5 хв і т. д.); пікову потужність також називають *сеансною потужністю*, або потужністю сеансного режиму; відрізняють потужність сеансного навантаження $W_{\text{сеанс}} = W_{H, \text{пїк}} - W_{H, \text{черг}}$;

- *чергова потужність* навантаження $W_{н.черг}$, що означає потужність споживання при відсутності сеансного навантаження;
- у деяких випадках *аварійна чергова потужність* $W_{н. черг. ав}$ – така мінімально необхідна потужність енергоспоживання, незабезпечення якої неминуче призводить до виходу з ладу життєво важливих систем КА або навіть до його втрати.

Зазвичай вважається, що КА є функціональним (тобто здатним виконувати свої завдання), якщо СЕЗ забезпечує 100 % вимог чергового навантаження і принаймні 75...80 % вимог сеансного навантаження (станом на кінець заданого ресурсу). Крім того, супутник повністю виходить з ладу, якщо СЕЗ не забезпечує потреб навіть аварійної чергової потужності навантаження.

1.2. Призначення КА та його заданий ресурс

Відомості про призначення КА потребуються для прийняття рішення під час вибору розрахункового витка з урахуванням припустимості чи неприпустимості короточасних обмежень на роботу сеансного навантаження в періоди максимальної тривалості тіні. Оскільки внаслідок деградаційних процесів з плином часу роботи КА поступово зменшуються вихідна потужність генератора (наприклад, фотоелектричної батареї (БФ)) і ємність накопичувача (наприклад, батареї хімічних акумуляторів (БХ)), то відомості про ресурс потребуються для прийняття рішення щодо необхідного запасу установленої потужності БФ і установленої ємності БХ.

Установлена потужність БФ – це максимальна потужність, яку здатна генерувати недеградована БФ при роботі в номінальних умовах.

Установлена ємність БХ – це номінальна розрядна ємність недеградованої БХ.

1.3. Параметри орбіти КА

Відомості про параметри орбіти КА є важливими в тому випадку, якщо як джерело первинної енергії використовується Сонце. В умовах орбітального польоту КА має місце чергування тінювих та освітлених ділянок орбіти. Тривалість тінювих ділянок визначає необхідну ємність БХ. При цьому слід урахувувати, що внаслідок непаралельності площин екватора й екліптики відбувається сезонна зміна тривалості тіні. На сезонну зміну тривалості тіні також помітно впливає прецесія площини орбіти внаслідок несферичності Землі. Більш детально ці питання викладено в роботі [1]. На рис. 1.2 показано сезонні зміни тривалості тіні для різних орбіт.

Як видно з рисунка, при незмінному періоді обертання тривалість тінювої ділянки протягом року може істотно змінюватися. Тривалість тіні є

практично незмінною лише для низьких екваторіальних (близьких до площини екватора) орбіт. Водночас для визначення необхідних параметрів СЕЗ (установленої потужності БФ і установленої ємності БХ) необхідно оперувати конкретною величиною тривалості тіні.

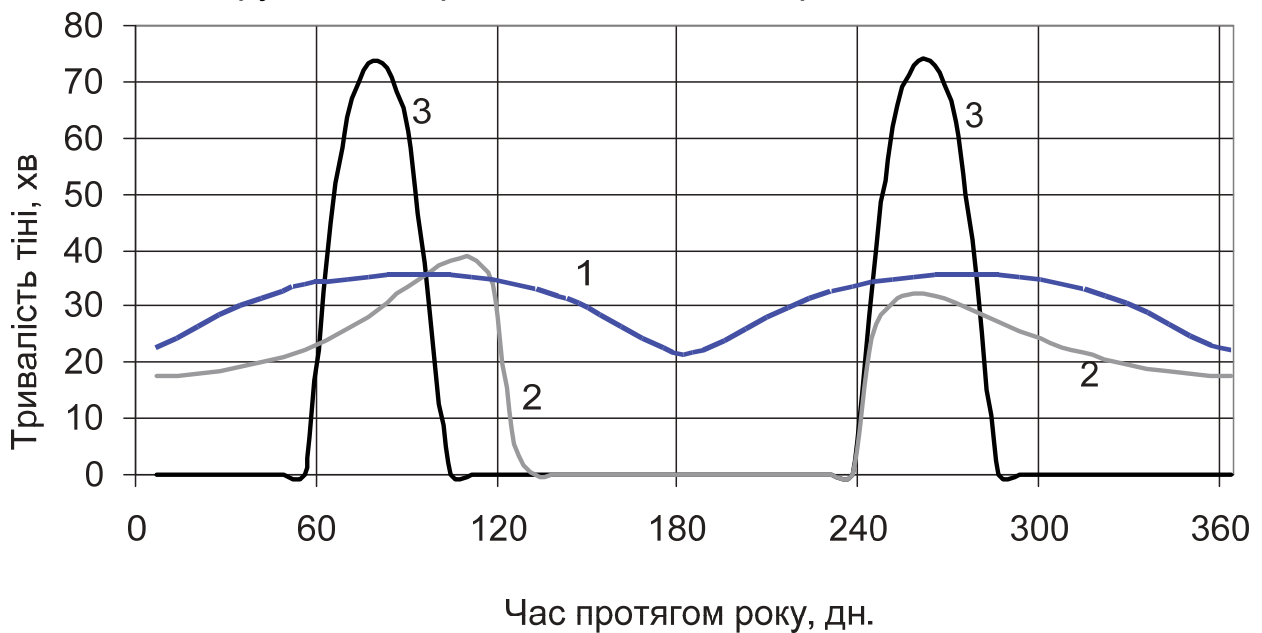


Рис. 1.2. Сезонна зміна тривалості тіні для різних орбіт: низької приполярної (1), сильноеліптичної з помірним нахилом (2), геостаціонарної (ГСО) (3)

Для проектувальника дуже важливо правильно вибрати параметри розрахункового витка. На перший погляд, просте рішення – як розрахунковий вибрати виток з найбільшою тривалістю тіні – не завжди є технічно грамотним. Як видно з рис. 1.2, наприклад, на ГСО більшу частину часу КА перебуває у видимості Сонця, не заходячи в тінь Землі, і лише два рази на рік, під час осіннього й весняного сонцестояння, коли площина орбіти КА приблизно збігається з площиною екліптики (площина, в якій знаходиться орбіта Землі), апарат один раз на добу заходить у тінь Землі на 50...70 хв. Ці сезони тривають приблизно три тижні. Як показують економічні розрахунки, піднімати на геостаціонарну орбіту важку хімічну батарею (маса СЕЗ у сучасних КА становить від 15 до 20 % маси КА, у тому числі 30...50 % маси СЕЗ припадає на масу БХ) є наперед програшним варіантом порівняно з тим, щоб два рази на рік протягом двох-трьох тижнів один раз на добу обмежувати на 50...70 хв потреби навантаження. Подібне відбувається і з приполярними орбітами. Але знову ж таки необхідно враховувати й функціональне призначення КА, тобто наскільки допустиме таке обмеження.

Отже, вибір розрахункового витка, який був би компромісним варіантом між необхідністю обмежувати потреби навантаження та необхідністю збільшувати масу БХ, – процес творчий. Можна лише рекомендувати для низьких кругових екваторіальних орбіт та орбіт з

помірним нахилом як розрахунковий вибрати виток з найбільшою тривалістю тіні, а для приполярних і високих орбіт (у тому числі й ГСО) – виток з тривалістю тіні 50...70 % від максимальної.

1.4. Первинне джерело енергії для енергоустановки КА

Як первинне джерело енергії можуть використовуватися Сонце, ядерний реактор, радіоізотопна капсула, хімічне пальне тощо. Вибір того чи іншого первинного джерела обумовлює певні індивідуальні особливості розрахунку. Тут і далі як первинне джерело будемо детально розглядати енергію сонячного випромінювання, що використовується на абсолютній більшості навколосемних космічних апаратів.

Разом з типом джерела енергії необхідно знати його основні характеристики. Для сонячного випромінювання це насамперед енергетична щільність потоку на орбіті Землі E_C . Для більшості розрахунків можна брати $E_C = 1\ 360\ \text{Вт/м}^2$.

1.5. Первинний перетворювач енергії

Як первинний перетворювач енергії можуть використовуватися батареї фотоелектричних перетворювачів (ФП), термоелектричних перетворювачів (ТЕЛП), термоемісійних перетворювачів (ТЕП), паливних елементів (електрохімічний генератор (ЕХГ)). Вибір того чи іншого первинного перетворювача також обумовлює певні особливості розрахунку. Детально розглянемо найбільш поширені в сучасній космонавтиці перетворювачі, що забезпечують понад 99 % сумарної енергетичної потреби всіх сучасних КА, – фотоелектричні перетворювачі (сонячні батареї, сонячні елементи).

Разом з типом первинного перетворювача необхідно знати його основні характеристичні параметри:

- ККД перетворення;
- вольт-амперну (ВАХ) і вольт-ватну характеристики;
- прогноз зміни ККД і ВАХ протягом терміну ресурсу КА.

1.6. Накопичувач енергії

Основне призначення накопичувача енергії в складі СЕЗ автономного об'єкта полягає в забезпеченні узгодження графіків електроспоживання й електропостачання (рис. 1.3).

Якщо взяти достатньо тривалий інтервал часу, то середня потужність генератора енергії на цьому інтервалі приблизно дорівнюватиме спожитій потужності навантаження (за вирахуванням втрат на передавання енергії). Водночас у кожний конкретний момент часу потужність генератора і споживана потужність можуть не збігатися. У реальній системі

електрозабезпечення циклограма споживання енергії є досить мінливою. Як у повсякденному житті в довільні моменти часу ми вмикаємо й вимикаємо освітлення, побутові електроприлади, так і в системі електрозабезпечення КА одночасно працюють, вмикаються і вимикаються до десятка (або навіть більше) різних споживачів. Саме накопичувач у системі електрозабезпечення і дає змогу узгодити потоки потужностей, що генеруються і споживаються, накопичуючи енергію в ті періоди, коли потужність генератора є більшою за потужність навантаження, і віддаючи енергію в періоди, коли потужність навантаження є більшою за потужність генератора.

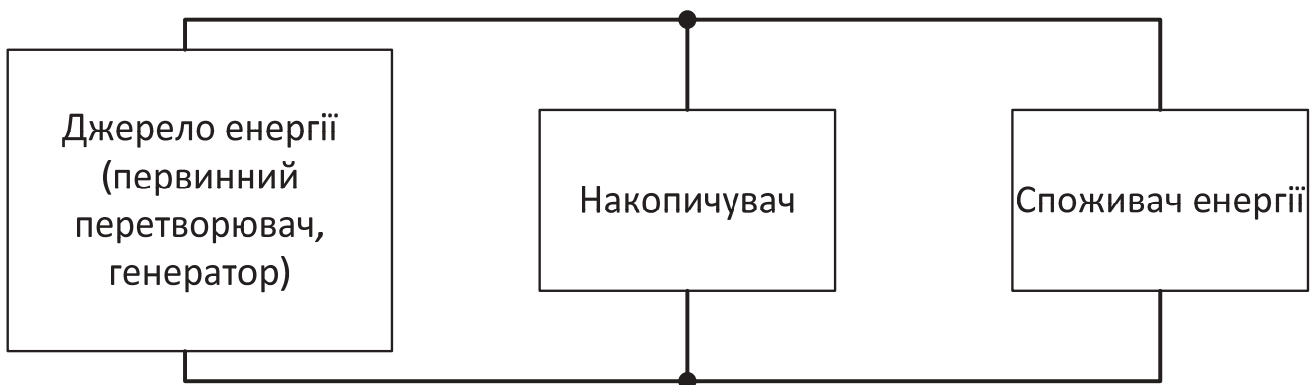


Рис. 1.3. Місце накопичувача в автономній системі електрозабезпечення

У космічній енергетиці найбільшого поширення набули хімічні батареї (БХ), у тому числі на основі:

- срібно-цинкових (СЦ) елементів (доцільні для використання на КА з ресурсом до декількох місяців);
- герметичних нікель-кадмієвих елементів (НКГ) (доцільні для використання на КА з ресурсом від декількох місяців до 5–6 років);
- літій-іонних елементів (Li-ion) (доцільні для використання на КА з ресурсом від декількох місяців до 6–8 років);
- нікель-водневих елементів (НВ) (доцільні для використання на КА з ресурсом від декількох років до 15–17 років).

У наземних системах електрозабезпечення автономних об'єктів також використовують БХ на основі свинцевих, нікель-залізних та інших елементів.

Разом з типом накопичувача необхідно знати такі його основні характеристичні параметри:

- зарядно-розрядна характеристика (залежність напруги на клеммах акумулятора від переданої/знятої ємності з урахуванням робочої температури БХ і струму зарядження-розрядження);
- залежність струму саморозрядження від зарядженості БХ;
- прогноз зміни розрядної ємності БХ протягом терміну ресурсу КА й енергоустановки.

- Для більш детальних розрахунків бажано також мати залежності:
- внутрішнього тиску в акумуляторі від стану зарядженості;
 - потужності тепловиділення від зарядженості.

1.7. Додаткові дані про конструкцію СЕЗ

До необхідних додаткових даних слід віднести інформацію про спосіб орієнтації КА і БФ. За способом орієнтації БФ можуть бути:

- неорієнтованими;
- одновісно-орієнтованими (найбільш поширені в теперішній час);
- двовісно-орієнтованими.

Для спрощених розрахунків можна вважати, що неорієнтовані БФ використовують 20...30 % сонячного випромінювання, що падає на їх поверхню, а одновісно-орієнтовані – 95...98 %. Для більш точних розрахунків на основі наявної інформації про параметри орбіти й характер орієнтації КА необхідно визначити зміну освітлення на витку для кожної панелі БФ. Методику такого розрахунку наведено в роботі [1].

При цьому в деяких випадках можна вважати що неорієнтовані БФ, які встановлюються на КА і є постійно орієнтованими на Сонце (як деякі КА серії "Молнія"), використовують 100 % сонячного випромінювання, що падає на їх поверхню.

Також при проведенні енергобалансного розрахунку необхідно знати:

- а) вихідну напругу СЕЗ (або діапазон вихідної напруги);
- б) характер напруги на головній шині СЕЗ (стабілізована, нестабілізована);
- в) логіку автономної роботи СЕЗ у частині, що стосується:
 - способу обмеження генерованої потужності;
 - способу обмеження споживаної потужності;
 - способу ідентифікації зарядженості БХ.

Також можуть виявитися необхідними додаткові відомості про конструкцію СЕЗ (наприклад, наявність концентратора сонячного випромінювання тощо).

2. СТАТИЧНИЙ ЕНЕРГОБАЛАНСНИЙ РОЗРАХУНОК

Вихідні дані для статичного енергобалансного розрахунку:

- циклограма навантаження;
- параметри розрахункового витка (тривалість витка, тривалість тіні).

Якщо циклограму навантаження не задано, а задано лише рівні середньої і максимальної потужностей, тривалості сеансів пікового навантаження, то в цьому випадку необхідно сконструювати відповідну циклограму. Прості циклограми навантаження – дворівнева й трирівнева. У деяких випадках доцільно зводити складну циклограму до дво- або трирівневого вигляду.

Для того щоб довільну циклограму звести до простішого вигляду, спочатку необхідно розрахувати середню потужність навантаження:

$$W_{н.сер} = \frac{1}{T} \int_0^T W_{н}(\tau) d\tau, \quad (2.1a)$$

або в дискретній формі –

$$W_{н.сер} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n W_{н.i} \Delta \tau_i, \quad (2.1б)$$

де n – кількість ділянок, $W_{н.сер}$ – середня споживана потужність навантаження на інтервалі усереднювання T (для енергобалансних розрахунків як T зазвичай беруть тривалість витка).

Основний принцип більшості методик для спрощення циклограм – обчислення середнього значення й подальше групування й об'єднання ділянок циклограми з потужністю, більшою і меншою за середню. Для цього розраховують сумарну площу ділянок циклограми, де потужність навантаження є більшою або меншою за середню (ці площі є однаковими):

$$\begin{aligned} E_n^+ &= \sum_{i=1}^n (W_{н.i} - W_{н.сер}) \Delta \tau_i = E_n^- = \\ &\quad \text{if } W_{н.i} > W_{н.сер} \\ &= \sum_{i=1}^n (W_{н.сер} - W_{н.i}) \Delta \tau_i \cdot \\ &\quad \text{if } W_{н.i} < W_{н.сер} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Самі методики можуть різнитися за способом розподілу розрахованих значень енергій. Для отримання дворівневої циклограми навантаження (рис. 2.1) площу від'ємних ділянок розподіляють на інтервалі освітленої ділянки циклограми, а площу додатних – на інтервалі тіньової ділянки. Таким чином, на зведеній циклограмі

$$W_{н.min} = \frac{E_n^-}{\tau_{осв}}, \quad (2.3)$$

$$W_{н.max} = \frac{E_n^+}{\tau_{тін}}. \quad (2.4)$$

Для визначення необхідної потужності БФ у першому наближенні, нехтуючи втратами під час передавання енергії від генератора до навантаження, можна записати

$$W_{н.сер} = W_{БФ сер}, \quad (2.5)$$

де $W_{БФ сер}$ – середня потужність генератора на інтервалі T .

Іншими словами, середня потужність генератора дорівнює середній потужності навантаження, а енергія, передана від генератора за час T , дорівнює енергії, спожитій за цей же час навантаженням.

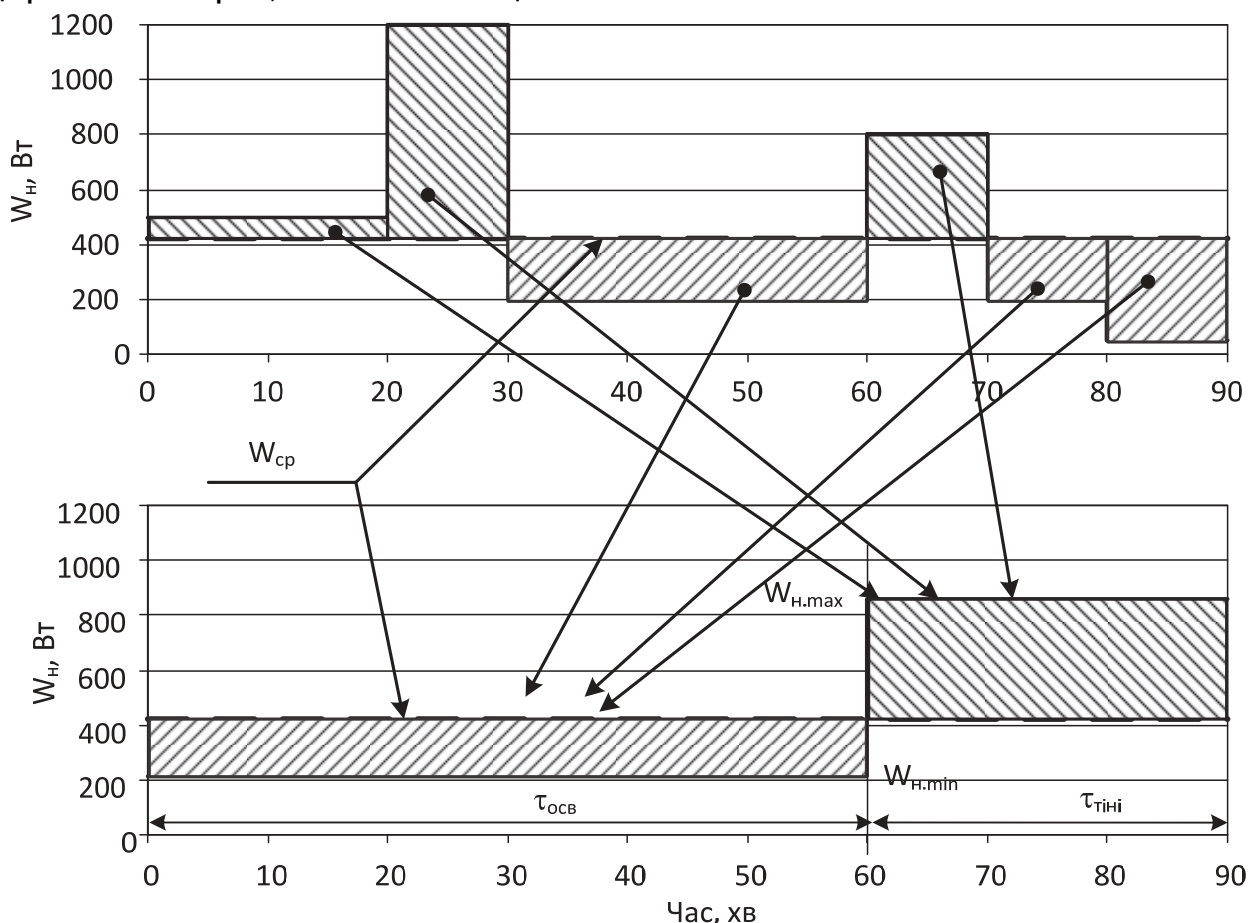


Рис. 2.1. Зведення довільної циклограми до дворівневого вигляду

З урахуванням того, що БФ не працює протягом усього витка, для випадків одновісної і двовісної орієнтацій БФ мінімальне потрібне значення установленної потужності БФ $W_{БФ вст}$ можна оцінити за співвідношенням

$$W_{БФ вст} = \frac{T}{\tau_{осв}} W_{БФ сер}. \quad (2.6)$$

На рис. 2.2 верхній графік – це початкова циклограма навантаження, нижче – циклограма енергоприходу від генератора (сонячної батареї), ще нижче – різниця потужностей генератора й навантаження, яка є потоком

потужності через накопичувач. Додатному значенню $W_{БХ}$ відповідає стан зарядження накопичувача, від'ємному – стан розрядження:

$$W_{БХ}(\tau) = W_{БФ}(\tau) - W_{н}(\tau). \quad (2.7)$$

Зінтегрувавши за часом потік потужності через накопичувач, можна отримати залежність від часу поточної зарядженості накопичувача (нижній графік на рис. 2.2) :

$$E_{БХ}(\tau) = \int_0^{\tau} W_{БХ}(\tau) d\tau. \quad (2.8)$$

Проводячи аналогію між накопичувачем і "баком з водою", у який одночасно по одній трубі вода вливається (енергія від генератора), а по іншій – з нього виливається (енергія, споживана навантаженням), змінення значень $E_{БХ}(\tau)$ відповідають коливанням рівня води в баку. При цьому максимальна різниця значень $E_{БХ}(\tau)$ ("коливання рівня води в баку") відповідає мінімальній необхідній ємності накопичувача (об'єму бака). Таким чином, необхідне мінімальне значення установленої ємності

$$E_{БХ \text{ вст}} = E_{БХ}(\tau)_{\max} - E_{БХ}(\tau)_{\min}. \quad (2.9)$$

Тут $E_{БХ}$ вимірюється в одиницях енергії: Дж, Вт·год. Для характеристики накопичувачів на основі батарей електрохімічних акумуляторів частіше використовують електрохімічну ємність БХ – $Q_{БХ}$. Одиниця вимірювання $Q_{БХ}$ – Кл, А·год.

Унаслідок неминучих втрат на поляризацію середня зарядна напруга (для всіх накопичувачів) завжди є більшою від середньої розрядної напруги. За законами електрохімії для тієї або іншої реакції необхідно надати електроду деякого потенціалу, що відрізняється від рівноважного. При рівноважному потенціалі струми прямої і зворотної реакцій є однаковими. Різниця між рівноважним потенціалом і потенціалом, під яким перебуває електрод, називається напругою поляризації. Тому ККД акумулятора зазвичай не є більшим за 75...80 % і величина енергії, надана акумуляторам ($E_{БХ \text{ зар}}$), істотно відрізняється від величини енергії, відданої акумулятором ($E_{БХ \text{ розр}}$).

Для акумуляторів космічного застосування, у яких реалізовано замкнені цикли, у нормальних умовах роботи зарядна $Q_{БХ \text{ зар}}$ і розрядна $Q_{БХ \text{ розр}}$ ємності відрізняються незначно. Відповідно до закону збереження зарядження розрядна ємність має дорівнювати зарядній за вирахуванням втрат на неосновні (неструмотвірні, паразитні) реакції.

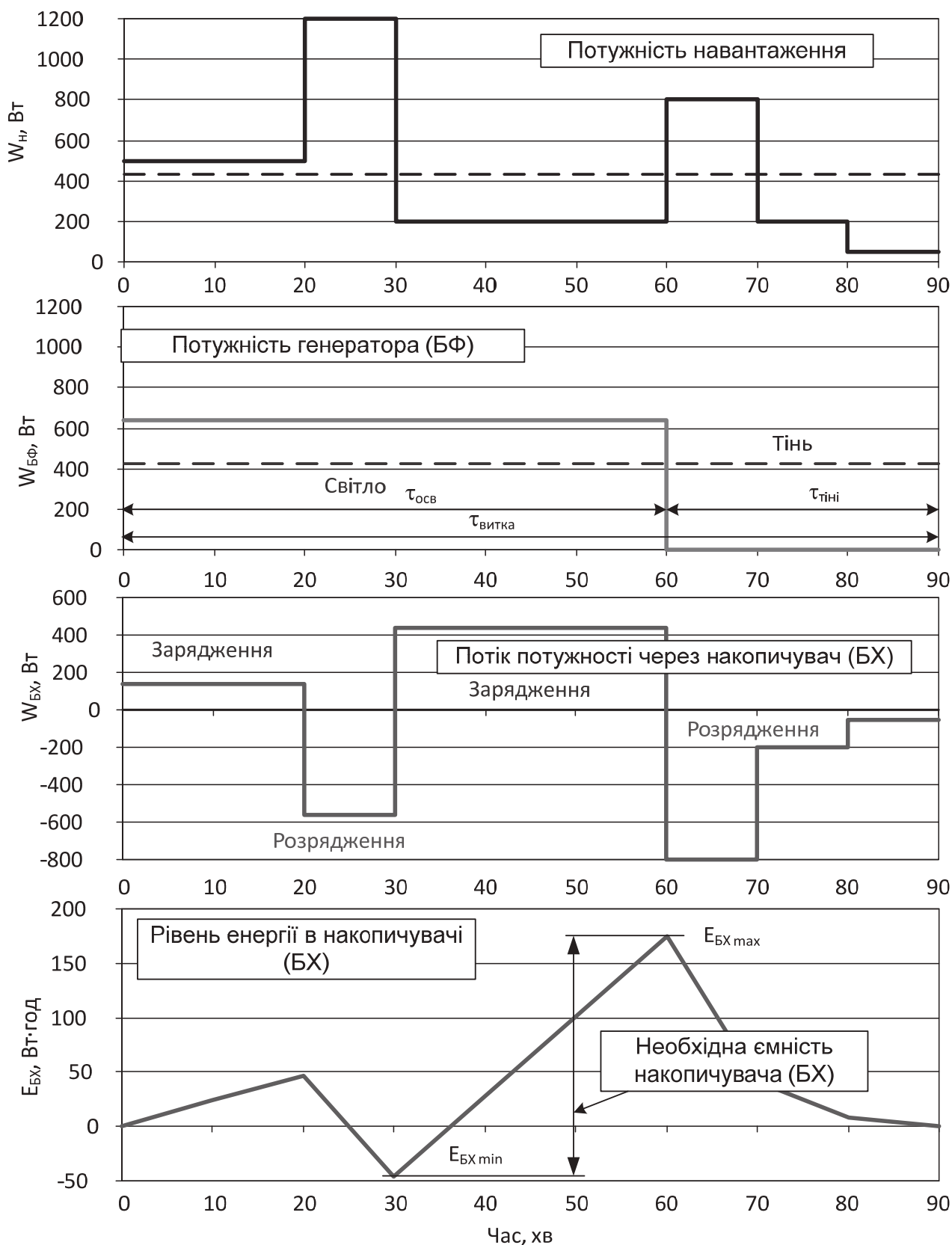


Рис. 2.2. До попереднього енергобалансного розрахунку: приклад циклограм потоків потужності через генератор, навантаження і накопичувач; розрахункова циклограма рівня заощадженої енергії в накопичувачі

Значення коефіцієнта ефективності за струмом (або просто коефіцієнта ефективності) за один цикл для акумуляторів космічного застосування

$$\eta = \frac{Q_{БХ\ розр}}{Q_{БХ\ зар}}, \quad (2.10)$$

становить 0,90...0,99 і залежить від температури, середнього рівня зарядженості, ступеня деградації. Тому поточне значення $Q_{БХ}$ (як аналог "рівня води в баку") використовують для керування накопичувачем.

Необхідну установлену електрохімічну ємність БХ можна визначити за формулою

$$Q_{БХ} = \frac{E_{БХ}}{U_{БХ\ роб}}, \quad (2.11)$$

де $U_{БХ\ роб}$ – робоча напруга акумуляторної батареї.

Для СЕЗ зі стабілізованою шиною при розрахунках як $U_{БХ\ роб}$ беруть стабілізовану вихідну напругу СЕЗ. Для СЕЗ з нестабілізованою шиною, у яких напруга на головній шині змінюється разом з напругою на БХ, при розрахунках як $U_{БХ\ роб}$ беруть мінімальну робочу напругу СЕЗ.

3. ДИНАМІЧНИЙ ЕНЕРГОБАЛАНСНИЙ РОЗРАХУНОК

Вироблення і споживання енергії на борту космічного апарата не є статичними процесами. Постійно змінюються споживана навантаженням потужність, генерована потужність, запас енергії в накопичувачі, і все це потребує дослідження процесів у СЕЗ з огляду на динаміку енергобалансу. Для цього необхідно використати динамічну енергобалансну модель, але спочатку розглянемо типову логіку роботи СЕЗ.

3.1. Типова логіка роботи СЕЗ (стани СЕЗ)

Типову логіку роботи СЕЗ показано на рис. 3.1. СЕЗ може перебувати в трьох основних станах:

- нормальний режим роботи (НР);
- режим обмеження зарядження (РОЗ);
- режим обмеження навантаження (РОН).

Перехід з одного режиму в інший обумовлений станом зарядженості накопичувача (у цьому випадку батареї хімічної БХ). У нормальному режимі (НР) не обмежуються ні потужність навантаження, ні потужність генератора. При цьому якщо потужність навантаження є більшою за потужність генератора, то дефіцит потужності покривається за допомогою БХ або, навпаки, надлишок потужності генератора йде на зарядження БХ. У тому випадку, якщо генерована потужність є більшою за потужність, що

потребується для навантаження, а БХ уже повністю заряджена, то для запобігання перезарядженню БХ потужність генератора необхідно обмежувати, оскільки перезарядження БХ імовірно призведе до виходу її з ладу. Це приблизно те ж саме, що прикрити кран при повній бочці, щоб вода не пролилася на підлогу. У цьому випадку аналог води – це енергія. На жаль, "вода, що не помістилася у бочці" – це енергія, дисипована в тепло.

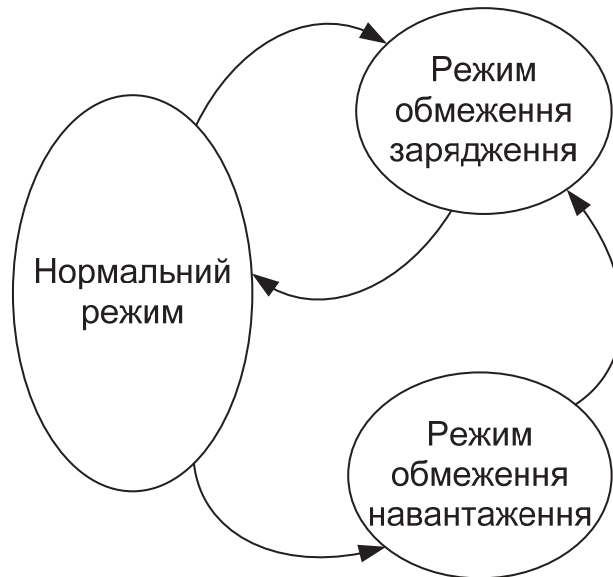


Рис. 3.1. Типова логіка роботи СЕЗ КА

Зазвичай потужність БФ регулюють або підключенням/відключенням окремих секцій БФ (дискретне регулювання), або за допомогою широтно-імпульсного (ШІМ) регулятора (аналогове регулювання). Кожна секція БФ є окремим автономним генератором, налаштованим на робочу напругу БФ; усі секції з'єднані послідовно й забезпечені ключами для окремого підключення/відключення. Приєднаний паралельно до БФ ШІМ-регулятор є напівпровідниковим ключем, що замикається з високою частотою й заданою шпаруватістю імпульсів (шпаруватість імпульсів – відношення тривалості поодинокого імпульсу ввімкнення до періоду імпульсів). Унаслідок роботи ШІМ-регулятора вихідна потужність БФ зменшується пропорційно шпаруватості імпульсів ключа.

Якщо генерована потужність є меншою від потрібної потужності навантаження, а БХ повністю розряджена, то, щоб уникнути перерозрядження БХ, який також майже неминуче призводить до виходу її з ладу, необхідно обмежувати споживання навантаження. Зазвичай таке обмеження здійснюється частковою або повною заборонаю на ввімкнення сеансного навантаження, а в особливо небезпечних випадках – навіть і частковою заборонаю чергового навантаження до рівня аварійного чергового навантаження, коли дозволено живлення тільки найнеобхідніших для підтримки існування КА споживачів.

Отже, РОЗ вмикається, якщо БХ повністю заряджена, і вимикається, якщо БХ розряджається до встановленого певного рівня (зазвичай 75...90 % від повної зарядженості БХ). РОН вмикається, якщо БХ повністю розряджена, і за умовами забезпечення надійної роботи СЕЗ вимикається тільки тоді, коли БХ повністю заряджена. НР, РОЗ, РОН – це стани СЕЗ. Перехід з одного стану в інший обумовлюється настанням деяких подій, які супроводжують роботу СЕЗ. Цими подіями є:

- спрацьовування спеціальних датчиків, що стежать за станом зарядженості БХ;
- поява керувальних сигналів від системи керування СЕЗ або ручного дистанційного керування.

Для керування СЕЗ використовуються декілька паралельних контурів керування, що відстежують стан зарядженої БХ та доповнюють один одного:

- за напругою на клеммах БХ (потенціометричний);
- за температурою корпусу БХ (термометричний);
- за тиском усередині акумуляторів (барометричний);
- за напругою на клеммах окремих акумуляторів (індивідуальний потенціометричний);
- за лічильником ампер-годин (ЛАГ) (кулонометричний).

Керування за напругою на клеммах БХ полягає в тому, що датчик напруги (ДН) безперервно відстежує напругу на клеммах БХ. Коли напруга набуває деяких наперед заданих значень (уставок ДН), генеруються сигнали, що зазвичай позначають *ДГН*, *ДСН*, *ДМН*.

ДГН – спрацьовування датчика граничної напруги, коли напруга на клеммах БХ при зарядженні починає стійко перевищувати уставку *ДГН*. *ДГН* і $\overline{\text{ДГН}}$ відповідно означають TRUE і FALSE для однойменної логічної змінної. *ДГН* використовується для ввімкнення РОЗ:

$$\text{if } U_{\text{БХ}} > U_{\text{ДГН}} \text{ then } \text{ДГН} \text{ else } \overline{\text{ДГН}} . \quad (3.1\text{a})$$

ДСН – спрацьовування датчика середньої напруги, коли напруга на клеммах БХ при розрядженні стійко зменшується нижче уставки *ДСН*; *ДСН* використовується для ввімкнення НР після РОЗ:

$$\text{if } U_{\text{БХ}} < U_{\text{ДСН}} \text{ then } \text{ДСН} \text{ else } \overline{\text{ДСН}} . \quad (3.1\text{б})$$

ДМН – спрацьовування датчика мінімальної напруги, коли напруга на клеммах БХ при розрядженні стійко зменшується нижче уставки *ДМН*; *ДМН* використовується для ввімкнення РОН:

$$\text{if } U_{\text{БХ}} < U_{\text{ДМН}} \text{ then } \text{ДМН} \text{ else } \overline{\text{ДМН}} . \quad (3.1\text{в})$$

Головна перевага керування за напругою – це простота реалізації. Істотним недоліком є те, що напруга на клеммах БХ залежить не лише від міри її зарядженості, але й від величини струму зарядження-розрядження (омічна складова падіння напруги), температури акумуляторів і міри деградації БХ (змінюється внутрішній опір БХ). Деякою мірою подолати цей недолік допомагає використання струмотермозалежних уставок ДН.

При перезарядженні БХ, коли енергія, що підводиться, уже не може бути спрямована на зарядження активної маси, починає різко зростати температура акумуляторів. Для традиційних у космічній техніці НКГ- і НВ-акумуляторів цей процес також супроводжується інтенсивним газовиділенням. Інтенсивним газовиділенням супроводжується й надмірне перерозрядження акумуляторів (переполюсування).

Керування за температурою корпусу БХ полягає в тому, що, коли температура корпусу БХ підвищується вище певного значення, генерується відповідний сигнал для ввімкнення РОЗ.

Аналогічно перевищення газового тиску вище допустимого значення в порожнині будь-якого з акумуляторів призводить до замикання контактів спеціальних датчиків і до ввімкнення РОЗ на зарядженні або РОН на розрядженні. Датчики тиску є досить громіздкими, тому вони не використовуються у БХ невеликої ємності (приблизно менше 25 А·год).

Вихід на переполюсування окремих акумуляторів виникає через те, що рівні зарядженості акумуляторів у БХ різняться, і при значній різниці зарядженості акумуляторів цілком може статися ситуація, коли окремі акумулятори вже повністю розрядилися, але в цілому батарея все ще продовжує розряджатися, і тоді ці окремі акумулятори виходять на зазначений режим переполюсування, унаслідок чого майже напевно БХ вийде з ладу. Для запобігання цьому використовується індивідуальний поелементний контроль напруги на клеммах кожного акумулятора. При падінні напруги на будь-якому з акумуляторів нижче допустимого рівня блок поелементного контролю (БПК) генерує сигнал, що вмикає РОН, причому зазвичай у цьому випадку навантаження знижується до рівня аварійного чергового.

Керування за ЛАГ (кулонометричний спосіб) полягає в тому, що в колі БХ лічильник ампер-годин безперервно відстежує стан БХ, підраховуючи узятю від неї або надану їй ємність:

$$Q_{\text{ЛАГ}}(\tau) = \frac{1}{k_n} \int_0^{\tau} I_{\text{БХ}}(\tau) d\tau. \quad (3.2)$$

Тут $Q_{\text{ЛАГ}}$ – розрядженість БХ за ЛАГ, А·год (традиційно вимірюють саме розрядженість, а не зарядженість БХ, тобто $Q_{\text{ЛАГ}} = 0$ відповідає повністю зарядженій БХ); k_n – коефіцієнт перезарядження, що враховує

втрати за струмом зарядження (беруть $k_n = 1$ на розрядженні і $k_n > 1$ на зарядженні).

При досягненні $Q_{ЛАГ}$ певних значень ЛАГ генерує сигнали (зазвичай їх позначають C_0, C_1, C_2), аналогічні за змістом ДГН, ДСН, ДМН. Для поєднання шкали ЛАГ зі шкалою розрядженості БХ використовують коригування показів ЛАГ:

- при спрацьовуванні на зарядженні або ДГН, або датчика граничної температури, або датчика граничного тиску $Q_{ЛАГ}$ обнуляється, а k_n збільшується;
- при більш ранньому спрацьовуванні на зарядженні ДСН перед C_1 k_n зменшується.

Таким чином, усі контури керування доповнюють і підстраховують один одного. На рис. 3.2 показано рівні зарядженості БХ, що відповідають спрацьовуванню тих або інших датчиків. При нормальній роботі керування циклуванням БХ здійснюється передусім за показами ЛАГ у межах від C_0 до C_1 . Якщо при повному зарядженні БХ з будь-яких причин не спрацював ЛАГ, то наступний "рубіж оборони" – датчик напруги, ще далі "в тилу" – датчик тиску і датчик температури. Так само і на розрядженні "ешелонована оборона" проти можливого перерозрядження БХ: спочатку C_2 , потім ДМН, БПК, датчик тиску.

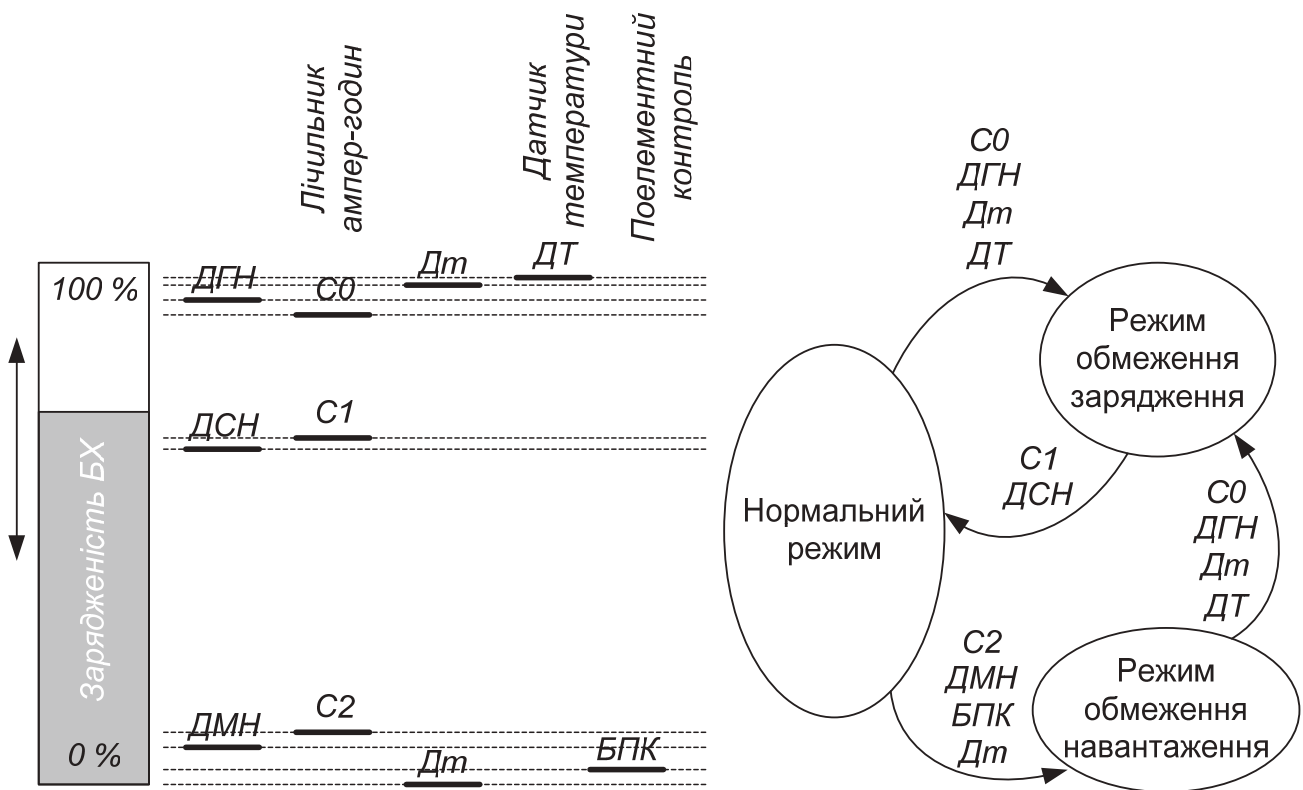


Рис. 3.2. Контури керування циклуванням БХ у складі СЕЗ КА

3.2. Структура динамічної енергобалансної моделі СЕЗ

Діюче значення потужності навантаження залежно від режиму роботи СЕЗ складається або з чергового й сеансного навантажень в режимах РОЗ і НР, або тільки чергового навантаження в режимі РОН:

$$P_{нав}(\tau) = \begin{cases} P_{черг}(\tau) + P_{сеанс}(\tau), & \text{якщо } РОЗ \cap НР; \\ P_{черг}(\tau), & \text{якщо } РОН. \end{cases} \quad (3.3)$$

Потужність, яку може дати сонячна батарея без обмеження її вихідної потужності (наявна потужність БФ), визначається формулою

$$P_{БФ \text{ наяв}} = P_{БФ \text{ уст}} K_{дегр.БФ} k_{осв}, \quad (3.4)$$

де $P_{БФ \text{ уст}}$ – установлена (вихідна на початок ресурсу) потужність сонячної батареї; $K_{дегр. БФ}$ – коефіцієнт деградації потужності сонячної батареї (див. рис. 2.1); $k_{осв} = f(i, \theta, \tau)$ – коефіцієнт освітленості БХ, що визначається місцем поточного становища КА на орбіті (світло, тінь) і кутом розташування БФ відносно Сонця (для неорієнтованих БФ); i – нахил орбіти; θ – довгота висхідного вузла; τ – час.

Діюче значення потужності БФ залежно від режиму роботи СЕЗ дорівнює або наявній потужності (у режимах НР і РОН), або (в ідеальному випадку) потужності навантаження (якщо тільки потужність навантаження не перевищує наявної потужності БФ на певний момент):

$$P_{БФ} = \begin{cases} P_{наяв}, & \text{якщо } P_{БФ \text{ наяв}} > P_{нав}; \\ P_{БФ \text{ розп}}, & \text{якщо } P_{БФ \text{ наяв}} \leq P_{нав}; \end{cases} \quad \text{якщо } РОЗ, \quad (3.5)$$

$$P_{БФ \text{ розп}}, \quad \text{якщо } РОН \cap НР.$$

Наявна ємність БХ описується як

$$Q_{БХ} = Q_{БХ \text{ уст}} k_{дегр.БХ}, \quad (3.6)$$

де $Q_{БХ \text{ уст}}$ – установлена ємність БХ; $k_{дегр. БХ}$ – коефіцієнт деградації ємності БХ.

Коефіцієнти деградації потужності БФ і ємності БХ досить задовільно описуються експонентою, що зменшується. З урахуванням того, що процеси деградації мають в основному випадковий характер, їх передбачувані значення коректно розміщувати в деякому довірчому інтервалі, обмеженому песимістичним та оптимістичним прогнозами. З огляду на сучасний рівень космічних технологій можна застосувати такі емпіричні залежності:

1. Для БФ на основі GaAr:

$$\begin{aligned}
 K_{дегр. БФ} &= 0,5 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{35}\right)} + 0,5; \\
 K_{дегр. БФ_{опт}} &= 0,4 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{60}\right)} + 0,6; \\
 K_{дегр. БФ_{пес}} &= 0,6 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{25}\right)} + 0,4,
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

де $\tau_{КА}$ – час існування КА на орбіті, років;

$K_{дегр. БФ_{опт}}$ – оптимістичний коефіцієнт деградації;

$K_{дегр. БФ_{пес}}$ – песимістичний коефіцієнт деградації;

$K_{дегр. БФ}$ – середній коефіцієнт деградації.

2. Для НКГ БХ:

$$\begin{aligned}
 K_{дегр. НКГ} &= 0,5 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{1,5}\right)} + 0,5 - 0,03 \tau_{КА}; \\
 K_{дегр. НКГ_{опт}} &= 0,4 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{1,5}\right)} + 0,6 - 0,03 \tau_{КА}; \\
 K_{дегр. НКГ_{пес}} &= 0,6 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{1,5}\right)} + 0,4 - 0,03 \tau_{КА},
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

де $K_{дегр. НКГ}$ – середній коефіцієнт деградації НКГ БХ;

$K_{дегр. НКГ_{опт}}$ – оптимістичний коефіцієнт деградації;

$K_{дегр. НКГ_{пес}}$ – песимістичний коефіцієнт деградації.

3. Для НВ БХ:

$$\begin{aligned}
 K_{дегр. НВ} &= 0,5 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{25}\right)} + 0,5 - 0,0115 \tau_{КА}; \\
 K_{дегр. НВ_{опт}} &= 0,2 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{25}\right)} + 0,8 - 0,0115 \tau_{КА}; \\
 K_{дегр. НВ_{пес}} &= 0,8 e^{\left(-\frac{\tau_{КА}}{25}\right)} + 0,2 - 0,0115 \tau_{КА},
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

де $K_{дегр. НВ}$ – середній коефіцієнт деградації;

$K_{дегр. НВ_{опт}}$ – оптимістичний коефіцієнт деградації;

$K_{дегр. НВ_{пес}}$ – песимістичний коефіцієнт деградації.

Потік потужності через накопичувач дорівнює різниці потужностей генератора й навантаження:

$$P_{БХ}(\tau) = P_{БФ}(\tau) - P_{нав}(\tau).
 \tag{3.10}$$

На основі цих залежностей, знаючи $Q_{БХ}$, можна зінтегрувати стан БХ і розрахувати її зарядженість у будь-який момент часу:

$$Q(\tau) = Q_0 + \int_0^{\tau} \left(\frac{P_{БХ}(\tau)}{U_{БХ}(\tau)} - I_{ср.БХ}(\tau) \right) d\tau, \quad (3.11)$$

де Q_0 – початкове значення зарядженості БХ, А·год;

$U_{БХ}$ – напруга на клеммах БХ, В;

$I_{ср.БХ}$ – струм саморозрядження БХ, А.

Узагалі-то струм саморозрядження БХ залежить від багатьох факторів: від зарядженості, температури, індивідуальних особливостей деградації. У реальних БХ саме розкид значень струму саморозрядження через декілька років експлуатації приводить до розкиду значень (розбалансування) поточних ємностей акумуляторів у складі БХ. Для оцінних розрахунків НКГ БХ можна використати емпіричний вираз

$$I_{ср.БХ} = \frac{Q_{БХ}}{4} 10^{-16} (e^{U_{БХ} + 0,1(t_{БХ} - 22)} - 1), \quad (3.12)$$

де $t_{БХ}$ – температура корпусу БХ, °С.

Для розрахунку напруги на клеммах БХ необхідно знати відносну зарядженість БХ – C : $C = 0$ відповідає повністю розрядженій БХ, а $C = 1$ – повністю зарядженій:

$$C_{БХ}(\tau) = \frac{Q(\tau)}{Q_{БХ}}. \quad (3.13)$$

Залежність напруги від відносної зарядженості БХ $U_{БХ}(C)$ називають зарядно-розрядною характеристикою БХ. Точніша напруга на БХ залежить від декількох факторів – передусім від зарядженості, струму БХ і температури корпусу БХ. Є достатня кількість моделей зарядно-розрядних характеристик різного ступеня складності для НКГ- і НВ-акумуляторів космічного застосування [2, 3]. Для простих оцінних енергобалансних розрахунків можна користуватися кусково-лінійною залежністю.

1. Для НКГ-акумуляторів:

$$U_{AK} = \begin{cases} \text{на зарядженні} & \begin{cases} C/6 + 1,4 & \text{при } 0 \leq C \leq 0,9; \\ 4C - 2,05 & \text{при } 0,9 < C; \end{cases} \\ \text{на розрядженні} & \begin{cases} 11C & \text{при } 0,1 < C; \\ C/4 + 1,075 & \text{при } 0,1 \leq C \leq 0,9; \\ C + 0,4 & \text{при } 0,9 < C. \end{cases} \end{cases} \quad (3.14)$$

2. Для НВ-акумуляторів:

$$U_{AK} = \begin{cases} \text{на зарядженні} & \begin{cases} C/6 + 1,5 & \text{при } 0 \leq C \leq 0,9; \\ 4C - 1,95 & \text{при } 0,9 < C; \end{cases} \\ \text{на розрядженні} & \begin{cases} 12C & \text{при } C < 0,1; \\ C/4 + 1,175 & \text{при } 0,1 \leq C \leq 0,9; \\ C + 0,5 & \text{при } 0,9 < C. \end{cases} \end{cases} \quad (3.15)$$

Напруга на батареї визначається такою формулою:

$$U_{BX} = n_{AK} U_{AK}, \quad (3.16)$$

де n_{AK} – кількість послідовно з'єднаних акумуляторів у БХ.

3.3. Критерії роботоздатності СЕЗ

Основне призначення СЕЗ КА – надійне забезпечення бортових споживачів електроенергією належної якості протягом заданого терміну експлуатації КА. Як уже зазначалося, бортові споживачі умовно підрозділяються на чергове й сеансне навантаження. Чергове навантаження пов'язане із забезпеченням існування КА, сеансне – з виконанням КА його цільового завдання, для якого він і був запущений. Коефіцієнт забезпечення потреби сеансного навантаження $k_{ЗСН}$ на деякому інтервалі спостереження T_{Σ} дорівнює відносному проміжку часу, протягом якого СЕЗ працює в режимі без обмеження навантаження:

$$k_{ЗСН} = 1 - \frac{T_{РОН}}{T_{\Sigma}}, \quad (3.17)$$

де $T_{РОН}$ – сумарний час роботи в режимі обмеження навантаження (ОН) на інтервалі часу T_{Σ} .

Іншими словами, при $k_{ЗСН} = 1$ забезпечуються всі 100 % потреб сеансного навантаження, система не заходить до режиму ОН; при $k_{ЗСН} = 0,5$ СЕЗ 50 % часу працює в режимі ОН; при $k_{ЗСН} = 0$ СЕЗ працює тільки в режимі ОН.

Функціональний ресурс КА – це час, протягом якого СЕЗ забезпечує на заданому рівні потреби сеансного навантаження. На інтервалі функціонального ресурсу КА вважається повністю роботоздатним. У практиці вітчизняної космонавтики вважається прийнятним короткочасне (на термін до декількох діб) зменшення параметра $k_{ЗСН}$ до рівня 0,6...0,8 (залежно від призначення КА). Також вважається прийнятним на кінець

заданого ресурсу КА значення $k_{ЗСН}$ у межах 0,7...0,8. Таким чином, стійке зменшення $k_{ЗСН}$ нижче рівня 0,7...0,8 означає вичерпання функціонального ресурсу КА.

Після вичерпання функціонального ресурсу і до вичерпання повного ресурсу КА залишається ще деякий час частково роботоздатним, оскільки час від часу сеансне навантаження ще може вмикатися в роботу.

Передбачуваний повний ресурс КА обумовлений вичерпанням ресурсу хімічної батареї. Протягом терміну експлуатації КА наявна ємність БХ безперервно зменшується. При цьому середня потужність навантаження є практично постійною, що обумовлює приблизно постійну величину абсолютної (у А·год) глибини розрядження БХ за цикл навантаження (зазвичай – один або декілька витків), що повторюється.

Таким чином, відносна глибина розрядження БХ за цикл навантаження безперервно зменшується протягом терміну експлуатації КА. Це означає, що безперервно зменшується й мінімальна напруга $U_{БХ\ min}$, до якої розряджається БХ за цикл навантаження, що повторюється. Коли ця мінімальна напруга починає зменшуватися до рівня нижче ДМН, це призводить до систематичного ввімкнення РОН, і ще деякий час КА залишається частково роботоздатним. Коли ж ця мінімальна напруга $U_{БХ\ min}$ наближається до нуля, це означає вичерпання ресурсу БХ і повного ресурсу КА.

Цей процес проілюстровано на рис. 3.3. У процесі експлуатації наявна ємність БХ $Q_{БХ\ наяв}$ поступово зменшується. При цьому необхідно забезпечувати постійну штатну глибину розрядження q . Коли ємність $Q_{БХ\ наяв}$ стає порівнянною з q , для забезпечення нормальної роботи СЕЗ доводиться вдаватися до періодичної заборони сеансного навантаження. Режим ОН починає періодично включатися тому, що напруга БХ починає стабільно зменшуватися до рівня нижче ДМН. Відповідно, якщо до цього часу коефіцієнт $k_{ЗСН}$ дорівнював одиниці, то тепер він починає поступово зменшуватися. Коли він досягає рівня 0,7...0,8, то це – момент вичерпання функціонального ресурсу КА. Для грамотно спроектованої СЕЗ він повинен збігатися із заданим ресурсом КА.

Далі, після вичерпання функціонального ресурсу, деякий час КА залишається частково функціональним, оскільки хоча і час від часу все рідше, але виникає можливість забезпечувати живлення сеансного навантаження. І, нарешті, через якийсь час ємність $Q_{БХ\ наяв}$ зменшується вже до такого рівня, що її стає недостатньо навіть для живлення аварійного чергового навантаження. Тоді мінімальна напруга на БХ за цикл навантаження досягає нульового рівня. Це є момент вичерпання повного ресурсу.

Енергобалансний розрахунок СЕЗ зводиться до того, щоб з допомогою енергобалансної моделі СЕЗ, задавшись значеннями установленної потужності БФ і установленної ємності БХ для заданого характеру енергоспоживання (циклограма чергового й сеансного

навантажень) і заданого характеру енергонадходження (орбіта КА і спосіб орієнтації БФ), скласти прогноз зміни параметрів $k_{ЗСН}$ і $U_{БХ\ min}$ протягом передбачуваного терміну експлуатації КА.

Для цього розглядають серію послідовних моментів. Для кожного моменту з урахуванням моделі деградації розраховують значення наявної ємності БХ, а також наявної потужності БФ. Потім проводять числову інтеграцію системи рівнянь (3.1), (3.3), (3.5), (3.10)–(3.14), (3.16) на інтервалі, достатньому, щоб СЕЗ вийшла на режим роботи, що встановився. Зазвичай для цього достатньо декількох витків. Для режиму роботи, що встановився, знаходять і фіксують значення параметрів $k_{ЗСН}$ і $U_{БХ\ min}$. Таким чином, отримують ряд значень цих параметрів для різних моментів терміну експлуатації КА.

Якщо дозволяють обчислювальні потужності, то можна зінтегрувати стан СЕЗ безперервно на всьому інтервалі передбачуваного часу експлуатації КА, заклавши при цьому й сезонну зміну тривалості тіні, характерну для більшості орбіт.

Картина, показана на рис. 3.3, є досить спрощеною для наочності. На ній не показано впливу на енергобаланс СЕЗ постійного зменшення наявної потужності БФ $P_{БФ\ наяв}$. Характер цього впливу подібний до впливу зменшення наявної ємності БХ $Q_{БХ\ наяв}$, проте спільний вплив цих двох факторів істотно ускладнює картину.

Як уже зазначалося, для більшості орбіт характерною є сезонна зміна тривалості тіні (див. рис. 1.2), яка призводить до того, що регулярно змінюється потрібна глибина розрядження БХ для забезпечення нормальної роботи СЕЗ. Вона зменшується зі зменшенням тривалості тіні і знову збільшується при сезонному збільшенні тривалості тіні, причому при зміні тривалості тіні змінюється також сумарне енергонадходження від БФ протягом кожного витка. Таким чином, верхній графік на рис. 3.3 у реальності більше схожий на політ планера над горами, ніж на розмірений спуск над рівниною.

Процеси деградації потужності БФ та ємності БХ значною мірою мають випадковий (стохастичний) характер. Деградація потужності БФ найбільшою мірою пов'язана з бомбардуванням поверхні фотоперетворювачів зарядженими частинками, що створює дефекти кристалічних ґрат, які є центрами рекомбінації електронно-діркових пар. Наслідок цього – зменшення коефіцієнта збирання, коефіцієнта виходу за струмом, напруги холостого ходу фотоперетворювача.

Зменшення ємності БХ обумовлене одночасним проходженням кількох процесів, основні з яких (для НКГ і НВ БХ) – це саморозрядження нікелевого електрода, що не компенсується, розбалансування ємностей акумуляторів, випаровування електроліту, закорочення сепаратора металевими мікродендритами та ін.

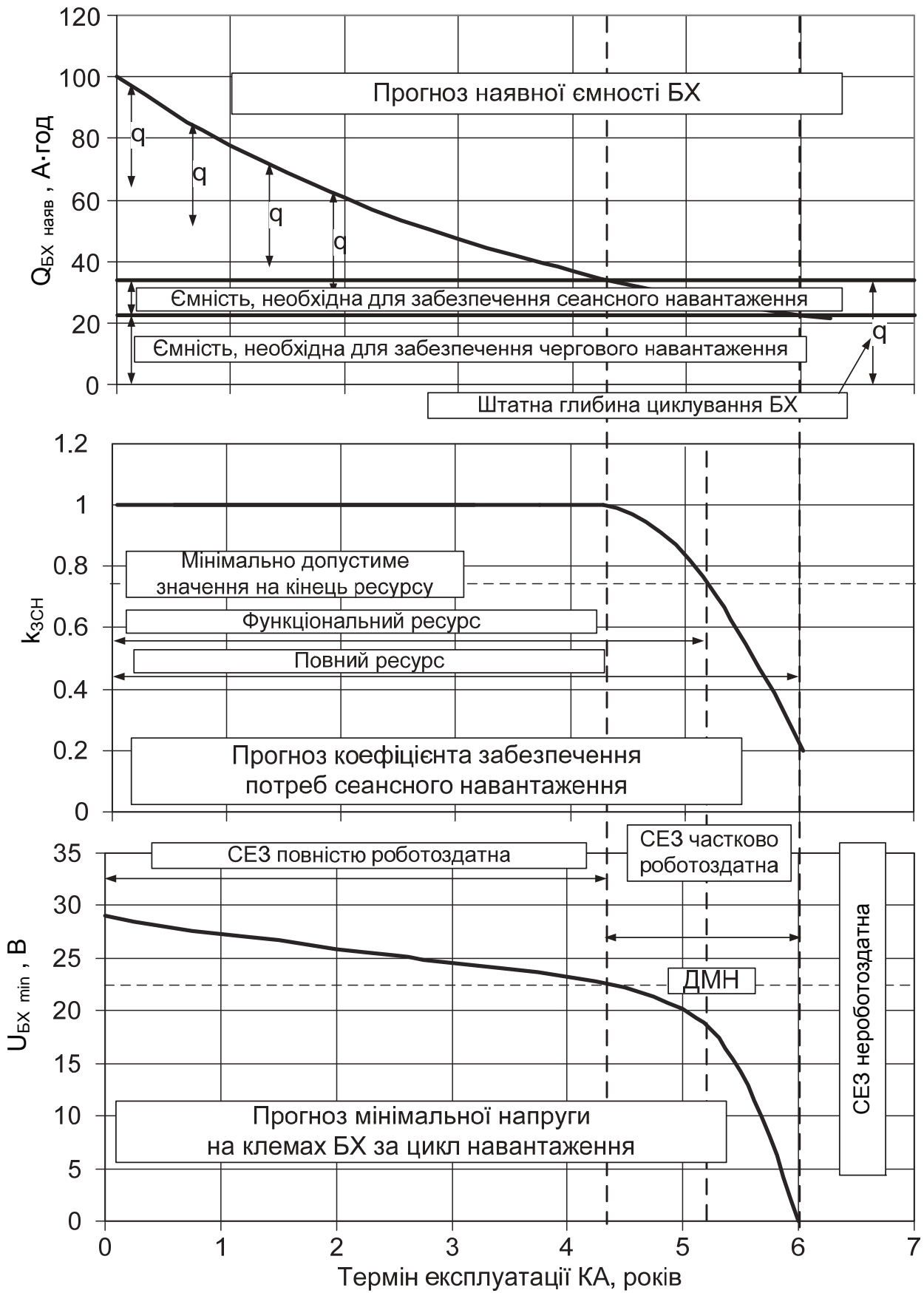


Рис. 3.3. Взаємозв'язок наявної ємності БХ і критеріїв роботоздатності СЕЗ

Тому важко казати про більш-менш точний прогноз очікуваної потужності БФ та ємності БХ через декілька років роботи. Досить достовірно можна казати тільки про передбачуваний інтервал їх значень у межах між оптимістичним і песимістичним прогнозами. Таким чином, і при розрахунку $k_{ЗСН}$ і $U_{БХ\ min}$ треба виходити з двох можливих крайніх варіантів – оптимістичного й песимістичного сценаріїв деградації ємності БХ і потужності БФ, виконуючи розрахунок для кожного з них.

Унаслідок цього розрахунку виходять не конкретні дати, а деякі часові інтервали, протягом яких з прийнятною достовірністю слід очікувати вичерпання функціонального й повного ресурсів. Для СЕЗ, що раціонально спроектована з огляду на забезпечення додатного енергобалансу, заданий ресурс, допускаючи деякий можливий ризик, може знаходитися в межах очікуваного інтервалу вичерпання функціонального ресурсу і, безумовно, має бути меншим за песимістичний прогноз вичерпання повного ресурсу.

Практичне заняття

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОБАЛАНСНОГО СТАНУ СЕЗ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Мета роботи: вивчити основні принципи побудови динамічної енергобалансної моделі СЕЗ, а також методику оцінювання енергобалансного стану СЕЗ.

Завдання:

1. Вивчити структуру і склад моделі СЕЗ, реалізованої в MS Excel, на прикладі програми SPS_Model.xls.
2. Вивчити вплив факторів (наявної потужності БФ, наявної ємності накопичувача) на параметри енергобалансу СЕЗ.

Послідовність виконання роботи

1. Якщо ви цього ще не зробили для виконання попередніх робіт, то у вашому робочому каталозі створіть окрему теку з власним ім'ям, куди ви надалі будете поміщати всі створені файли.

Увага! Для забезпечення коректної роботи рекомендується для назв тек і файлів використовувати тільки латинські літери.

2. Скопіюйте у вашу теку файл SPS _ Model2020.xls, який знаходиться за адресою P:/Help/Основи теорії ЕУ.

Відкрийте файл SPS _ Model2020.xls і продивіться сторінки.

У складі файлу знаходяться такі листи:

- "Модель" – на цьому листі проводяться всі основні розрахунки;
- "Інф" – лист з довідковою інформацією щодо деградації характеристик БФ і БХ;
- "Wn"...".Іср.БХ" – циклограми розрахункових параметрів СЕЗ.

В осередках "модель.A1: B11" розташовуються константи:

$P_{\text{БФн}}$, Вт	Наявна потужність БФ
$Q_{\text{БХ}}$, А·год	Ємність хімічної батареї
U-ДМН	Уставка датчика мінімальної напруги, В
U-ДСН	Уставка датчика середньої напруги, В
U-ДГН	Уставка датчика граничної (максимальної) напруги, В
Δt , хв	Крок інтеграції за часом
$n_{\text{ак}}$	Кількість акумуляторів у БХ
$T_{\text{осв}}$, хв	Тривалість світлової ділянки витка
$T_{\text{орб}}$, хв	Тривалість витка
$U_{\text{СЕЗ}}$	Напруга головної шини СЕЗ (для стабілізованих СЕЗ)
$C_{\text{поч}}$, відн. од.	Початкова ємність БХ

3. В осередках "модель.D2: AA1001" стовпцями розташуйте розрахункові параметри СЕЗ, які рядок за рядком обчислюються в процесі розрахунку, так що дані одного рядка є початковими для наступного рядка:

D	T, с	Час. Допоміжна шкала часу, яка використовується під час конструювання циклограми навантаження
E	Коефіцієнт освітленості БФ	Параметр $K_{осв}$. $K = 1$ на освітленій ділянці і $K = 0$ в тіні. Параметр задається вручну для кожного рядка протягом одного витка. Для наступних витків задається просте повторення $K_{N+1} = K_i$, де N – кількість рядків, що припадають на один виток. Для імітації неточної орієнтації БФ на Сонці можна задавати $K_{осв} = 0...1$
F		Резервний стовпець
G	$P_{н. сум}$, Вт	Сумарна потужність (чергова + сеансна), споживана навантаженням: $P_{н. сум} = P_{н. черг} + P_{н. сеан}$. Допоміжний стовпець, призначений для побудови повної циклограми навантаження, щоб виключити вплив режиму обмеження навантаження (РОН)
H	t, хв	Шкала часу. Обчислюється автоматично за допомогою приросту заданого кроку інтеграції за часом
I	$P_{н. черг}$, Вт	Потужність чергового навантаження. Параметр задається вручну для кожного рядка протягом часу одного витка. Для наступних витків задається просте повторення $P_{N+1} = P_i$, де N – кількість рядків, що припадають на один виток
J	$P_{н. сеан}$, Вт	Потужність сеансного навантаження. Параметр задається вручну для кожного рядка протягом часу одного витка. Для наступних витків задається просте повторення $P_{N+1} = P_i$, де N – кількість рядків, що припадають на один виток
K	$P_{н}$, Вт	Діюча потужність навантаження. Параметр розраховується так: = ЯКЩО ("РОН"; $P_{н. черг}$; $P_{н. черг} + P_{н. сеан}$), тобто в режимі обмеження навантаження дозволено тільки сеансне навантаження. Якщо немає режиму РОН, то дозволено все навантаження
L	$P_{БФ}$, Вт	Поточне значення потужності БФ. У кожному рядку $P_{БФ} = K_{осв} P_{БФн}$

M	$P_{ген}, V_T$	Поточне значення діючої потужності БФ (з урахуванням РОЗ). Розраховується так: $P_{ген} = \text{ЯКЩО ("РОЗ"; ЯКЩО } (P_H > P_{БФ}; P_{БФ}; P_H); P_{БФ})$, тобто якщо немає РОЗ, то потужність БФ не обмежується. У режимі РОЗ потужність БФ дорівнює потужності навантаження за умови, що потужність навантаження не перевищує максимально можливої потужності БФ. Ця логіка обмеження потужності генератора імітує випадок ШІМ-регулювання. В інших випадках можна використати дискретне регулювання потужності БФ
N	I_H, A	Струм навантаження: $I_H = P_H/U_{СЕЗ}$ – для стабілізованої шини, $I_H = P_H/U_{БХ}$ – для нестабілізованої шини
O	$I_{ген}, A$	Струм генератора: $I_{ген} = P_{ген}/U_{СЕЗ}$ – для стабілізованої шини, $I_{ген} = P_{ген}/U_{БХ}$ – для нестабілізованої шини
P	$I_{БХ}, A$	Струм БХ $I_{БХ} = I_{ген} - I_H$. При $I_{БХ} > 0$ батарея заряджається
Q	$I_{ср.БХ}, A$	Струм саморозрядження БХ. Це параметр, який розраховується для врахування ефекту втрат струму в БХ. На розрядженні $I_{ср.БХ} = 0$. При зарядженні $I_{ср.БХ} = \text{ЯКЩО } (C < 0,9; (C/9) * I_{БХ}; (10-9*C) * I_{БХ})$ – спрощена кусково-лінійна апроксимація функціональної залежності струму саморозрядження від міри зарядженості БХ. При $C = 0$ $I_{ср.БХ} = 0$ та при $C = 1$ $I_{ср.БХ} = I_{БХ}$
R	C	Відносна зарядженість хімічної батареї. Параметр C інтегрується в кожному рядку як $C_i = C_{i-1} + (I_{БХ} - I_{ср.БХ}) \Delta t / Q_{БХ} / 60$
S	$U_{ак}, V$	Напруга на окремому акумуляторі. Обчислюється на основі спрощеного наближення як кусково-лінійна апроксимація залежності напруги від міри зарядженості акумулятора. На розрядженні $U_{ак} = \text{ЯКЩО } (C > 0,9; C + 0,4; \text{ЯКЩО } (C > 0,1; C/4 + 1,075; 11C))$. На зарядженні $U_{ак} = \text{ЯКЩО } (C < 0,9; C/6 + 1,4; 4C - 2,05)$
T	$U_{БХ}, V$	Напруга на всій хімічній батареї $U_{БХ} = U_{ак} n_{ак}$. Масштабується з напруги одного акумулятора за кількістю акумуляторів у батареї
U	$U_{БХр}, V$	Реальна напруга БХ $U_{БХр i} = U_{БХ i} (U_{БХ i} - U_{БХр i-1}) / 3,5$. Обчислюється з урахуванням напруги на попередньому кроці для того, щоб врахувати інерційність процесу зміни напруги БХ при різкому змінненні режиму роботи БХ
V	ДМН	Логічна змінна. Стан датчика мінімальної напруги: ДМН = ЯКЩО ($U_{БХр} > U_{ДМН}$; ХИБНА; ІСТИННА)
W	ДСН	Логічна змінна. Стан датчика середньої напруги. На зарядженні завжди ДСН = ХИБНА, а на розрядженні ДСН = ЯКЩО ($U_{БХр} > U_{ДСН}$; ХИБНА; ІСТИННА)

X	ДГН	Логічна змінна. Стан датчика граничної (максимальної) напруги $ДГН = \text{ЯКЩО } (U_{БХр} < U_{ДГН}; \text{ХИБНА}; \text{ІСТИННА})$
Y	РОЗ	Логічна змінна "Режим обмеження зарядження". $РОЗ_i = \text{ЯКЩО } (ДГН_i; \text{ІСТИННА}; \text{ЯКЩО } (РОЗ_{i-1}; \text{ЯКЩО } (ДСН_i; \text{ХИБНА}; \text{ІСТИННА}); \text{ХИБНА}))$, тобто РОЗ вмикається при спрацьовуванні ДГН, після цього "залипає" і вимикається тільки при розрядженні БХ нижче ДСН
Z	РОН	Логічна змінна "Режим обмеження навантаження". $РОН_i = \text{ЯКЩО } (ДМН_i; \text{ІСТИННА}; \text{ЯКЩО } (РОН_{i-1}; \text{ЯКЩО } (ДГН_i; \text{ХИБНА}; \text{ІСТИННА}); \text{ХИБНА}))$, тобто РОН вмикається при спрацьовуванні ДМН, після цього "залипає" і вимикається тільки при повному зарядженні БХ (при ДГН)
A A	ОН+	Допоміжний параметр для обчислення коефіцієнта забезпечення потреби навантаження. $ОН+ = 1$ при $РОН = \text{ІСТИННА}$ і $ОН+ = 0$ при $РОН = \text{ХИБНА}$

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безручко, К. В. Расчет освещенности и температуры солнечных энергоустановок искусственных спутников земли в условиях орбитального полета / К. В. Безручко, А. В. Горовой, И. Б. Туркин. – Харьков : ХАИ, 1999. – 66 с.
2. Безручко, К. В. Расчет характеристик химических аккумуляторных батарей на основе математических моделей / К. В. Безручко. – Харьков : ХАИ, 1996. – 32 с.
3. Шепетов, Ю. А. Совершенствование эксплуатационных характеристик энергоустановок космических аппаратов на основе использования методов поэлементного управления работой аккумуляторных батарей : автореф. дис. канд. техн. наук / Шепетов Юрий Алексеевич; Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского „Харьк. авиац. ин-т”. – Харьков, 2000. – 20 с.

ЗМІСТ

1. Вихідні дані для енергобалансного розрахунку системи електрозабезпечення космічного апарата	3
1.1. Характер енергоспоживання навантаження	3
1.2. Призначення КА та його заданий ресурс	4
1.3. Параметри орбіти КА	4
1.4. Первинне джерело енергії для енергоустановки КА	6
1.5. Первинний перетворювач енергії	6
1.6. Накопичувач енергії	6
1.7. Додаткові дані про конструкцію СЕЗ	8
2. Статичний енергобалансний розрахунок	8
3. Динамічний енергобалансний розрахунок	13
3.1. Типова логіка роботи СЕЗ	13
3.2. Структура динамічної енергобалансної моделі СЕЗ	18
3.3. Критерії роботоздатності СЕЗ	21
Практичне заняття "Методика оцінювання енергобалансного стану СЕЗ за допомогою динамічної моделі"	26
Бібліографічний список	30

Навчальне видання

Шепетов Юрій Олексійович

**ЕНЕРГОБАЛАНСНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА**

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2021

Підписано до друку 26.11.2021

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 1,8. Обл.-вид. арк. 2,0. Наклад 50 пр.

Замовлення 278. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001