

А.Я Рыбалко, канд. техн. наук, С.В. Дыбрин
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

КРИТЕРИИ СОПОСТАВЛЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Введение

Значительное место в решении возникающих задач энергосбережения, обеспечения качества, эффективного преобразования энергии и определения наиболее рациональных режимов энергопитания потребителей отводится накопителям энергии.

Развитие науки и техники обусловило появление большого количества типов накопителей энергии, отличающихся характером протекания физических, химических и других процессов, принципом действия, конструктивным исполнением, технологией изготовления и многим другим.

Анализ публикаций

В публикации [1] авторами рассматриваются различные типы накопителей. Работа [2] посвящена проблеме баланса мощности между производителями и потребителями электроэнергии в энергосистемах и возможностям применения накопителей энергии в решении этой проблемы. В публикации [3] обосновывается применение накопителей энергии в системах электроснабжения пригородного железнодорожного транспорта. Источники [4, 5] посвящены химическим аккумуляторам энергии.

Накопители энергии рассмотрены в конкретных предметных областях использования, но нет их сопоставления, альтернативности выбора.

Цель исследования

При большом разнообразии типов накопителей, наряду с возрастающим объемом их применения в различных сферах, возникает задача выбора того или иного типа накопителя, для чего и необходимо обозначить критерии их сопоставления.

Результаты исследования

Энергетические показатели

1. *Техническая оптимальная энергоемкость накопителя* (предполагаемая или выявленная на основе опыта эксплуатации) характеризует такой оптимальный объем энергии, сообщаемый накопителю при эксплуатации, при котором затраты (потери энергии при заряде и разряде) будут минимальными. По вели-

чине это будет какое-то промежуточное значение между максимальной и минимальной энергоемкостью. При выборе накопителя это один из основных показателей.

2. *Максимальная и минимальная энергоемкость.* Эти значения параметра определяются многими факторами: типом накопителя, его конструктивными особенностями, применяемыми при изготовлении материалами, условиями эксплуатации и др. Для максимальной энергоемкости в инерционных накопителях в качестве ограничения выступает прочность материала, из которого изготавливается маховик, в емкостных – качество диэлектрика, в аккумуляторах – плотность электролита. Минимальная энергоемкость, в основном, ограничивается потерями энергии в самом накопителе или, опять же, типовыми особенностями: трением, параметрами электролита (для аккумулятора, например, весьма нежелателен глубокий разряд, который может резко сократить его ресурсы). При выборе накопителя решающее значение имеет максимальная энергоемкость, так как передача накопителю большей энергии приведет или к его порче, или к потере энергии.

3. *Удельная запасаемая энергия или плотность энергии* (отношение энергии элемента к его массе или объему, выраженное в ватт-часах или Дж на единицу массы или объема) связывает технически оптимальную энергоемкость накопителя и его размеры, что напрямую влияет на возможности монтажа в конкретных условиях. Характерные значения данного параметра некоторых видов накопителей представлены в таблице.

Характерные показатели накопителей энергии [1]

Накопитель		Удельная энергия (Дж/г)	Время вывода энергии (с)
Со статической активной зоной	Химический	$10^2 \dots 10^3$	$1 \dots 10^5$
	Индуктивный	$1 \dots 10$	$10^3 \dots 10$
	Емкостный	$0,1 \dots 0,5$	$10^{-6} \dots 10^{-2}$
С динамической активной зоной	Механический	$10 \dots 10^3$	$1 \dots 10^3$
	Электромеханический	$1 \dots 10$	$10^{-2} \dots 10$
	Электродинамический	$0,05 \dots 1$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$

4. *Максимальная и минимальная отдаваемая и потребляемая мощности.* Накопитель должен «успевать» накапливать передаваемую ему энергию и отдавать ее со скоростью, необходимой потребителю. Кроме того, эти параметры являются очень важными при выборе накопителя в качестве трансформатора мощности. Накопитель должен «уметь» накапливать энергию, передаваемую малой мощностью, и отдавать ее большой мощностью. Или наоборот – быстро накапливать и медленно отдавать.

5. *Плотность мощности* – отношение мощности разряда элемента к его массе или объему.

Временные показатели

1. *Время хранения энергии* (время, в течение которого сохраняется энер-

гия, накопленная в накопителе). При выборе накопителя этот параметр играет значительную роль, если накопленную энергию предполагается хранить долго. Время хранения заряда может зависеть от различных внешних факторов, например, температуры, давления, и для каждого отдельного накопителя указывается вместе с потерями емкости за данный период.

2. *Время вывода энергии* зависит от типа накопителя и тесно связано с мощностью разряда. Характерные значения представлены в таблице.

3. *Наибольшее возможное время заряда с заданной мощностью.* Этот параметр также зависит от характеристик самого накопителя: максимальной энергоемкости и мощности заряда, и его можно записать так:

$$t_m = W_m / P_z, \quad (1)$$

где W_m - наибольшая энергоемкость накопителя; P_z - мощность заряда.

Здесь также следует говорить о максимально возможном целесообразном времени заряда. Использование накопителя становится неэффективным, если за время процесса зарядки какая-то значительная часть энергии будет потеряна вследствие несовершенства накопителя (саморазряд, трение), т.е. здесь существует связь со временем хранения энергии.

4. *Время реверса мощности* (время, в течение которого накопитель может быть переведен из режима выдачи энергии в режим накопления и наоборот (быстродействие)). Этот параметр важен в том случае, если по условиям эксплуатации накопителя не предусматривается этап хранения энергии или возможны случаи резкого перехода из одного режима в другой. Величина данного показателя – от долей секунды до минут (например, у ГАЭС).

5. *Время выхода на требуемый уровень разрядной мощности.* Вследствие наличия переходных процессов выход на необходимую мощность отдачи энергии в любом накопителе занимает определенное время. И это время может быть не всегда приемлемым в конкретном случае – или слишком большим, или слишком маленьким.

Технические показатели

1. *Коэффициент полезного действия.* Обычно приводится КПД полного зарядно-разрядного цикла работы накопителя – это отношение энергии, отдаваемой накопителем потребителю при разряде (до установленного предела), к энергии, передаваемой каким-либо источником этой энергии накопителю при заряде. Могут быть интересны и такие показатели, как КПД заряда, КПД хранения и КПД разряда. При выборе накопителя этот (эти) критерий является определяющим, так как от него зависит величина общего эффекта от установки накопителя.

2. *Коэффициент линейности* – степень пропорциональности между изменением величины нагрузки и связанным с этим изменением времени работы нагрузки от накопителя. Например, если при увеличении нагрузки в два раза вре-

мя автономной работы уменьшается также в два раза, то коэффициент равен 1. В действительности этот показатель превышает 1, причем, чем он больше, тем это хуже характеризует энергетические возможности накопителя. Этот коэффициент является объективной величиной, зависящей от мощности, отдаваемой накопителем. Если значение коэффициента близко к 1 (не более 1,2...1,25), то это свидетельствует об оптимальном выборе. Данный показатель можно представить как:

$$K = t_{50} \cdot P_{50} / t_{100} \cdot P_{100} \quad (2)$$

где P_{50} , P_{100} - мощность нагрузки соответственно при 50 и 100 % от номинальной; t_{50} , t_{100} - время вывода энергии накопителем до полного разряда при нагрузке в 50 и 100 % соответственно.

Достоверную информацию о времени автономной работы на конкретную нагрузку можно получить опытным путем.

3. *Характеристики заряда и разряда* – это кривые зависимости характерного параметра накопителя (тока, напряжения, крутящего момента и т.д.) от времени заряда или разряда. Пример таких кривых для натрий-сернокислой батареи [4] и свинцового аккумулятора [5] приведен на рисунке 1. Эти зависимости являются важными, например, при определении оптимального режима заряда накопителя.

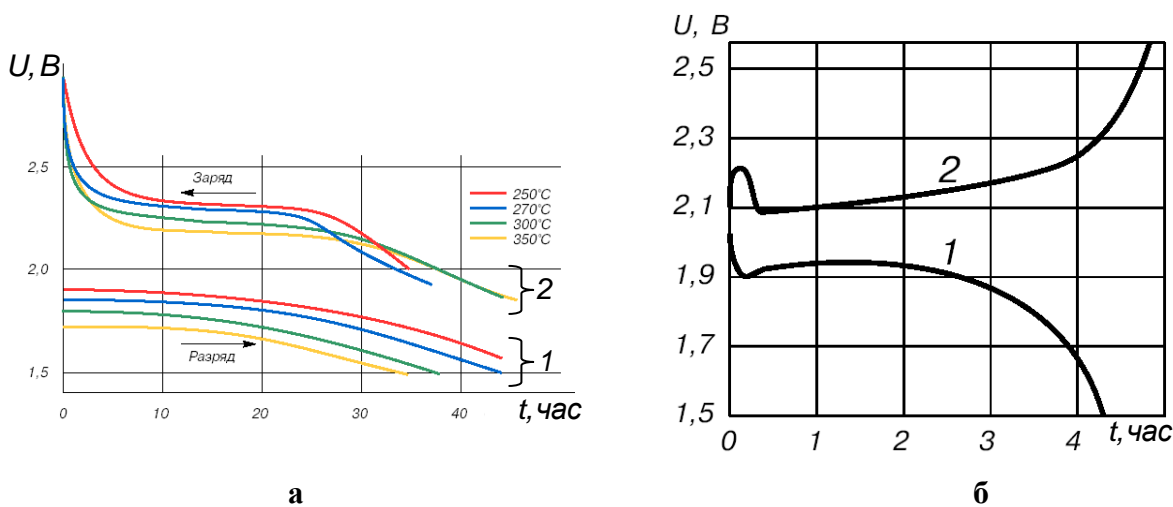


Рис.1 Кривые зависимости напряжений разряда (1) и заряда (2) натрий-сернокислой батареи (а) и свинцового аккумулятора (б) от времени

4. *Стабильность* – однородность определяющего параметра накопителя, например, напряжения или крутящего момента, при котором он отдаёт энергию в течение полного режима разряда. Этот параметр характеризует однородность характеристики разряда – чем она будет однороднее, тем лучше. Для повышения однородности могут применяться дополнительные устройства.

5. *Количество циклов заряда-разряда* – наработка за срок службы (циклический срок службы). Режим работы накопителя циклический (заряд – разряд), поэтому этот параметр является одним из основных. Нарботка за срок службы напрямую связана со сроком эксплуатации накопителя. Так, например, в системе тягового электроснабжения в пригородной сети железной дороги может

быть не менее 200 циклов заряда-разряда в сутки. Если принять срок эксплуатации накопителя равным 20 годам, он должен выдерживать 10^7 циклов без снижения мощности [3].

Эксплуатационные показатели

1. *Срок службы накопителя.* Если принять во внимание предыдущий показатель (циклический срок службы), становится ясным, что данный критерий зависит от интенсивности использования накопителя и всех тех причин, которые влияют на циклический срок службы. Здесь следует учитывать «старение» при хранении, которое также влияет на срок службы.

2. *Массогабаритные показатели.* К ним можно отнести массу, объем, линейные размеры. Эти показатели могут играть важную роль в отдельных случаях применения накопителя. Если накопитель предполагается использовать на движущихся объектах, то необходимо тщательно продумать, какой объем или вес он должен иметь. Стационарные объекты менее критичны к габаритам накопителя, однако и в этом случае их необходимо рассматривать и согласовывать.

3. *Требования к условиям эксплуатации.* Любое устройство проектируется с учетом возможных (или заданных) условий эксплуатации. При выборе накопителя необходимо убедиться, что он будет работать в данных условиях с установленными эффективностью и параметрами. Поэтому для данных конкретных условий может потребоваться какое-то специальное конструкционное решение относительно выбранного типа накопителя. К таким требованиям можно, например, отнести допустимость пределов рабочих температур, виброустойчивость и т.д.

4. *Надежность.* Этому параметру при выборе следует уделять особое внимание, так как от него зависит экономическая целесообразность применения данного накопителя энергии, который должен функционировать и в нестандартных ситуациях (например, при резких скачках напряжения, превышениях предельной мощности, землетрясениях и пр.).

5. *Регулируемость.* Необходимо, чтобы имелась возможность регулирования, подстройки параметров накопителя (например, отдаваемой мощности).

Экономические показатели

1. *Капитальные затраты.* Капитальные вложения определяются суммой единовременных затрат. В состав капитальных вложений входят: стоимость накопителя и его элементов; стоимость транспортировки к месту эксплуатации, а также стоимость монтажных работ; стоимость пуско-наладочных работ и прочие единовременные затраты. Это один из основных критериев выбора.

2. *Удельные капиталовложения на единицу энергоемкости* (стоимость единицы энергоемкости). Этот критерий является более удобным для сравнения различных накопителей, поскольку совмещает в себе два показателя: капиталовложения и энергоемкость, и представляет собой отношение капитальных за-

трат к технически оптимальной энергоемкости.

3. *Эксплуатационные затраты.* Этот показатель также является достаточно важным, так как с его помощью можно оценить экономическую эффективность проекта по применению накопителя. Выигрыш в экономии энергии в денежном эквиваленте должен быть больше затрат на эксплуатацию накопителя. Сюда могут входить затраты на смазочные материалы, запасные части, охлаждение, а также заработная плата обслуживающего персонала и отчисления от нее.

4. *Условная стоимость электроэнергии при работе в автономном режиме.* Эту величину целесообразно использовать для сравнительной оценки и анализа энергетической эффективности различных накопителей (при их автономной работе). Вычисляется она (без учета эксплуатационных затрат) по формуле:

$$A = K/P_t, \quad (3)$$

где K – капитальные затраты на приобретение накопителя; P – мощность нагрузки; t – время работы установки от накопителя до его полного разряда (при данной нагрузке).

Для каждого отдельного типа накопителя можно дополнительно выделить и другие специфические критерии.

Выводы

Рассмотрены критерии сопоставления различных типов накопителей энергии. Проанализировав их, можно утверждать, что выбор накопителя очень важный и ответственный процесс, а правильная оценка и обоснование по тому или иному критерию – залог успеха внедрения энергосберегающего устройства.

Приведенное обобщение показателей и характеристик (как критериев сопоставления) накопителей энергии рекомендуется к использованию для обоснования практических решений в электромеханической системе транспортных установок.

Список литературы

1. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. и др. Накопители энергии: Учеб.пособие для вузов ; Под ред. Бута Д.А.. — М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
2. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. Вузов – М.: Высш. шк., 1989. — 159 с.
3. F.Moninger. Elektrische Bahnen, 1998, N 8, S. 257-260. (Железные дороги мира 12-2000)
4. Д-р Дитрих Берндт. Конструкторский уровень и технические границы применения герметичных батарей. Сравнение герметичных и герметизированных батарей. Доклад: Информационные дни в Эрланге. Электрохимические накопители энергии 15.03.1998 г.
5. В.С. Лаврус. Батарейки и аккумуляторы. Электронная версия: НиТ. Аналитический центр, 1995