

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ АВТОНОМНЫХ ПРИВодОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

---

Александр Валерьевич МАКАРЕНКО родился в 1984 г. в городе Сафоново Смоленской области. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области систем приводов летательных аппаратов. Автор четырех научных работ.

Alexander V. MAKARENKO, was born in 1984, in the Smolensk Region. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in actuator systems for aircraft. He has published 4 technical papers.

---

Алексей Валерьевич ПРИЛИПОВ родился в 1984 г. в городе Москве. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области систем приводов летательных аппаратов. Автор четырех научных работ.

Aleksey V. PRILIPOV, was born in 1984, in Moscow. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in actuator systems for aircraft. He has published 4 technical papers.

---

Кира Евгеньевна САМОХИНА родилась в городе Ярославле. Научный сотрудник МАИ. Основные научные интересы — в области систем приводов летательных аппаратов. Автор четырех научных работ.

Kira E. SAMOKHINA, was born in Yaroslavl. She is a Research Associate at the MAI. Her research interests are in actuator systems for aircraft. She has published 4 technical papers.

---

*На основе комплексного подхода проводится исследование энергомассовых характеристик различных типов первичных источников питания автономных следящих приводов для решения задач управления мобильными объектами, дается сравнительный анализ источников и предлагаются рекомендации по их проектированию.*

Системы и оборудование, размещенные на борту современных автономных мобильных объектов (к которым относятся грузовой планирующий парашют и различные типы беспилотных ЛА), занимают вполне определенный объем и массу от общего объема и массы всего объекта.

Стремление повысить нагрузку мобильных объектов и уменьшить массогабаритные характеристики приводит к тому, что объем и масса бортового оборудования должны постоянно уменьшаться.

Поэтому проблема поиска приводов систем управления автономными мобильными объектами (АМО), имеющих минимальные массогабаритные показатели, является актуальной. Большой круг задач, решаемых современными АМО, и тенденция к использованию на их борту определенного класса автономных приводов обуславливают первостепенное значение этой проблемы. Существует два различных подхода к решению этой проблемы.

В первом используется алгоритмический метод прототипов, дающий возможность, исходя из об-

шей идеологии проектирования устройств данного класса, применительно к каждому конкретному случаю определить операции проектирования и их очередность, а также связи между операциями в результате создания ряда последовательных, приближающихся к цели процедур. Результаты этого метода высоки, если это касается привода, близкого к хорошо изученному прототипу. Однако такой подход не приводит к желаемым результатам при проектировании отличного от прототипа или принципиально нового типа привода.

Второй подход использует теорию оптимального проектирования, аналитическое решение проблемы минимизации привода и выбора его наилучших параметров с учетом противоречий между параметрами и массогабаритными характеристиками. Этот выбор осуществляется в соответствии с принятыми критериями. Оптимизация рассматривается как рациональная процедура, возможная лишь тогда, когда существуют различные варианты и приняты критерии выбора. Чем шире область возможных решений и чем более удачно выбраны критерии, тем больше вероятность нахождения абсолютного оптимального варианта. Однако практически всегда определяется относительный оптимум, поскольку выбор критериев никогда не бывает идеальным, а область возможностей всегда ограничена.

Известно, что объем и масса автономного привода определяются совокупностью входящих в его состав устройств и элементов — источниками энергопитания, исполнительным механизмом, датчиками информации, усилительно-преобразовательными устройствами, коммутационными связями между элементами и прочими устройствами привода.

Массогабаритные показатели элементов и устройств в свою очередь связаны с их выходной мощностью и временем работы, и среди однотипных элементов большей мощности и большему времени работы соответствует и большая масса.

Следовательно, минимизация автономного привода невозможна без решения задачи синтеза структуры привода, т. е. нахождения такого сочетания элементов привода, при котором обеспечивается управление объектом регулирования с минимальными энергетическими затратами.

Возросшие требования к приводным системам автономных объектов по точности и стабильности характеристик в сочетании с требованием уменьшения массогабаритных характеристик всей системы в целом требуют решения задач, определяющей из которых является проблема эффективного использования энергозапаса источника энергопитания, т. е. уменьшения потерь в энергетических каналах исполнительных механизмов в процессе воспроизведе-

дения заданного закона движения, рационального перераспределения энергии, совершенствования элементной базы и прочих мероприятий.

Вводимые ограничения по массогабаритным показателям в ряде случаев приводят к недостатку энергии, требуемой для обеспечения движения выходного звена приводной системы в соответствии с заданным законом, поэтому одна из важнейших задач — определение методов, которыми хотя бы частично можно скомпенсировать влияние этих ограничений на динамические свойства системы.

На протяжении всего времени развития автономных движущихся объектов всегда ставился вопрос о создании рациональной энергосистемы, обеспечивающей энергопитанием автономные приводные системы, с соблюдением ограничений по массогабаритным показателям. Проектировать современные энергосистемы возможно только при условии рассмотрения всего тракта преобразования энергии, т. е. энергосистема должна рассматриваться начиная с первичного источника и заканчивая выходным звеном привода независимо от ее конструктивного и производственного разделения на устройства и подсистемы.

Одним из наиболее важных и значительных по массе в составе автономной приводной системы является источник энергии. Для правильного выбора количества запасенной энергии недостаточно знать мощность исполнительного механизма и время работы, так как такой подход даст значительно завышенные показатели. Поэтому необходимо проанализировать типичный закон движения привода [1]. Наиболее типичный закон движения для автономных мобильных объектов представлен на рис. 1, где  $a$  — отрезок времени отделения объекта от носителя и ориентации (характеризуется программным управлением привода и максимальным отклонением органов управления (ОУ));  $b$  — основной этап сближения (управление с малыми углами отклонения ОУ);  $c$  — этап активного маневрирования при подходе к цели (потребляемая мощность теоретически стремится к бесконечности);  $d$  — среднее значение мощности;  $e$  — значение максимальной мощности. Среднее значение мощности, как правило, в несколько раз меньше максимального, так как отрезки времени  $a$  и  $c$  составляют обычно весьма малую часть всего времени работы системы.

Таким образом, источник энергии должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь запас энергии  $E_{\text{ист}}$ , обеспечивающий работу со средней мощностью все время работы с

учетом КПД привода: 
$$E_{\text{ист}} = \frac{d(a+b+c)}{\eta_{\text{пр}}};$$

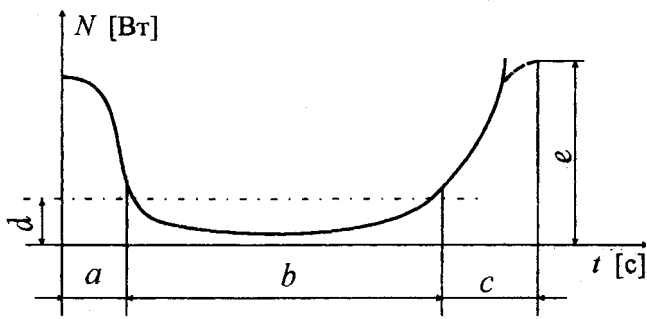


Рис. 1. Закон изменения мощности

• обеспечивать максимальную выходную мощ-

ность с учетом КПД привода:  $N_{ист} \geq \frac{N_{пр}}{\eta_{пр}}$ ;

• обеспечивать минимальное время выхода (1—2 с) тока на максимальное значение (если речь идет об источнике тока).

Помимо основных требований к энергетике системы, следует учитывать также возможность в некоторых случаях рекуперации энергии (при использовании химического источника тока в электродвигательном приводе) и способность регулирующего устройства прекращать расход рабочего тела (когда в качестве источника питания используется баллоном со сжатым газом, а распределительным устройством служит электроклапан).

Исследование энергомассовых характеристик первичных источников питания автономных следящих приводов производилось для времени работы привода 100 с (время, необходимое для перекладки стропы управления парашютом или управления рулевой поверхностью беспилотного ЛА).

Рассматривались следующие типы первичных источников энергии автономных приводов:

- 1) пневматический баллон со сжатым газом;
- 2) твердотопливный газогенератор;
- 3) электрохимический источник тока типа ампульной батареи;
- 4) объединенный источник энергопитания.

Опишем подробно каждый из перечисленных типов источников энергии.

В настоящее время в автономных пневматических системах применяются следующие источники сжатого газа (ИСГ) [2]:

- ИСГ на основе баллона с газом;
- твердотопливные газогенераторы (ТТГГ);
- газогенераторы на однокомпонентном жидком топливе;
- непосредственный отбор сжатого газа от бортовых источников (двигателей).

ИСГ являются автономными устройствами и в комплекте со вторичными источниками энергии снабжают все устройства энергией необходимого вида на протяжении всего времени управляемого полета летательного аппарата или времени работы устройства.

Объем источника сжатого газа при известном давлении на входе в привод зависит от плотности первичного вещества, преобразуемого в газ, и совершенства конструкции самого источника.

Наибольшая плотность первичного вещества у порохов (1,6—1,7 г/см<sup>3</sup>), следовательно, и ИСГ на их основе будут иметь наименьший объем. Минимальной плотностью и, следовательно, максимальным объемом обладают ИСГ с использованием сжатого газа (0,12—0,61 г/см<sup>3</sup>). Даже при давлениях 50 МПа плотность сжатого газа почти в два раза меньше плотности твердых и жидких веществ. Недостатком ИСГ с использованием твердых и жидких первичных веществ является высокая температура газа (1000—3000 К), что существенно снижает время работы привода по прочностным соображениям. Необходимо отметить также жесткие требования к прочности конструкции воздушных баллонов, так как они находятся под высоким давлением.

### 1. Пневматический баллон со сжатым газом

Источники газообеспечения на холодном газе представляют собой баллоны различной конфигурации, выполненные из различных материалов. Схема воздушного баллона и его подключение к приводу приведены на рис. 2. Сжатый газ находится в баллоне под высоким давлением ( $P_6 = 10—50$  МПа). Включение подачи сжатого газа осуществляется электроклапаном. Регулятор давления (РД) понижает и стабилизирует давление на входе в приводы.

Энергию газа  $\mathcal{E}_п$ , запасенную в емкости, можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{E}_п = \frac{k}{k-1} RT_{раб} \eta_t,$$

где  $T$  — рабочая температура на входе в устройство, преобразующем энергию;  $k$  — показатель адиабаты;

$$\eta_t = 1 - \left( \frac{p_1}{p_{раб}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \text{ — термический КПД; } p_1 \text{ — конечное}$$

давление на выходе устройства [1].

Масса ИСГ (сумма массы газа и массы баллона) пропорциональна потребной массе сжатого газа, кроме того, для баллона желательно применять

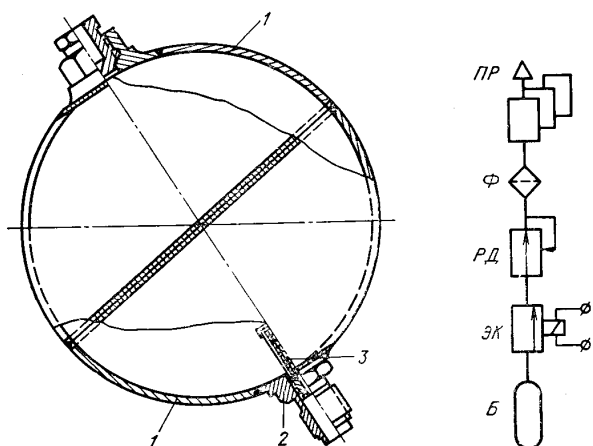


Рис. 2. Схема воздушного баллона и схема его подключения в составе ИСГ:

1 — полусфера; 2 — заправочная горловина; 3 — фильтр; Б — баллон; ЭК — электроклапан; РД — регулятор давления; Ф — фильтр; ПР — привод

материал с малой плотностью и большим пределом прочности, а также предпочтительным является газ с меньшей газовой постоянной [2].

Разрядная характеристика баллона со сжатым газом представлена на рис. 3.

Масса баллона со сжатым газом является функцией мощности автономного привода  $N_{пп(б)}$  и времени его работы  $t$ :

$$G_6 = k_6 N_{пп(б)} t + G_6^0 = k_6^* N_{пп(б)} + G_6^0,$$

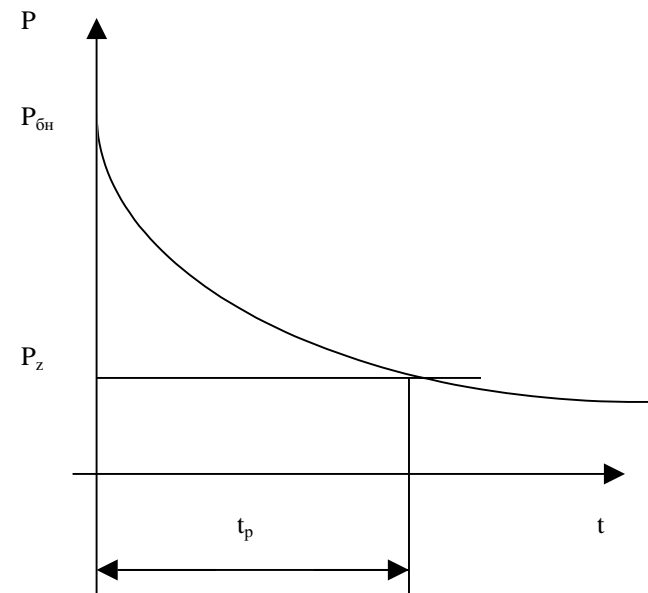


Рис. 3. Разрядная характеристика пневматического баллона со сжатым газом:

$p_{бн}$  — начальное давление в баллоне;  $p_z$  — постоянное выходное давление в баллоне;  $t_p$  — время разрядки баллона, при котором обеспечивается работа приводной системы

где  $k_6^*$  — приведенный массовый коэффициент для воздушных аккумуляторов давления с временем непрерывной работы привода 100 с

( $k_6^* = 0,003333$  кг/Вт);  $G_6^0$  — постоянная составляющая массы воздушного баллона.

## 2. Твердотопливный газогенератор

Принцип работы построен на основе использования продуктов горения твердых топлив. На рис. 4 приведена схема твердотопливного газогенератора (ТТГГ) и его подключения к приводу. В отличие от баллона, где при опорожнении изменяется давление, в пороховом газогенераторе сжатый газ создается при относительно постоянном давлении  $p_{гг}$ , что позволяет обойтись без регулятора давления. Для стабилизации процесса горения в схеме (рис. 4) предусматривается разделительный дроссель  $A_{др}$ , работающий в сверхкритическом режиме. Наличие разделительного дросселя позволяет исключить влияние на работу газогенератора различных процессов, связанных с уменьшением давления  $p_z$ , т. е. с увеличением потребляемого приводом расхода  $G_z$ ; увеличение давления парируется при этом специальным выбором режимов работы привода или постановкой сбросного клапана (СК) параллельно приводу.

Энергию горячего газа  $\Theta_{гг}$ , накопленную в ТТГГ, можно выразить формулой вида

$$\Theta_{гг} = \frac{k}{k-1} m_T R T_1 \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right),$$

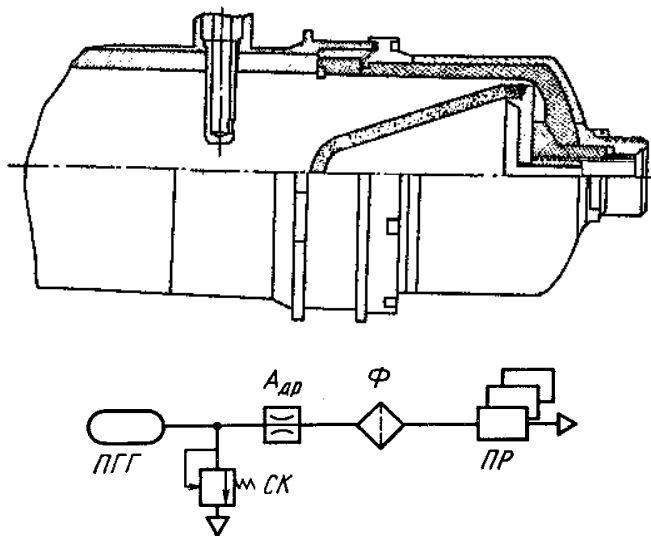


Рис. 4. Схема порохового газогенератора и схема его подключения в составе ИСГ

где  $T$  — температура газа на входе в питаемый агрегат;  $k$  — показатель адиабаты;  $p_2, p_1$  — конечное давление на выходе из агрегата и на входе в питаемый агрегат [1].

В качестве горючего в пороховых газогенераторах применяются коллоидные или смесевые пороха [4] со скоростями горения 0,3—5 мм/с. В связи с наибольшей плотностью первичного вещества (порохов), высокой температурой газов и относительно высокой газовой постоянной ТТГГ являются наиболее компактными источниками сжатого газа и применяются не только для питания сжатым газом систем приводов, но и для различных одноразовых пироструйных устройств.

Основные недостатки данного источника питания: высокая температура газа на выходе, что вынуждает применять дорогостоящие материалы; кратковременность работы — время работы определяется длиной и объемом шашки; загрязненность газов твердыми включениями и смолистыми составляющими, что приводит к необходимости дополнительных систем очистки рабочего тела. Разрядная характеристика ПГГ представлена на рис. 5.

В качестве первичных источников газовой энергии широкое распространение в ракетных двигателях твердого топлива (РДТТ) получили твердотопливные газогенераторы (ТТГГ).

Применение ТТГГ в бортовых источниках питания (БИП) рулевых приводов обусловлено следующими его преимуществами перед другими типами (жидкостных газогенераторов, баллонов со сжатым газом)[3]:

- высокая удельная энергоемкость и удельная энергия по сравнению с другими источниками (составляет  $36 \cdot 10^2$  Дж/г);

- высокая надежность действия (вероятность безотказной работы 0,9998) и постоянная боеготовность;

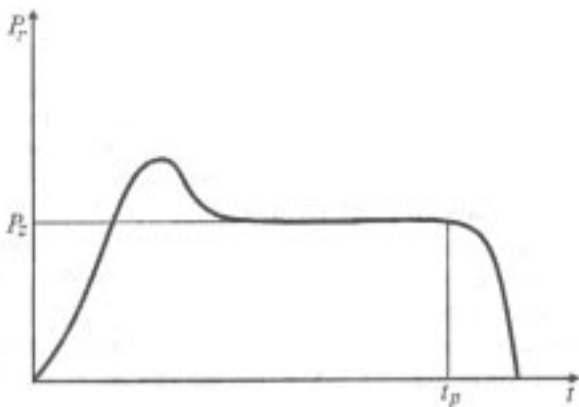


Рис. 5. Разрядная характеристика ТТГГ:  $p_2$  — рабочее давление;  $t_p$  — время работы ТТГГ

- простота и компактность конструкции (за счет отсутствия подвижных элементов и высокой плотности заряжания);

- простота эксплуатации и обслуживания;

- возможность длительного хранения в окончательно снаряженном виде (до 18 лет).

Масса газогенератора  $G_{ГГ}$  определяется следующей формулой:

$$G_{ГГ} = k_{ГГ} \cdot N_{пп(г)} \cdot t,$$

где  $k_{ГГ}$  — массовый коэффициент газогенератора ( $k_{ГГ} = 0,00000225$  кг/(Вт · с));  $N_{пп(г)}$  — мощность привода (Вт);  $t$  — время работы (с).

При  $t = 100$  с и  $k_{ГГ} = 0,00000225$  кг/(Вт · с) выражение массы газогенератора от мощности принимает вид

$$G_{ГГ} = k_{ГГ}^* \cdot N_{пп(г)},$$

где  $k_{ГГ}^*$  — приведенный коэффициент газогенератора ( $k_{ГГ}^* = 0,00225$  кг/Вт).

### 3. Электрохимические источники тока

Электрохимические источники тока (ХИТ) типа ампульных или аккумуляторных батарей надежны и удобны в эксплуатации. Вырабатываемая ими электрическая энергия легко передается к потребителю и преобразуется в другие виды энергии. К числу недостатков ХИТ следует отнести сравнительно большое время выхода на номинальный режим работы и ограничение в отдаче мощности при пусковых режимах потребителей.

По конструктивным характеристикам батареи можно подразделить на многоампульные и одноампульные, по виду применяемой электрохимической системы — на серебряно-цинковые и свинцово-кремнефтористоводородные, по способу вытеснения электролита — на батареи с пиротехническим вытеснителем жидкости и вытеснением жидкости с помощью сжатого воздуха [3].

Конструктивная схема ампульной батареи приведена на рис. 6.

Ампульная батарея содержит, как правило, несколько, например 19 последовательно соединенных в два блока элементов (рис. 6, позиция 1).

От количества элементов зависит величина напряжения на клеммах батареи. Блоки элементов расположены в два ряда над сосудом 5 с электролитом. Они состоят из пластмассовых секций 2, соединенных между собой по торцам, и пакетов электродов 3.

Секции представляют собой пластмассовые прямоугольники с углублениями для размещения в

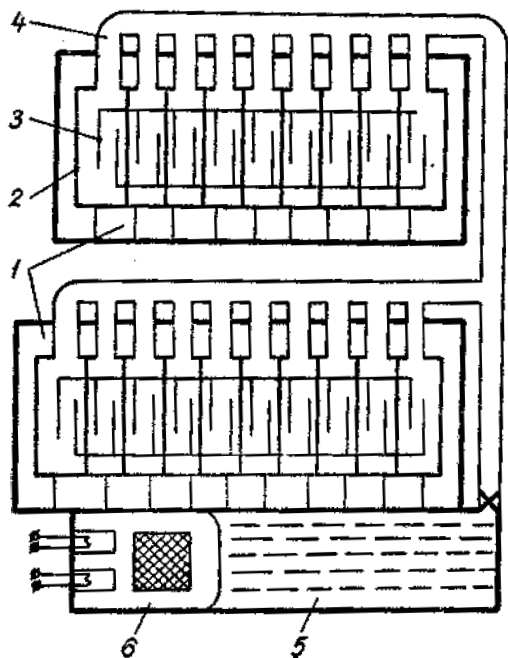


Рис. 6. Конструктивная схема ампульной батареи

них электродов. Пакет включает в себя чередующиеся между собой положительные и отрицательные электроды. Система распределения 4 служит для соединения блоков элементов с сосудом 5.

Пиротехнический вытеснитель жидкости 6 состоит из электровоспламенителей и пиротехнической шашки.

В состоянии готовности батарея приводится передавливанием электролита из сосуда в блоки элементов. От подачи импульса тока на нити накаливания электровоспламенители срабатывают и воспламеняют пиротехническую шашку. Образующиеся при горении шашки газы прожигают металлическую диафрагму и направляются в сосуд с электролитом. Под действием давления газа электролит поступает в секции блоков элементов. При химическом взаимодействии электродов с электролитом вырабатывается электрическая энергия.

В батареях серебряно-цинковой электрохимической системы положительным электродом является серебро, отрицательным — цинк. Это батареи одноампульной конструкции, они обычно работают с пиротехническим вытеснителем жидкости.

Батареи свинцово-кремнефтористо-водородной системы имеют многоампульную конструкцию. Положительным электродом в них является окись свинца, отрицательным — металлический свинец. По устройству и принципам действия эти батареи аналогичны батареям серебряно-цинковой системы. Приведение в действие батарей свинцово-кремнефтористо-водородной системы происходит путем подачи сжатого воздуха под давлением 9—12 атм.

В общем случае масса ампульной батареи зависит от многих параметров, в том числе от ее емкости, допустимых механических перегрузок, температурного диапазона работы, рабочего перепада напряжений, наличия или отсутствия обогрева и времени выхода на режим.

Ампульные батареи, применяемые в авиационной и ракетной технике, имеют следующие значения параметров: напряжение 27—36 В, температурный диапазон применения от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Большинство батарей для обеспечения работы в заданном диапазоне температур требует электрического обогрева.

Постоянство указанных параметров позволяет считать, что масса ампульной батареи зависит достаточно для практики точно только от ее емкости.

При условии практически постоянного напряжения емкость однозначно определяет величину запасенной в батарее энергии.

Обработка имеющихся данных [3] методом наименьших квадратов позволила получить эмпирическую зависимость массы батареи от величины заключенной в ней электрической энергии:

$$G_{AB} = k_{AB} A^n + G_{ABconst},$$

где  $k_{AB}$  — коэффициент пропорциональности;  $A$  — величина запасенной энергии;  $n$  — показатель степени;  $G_{ABconst}$  — постоянная составляющая массы конструктивных элементов ампульной батареи, обусловленная наличием таких элементов, как разъемы, проводка, крепеж, масса которых существенно не изменяется с ростом энергии до определенных пределов.

На рис. 7 показана зависимость массы ампульной батареи от величины запасенной в ней энергии, построенная при  $G_{ABconst} = 1,7$  и  $n = 2$ .

#### 4. Объединенный источник энергопитания (ОИЭП)

Известные описания различных автономных источников энергопитания [5] позволили разработать новую схему автономной системы управления с объединенным источником энергопитания (ОИЭП), состоящую из маломощного ХИТа, работающего в режиме малых и сверхмалых разрядных токов, зарядного устройства (ЗУ) и емкостного накопителя энергии (ЕНЭ).

На основании проведенных исследований было предложено изменить структуру источника энергопитания, включив в его состав накопитель энергии, и улучшить массогабаритные показатели всей автономной приводной системы. От традиционных химических источников тока накопитель отличает-

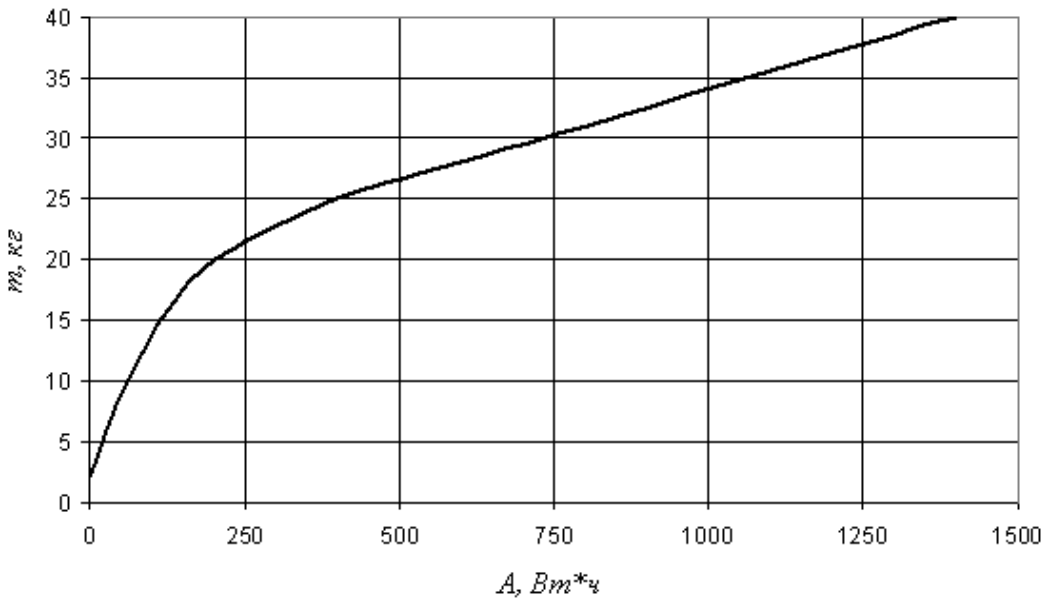


Рис. 7. Зависимость массы ампульной батареи от запасенной в ней энергии

ся существенно меньшим значением выходного (внутреннего) сопротивления, незначительным временем хранения накопленного энергозапаса, существенно меньшим значением полной запасенной энергии, меньшими удельными величинами плотностей энергии, приемлемыми массогабаритными показателями, существенно меньшими по сравнению с химическими источниками тока (ХИТ), и значительно меньшей зависимостью выходных параметров от температурно-влажностных характеристик окружающей среды.

Технические характеристики ОИЭП приведены в таблице.

ЕНЭ в комбинации с маломощным ХИТ необходим как для покрытия пиковых значений тока потребителя, так и для повышения устойчивости и надежности источника энергопитания. Существенным недостатком систем с одним накопителем, подключенным параллельно источнику питания, является тот факт, что ЕНЭ участвует только в кратковременных режимах выравнивания пиковых зна-

чений тока потребителя, а все остальное время энергопитание осуществляется от ХИТ. Поэтому необходим постоянный подзаряд накопителя при отключенном потребителе (приемлем лишь для повторно-кратковременных режимов работы потребителя) или параллельное соединение группы ЕНЭ с программным управлением процессов заряда-разряда [6].

С появлением микропроцессорных устройств, ориентированных на выполнение сколь угодно сложных алгоритмических задач, стало возможным построение источника питания, объединяющего химический источник тока, группу емкостных накопителей энергии и программный блок управления зарядно-разрядными процессами в единое целое, получившего название объединенный источник энергопитания (ОИЭП). Применение ОИЭП в системе энергопитания автономной приводной системы управления позволяет избавиться от многих недостатков, присущих схемам с энергопи-

#### Технические характеристики ОИЭП

Номинальное напряжение заряда, В	27
Максимальное напряжение заряда, В	30
Электрическая емкость, Ф	5
Максимальный ток разряда, А	240
Номинальный ток разряда, А	60
Внутреннее сопротивление при 1 kHz, Ом	0.0051
Диапазон рабочих температур, °C	-40...+60
Время работы в последовательно-кратковременном режиме, с	600
Максимальная масса совместно с источником тока F 20/7 НІСТ -E2 не более, кг	25.8

танием от ХИТ, используемым в настоящее время в автономных приводных установках.

Предложенная схема ОИЭП [7], решающая комплексные проблемы энергопитания автономных систем приводов, связанные с расходом энергозапаса и с возникновением режимов «просадки» в моменты пиковых значений тока потребителя, изображена на рис. 8.

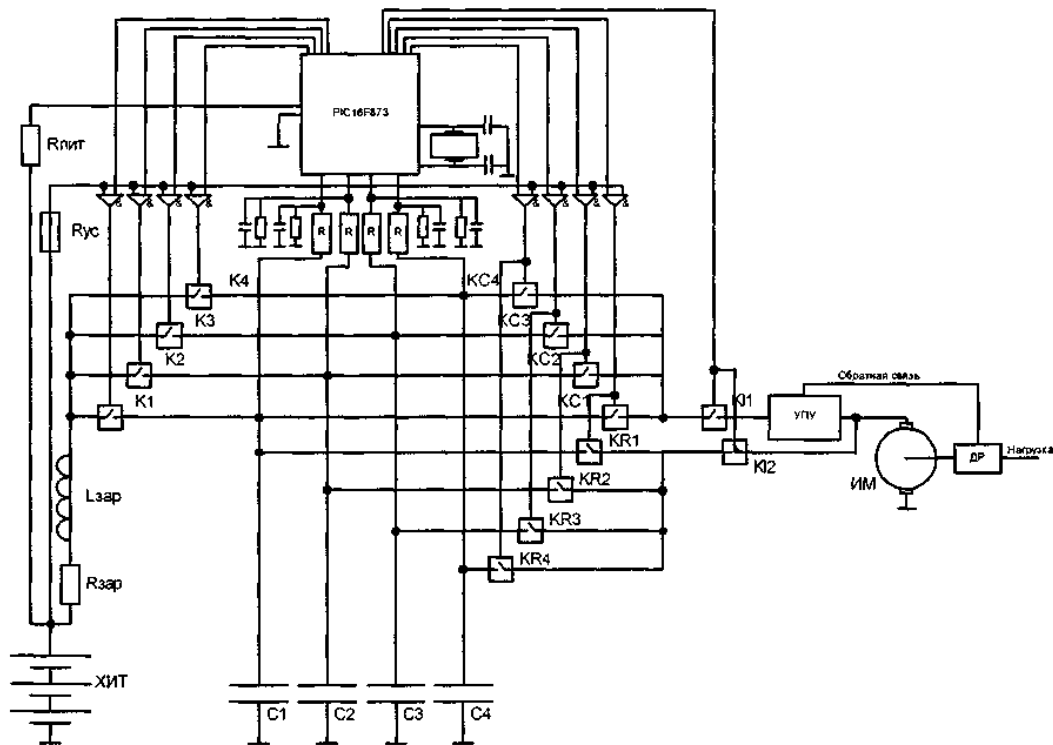


Рис. 8. Схема ОИЭП

Для обеспечения непрерывной работы следящего привода с минимальными уровнями пульсаций тока и напряжения в якоре исполнительного двигателя и уровня пульсаций скоростей вращения выходного вала в моменты коммутации зарядно-разрядных ключевых элементов с приемлемыми характеристиками работы в статических и динамических режимах необходимо сформировать алгоритм коммутации ключевых элементов и разработать методику синтеза управляющих логических функций для реализации выбранного алгоритма.

Коммутация ключевых элементов в алгоритме происходит при достижении порогового значения напряжения на рабочем ЕНЭ или при приходе переднего фронта управляющего сигнала. Работа алгоритма проиллюстрирована на рис. 9 [5].

Результаты расчета оптимальной структуры и состава ОИЭП позволили провести натурные испытания источника питания, в ходе которых была получена экспериментальная зависимость энерго-

емкости ОИЭП от его массовых характеристик [1]. Вид зависимости представлен на рис. 10.

На основании рассмотренных в данной статье материалов можно провести сравнение первичных источников энергии автономных приводов по энерго-массовым характеристикам. Результаты сравнительного анализа в виде графических зависимостей представлены на рис. 11.

На рис. 11 использованы следующие сокращения: ОИЭП — объединенный источник энергопитания, ПБ — пневматический баллон, ТТГГ — твердотопливный газогенератор, ХИТ — химический источник тока.

Зависимости массы первичных источников энергии от величины запасенной в них энергии показывают, что в области значений энергии от 0 до 1500 Вт · ч объединенный источник энергопитания (ОИЭП) имеет минимальную массу. Так, для энергии 250 Вт · ч масса ОИЭП в 7 раз меньше массы ХИТ типа ампульная батарея и в 9—10 раз меньше массы пневматического баллона. По сравнению с газогенератором ОИЭП легче на 1—2 кг.

При энергии свыше 500 Вт · ч применение баллонов со сжатым газом существенно увеличивает массу автономного привода по сравнению с массой других источников энергии.

Приблизенность приведенных оценок и близость некоторых величин (например, таких, как



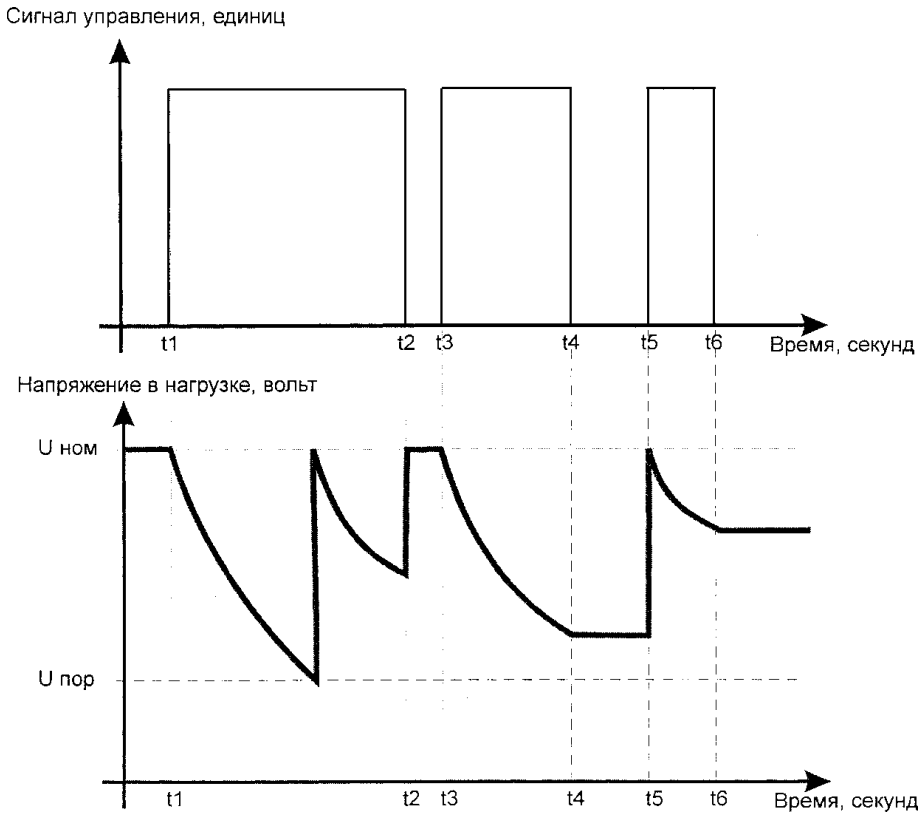


Рис. 9. Алгоритм работы ОИЭП

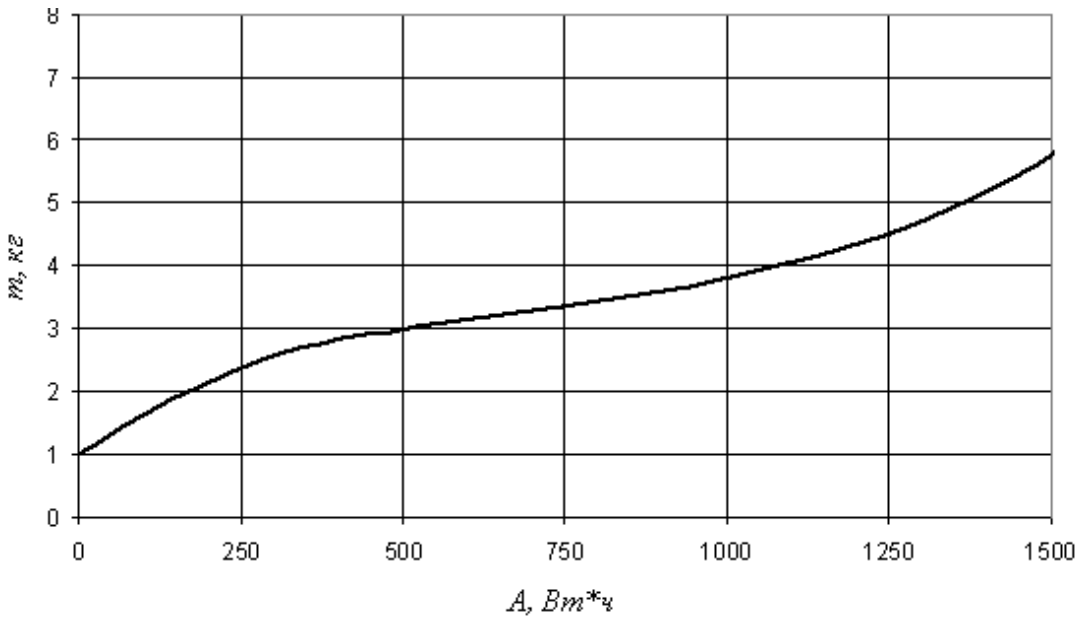


Рис. 10. Зависимость энергоемкости ОИЭП от его массы

массы ОИЭП и ТТГГ) указывают также на необходимость тщательного анализа схем при проектировании автономных приводов с ограничением по массогабаритным и энергетическим показателям.

**Выводы**

Представленные энергомассовые зависимости могут быть рекомендованы для определения мас-

сы и энергозапаса различных первичных источников питания и их сравнительного анализа на этапах аванпроекта и эскизного проектирования автономных приводов систем управления мобильными объектами.

**Summary**

A comparative analysis basing on integrated approach is carried out for various classes of primary

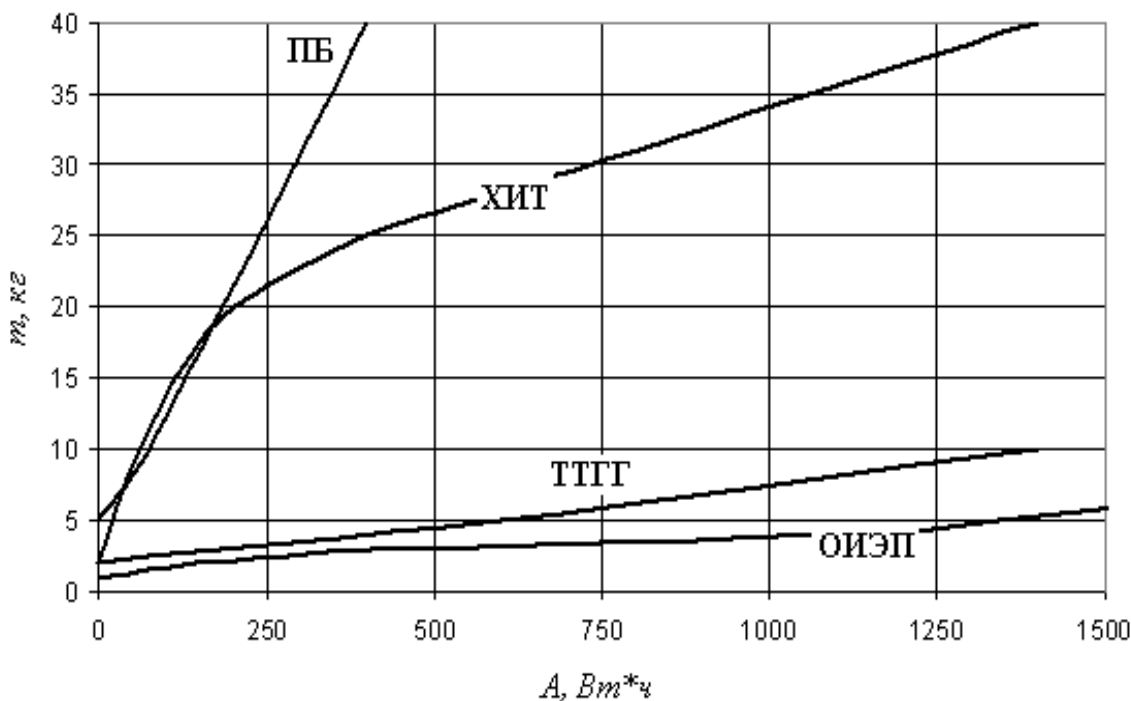


Рис. 11. Зависимости энергоемкости первичных источников питания от их массовых характеристик

power supplies intended for autonomous tracking actuators. These actuators are needed to solve control problems related to mobile objects. Recommendations are suggested to design the primary power supplies.

#### Библиографический список

1. *Герашенко А.Н., Толмачев В.И., Лалабеков В.И.* Проектирование энергоэффективных систем приводов управления автономными объектами: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2004.
2. *Чащин В.А., Камладзе О.Г., Кондратьев А.Б.* и др. Пневмопривод систем управления летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1987.
3. *Гладков И.М., Боровский Э.В.* Весовой анализ приводов органов управления баллистических ракет. — М.: Машиностроение, 1972.
4. *Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю.* Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Машиностроение, 1979.

5. *Герашенко А.Н., Журавлева В.Н., Серебряный Д.Э., Толмачев В.И.* Теория систем с ограниченным энергоресурсом применительно к автономным энергоприводным системам: Технический отчет по теме №ГР-6/64190-07020 / МАИ. М., 1994.

6. *Герашенко А.Н.* Теория систем с накопителем энергии и ее применение в системах управления парашютами: Технический отчет по теме №ГР — 3 — 96 / МАИ. М., 1996.

7. *Герашенко А.Н.* Обоснование применения накопителя энергии в качестве источника энергообеспечения в автономном электроприводе // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. МАИ / МАИ. М., 1999. С. 151—154.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 12.10.2007