

УДК 629.7.014-519.064.5

**А.С. ВАСИЛЕНКО, С.А. КИРИЧЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ  
РЕТРАНСЛЯТОРА-АЭРОПЛАТФОРМЫ**

Одной из важнейших задач при разработке ретрансляторов-аэроплатформ является расчет системы энергоснабжения. Аналогичные расчеты проводятся для космических аппаратов, но они не могут быть использованы из-за различий объектов. Поэтому возникла необходимость в разработке методики расчета для аэроплатформ. Изложенная в статье методика позволяет осуществлять оценку потребных параметров солнечных и химических батарей для различных видов аэроплатформ. Численные расчеты, приведенные в статье, подтверждают правильность предложенной методики. В заключение даны рекомендации применимости полученных результатов.

**система энергоснабжения, ретранслятор-аэроплатформа, батарея фотоэлектрическая, батарея химическая, уравнение энергобаланса, коэффициент запаса**

**Введение**

Кардинальным решением в обеспечении информационных услуг урбанизированных районов стала разработка нового вида систем широкополосного беспроводного доступа, названных телекоммуникационными системами на базе высокоподнятых аэроплатформ [1]. Основная идея состоит в реализации различных видов связи с помощью ретрансляционной станции, размещенной на специальной платформе, на высоте (20...30) км, т.е. в области стратосферы. Проекты таких систем разрабатываются ведущими промышленными странами (Япония, США, Германия и др.), поскольку они будут использоваться не только как платформы для ретрансляторов систем связи, включая цифровое радио- и телевидение, но и в качестве средств наблюдения (мониторинга) за поверхностью Земли, движением наземных, воздушных и морских объектов.

Как известно, в качестве аэроплатформ могут быть использованы аэростаты, дирижабли, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и даже специальные воздушные шары [2, 3]. Следует отметить положительные свойства каждого из вида ретранс-

ляторов-аэроплатформ. Преимущество аэростатов и дирижаблей состоит в том, что они способны на длительное время зависать в заданной зоне, которая по Рекомендациям Международного Союза Электросвязи F.1500, определяется как цилиндр с радиусом 400 м и высотой 1,4 км. Кроме того, они, безусловно, являются наиболее экономичными аппаратами воздухоплавания, способные поднимать полезный груз до 1000 кг.

Что касается беспилотных летательных аппаратов – электролетов, то они являются незаменимыми для осуществления мониторинга земной поверхности, и также могут быть успешно использованы для ретрансляции в телекоммуникационных системах при решении задачи длительного обеспечения электроэнергией для барражирования в определенной зоне и обеспечения энергией бортовой аппаратуры ретранслятора. Поэтому в каждом конкретном случае решается вопрос о целесообразности использования той или иной высокоподнятой аэроплатформы.

**Формулирование проблемы.** Источником электроэнергии для таких ретрансляторов-аэроплатформ могут служить системы энергоснабжения (СЭС), вырабатываемые бортовой топливной энергоуста-

новой или солнечными батареями (БФ – батарея фотоэлектрическая). Учитывая наибольшую эффективность солнечных батарей на высокоподнятых стратосферных платформах, находящихся в зоне высокого уровня солнечного излучения, в последние годы усиленно ведутся работы по созданию полностью автономных длительно летающих аэроплатформ (от полугода до 5 лет), полет которых и работу всей бортовой аппаратуры обеспечивают солнечные батареи (системы БФ). На Украине, которая географически размещена между  $46^\circ$  и  $52^\circ$  северной широты с достаточно хорошей освещенностью, разработка таких аэроплатформ целесообразна и технико-экономически обоснована.

Ключевой проблемой при использовании стратосферных высокоподнятых аэроплатформ остается поддержание их стабильного положения в пространстве «зависания». Несмотря на то, что скорость ветра в районе (14...30) км составляет всего (10...20) м/с, а воздушные потоки в стратосфере относительно постоянны, что облегчает отработку устойчивого положения, все же имеются некоторые сезонные и территориальные перепады скорости и направления ветра, которые требуют учета при долговременной эксплуатации такого ретранслятора.

Анализу и расчетам СЭС ретранслятора-аэроплатформы (РА) следует уделить особое внимание, поскольку хорошо отработанная теория и практические расчеты СЭС космических аппаратов (спутников, ракетно-космических систем) не может быть использована в силу отличий этих объектов [3]. Прежде всего, в РА солнечная энергия БФ используется не только для питания бортовой аппаратуры, но также и для обеспечения тяги аэроплатформы для полета или стабилизации ее положения в течение длительного времени. Во-вторых, РА работает постоянно, т.е. круглосуточно в течении 24 часов, а заряд БФ осуществляется на протяжении дня ( $\tau_d$ ), когда только и работают солнечные батареи. Поэтому задача разработки методики расчета СЭС

ретранслятора-аэроплатформы, решению которой посвящена эта статья, является актуальной.

**Общие положения.** С учетом географического расположения Украины для расчетов выбираем наиболее неблагоприятное время по продолжительности светового дня (минимальный энергоприход для солнечных батарей). Этому соответствует зимнее время, а точнее день – 22 декабря, когда продолжительность дня  $\tau_d = 8$  ч, а ночи  $\tau_n = 16$  ч за сутки.

Итак, энергетическая система ретранслятора-аэроплатформы основана на солнечных и химических батареях, причем солнечные батареи – это основной или первичный генератор электроэнергии РА, а аккумуляторные батареи (БХ) являются вторичными источниками и обеспечивают энергоснабжение в течение ночи ( $\tau_n$ ).

## Решение проблемы

Для разработки методики расчета СЭС ретранслятора-аэроплатформы необходимо:

- а) записать уравнение энергодбаланса между системой энергоснабжения РА и нагрузкой;
- б) определить выражения для энергий, входящих в уравнение энергодбаланса;
- в) получить выражение для определения потребной мощности БФ;
- г) определить проектировочные параметры БФ;
- д) определить параметры химических батарей.

**Составление уравнения энергодбаланса.** Для определения мощности батареи фотоэлектрической составляется уравнение энергодбаланса между СЭС ретранслятора-аэроплатформы и нагрузкой, которое в первом приближении записывается выражением:

$$\begin{aligned} W_{\text{бфд}} &= K_1 \cdot W_{\text{нд}} + K_2 \cdot W_{\text{бхзд}} = \\ &= K_1 \cdot W_{\text{нд}} + K_2 \cdot K_3 \cdot W_{\text{нн}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $W_{\text{бфд}}$  – энергия, выработанная фотоэлектрической батареей в течение дневного (светового) промежутка времени суток;

$W_{Hд}$  – энергия, потребляемая нагрузкой (тяговыми электродвигателями и бортовой аппаратурой) в течении дневного времени суток;

$W_{Hн}$  – энергия, потребляемая нагрузкой в ночное время суток;

$W_{бхэд}$  – энергия, потребляемая химическими батареями в режиме заряда в дневное время суток;

$K_1, K_2$  и  $K_3$  – коэффициенты запаса, учитывающие потери передачи энергии от БФ к нагрузке, к БХ и от БХ в режиме заряда, разряда и хранения соответственно.

Для нормальной работы СЭС ретранслятора-аэроплатформы необходимо выполнение условия

$$K_2 \cdot W_{бхэд} = K_2 \cdot K_3 \cdot W_{Hн} = K_4 \cdot W_{бхрн}, \quad (2)$$

где  $W_{бхрн}$  – энергия, отданная химическими батареями в режиме разряда в ночное время суток;

$K_4$  – коэффициент запаса, учитывающий потери энергии при хранении и передаче к нагрузке в режиме разряда БХ.

Выражение (1) описывает равенство энергии, вырабатываемой БФ в течение дня, сумме энергий, затраченных на работу нагрузки и накопленной в БХ на световом участке суток. Условие (2) вытекает из выражения (1) и характеризует равенство энергий, заряженной БХ и энергии БХ в режиме разряда и хранения для питания нагрузки в ночное время с учетом коэффициентов потерь в передаче энергии.

Составляющие энергоприхода и энергорасхода в СЭС можно представить следующими уравнениями.

Энергия, вырабатываемая фотоэлектрическими батареями в течение дня:

$$W_{бфд} = \frac{P_{бф} \cdot \tau_{д}}{\eta_{бф-н} \cdot \eta_{бф-бх}}, \quad (3)$$

где  $P_{бф}$  – текущая мощность солнечных батарей;

$\eta_{бф-н} = (0,92 \dots 0,95)$  – коэффициент, учитывающий потери в передаче энергии от БФ к нагрузке (фидеры питания, блокирующие диоды, контактные группы и т.д.) с учетом регулирования мощности БФ;

$\eta_{бф-бх} = (0,89 \dots 0,92)$  – коэффициент, учитывающий потери в передаче энергии от БФ к аккумуля-

торным батареям (зарядные вольтодобавочные устройства);

$\tau_{д}$  – дневное (световое) время суток.

Энергия, потребляемая нагрузкой за дневное время суток:

$$W_{Hд} = \frac{P_{н} \cdot \tau_{д}}{\eta_{бф-н}}, \quad (4)$$

где  $P_{н}$  – текущая мощность, потребляемая нагрузкой.

Энергия, запасаемая аккумуляторными батареями в течение дня:

$$W_{бхэд} = \frac{(P_{бф} - P_{н})}{\eta_{бф-бх}}. \quad (5)$$

Энергия, отдаваемая аккумуляторными батареями в ночное время суток:

$$W_{бхрн} = \frac{P_{н} \cdot \tau_{н}}{\eta_{бх-н} \cdot \eta_{бх}}, \quad (6)$$

где  $\eta_{бх-н} = (0,82 \dots 0,92)$  – коэффициент, учитывающий потери в передаче энергии от БХ к нагрузке (разрядные вольтодобавочные устройства);

$\eta_{бх} = (0,75 \dots 0,94)$  – коэффициент, учитывающий эффективность накопления энергии в БХ, хранение и саморазряд БХ и зависящий от значений зарядных и разрядных токов (для больших значений токов берутся меньшие значения коэффициентов);

$\tau_{н}$  – ночное время суток.

Очевидно, что при решении уравнения энергетического баланса на первом шаге вычислений невозможно с достаточной точностью вычислить требуемую мощность БФ. Однако, приняв упрощения по учету передачи энергии в БХ и обратно для режимов работы их заряда и разряда, можно определить мощность БФ из условия:

$$P_{бф} = \frac{1}{\tau_{д}} \cdot \left( \frac{P_{н} \cdot \tau_{д}}{\eta_{бф-н}} + \frac{P_{н} \cdot \tau_{н}}{\eta_{бф-н} \cdot \eta_{бф-бх} \cdot \eta_{бх-н} \cdot \eta_{бх}} \right). \quad (7)$$

**Проектировочные параметры БФ.** Теперь необходимо определить проектировочные параметры

БФ: площадь БФ, рабочий ток, размеры и конфигурацию БФ.

Площадь БФ определяется следующим выражением:

$$S_{\text{бф}} = \frac{P_{\text{бф}}}{E_{\Sigma} \cdot \eta \cdot k_{\text{осв}}}, \quad (8)$$

где  $E_{\Sigma}$  – плотность потока солнечного излучения на заданной высоте, Вт/м<sup>2</sup>;

$\eta$  – коэффициент полезного действия солнечных батарей ( $\eta = 12\%$ );

$k_{\text{осв}}$  – интегральный среднесуточный коэффициент освещенности БФ (для электролета  $k_{\text{осв}} = 0,5$ ).

Рабочий ток БФ можно вычислить из условия

$$I_{\text{бф}} = \frac{P_{\text{бф}}}{U_{\text{СЭС}} + \Delta U_{\Sigma}}, \quad (9)$$

где  $U_{\text{СЭС}} = U_{\text{const}} = 28,5$  В для бортовой аппаратуры РА;

$\Delta U_{\Sigma} = (2...3)$  В – суммарные потери напряжения.

Следует отметить, что размеры фотоэлектрической батареи рассчитывают, исходя из конструктивных ограничений (площадь крыла, фюзеляжа, сферы шара и т.д.) и выбирают рационально в каждом конкретном случае аэроплатформы.

**Определение параметров БХ.** Далее определяются параметры БХ. Потребная емкость аккумуляторных батарей, т.е. минимально необходимая для удовлетворения энергетического баланса, находится из условия

$$Q_{\text{бх}} = \frac{W_{\text{бх\_нотр}}}{U_{\text{СЭС}} + \Delta U_{\Sigma}}, \quad (10)$$

где  $W_{\text{бх\_нотр}}$  – энергия, потребляемая нагрузкой в ночное время суток.

С учетом того, что продолжительность и надежность работы аккумулятора во многом зависит от его глубины разряда и значений рабочих параметров (температура, величина токов заряда – разряда и т.д.), емкость аккумуляторной батареи, устанавливаемой в СЭС, определяется из условия ограничения глубины разряда:

$$Q_{\text{бх}} = \frac{Q_{\text{бх}}}{\gamma_p}, \quad (11)$$

где  $\gamma_p$  – глубина разряда аккумулятора, которая обычно находится в пределах (0,4...0,5).

Для обеспечения потребной емкости аккумуляторных батарей необходимо определить количество аккумуляторов  $m$ , включенных параллельно, из условия:

$$m = \frac{Q_{\text{бх}}}{Q_{1\text{бх}}}, \quad (12)$$

где  $Q_{1\text{бх}}$  – емкость одного комплекта БХ.

Также для обеспечения требуемого напряжения  $U_{\text{СЭС}}$  необходимо определить число аккумуляторов  $n_{\text{ак}}$ , включенных последовательно:

$$n_{\text{ак}} = \frac{U_{\text{СЭС}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (13)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение единичного аккумулятора.

На этом анализ методики расчета СЭС считается законченным, а результаты представлены в итоговой табл. 1.

## Заключение

Проведенные исследования позволили предложить методику расчета СЭС ретранслятора-аэроплатформы, в которой решены проблемы выбора параметров БФ и БХ, исходя из требуемого энергетического обеспечения объекта. Численные значения, полученные с помощью предложенной методики расчета, приводят к выводу о целесообразности разработки ретранслятора-аэроплатформы на базе аэростата или дирижабля. Рекомендации основаны на потребной площади БФ и массогабаритных параметрах БХ, так как поверхность аэростата позволяет разместить требуемое количество солнечных батарей, а большая грузоподъемность – установить химические аккумуляторы для поддержания нужного режима работы СЭС ретранслятора-аэроплатформы в ночное время суток.

Таблица 1

Итоговая сводка результатов расчета по предложенной методике

|   |                                     |                                     |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Баллистические параметры: $T = 24$ ч; $\tau_c = 8$ ч (28800с); $\tau_n = 16$ ч (57600с)   |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Принятые коэффициенты: $\eta_{\phi\phi-n} = 0,95$ ; $\eta_{\phi\phi-\phi x} = 0,92$ ; $\eta_{\phi x-n} = 0,92$ ; $\eta_{\phi x} = 0,75$ |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Рассчитанные параметры:   |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Возможные варианты $P_n$<br>( $P_{эдв}+P_{ба}$ )  | $P_{эдв}=3$ кВт;<br>$P_{ба}=100$ Вт | $P_{эдв}=2$ кВт;<br>$P_{ба}=100$ Вт | $P_{эдв}=1$ кВт;<br>$P_{ба}=500$ Вт | $P_{эдв}=2$ кВт;<br>$P_{ба}=500$ Вт |
| $W_{но}$ , кВт·ч  | 26,11                               | 17,68                               | 12,63                               | 21,05                               |
| $W_{бхрн}$ , кВт·ч  | 71,88                               | 48,7                                | 34,78                               | 57,97                               |
| $P_{б\phi}$ , кВт   | 13,54                               | 9,2                                 | 6,55                                | 10,9                                |
| $W_{б\phi\phi}$ , кВт·ч   | 124                                 | 83,98                               | 59,99                               | 99,98                               |
| $W_{бхэд}$ , кВт·ч  | 90,82                               | 61,52                               | 43,94                               | 73,24                               |
| Проектировочные параметры БФ и БХ:  |                                     |                                     |                                     |                                     |
| $S_{б\phi}$ , м <sup>2</sup>  | 168,5                               | 114                                 | 81,5                                | 135,8                               |
| $I_{б\phi}$ , А   | 443,9                               | 300,82                              | 215                                 | 358                                 |
| $W_{потр\_нагр}=P_n \cdot \tau_n$ , кВт·ч   | 49,6                                | 33,6                                | 24                                  | 40                                  |
| $Q_{бх}$ , А·ч  | 1626                                | 1102                                | 786,9                               | 1311                                |
| $Q_{б\phi}$ , А·ч   | 3252                                | 2204                                | 1574                                | 2622                                |
| Параметры Li-ion аккумуляторов: 200 А·ч ~5,5 кг~3,6 В   |                                     |                                     |                                     |                                     |
| $m$ , шт.   | 16                                  | 11                                  | 8                                   | 14                                  |
| $n_{ак}$ , шт.  | 9                                   | 9                                   | 9                                   | 9                                   |
| Масса, кг   | 792                                 | 544,5                               | 396                                 | 693                                 |

## Литература

1. Кравчук С.О., Ильченко М.Ю. Аэроплатформы для телекоммуникационных систем / Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2003. – №1. – С. 5-15.

2. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. – К.: Наук. думка, 2003. – 22 с.

3. Материалы корпорации Angel. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.angelhalo.com>. (5.02.2006).

4. Оценочные расчеты параметров ракетно-космических систем: Учеб. пособие к курсовому проектированию по общему устройству и конструированию объектов аэрокосмической техники / К.В. Безручко, Н.В. Белан, С.В. Губин, Е.А. Исаев и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2003. – 33 с.

Поступила в редакцию 11.01.2007

**Рецензент:** канд. техн. наук, доц. Ю.А. Шепетов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.