

ГЛАВА 2

ПЕРВИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Составитель:
к.т.н., доцент кафедры РЛ1
Родин М.В.

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

2.1 Введение	3
2.2 Химические источники тока	4
2.2.1 Общие сведения.....	–
2.2.2 Первичные химические источники тока	15
2.2.3 Вторичные химические источники тока	32
2.2.4 Эксплуатация химических источников тока.....	58
2.2.5 Области применения химических источников тока	61
2.3 Альтернативные источники тока	78
2.3.1 Общие замечания	–
2.3.2 Термобатареи.....	79
2.3.3 Фотоэлектрические источники тока.....	83
2.3.4 Топливные источники тока.....	87
2.3.5 Биохимические источники тока	97
2.3.6 Атомные источники тока	98
2.4 Электромашинные генераторы	103
2.4.1 Общие сведения.....	–
2.4.2 Трёхфазные системы электроснабжения	108
2.4.3 Расчёт мощности в трёхфазных системах электроснабжения	123
2.4.4 Измерение мощности в трёхфазных системах электроснабжения	126
Контрольные вопросы и задачи	128
Список литературы	129

2.1 Введение

Электроэнергия играет важную роль в жизни современного человека, сопровождая его повсюду. Мобильные телефоны, радиоприёмники, телевизоры, компьютеры – все эти и многие другие привычные каждому радиоэлектронные средства (РЭС), облегчающие нашу жизнь, не способны функционировать без электрической энергии. При этом количество радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), окружающей нас, не становится меньше, оно постоянно увеличивается из года в год.

Делая свою жизнь комфортней, человек всё более становится зависимым от электроснабжения. Именно поэтому в науке и технике так велик интерес к источникам электроэнергии, в том числе новым, обещающим длительной автономной работы РЭА.

Ранее мы разделили источники электроэнергии на первичные и вторичные. К *первичным источникам электроэнергии* мы отнесли источники, преобразующие неэлектрическую энергию (химическую, тепловую, механическую, световую и т. д.) в электрическую. Среди них:

- химические источники тока;
- термоэлектронные генераторы и преобразователи;
- фотоэлектрические источники тока;
- топливные элементы;
- биохимические источники тока;
- атомные элементы;
- электромашинные генераторы.

Все первичные источники электроэнергии, за исключением химических и электромашинных генераторов, будем называть *альтернативными источниками электроэнергии*.

Однако несмотря на то, что непосредственное использование первичных источников электроэнергии ограничено (невысокая стабильность, отсутствие

регулировки выходного напряжения и т. д.), тем не менее, они обеспечивают электрической энергией современный мир. Их широко используют в портативной электронной аппаратуре (мобильные телефоны, калькуляторы, радиоприёмники, ноутбуки, слуховые аппараты, электроинструмент и т. д.), стационарной (базовые станции мобильной связи, радио- и телевещательное оборудование и т. д.), а также в ряде других приложений (электромобили, автомобили, железнодорожный транспорт, воздушный транспорт, радиолокационные системы и т. д.).

Далее рассмотрим первичные источники электроэнергии более подробно.

2.2 Химические источники тока

2.2.1 Общие сведения

Жизнь современного общества невозможно представить без использования *химических источников тока* (ХИТ). Они незаменимы на транспорте, в промышленности, в военной и специальной технике, а также в других сферах народного хозяйства страны.

ХИТ – это устройство, в котором химическая энергия непосредственно превращается в электрическую энергию. Устройство для этого преобразования также называют "*гальваническим элементом*".

ХИТ широко используют для автономного электропитания РЭА. Также их применяют как вспомогательные и (или) резервные источники электроэнергии. Выходное напряжение ХИТ практически не содержит переменной составляющей (пульсаций). Поэтому ХИТ часто используют в РЭА, критичной к качеству напряжения электропитания.

Основой работы ХИТ является химическая реакция взаимодействия *окислителя* и *восстановителя*. В процессе взаимодействия окислитель, восстанавливаясь, присоединяет электроны, а восстановитель, окисляясь, отдаёт электроны. Чтобы энергия этой реакции не выделялась в виде тепла, а превращалась

исключительно в электрическую энергию, процессы окисления и восстановления должны быть пространственно разделены. Таким образом, ХИТ представляет собой электрохимическую систему.

Отметим, что электрохимическим методом можно также обратное преобразовать электрическую энергию в химическую и таким образом накапливать (аккумулировать) электрическую энергию в химической форме.

Простейшая электрохимическая система состоит из двух электродов, разделённых проводником второго рода, т.е. ионным проводником, или *электролитом*. Электролит необходим для предотвращения непосредственного перехода электронов от восстановителя к окислителю. Структура такой системы имеет вид, представленный на рисунке 2.1.

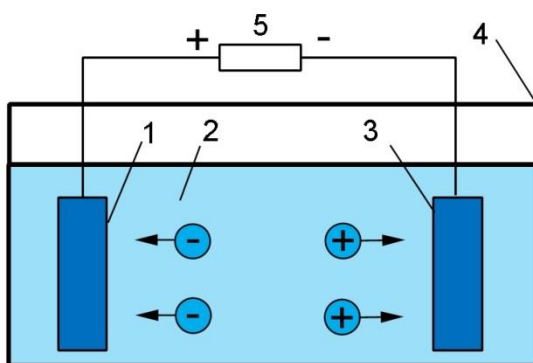


Рисунок 2.1 – Структура гальванической электрохимической системы

1 – катод (окислитель); 2 – электролит (ионный проводник); 3 – анод (восстановитель);
4 – корпус; 5 – внешняя омическая нагрузка

Электродом называют проводник первого рода, находящийся в контакте с ионным проводником. На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый *электродным потенциалом*. Электрод, на котором протекает окисление (отдача электронов) восстановителя, называют *анодом*, электрод, на котором протекает восстановление (приём электронов) окислителя – *катодом*.

ХИТ принято делить на две группы:

- гальванические элементы и батареи;
- аккумуляторы (от латинского "accumulator", что означает "собиратель"; в электротехнике так называют устройства, накапливающие электрическую энергию с целью её дальнейшего применения).

Элементы первой группы также называют *первичными* ХИТ, а элементы второй – *вторичными*.

Первичные ХИТ – одноразовые, содержат активные вещества в электродах, а после полного расходования активных веществ становятся неработоспособными и требуют замены новыми. Процесс генерации энергии в ХИТ называют *разрядом*. Как правило, ХИТ работают в режиме непрерывного или прерывистого разряда. ХИТ, состоящий из одной ячейки, называют гальваническим элементом. Если ХИТ состоит из двух и более элементов, то он называется *гальванической батареей*.

Вторичные ХИТ после разряда, т.е. после израсходования активных масс могут быть приведены в рабочее состояние пропусканием электрического тока через элемент в обратном направлении.

Первичные ХИТ, по сравнению с аккумуляторами, обладают бóльшей удельной электрической ёмкостью и имеют мёньшую стоимость. Основным же преимуществом аккумуляторов является возможность их многократного использования и вследствие этого значительно мёньшая стоимость единицы получаемой электроэнергии.

Так как в ХИТ имеет место непосредственное превращение химической энергии в электрическую (без тепловой стадии), то коэффициент полезного действия (КПД) ХИТ обычно высок – и может достигать 90-95%.

Рассмотрим далее основные характеристики первичных и вторичных ХИТ.

Термодинамика электрохимических элементов позволяет определить их *электродвижущую силу* E (ЭДС). ЭДС – это теоретическая разность потен-

циалов между положительным и отрицательным электродами в отсутствие тока, т.е. когда элемент разомкнут. ЭДС равна разности равновесных электродных потенциалов двух электродов.

Реальная разность потенциалов электродов разомкнутого элемента, называемая *напряжением разомкнутой цепи*, может быть равна ЭДС, а может отличаться. Отличие обусловлено тем, что на электродах не устанавливаются равновесные потенциалы из-за протекания других (побочных) реакций, кроме основной реакции, для которой был проведён термодинамический расчёт. Побочные реакции обычно вредны, т.к. вызывают дополнительный расход реагентов и снижают напряжение элемента.

При замыкании гальванического элемента (или аккумулятора) на внешнюю нагрузку $R_{\text{внеш}}$ образуется электрическая цепь (рисунок 2.2). При этом напряжение на нагрузке $U_{\text{разр}}$ (*разрядное напряжение*) определяется как

$$U_{\text{разр}} = E - \Delta\varepsilon - Ir_{\text{внутр}}, \quad (2.1)$$

где $\Delta\varepsilon$ – поляризация электродов при разряде; I – ток разряда; $r_{\text{внутр}}$ – внутреннее сопротивление элемента, представляющее собой сумму активных сопротивлений электродов, сепараторов, ионных проводников и других токоведущих элементов. Таким образом, разрядное напряжение ХИТ всегда меньше, чем его ЭДС.

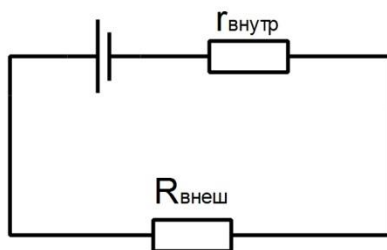


Рисунок 2.2 – Подключение гальванического элемента (аккумулятора) к нагрузке

Поляризация элемента $\Delta\varepsilon$ может состоять в общем случае из электрохимической, химической и концентрационной составляющих. Электрохимическая

поляризация обусловлена замедленностью собственно электрохимической реакции. Концентрационная поляризация вызывается замедленностью стадий подвода реагентов к электродам и отвода продуктов реакции. Химическая поляризация возникает, если электродный процесс сложный и включает химические стадии. Общий путь снижения всех составляющих поляризации и повышения таким образом напряжения ХИТ – увеличение удельной поверхности электродов, увеличение температуры и концентрации реагентов, применение каталитически активных электродов.

Графическое изображение зависимости напряжения ХИТ от силы тока называется *вольтамперной характеристикой* (ВАХ). Кривая ВАХ обычно имеет три участка: I и III – участки резкого изменения напряжения, II – участок примерно линейного изменения напряжения (рисунок 2.3). Аналитические формулы, описывающие ВАХ, весьма сложны и здесь приводиться не будут.

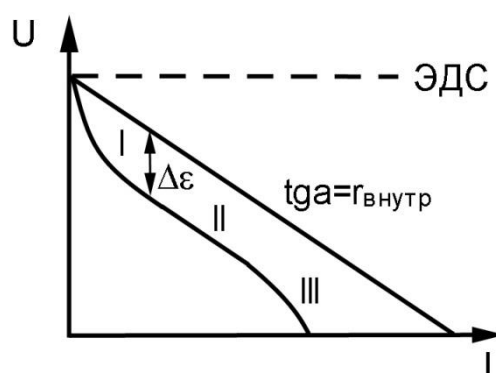


Рисунок 2.3 – Типичная ВАХ ХИТ (схематично)

В процессе работы ХИТ, т.е. в процессе его разряда, возрастает поляризация элемента и снижается, как правило, ЭДС из-за уменьшения концентрации исходных веществ и увеличения концентрации продуктов реакции. Обычно также растёт и внутреннее сопротивление. По этим причинам наблюдается неуклонное падение напряжения ХИТ во времени по мере разряда. Это наиболее типичное поведение, хотя бывают и исключения: начальный этап разряда

может сопровождаться ростом напряжения ХИТ в основном из-за перераспределения составляющих поляризации и/или нагрева. Кривая изменения напряжения во времени называется *разрядной кривой*.

Разрядные кривые имеют разнообразный вид. Их характерные формы показаны на рисунке 2.4, в том числе I – плоская, II – пологая, III – линейная разрядная характеристики. Идеальная разрядная характеристика имеет форму прямоугольника, т.е. весь разряд происходит строго при одном постоянном напряжении (*рабочем напряжении*), и резко заканчивается при 100%-ном исчерпании активных веществ в электродах. Рабочее напряжение всегда меньше ЭДС и может быть неопределённым (когда разрядная характеристика близка к линейной).

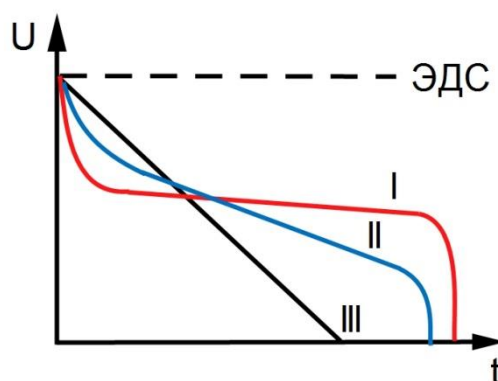


Рисунок 2.4 – Типичные формы разрядной характеристики ХИТ (схематично)

Конечным разрядным напряжением называют напряжение, при достижении которого разряд следует прекратить. Продолжение разряда приведёт к резкому снижению напряжения из-за практически полного исчерпания активных масс. Кроме того, разряд ниже конечного разрядного напряжения может привести к необратимой деградации ХИТ.

Также для характеристики конкретных типов ХИТ используют следующие параметры (обычно их не включают в технические условия): мощность P ,

удельная мощность $P_{уд}$, ёмкость Q , удельная ёмкость $Q_{уд}$, энергия W и удельная энергия $W_{уд}$.

Мощность равна произведению силы тока на напряжение и измеряется в ваттах.

Удельную мощность определяют как

$$P_{уд} = \frac{UI}{m} \text{ [Вт/кг]} \text{ или } P_{уд} = \frac{UI}{V} \text{ [Вт/л]}, \quad (2.2)$$

где m – масса ХИТ; V – объём ХИТ.

Ёмкость ХИТ – наиболее широко используемая характеристика. Ёмкостью называют количество электричества (заряд), которое ХИТ способен выработать при разряде. Теоретическая ёмкость определяется по закону Фарадея

$$Q_{теор} = \frac{nFm}{M} \text{ [Кл]} \text{ или } [A \cdot ч], \quad (2.3)$$

где F – постоянная Фарадея (26,8 А·ч/моль); n – стехиометрическое число электронов, принимающих участие в электрохимическом превращении; M – масса моля вещества.

Для измерения емкости обычно применяют внесистемные единицы. Так, ёмкость измеряют в ампер-часах: $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 1 \text{ А} \cdot 3600 \text{ сек} = 3600 \text{ Кл}$.

Фактическая ёмкость равна теоретической или ниже из-за неполного использования активных веществ и расхода их на побочные процессы. Фактическая ёмкость $Q_{факт}$ может быть измерена путём полного разряда ХИТ постоянным током I в течение времени t и рассчитана как

$$Q_{факт} = It \text{ [А} \cdot \text{ч]}. \quad (2.4)$$

Удельную ёмкость измеряют в А·ч/г или в А·ч/л.

При разряде ХИТ на постоянную нагрузку (на постоянное внешнее сопротивление $R_{внеш}$) ток непрерывно меняется во времени. В этом случае ёмкость (заряд) определяется интегрированием произведения $I \cdot t$ и представляет собой площадь под разрядной кривой

$$Q = \int_0^t Idt = \frac{1}{R_{\text{внеш}}} \int_0^t Udt = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{внеш}}} t \quad [\text{Кл}] \text{ или } [\text{А} \cdot \text{ч}], \quad (2.5)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее разрядное напряжение, определяемое усреднением всех точек разрядной кривой. Обычно на гальваническом элементе или аккумуляторе указывается его рабочее напряжение (иногда также ёмкость).

Энергия W , которую вырабатывает ХИТ (т.е. энергия, которую он передаёт во внешнюю нагрузку $R_{\text{внеш}}$), равна произведению ёмкости на напряжение. Если бы электрохимические реакции в ХИТ протекали термодинамически обратимо, то теоретическая энергия была бы точно равна полезной работе ΔG . Фактически количество вырабатываемой энергии, конечно, меньше ΔG . Энергия определяется площадью под разрядной кривой. При разряде постоянным током I

$$W = I \int_0^t Udt \approx U_{\text{ср}} It = U_{\text{ср}} Q \quad [\text{Дж}] \text{ или } [\text{Вт} \cdot \text{ч}]. \quad (2.6)$$

При разряде на постоянную внешнюю нагрузку $R_{\text{внеш}}$ ток непрерывно меняется во времени. Преобразуем (2.6), используя закон Ома, как

$$W = \int_0^t IUdt = \frac{1}{R_{\text{внеш}}} \int_0^t U^2 dt \approx \frac{U_{\text{ср}}^2 t}{R_{\text{внеш}}} \approx U_{\text{ср}} Q \quad [\text{Дж}] \text{ или } [\text{Вт} \cdot \text{ч}]. \quad (2.7)$$

Для измерения энергии обычно применяют внесистемные единицы: $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ сек} = 3600 \text{ Дж}$.

Необходимо чётко понимать, что напряжение и ЭДС – всё, что измеряется в вольтах, – являются *интенсивными* характеристиками, зависящими от внутренних свойств веществ, от их природы, но не от их количества. Поэтому ХИТ одной и той же электрохимической системы будут иметь одно и то же напряжение, независимо от массы и геометрических размеров ХИТ. Напротив, P , W и Q – *экстенсивные* характеристики, пропорциональные количеству заложенных реагентов, следовательно, примерно пропорциональные массе или объёму ХИТ.

Для сравнения различных электрохимических систем используют *удельную ёмкость*

$$Q_{y\partial} = \frac{Q}{m} \text{ [А·ч/кг]} \text{ или } Q_{y\partial} = \frac{Q}{V} \text{ [А·ч/л]} \quad (2.8)$$

и *удельную энергию* (массовую или объемную).

$$W_{y\partial} = \frac{W}{m} \text{ [Вт·ч/кг]} \text{ или } W_{y\partial} = \frac{W}{V} \text{ [Вт·ч/л]}. \quad (2.9)$$

От последнего параметра зависят массогабаритные характеристики ИЭП и, соответственно, питаемой аппаратуры. По удельной энергии аккумуляторы заметно уступают первичным ХИТ. Последние имеют удельную энергию до 1200 Вт·ч/дм^3 (литий-тионилхлоридные ХИТ). В то же время удельная энергия аккумуляторов составляет от $30\text{-}50 \text{ Вт·ч/дм}^3$ (никель-железные и никель-кадмиевые) до 600 Вт·ч/дм^3 (литиевые и литий-ионные).

Разрядную кривую можно представить как зависимость напряжения U от времени разряда t , обязательно указывая ток разряда I , или в координатах U - Q . В этом случае кривая будет более универсальна, т.к. по идее одна и та же кривая должна получаться при разных токах. На самом деле вырабатываемая ёмкость тоже зависит от тока. Обычно чем ближе режим разряда к равновесному, чем меньше ток и чем длительнее разряд, тем выше ёмкость и особенно энергия.

Таким образом, по мере увеличения силы разрядного тока снижаются напряжение ХИТ и его фактическая ёмкость. Поэтому ёмкость, указанная в документах на ХИТ (или в маркировке на его корпусе), – это *номинальная ёмкость* C или C° (в А·ч), относящаяся к номинальному режиму разряда, то есть рекомендованному режиму разряда. С практической точки зрения идеально было бы, чтобы ёмкость вообще не зависела от тока.

Саморазрядом ХИТ называют потерю его ёмкости при разомкнутой внешней цепи. Саморазряд вызывается в основном взаимодействием активных

веществ с компонентами электролита или с веществами окружающей среды.

Важной характеристикой любого ХИТ является *максимально допустимый ток разряда* и связанные с ним *максимально допустимая мощность* и *критическое напряжение*. Эксплуатация ХИТ при больших токах невозможна или нецелесообразна (например, из-за сильного снижения напряжения или из-за сильного разогрева). Кроме того, используют понятие *тока короткого замыкания* $I_{кз}$. Это наибольший ток, который способен генерировать ХИТ, когда внешнее сопротивление равно нулю. Поскольку току короткого замыкания соответствует нулевое напряжение $U = 0$, следовательно, ему соответствует также нулевая отдаваемая мощность $P = 0$. В этом режиме вся химическая энергия токообразующей реакции превращается в тепло внутри ХИТ.

Для перезаряжаемых ХИТ (аккумуляторов) важными электрическими характеристиками, кроме рассмотренных выше, являются также номинальное число зарядно-разрядных циклов и отдача по емкости M_Q :

$$M_Q = \frac{C}{Q} \leq 1. \quad (2.10)$$

Так как часть сообщенного заряда Q тратится на побочные процессы, отдача по ёмкости обычно меньше единицы. Используют также отдачу по энергии M_W .

Если напряжение или ёмкость одного гальванического элемента недостаточны, несколько элементов соединяют в батарею (гальваническую батарею). Чаще всего используют *последовательное соединение*, при котором соединяют разноимённые полюса (минус к плюсу), как это показано на рисунке 2.5. При этом напряжение и ЭДС суммируются. Количество элементов не ограничено. Например, в 1803 г. был изготовлен Вольтов столб из 2100 элементов.

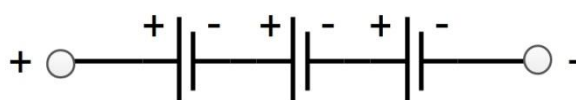


Рисунок 2.5 – Последовательное соединение гальванических элементов

Общая ёмкость батареи из n элементов равна ёмкости одного элемента:

$$U_{\text{бат}} = nU_{\text{э}}, \quad Q_{\text{общ}} = Q. \quad (2.11)$$

Энергия же возрастает в n раз:

$$W = U_{\text{бат}} Q_{\text{бат}} = nUQ = nW. \quad (2.12)$$

Параллельное соединение применяют для увеличения силы тока, что требуется реже, поскольку этого можно добиться, используя более крупные ХИТ. При параллельном соединении допустимо соединять вместе только одинаковые полюса (плюс к плюсу, минус к минусу), как это показано на рисунке 2.6. Все элементы должны быть одинаковыми для выравнивания токов через них.

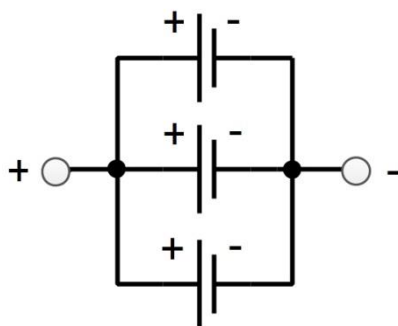


Рисунок 2.6 – Параллельное соединение гальванических элементов

При этом суммируются ёмкость и энергия, а общее напряжение равно напряжению единичного элемента

$$U_{\text{бат}} = U_{\text{э}}, \quad Q_{\text{общ}} = nQ, \quad W_{\text{общ}} = nW. \quad (2.13)$$

Наконец, возможна *комбинированная коммутация*, пример которой показан на рисунке 2.7.

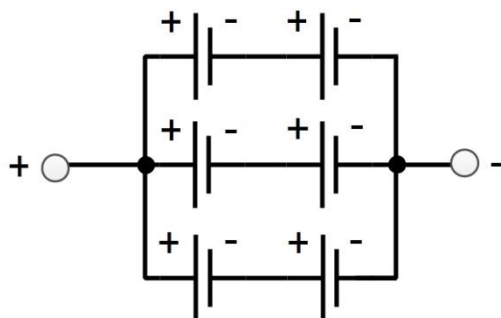


Рисунок 2.7 – Комбинированная коммутация гальванических элементов

При выборе ХИТ для электропитания конкретной РЭА, прежде всего, обращают внимание на его цену, энергоёмкость, долговечность при хранении, постоянство напряжения в течение разряда, внутреннее сопротивление, максимальное значение отдаваемого тока, диапазон рабочих температур и массогабаритные показатели.

В общем случае требования к ХИТ выглядят следующим образом. Они должны иметь или обеспечивать:

- как можно более высокие значения удельных параметров;
- как можно более широкий температурный интервал работоспособности;
- как можно более высокое напряжение;
- по возможности невысокую стоимость единицы энергии;
- для аккумуляторов – также высокий ресурс (большое число циклов);
- стабильность напряжения;
- сохранность заряда;
- безопасность;
- необслуживаемость или простоту обслуживания.

Точная оценка современных объёмов производства различных ХИТ затруднена. Многие данные о выпуске ХИТ за рубежом закрыты, так как они составляют секреты отдельных фирм и военных организаций. По очень грубой оценке, общий выпуск ХИТ во всём мире в настоящее время соответствует энергозапасу более 150 млн кВт·ч в год.

2.2.2 Первичные химические источники тока

Теоретически ХИТ можно построить на основе любой окислительно-восстановительной реакции. На практике набор требований ограничивает круг используемых веществ. В итоге всего исследовано более 500 электрохимических систем, перспективных для возможного применения в ХИТ, и только 40-50 из них дошли до стадии практической реализации. Так, наибольшее распро-

странение получили гальванические элементы и батареи следующих систем: марганцево-цинковые (солевые и щелочные), ртутно-цинковые, серебряно-цинковые, литиевые.

Марганцево-цинковые элементы делят на источники тока с солевым электролитом и с щелочным (рисунок 2.8).

Вообще цинк – очень удобный реагент для ХИТ: он является хорошим восстановителем с достаточно отрицательным потенциалом, коррозионно довольно устойчив в водных растворах, сравнительно дешёв и нетоксичен. Цинковые аноды использовались ещё в вольтовом столбе и продолжают оставаться основными до сих пор.



Рисунок 2.8 – Солевые и щелочные марганцево-цинковые элементы

Исторически начало промышленного производства первичных ХИТ было заложено в 1865 г. французом Ж.Л. Лекланше, предложившим марганцево-цинковый элемент с солевым электролитом (так называемый элемент Лекланше). И до недавнего времени элементы с солевым электролитом (система $\text{Zn} | \text{NH}_4\text{Cl}, \text{ZnCl}_2 | \text{MnO}_2$) являлись наиболее распространёнными несмотря на то, что появились они одними из первых и сохранились практически в неизменённом виде благодаря своим характеристикам (рисунок 2.9):

- дешевизна и доступность сырья;
- простота технологии производства;
- низкая конечная стоимость, определённая низкими затратами производителя;
- удобство использования;

- удовлетворительные для большинства областей применения электрические параметры.

Так, в 1985 г. в мире было выпущено более 18 млрд. элементов с соевым электролитом.

Однако к настоящему времени практически все производители ХИТ полностью отказались от их выпуска, что объясняется повышением требований производителей современной РЭА к техническим параметрам ХИТ.



Рисунок 2.9 – Угльно-цинковые (соевые) ХИТ советского производства

К числу недостатков соевых элементов относят:

- резкое падение напряжения в течение разряда;
- значительное снижение отдаваемой ёмкости при увеличении разрядных токов до значений, необходимых для современной РЭА;
- резкое ухудшение характеристик при отрицательных температурах;
- маленький срок хранения (в зависимости от рецептур активных масс и электролита, конструктивного исполнения и размеров элементов их сохранность колеблется от 1 года до 3 лет; к концу гарантированного срока утрата ёмкости может составлять 30-40%).

Соевые элементы выпускали в виде двух модификаций:

- традиционные элементы Лекланше с электролитом, представляющим собой водный раствор хлорида аммония;

- элементы с электролитом, представляющим собой хлорид цинка и (или) хлорид кальция, загущенный крахмалом или синтетическими полимерами.

В обоих случаях электролит находится в иммобилизованном состоянии, что позволяет эксплуатировать элементы в любом пространственном положении и служит основой для названия "сухие элементы" (рисунок 2.10). Примечательно, что кроме "сухих батарей" до 1930-х гг. выпускались и "мокрые", которые работали с жидким электролитом. Перед использованием в их элементы нужно было залить воду. Зачастую "мокрые" батареи радиолюбители успешно изготавливали сами.



Рисунок 2.10 – "Сухая батарея" БС-Г-70 (1952 г.)

Солевые элементы работоспособны в интервале температур от минус 20°C до 60°C. При длительном воздействии высокой температуры увеличивается саморазряд элементов. А при низкой температуре заметно уменьшается отдаваемая ёмкость.

При использовании в РЭА у солевых элементов на последней стадии разряда и по его окончании может произойти течь электролита, что связано с повышением объёма активной массы положительного электрода и выдавливанием электролита из его пор. Особенно сильно этот эффект проявляется после разряда большими токами или короткого замыкания. В конце разряда в результате

медленного разложения диоксида марганца может также выделяться кислород, а в результате коррозии цинка – водород, что тоже способствует увеличению внутреннего объёма элемента.

Особенность солевых ХИТ – это большое разнообразие их форм и размеров. Это преимущество перед другими типами ХИТ в своё время обеспечило им самое широкое распространение: на транспорте, в бытовой технике, аппаратуре освещения, фотоаппаратуре, специальной аппаратуре и т. д.

Конструктивно солевые элементы чаще всего выпускали в двух вариантах: "цилиндрическом" и "дисковом". Типоразмеры солевых элементов стандартизованы и приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные типоразмеры цилиндрических солевых ХИТ

Ø, мм	Высота, мм	Объём, см ³	МЭК	США	Россия
10.5	3		R08	O	
10.5	44.5		R03	AAA	
14.5	50.5	8.34	R6	AA	316
26.2	50		R14	C	343
34.2	61.5	56.5	R20	D	373

В солевых цилиндрических элементах (рисунок 2.11) корпус, сделанный из цинка (цинковый стакан), является отрицательным электродом. Положительный электрод представляет из себя брикет из спрессованной активной массы, увлажнённый электролитом, в центре которой расположен токоотвод – угольный стержень, пропитанный составами на основе парафина для снижения потери воды из электролита. Сверху токоотвод обжат металлическим колпачком. Электролит в сепараторе – загущенный. В элементах есть газовая камера (воздушная прослойка), в которую поступают газы, выделяющиеся при разряде и саморазряде. Сверху размещают прокладку. Для уменьшения вероятности течи в результате коррозии тонкостенного цинкового стакана элемент помещают в защитный футляр (корпус), картонный или полимерный, иногда дополни-

тельно применяют футляр из белой жести. В этом случае дно и верх элемента также закрывают белой жстью.

Щелочные марганцево-цинковые ХИТ (система $\text{Zn} \mid \text{KOH} \mid \text{MnO}_2$) начали производить в середине XX века. Одной из первых их промышленный выпуск освоила компания "Duracell" (США).

Активным материалом анода является порошкообразный цинк высокой степени чистоты. Для уменьшения скорости коррозии цинк может быть легирован небольшими добавками свинца, индия, висмута и алюминия.

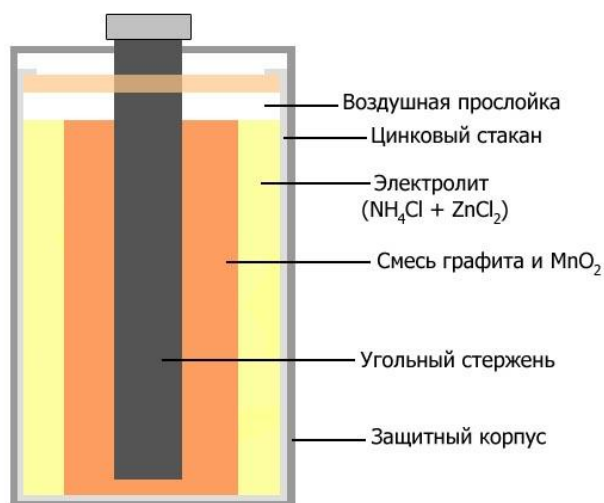


Рисунок 2.11 – Устройство солевого марганцево-цинкового элемента

При непрерывном разряде средними и повышенными токами щелочные элементы обеспечивают ёмкость бóльшую (до 7-10 раз), чем солевые элементы тех же габаритов. Щелочные элементы лучше функционируют и при низких температурах: при минус 20°C отдают такую же ёмкость, как солевые в режиме непрерывного разряда при комнатной температуре. Скорость саморазряда щелочных марганцево-цинковых элементов меньше: после 1 года хранения при 20°C или 3 месяцев при 50°C потери ёмкости составляют примерно 10% начальной ёмкости.

Гарантийный срок хранения щелочных элементов составляет 5-7 лет, иногда он достигает 10 лет.

Итак, при одинаковых размерах солевых и щелочных ХИТ продолжительность работы последних при одинаковых малых токах в 1,5-2 раза больше, а при больших – в 4-10 раз больше.

Размеры цилиндрических щелочных элементов совпадают с размерами элементов марганцево-цинковой системы с солевым электролитом. В то же время, устройство щелочных элементов отличается от устройства солевых аналогов: в элементах с щелочным электролитом цинк всегда находится в виде порошка, поэтому вместо цинкового стаканчика применяют стальной никелированный цилиндрический корпус, служащий токоотводом положительного электрода (рисунок 2.12). Активная масса положительного электрода подпрессовывается к внутренней стенке корпуса. В щелочном элементе можно расположить больше активной массы положительного электрода, чем в солевом элементе того же объёма. Во внутреннюю полость, образованную активной массой положительного электрода, вставляется сепаратор, пропитанный электролитом. В качестве сепарационных материалов применяют целлофан либо нетканые полимерные материалы. По оси элемента размещён латунный токоотвод (стержень) отрицательного электрода, а всё пространство между этим токоотводом и сепаратором плотно забивают анодной пастой, состоящей из цинкового порошка, пропитанного загущенным электролитом.

Часто уже при изготовлении элементов в качестве электролита применяют щёлочь, предварительно насыщенную цинкатами, что позволяет избежать расходования щёлочи в начале эксплуатации. Кроме того, присутствие цинкато в электролите замедляет скорость коррозии цинка. Для предотвращения взрыва батареи при неправильном использовании (например, коротком замыкании), в ней имеется предохранительная мембрана. При превышении давления газов происходит разрыв мембраны и разгерметизация элемента – результатом обычно становится течь электролита.

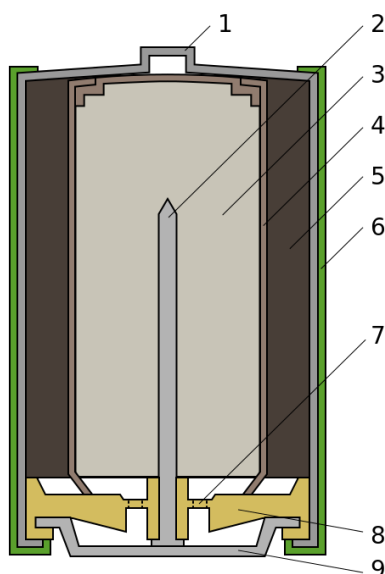


Рисунок 2.12 – Устройство щелочного марганцево-цинкового элемента

1 – стальной никелированный стакан; 2 – латунный стержень; 3 – анодная паста; 4 – сепаратор; 5 – графит или сажа; 6 – оболочка; 7 – предохранительная мембрана; 8 – прокладка; 9 – стальная тарелка.

Из-за более плотной активной массы и применения стального корпуса щелочные элементы при тех же размерах обычно тяжелее солевых на 25-50%.

Как и у всех ХИТ, ёмкость элементов с щелочным электролитом уменьшается при увеличении тока разряда и снижении температуры, но менее резко, чем у элементов с солевым электролитом. Удельная ёмкость элементов с щелочным электролитом при разряде малыми токами приблизительно в 1,5 раза превышает удельную ёмкость элементов с солевым электролитом. При разряде большими токами это различие достигает 4-10-кратного.

Напряжение в процессе работы щелочных элементов изменяется значительно меньше, чем у элементов с солевым электролитом. Элементы с щелочным электролитом имеют более высокие удельную энергию (65-90 Вт·ч/кг) и удельную мощность (100-150 кВт/м³).

Щелочные элементы очень хорошо работают в режимах с непрерывным отбором тока и с отбором больших токов и имеют явное преимущество перед солевыми элементами. Основное преимущество щелочных батарей заключается

именно в высокой мощности при разряде в непрерывном или тяжёлом режиме. При определённых условиях щелочные ХИТ обеспечивают в семь раз бóльшую длительность работы, чем солевые ХИТ. Также они остаются работоспособными в интервале температур от минус 20°C до 70°C, а в определённых случаях и при более высоких температурах в районах с различной влажностью и условиями эксплуатации.

Как и для ХИТ системы Лекланше, так и для щелочных ХИТ характерно то, что время работы (в часах) тем выше, чем ниже конечное напряжение. Целесообразно добиваться как можно более низкого конечного напряжения, для того чтобы полностью использовать высокую энергию, содержащуюся в элементах этого типа. Элементы и батареи изготавливают с величиной ёмкости от нескольких сотен миллиампер-часов до сотен ампер-часов.

Диапазон применения щелочных ХИТ – от космической техники до бытовых приборов. Их применяют в качестве автономных источников тока для электропитания аппаратуры освещения, радиоприёмников, радиостанций, геофизических приборов, фотоаппаратуры, навигационного оборудования, специальной аппаратуры. Ежегодно в мире их производят более 10 млрд. штук. По некоторым сведениям, 90% всех выпускаемых в мире ХИТ – щелочные.

Среди отечественных компаний, выпускающих щелочные элементы в интересах оборонно-промышленного комплекса, можно выделить АО "НПП "Квант" (г. Москва), АО "Энергия" (г. Елец).

Технические характеристики некоторых современных отечественных щелочных элементов и батарей приведены на рисунке 2.13.

Ртутно-цинковые элементы и батареи (система $\text{Zn} \mid \text{KOH} \mid \text{HgO}$) характеризуются постоянством напряжения при разряде. Напряжение ртутно-цинкового элемента равно 1,352 В и мало изменяется при изменении температуры. Поэтому эти элементы иногда используют в РЭА в качестве источников опорного напряжения.



№ п/п	Параметр	Значение
1	Максимальные габариты, мм	21,5х37,3
2	Максимальная масса, кг	0,035
3	Начальное напряжение, В, не менее	1,4
4	Ёмкость, А·ч	1,6
5	Гарантийный срок хранения, мес	12



№ п/п	Параметр	Значение
1	Габаритные размеры, мм	257х132
2	Масса, кг, не более	7,3
3	Напряжение, В, не менее	1,55
4	Конечное напряжение при разряде, В	0,96
5	Ёмкость, А·ч, не менее	350
6	Гарантийный срок хранения, мес	12
7	Диапазон рабочих температур, °С	минус 5...40

Рисунок 2.13 – Щелочные элемент А332 "Эра" и батарея "Пульсар" и их технические характеристики (производство АО "Энергия")

Характерными чертами ртутно-цинковых ХИТ являются:

- длительный срок службы;
- большое значение удельной ёмкости;
- плоская кривая разряда;
- сравнительно высокое напряжение под нагрузкой;
- относительно постоянная отдаваемая ёмкость, практически независимая от условий разряда;
- малое и практически постоянное внутреннее сопротивление;
- сохранение работоспособности при высоких температурах;
- высокая устойчивость к ударам, вибрациям и ускорениям;
- устойчивость к пониженному и повышенному давлению по сравнению с атмосферным.

Рабочая ёмкость ртутно-цинковых ХИТ после года хранения при температуре 21°C, как правило, составляет более 90% ёмкости свежееизготовленной батареи. Рекомендуемый срок хранения для ртутно-цинковых ХИТ составляет до 5-10 лет при обычной температуре.

Высокие температуры (до 70°C) практически не сказываются на стабильности характеристик ртутно-цинковых ХИТ. В течение нескольких часов такие ХИТ могут работать при температуре порядка 145°C. При низких температурах в общем случае характеристики ртутно-цинковых элементов становятся неудовлетворительными. Однако более поздние разработки элементов значительно лучше работают в условиях пониженных температур.

Ртутно-цинковые элементы рассчитаны на длительный разряд малыми токами. Основные достоинства – 100% использование активных веществ, малогабаритность, очень высокая стабильность разрядного напряжения, довольно высокая удельная энергия (100-120 Вт·ч/кг) и самая высокая среди традиционных ХИТ объёмная удельная энергия (400-500 Вт·ч/л). Последнее достигается за счет высокой плотности материалов и плотной сборки.

Ввиду большой энергоплотности ртутно-цинковые элементы к 1980-м гг. нашли относительно широкое применение как источники электроэнергии в электронных часах, кардиостимуляторах, слуховых аппаратах, портативной РЭА военного назначения, в космических аппаратах.

Отдельно следует указать на то обстоятельство, что ртутно-цинковый элемент обратим, то есть способен работать как аккумулятор. Однако при циклировании (заряд-разряд) наблюдается деградация элемента и уменьшение его ёмкости.

В XXI веке производство и эксплуатация ртутных элементов в большинстве стран мира запрещена. Ртутно-цинковые элементы полностью вытеснены более безопасными ХИТ, так как проблема их отдельного сбора и особенно безопасной утилизации достаточно сложна. Однако ртутно-цинковые элементы до сих пор выпускает, например, АО "Энергия" (рисунок 2.14).

Серебряно-цинковые элементы (система $Zn | KOH | AgO$) обеспечивают более высокое напряжение, чем ртутно-цинковые, при сохранении плоской кривой разряда. Серебряно-цинковые ХИТ сохраняют работоспособность при низких температурах. Рабочее напряжение серебряного элемента составляет 1,5 В (напряжение на разомкнутых электродах равно 1,6 В).

Серебряно-цинковые ХИТ используют для электропитания наручных часов, калькуляторов, электронных записных книжек, миниатюрных слуховых аппаратов, измерительных приборов и т. д. (рисунок 2.15). Также, как и ртутно-цинковые элементы, серебряно-цинковые ХИТ применяют в качестве источников опорного напряжения.

Характеристики типового серебряно-цинкового элемента SR920SW (производство "Sony") приведены в таблице 2.2.

Серебряно-цинковые элементы хорошо сохраняют работоспособность после долгого хранения (обычно сохраняется более 90% ёмкости после одного года хранения при температуре 21°C).



Рисунок 2.14 – Ртутно-цинковые ХИТ (производство АО "Энергия")



Рисунок 2.15 – Серебряно-цинковый элемент (производство "Sony") и его место в составе наручных часов

Таблица 2.2 – Характеристики серебряно-цинкового элемента SR920SW

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Норма
1	Номинальное напряжение	В	1,5
2	Номинальная ёмкость	мА·ч	32,0
3	Размеры	мм	9,5x2,0
4	Диапазон температур эксплуатации	°С	минус 40...50

Элементы серебряно-цинковой системы могут иметь как малое, так и большое внутреннее сопротивление. Так, отечественные элементы для наручных часов обладают низким собственным импедансом. В то же время ряд элементов аналогичного назначения, производимых зарубежными фирмами, выпускаются с большим внутренним сопротивлением, что препятствует их взаимозаменяемости в часах с такими функциональными возможностями как под-

светка и формирование звукового сигнала.

Литиевые элементы и батареи обеспечивают удельную энергию по массе до 330 Вт·ч/кг, что примерно в три раза выше, чем у ртутных и серебряно-цинковых, и в четыре раза выше, чем у щелочных ХИТ. Удельная энергия по объёму у литиевых батарей на 50% выше, чем у ртутных, и на 100% выше, чем у щелочных. Таким образом, применение литиевых ХИТ позволяет уменьшить массогабаритные показатели РЭА с автономным электропитанием. Другим замечательным свойством литиевых элементов и батарей является большой срок сохраняемости, благодаря чему автономность некоторых устройств с литиевым ХИТ достигает 5-10 лет и более, а потеря ёмкости после 3-х лет хранения ничтожно мала.

Вследствие неводной природы электролитов, используемых в литиевых электрохимических системах, электропроводность таких систем при пониженных температурах значительно выше, чем электропроводность ХИТ нелитиевых систем. Интервал рабочих температур современных литиевых элементов – от минус 30°C до 60°C.

Большой срок годности литиевых ХИТ может привести к уменьшению затрат на обслуживание, связанное с заменой батарей. Особенно это существенно при использовании РЭА, расположенной в удалённых местах, а также устройств, замена батарей в которых сопряжена со значительными затратами времени и средств.

Современные литиевые ХИТ используют для электропитания охранных систем, приборов ночного видения, газоанализаторов, медицинской техники, кассовых аппаратов, электроизмерительных приборов, стационарных и подвижных средств связи, а также для автономного (аварийного) энергообеспечения объектов автоматики и связи при нарушении штатных систем электроснабжения.

В настоящее время литиевые элементы и батареи выпускает как отечественная, так и зарубежная промышленность (рисунок 2.16).

В таблице 2.3 приведены технические характеристики литиевого элемента ER34580 (производство АО "Литий-Элемент"). Примечательно, что он дополнительно снабжён устройством электронной защиты, предназначенным для прекращения разряда элемента во внешнюю цепь при снижении разрядного напряжения ниже безопасной величины, не разрывая при этом цепь.



Рисунок 2.16 – Отечественные литиевые ХИТ
(производство АО "Литий-Элемент")

Таблица 2.3 – Характеристики литиевого элемента ER34580

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Норма
1	Номинальное напряжение	В	3,6
2	Номинальная ёмкость	А·ч	15,0
3	Конечное напряжение разряда, не менее	В	2,0
4	Максимальный ток разряда	А	1,1
5	Номинальный ток разряда	А	0,1
6	Максимальный импульсный ток разряда при н.к.у.	А	3,0
7	Диапазон температур эксплуатации	°С	минус 30...60
8	Масса	г	102,0

Резервные ХИТ применяют в основном в РЭА, где требуется большая мгновенная отдаваемая мощность, короткое время работы, очень большой срок сохраняемости. Большую часть времени такие элементы и батареи находятся в неактивированном состоянии (режим хранения). Для приведения в действие рассматриваемые ХИТ активируются различными способами.

Высокотемпературные резервные термически-активируемые батареи содержат электрохимическую систему, которая остаётся инертной до тех пор, пока не будет активирована при помощи нагрева. Эти ХИТ можно хранить даже подключенными к нагрузке. Используемый в элементе электролит представляет собой смесь безводных солей, которые проводят ток только в расплавленном состоянии. Время активации не превышает нескольких секунд. Продолжительность активного периода тепловой батареи составляет несколько минут (обычно не менее пяти). Срок сохраняемости достигает двадцати и более лет. Тепловые батареи применяют в основном в военной и специальной технике.

Технические характеристики тепловых батарей ЛОТ-2БМ (производство АО "Литий-Элемент") приведены в таблице 2.4.

Активация тепловых батарей ЛОТ-2БМ происходит от электровоспламенителя. Внешний вид таких батарей представлен на рисунке 2.17.

Таблица 2.4 – Характеристики тепловой батареи ЛОТ-2БМ

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Норма
1	Номинальное напряжение	В	25,0
2	Разрядный ток	А	0,6-18,0
3	Ёмкость	А·с	130,0-230,0
4	Время приведения в действие	с	0,35-0,9
5	Диапазон температур эксплуатации	°С	минус 50...60
6	Габаритные размеры	мм	Ø47,0 x 70,0
7	Масса, не более	кг	0,3

Водоактивируемые батареи ХИТ широко применяют в качестве источника электроэнергии для предупредительных огней, буйев и маяков практически любых акваторий (рисунок 2.18). Рассматриваемые ХИТ характеризуются большим сроком годности при соблюдении условия хранения в герметичной упаковке. После разгерметизации и заполнения водой они должны быть израсходованы в течение нескольких часов или дней.



Рисунок 2.17 – Тепловая батарея ЛОТ-2БМ



№ п/п	Параметр	Значение
1	Максимальные габариты, мм	48,5x21,5x101,0
2	Максимальная масса, кг	0,15
3	Рабочее напряжение, В, не менее и не более	1,8 и 3,4
4	Время достижения минимального рабочего напряжения, с	180
5	Продолжительность работы, ч, не менее	13
6	Гарантийный срок хранения, мес	12

Рисунок 2.18 – Водоактивируемая батарея "Дымок-1М" и её характеристики
(производство АО "Энергия")

Эти батареи предназначены также для электропитания осветительных устройств, которыми снабжаются спасательные жилеты, костюмы, плоты и другие средства для спасения людей, потерпевших аварию на воде. В случае попадания в воду, потерпевший выдергивает пробки, изделие наполняется водой и в действие приводится сигнальная лампа спасательного средства.

Водоактивируемые батареи одноразового действия устойчивы к воздействию механических нагрузок и климатических факторов. Они просты в эксплуатации, работоспособны в широком диапазоне температур и давлений.

2.2.3 Вторичные химические источники тока

Аккумуляторы и аккумуляторные батареи относят к вторичным ХИТ. Они отдают во внешнюю электрическую цепь электроэнергию, запасённую в процессе заряда. Их использование для электропитания РЭА в ряде случаев более целесообразно, чем использование гальванических элементов и батарей.

Аккумуляторы допускают многократный заряд и разряд. При зарядке аккумулятора его положительный полюс подключают к положительному полюсу зарядного устройства. Заряд аккумулятора осуществляют током, идущим в направлении, обратном току разряда.

Важнейшей характеристикой аккумулятора является число разрядов, после которых его емкость можно восстановить путем заряда. Чем больше число таких зарядно-разрядных циклов, тем в большей степени аккумулятор отвечает своему назначению – способности накапливать электроэнергию. Возможность восстановления заряженности источника тока после его использования предоставляет высокие технические возможности для ИЭП различных групп потребителей.

Причиной широкого применения аккумуляторов в РЭА является то, что, в отличие от первичных ХИТ, заряд, особенно ускоренный, приводит их в состояние готовности довольно быстро. Кроме того, аккумуляторы, как правило,

имеют бóльшую мощность по сравнению с первичными ХИТ.

Использование аккумуляторов целесообразно для:

- аппаратуры кратковременного использования, когда после нескольких часов использования емкость батареи может быть восполнена путем заряда;
- миниатюрной РЭА, энергопотребление которой не обеспечивается миниатюрными первичными ХИТ;
- резервного электропитания РЭА при отключении основного ИЭП (сети);
- накопителей электроэнергии, вырабатываемой маломощным физическим источником тока, работающих в связке с последним.

Наиболее широкое распространение получили следующие типы аккумуляторов: кислотные, щелочные, серебряно-цинковые и литиевые.

Кислотные аккумуляторы получили широкое распространение для электропитания электрооборудования автотранспорта (в этом случае их используют как стартерные) и для электропитания специальной РЭА.

Они характеризуются следующими параметрами:

- ЭДС заряженного аккумулятора 2,6-2,8 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 1,7-1,8 В;
- КПД до 80%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) 300-800;
- саморазряд в сутки 1-2%.

При эксплуатации кислотных аккумуляторов необходимо иметь в виду их чувствительность к перезарядам и недозарядам, следствием которых является постепенное разрушение активной массы пластин.

Свинцовый аккумулятор (система $Pb \mid H_2SO_4 \mid PbO_2$) является наиболее распространённым в настоящее время кислотным аккумулятором. Более половины всего мирового производства свинца расходуется на изготовление свинцовых аккумуляторов. Широкое распространение этих аккумуляторов обусловлено их относительной дешевизной и довольно хорошими техническими харак-

теристиками. Они обладают стабильным напряжением, мало меняющимся с температурой и с токами нагрузки. Ресурс составляет от 100 до 1000 циклов, а для некоторых типов аккумуляторов – более 1000 циклов. По времени эксплуатации автомобиля это соответствует примерно 600 ч и более. Аккумуляторы имеют выходное напряжение 6 или 12 В.

Первый действующий образец свинцового аккумулятора был создан в 1859 г., серийно выпускаются с конца XIX века. Раньше специально для электропитания РЭА выпускали радиоанодные и радионакальные свинцовые аккумуляторы.

Свинцовые аккумуляторы выпускают средне- и крупногабаритными и подразделяют на *стартерные* (5-200 А·ч), *тяговые* (40-1200 А·ч) и *стационарные* (5-5000 А·ч).

В стартерном режиме аккумуляторы работоспособны до минус 30°C. Современные зарядные устройства обеспечивают оптимальный режим эксплуатации.

Нормальное состояние свинцового аккумулятора – полностью заряженное. Хранить его разряженным недопустимо. До недавнего времени свинцовые аккумуляторы требовали обслуживания в виде доливки воды в электролит (в электролит можно доливать только дистиллированную воду взамен испарившейся и разложившейся). В последние годы выпускают герметизированные необслуживаемые свинцовые аккумуляторы.

Удельная энергия невелика: 10-40 Вт·ч/кг или 50-90 Вт·ч/л (для различных типов). Конструкция – призматический баночный пластиковый или эбонитовый моноблок, залитый герметично специальной массой (рисунок 2.19). Моноблок разделён на отдельные ячейки, соединённые последовательно. 12 В аккумулятор состоит из 6 таких ячеек. В каждой находится электродный блок, состоящий из вертикальных положительных и отрицательных пластин, погруженных в электролит.

Существует несколько технологий изготовления свинцовых аккумуляторов: Gelled Electrolite (GEL), Absorptive Glass Mat (AGM), а также различные гибридные технологии, использующие один или несколько способов улучшения параметров аккумуляторов. При изготовлении по GEL-технологии путем добавления в электролит специальных веществ обеспечивается его переход в желеобразное состояние через несколько часов после заполнения аккумулятора. В толще желеобразного электролита происходит образование пор и раковин, имеющих значительный объем и площадь поверхности, где происходит встреча и рекомбинация молекул кислорода и водорода с образованием воды. В результате количество электролита остается неизменным и доливка воды не требуется в течение всего срока службы. При технологии AGM использует пропитанный жидким электролитом пористый наполнитель из стекловолокна. Микропоры этого материала заполнены электролитом не полностью. Свободный объем используется для рекомбинации газов.

Кислотные аккумуляторы обычно используют в случаях, когда требуется отдача большой мощности, масса не критична, а стоимость должна быть минимальной. Для кислотных аккумуляторов неприемлем режим быстрого заряда. Типовое время заряда – от 8 до 16 ч.

Кислотные аккумуляторы "не любят" глубоких циклов разряда и хранения в разряженном состоянии. Это приводит к сульфатации пластин аккумулятора, в результате чего их заряд становится трудным, если не невозможным. Фактически, каждый цикл заряда/разряда отнимает у аккумулятора небольшое количество емкости. Эта потеря очень небольшая, если аккумулятор находится в хорошем состоянии, но становится более ощутима, как только емкость понижается ниже 80% от номинальной.

Основная причина относительно небольшого количества циклов заряда/разряда – расширение положительных пластин в результате внутренних химических реакций. Это явление наиболее сильно проявляется при более высо-

ких температурах. Также кислотные аккумуляторы обладают относительно низкой плотностью энергии по сравнению с другими аккумуляторами и, вследствие этого, непригодны для компактных устройств. Это становится особенно критичным при низких температурах, так как способность отдавать ток в нагрузку при низких температурах значительно уменьшается.

Из-за высокого содержания свинца, кислотные аккумуляторы при неправильной утилизации экологически вредны.

В начале 2000-х гг. появились **гелевые** аккумуляторы (технология Gel), которые, по заверению продавцов, могли прослужить на порядок дольше обычных кислотных, при этом они отлично подходили для эксплуатации в условиях холодного климата.

Основной особенностью гелевых аккумуляторов является состояние электролита, который выполнен не в виде жидкости, а в виде геля, что обеспечивает улучшенное сохранение заряда, гарантируя эффективный пусковой ток в широком диапазоне температур. Добиться такого состояния у электролита удалось за счёт повышенного содержания в нём оксида кремния. Также в качестве заполнителя может использоваться пористое стекловолокно и сепаратор, пропитанный соляной кислотой. Такие гелевые аккумуляторы получили на сегодняшний день наибольшее распространение, они надежны, долговечны и имеют не слишком высокую стоимость.

Впервые технология гелевых аккумуляторов появилась ещё в 1960-х гг. и изначально использовалась в космической отрасли. Использование геля в качестве электролита позволило обеспечить полную герметичность батареи и ее минимальное газовыделение. Поэтому такие аккумуляторы отличаются великолепной устойчивостью к глубокому разряду, они куда более стойкие и долговечные, в сравнении со стандартными кислотными аккумуляторами.

Самые популярные на сегодняшний день модификация таких аккумуляторов используют жидкую кислоту, которая удерживается в виде геля в порах

сепаратора. Такая оригинальная технология позволяет обеспечить герметичность корпуса, а также полную работоспособность батареи, даже при пробое корпуса, что может возникать по причине механических повреждений аккумулятора.

Итак, к достоинствам гелевых аккумуляторов стоит отнести:

- продолжительный срок эксплуатации (около 10 лет);
- большое количество циклов зарядов-разрядов (до 400 полных разрядов);
- нет необходимости срочно заряжать аккумулятор в случае его глубокого разряда;
- небольшие потери емкости в случае простоя аккумулятора (около 20% в год);
- не требуют обслуживания;
- отличаются безопасностью эксплуатации за счёт непроницаемости корпуса.

Среди недостатков отметим следующие:

- при зарядке следует контролировать подаваемое напряжение (если превысить допустимое значение, то начнётся процесс разрушения компонентов);
- чувствительность к низким температурным режимам из-за застывания электролита и ухудшения его свойств;
- чувствительность к коротким замыканиям.
- высокая стоимость по сравнению со свинцовыми аккумуляторами.

Наряду с кислотными аккумуляторами широкое распространение получили **щелочные аккумуляторы**, где электролитом служит едкий калий или едкий натр, а электродами являются железные никелированные рамки, удерживающие пакеты с активной массой.

Основные параметры щелочных аккумуляторов следующие:

- ЭДС заряженного аккумулятора 1,75-1,8 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 0,8-1,0 В;

- КПД до 60%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) 500-1000;
- саморазряд в сутки 1,5%.



Рисунок 2.19 – Стартерный свинцовый аккумулятор
(производство АО "Тюменский аккумуляторный завод")

Внешний вид современных щелочных аккумуляторов представлен на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 – Современные щелочные аккумуляторы

Свежезаряженный щелочной аккумулятор даёт напряжение около 1,7-1,8 В. После прекращения заряда это напряжение даже без подключения нагрузки быстро падает до 1,4-1,45 В. Под нагрузкой напряжение каждого аккумулятора равно 1,2 В. В конце разряда напряжение падает до 0,95-1 В. Это

говорит о том, что ёмкость аккумулятора израсходована и его требуется заряжать снова.

Щелочные аккумуляторы, по сравнению с кислотными, обладают рядом преимуществ. Они имеют меньшую массу, не боятся вибраций и толчков, не портятся от кратковременных коротких замыканий и от больших зарядных и разрядных токов, могут оставаться долгое время незаряженными. Однако они дороже свинцовых, дают значительно меньшее напряжение на каждый аккумулятор и имеют меньший КПД.

Наибольшее распространение в малогабаритной РЭА получили *никель-кадмиевые* (система $\text{Cd} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH}$), *никель-железные* (система $\text{Fe} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH}$) и *никель-металлгидридные* (система $\text{MH} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH}$) герметичные аккумуляторы. Они изготавливаются двух типов: дисковые и цилиндрические. Дисковые аккумуляторы применяют в малогабаритной связной аппаратуре, слуховых аппаратах, калькуляторах, игрушках, электрофонарях и т. д. Цилиндрические аккумуляторы дешёвы, имеют значительные сроки службы и сохранность, хорошо переносят ударные нагрузки. Всё это определяет их широкое применение в медицинской, полевой, геофизической и других видах РЭА.

В негерметичных аккумуляторах используют обычный принцип призматической баночной конструкции. Требуется периодически доливать дистиллированную воду.

В положительных пластинах никель-кадмиевых аккумуляторов активной массой является гидрат окиси никеля в смеси с графитом, в отрицательных – кадмий и окись железа. Активная масса никель-железных аккумуляторов не содержит кадмия и имеет несколько иной состав.

Никель-кадмиевые аккумуляторы были изобретены ещё в 1899 г. Вальдмаром Юнгнером. Однако материалы для производства таких аккумуляторов стоили дороже материалов для производства аккумуляторов других типов, и поэтому в то время широкого использования они не нашли. Только в 1947 г.

стали известны работы над созданием герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов, в которых была осуществлена возможность рекомбинации газов, выделявшихся в процессе заряда, без их отвода. Конечным результатом этих работ и стало появление герметичных никель-кадмиевых аккумуляторных батарей, используемых и в настоящее время. В международной терминологии принято обозначение таких аккумуляторов в виде nickel-cadmium battery, или сокращенно NiCd.

Основные параметры герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов:

- ЭДС заряженного аккумулятора 1,48-1,5 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 0,7-1,0 В;
- КПД 50-60%;
- срок службы (количество циклов заряд-разряд) до 1000 (однако согласно данным ряда исследований благодаря регулярному глубокому периодическому разряду срок службы аккумуляторов увеличивается до 2000 циклов заряд-разряд и более);
- разрядный ток – в широких пределах;
- допускается перезаряд и недозаряд.

Никель-кадмиевые аккумуляторы имеют малое внутреннее сопротивление и могут работать в стартерных режимах. Сохраняют устойчивую работоспособность в условиях низких температур и при воздействии вибраций и ударов. Правда, для никель-кадмиевых аккумуляторов крайне необходим полный периодический разряд: если его не делать, на пластинах элементов формируются крупные кристаллы, значительно снижающие их ёмкость (так называемый "эффект памяти").

Можно выделить следующие преимущества никель-кадмиевых аккумуляторных батарей:

- возможность быстрого и простого заряда, даже после длительного хранения аккумулятора;

- большое количество циклов заряд/разряд;
- хорошая нагрузочная способность и возможность эксплуатации при низких температурах (вполне работоспособны при минус 40°C, причём они даже способны и заряжаться при такой температуре);
- продолжительные сроки хранения при любой степени заряда;
- сохранение стандартной ёмкости при низких температурах (хранение аккумуляторов при более низкой температуре понижает потери ёмкости: обычно саморазряд при 0°C в 2 раза меньше, чем при 20°C);
- наибольшая приспособленность для использования в жёстких условиях эксплуатации;
- низкая стоимость;
- широкий диапазон типоразмеров.

В то же время имеют место и следующие недостатки:

- относительно низкая по сравнению с другими типами аккумуляторных батарей энергетическая плотность (дисковые аккумуляторы с двумя электродами среди герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов обладают самыми маленькими удельными энергетическими характеристиками: 15-18 Вт·ч/кг; удельные энергетические характеристики цилиндрических аккумуляторов достигают величин 45 Вт·ч/кг; у аккумуляторов с положительным электродом на войлочной основе они ещё выше: до 55 Вт·ч/кг);
- "эффект памяти" и необходимость проведения периодических работ (полная разрядка) по его устранению;
- токсичность применяемых материалов, что отрицательно сказывается на экологии, и некоторые страны ограничивают использование аккумуляторов этого типа;
- относительно высокий саморазряд (до 10 % в течение первых 24-х часов).

NiCd-аккумулятор – ветеран на рынке портативной РЭА. Отлаженная технология и надежная работа обеспечили ему широкое распространение для электропитания переносных радиостанций, медицинского оборудования, профессиональных видеокамер, регистрирующих устройств, мощных ручных инструментов и другой портативной техники. Появление аккумуляторов более новых электрохимических систем хотя и привело к уменьшению использования NiCd-аккумуляторов, однако, выявление недостатков новых видов аккумуляторов привело к возобновлению интереса к NiCd-аккумуляторам.

Дисковые никель-кадмиевые аккумуляторы широко применяли в персональных компьютерах выпуска 1980-1990 гг., в частности РС-286/386 и ранних 486, для электропитания энергонезависимой памяти настроек и часов реального времени при отключенном сетевом электропитании. Срок службы аккумуляторов в таком режиме составлял несколько лет, после чего батарея, в большинстве случаев впаянная в материнскую плату, подлежала замене. С развитием компьютерных технологий и уменьшением потребляемой мощности аккумуляторы были вытеснены одноразовыми литиевыми элементами ёмкостью порядка 200 мА·ч (CR2032 и т. д.), устанавливаемыми в гнезда-защёлки и легко заменяемыми пользователем, с аналогичным сроком непрерывной работы.

В СССР дисковые аккумуляторы были практически единственными доступными в широкой продаже аккумуляторами (кроме автомобильных). Помимо отдельных элементов, предлагалась 9-вольтовая батарея из семи аккумуляторов Д-0,1 с разъёмом, аналогичным "Кроне".

В настоящее время в России ведущими компаниями, производящими никель-кадмиевые аккумуляторы, являются ЗАО "ОЗ НИИХИТ" (г. Саратов), ОАО "НИАИ "Источник" (г. Санкт-Петербург).

Удельная энергия *никель-железных* аккумуляторов практически такая же, как у свинцовых, и в зависимости от типа и условий эксплуатации лежит в интервале 20-35 Вт·ч/кг или 40-70 Вт·ч/л, но они имеют гораздо бóльший ресурс –

до 2000 циклов, могут разряжаться большими токами (до 10С у некоторых разновидностей). Вместе с тем никель-кадмиевые аккумуляторы имеют лучшие характеристики, а никель-железные – хуже, но в них нет дорогого и токсичного кадмия.

Температурная зависимость ёмкости и напряжения никель-железных аккумуляторов выражена менее резко (собственно, как и у никель-кадмиевых аккумуляторов), чем у других электрохимических систем. Рабочим пределом является температура минус 10°C. Срок службы – 10 лет, а для некоторых типов – 25 лет и более. Для никель-железных аккумуляторов характерен высокий саморазряд: до 25-35% в месяц при 20°C.

Никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы заряжают постоянным током. Наиболее высокие удельные характеристики имеют цилиндрические рулонные конструкции аккумуляторов, наиболее низкие – дисковые конструкции. Это связано с толщиной электродов и с особенностями конструкции. Из-за сравнительно низкого напряжения требуется большее число элементов в батарее (например, 10 штук для создания 12 В батареи).

В настоящее время Россия остаётся ведущей страной по выпуску никель-железных аккумуляторов.

Никель-металлгидридный аккумулятор (NiMH) появился как дальнейшее развитие никель-кадмиевой электрохимической системы в результате замены кадмиевого электрода на водородный электрод. Причины были следующие:

- недостаточно высокая плотность энергии традиционных свинцовых, никель-кадмиевых и никель-железных аккумуляторов;
- экологическая опасность свинца и кадмия.

Разрядная кривая никель-металлгидридного аккумулятора почти такая же, как у никель-кадмиевого аккумулятора. Кроме того, они имеют то же напряжение, что и никель-кадмиевые, и выпускаются в таких же корпусах, являясь взаимозаменяемыми. Но замена кадмия на водород позволила в 1,5-2 раза

увеличить удельные характеристики. Удельная энергия никель-металлгидридной системы составляет 40-80 Вт·ч/кг или 100-250 Вт·ч/л.

Эта система имеет ещё ряд преимуществ:

- способность выдерживать высокие скорости разряда: до 5С постоянным током, до 10С импульсным (отсюда возможность достижения высокой удельной мощности – до 400 Вт/кг);
- большой ресурс (типично 400-1500 циклов при 100%-й глубине циклирования), срок службы – 5 лет;
- способность металлгидридного электрода к быстрому заряду (такие аккумуляторы позволяют производить сверхбыстрый заряд током 1С за 1 ч);
- примерно на 40-50% бóльшая удельная емкость по сравнению со стандартными NiCd-аккумуляторами;
- мёньшая склонность к эффекту памяти, чем у NiCd аккумуляторов (периодические циклы восстановления должны выполняться реже);
- переход к более экологически чистым производствам.

Наряду с преимуществами есть и недостатки:

- более высокая цена из-за применения редких металлов;
- температурный диапазон не такой широкий, как у никель-кадмиевых ХИТ (большая часть никель-металлгидридных аккумуляторов неработоспособна ниже минус 10°C и выше 40°C);
- саморазряд несколько выше, чем у никель-кадмиевых аккумуляторов (теряет 40% ёмкости за полгода хранения при 20°C);
- NiMH-аккумулятор по сравнению с NiCd выделяет значительно бóльшее количество тепла во время заряда и требует более сложного алгоритма для обнаружения момента полного заряда, если не используется контроль по температуре.

Никель-металлгидридные аккумуляторы имеют недавнюю историю. Первый герметичный никель-водородный аккумулятор был предложен в СССР в

1964 г. Такие аккумуляторы надёжно эксплуатируют в космической технике и в настоящее время. Однако использовать их в бытовой РЭА затруднительно.

Серийно никель-металлгидридные аккумуляторы начали производить за рубежом с 1987 г. Все последующие годы их производство стремительно росло. Сейчас они выпускаются всеми ведущими мировыми электротехническими фирмами, таким как "Panasonic", "Sanyo", "Sony", "Varta" и т. д. С начала 1990-х гг. они начали вытеснять никель-кадмиевые аккумуляторы, производство которых росло весь XX век, но с 1991 г. начало сокращаться. В настоящее время многие фирмы уже объявили о прекращении выпуска никель-кадмиевых аккумуляторов.

До недавнего времени особенно широко никель-металлгидридные аккумуляторы применяли в портативной РЭА (ноутбуки, мобильные телефоны, видео- и фотоаппаратура, переносной электроинструмент, электробритвы, миксеры и т. д.), где увеличение их удельных характеристик в 1,5-2 раза по сравнению с никель-кадмиевыми привело к улучшению потребительских свойств этой РЭА. До сих выпускаются также крупные и мощные тяговые аккумуляторы для электромобилей и для космической техники. В международной терминологии такие аккумуляторы принято обозначать как *nickel metal-hydride battery*, или сокращенно NiMH.

К началу 1990-х гг. во многих промышленно развитых странах было налажено крупносерийное производство **литиевых аккумуляторов** самых разных типоразмеров с использованием различных литиевых электрохимических систем, в основном удовлетворяющих современным требованиям.

Интерес к разработке литиевых аккумуляторов обусловлен принципиальной возможностью создания аккумуляторов с высокими удельными характеристиками – даже более высокими, чем у самых энергоемких из известных серебряно-цинковых аккумуляторов (100-120 Вт·ч/кг и 200-250 Вт·ч/дм³).

Дело в том, что принцип работы ХИТ основан на окислительно-восстановительной реакции между элементами. В периодической таблице существует всего 90 природных элементов, которые могут участвовать в такой реакции. При этом литий является металлом с предельными характеристиками: самой низкой массой, самым низким электродным потенциалом ($-3,05$ В) и самой высокой токовой нагрузкой ($3,83$ А·ч/г). Благодаря этому литий характеризуется наибольшей теоретической удельной электрической энергией.

Не малую роль играет и доступность лития, запасов которого в земной коре в несколько раз больше, чем серебра и ртути.

Первоначально в качестве отрицательного электрода предполагалось использовать металлический литий, а в качестве положительного электрода – какой-либо оксид или халькогенид металла переменной валентности, способный к обратимому внедрению лития. Однако несмотря на огромные усилия, затраченные учеными и конструкторами во всем мире на решение проблемы циклирования металлического лития (его многократного растворения-осаждения), полностью решить эту проблему не удалось до сих пор. В результате неоднократно та или иная фирма объявляла о начале производства литиевых аккумуляторов, но через некоторое время была вынуждена прекратить их выпуск. Так, в 1987 г. крупномасштабное промышленное производство литиевых аккумуляторов было начато канадской фирмой "Moli", однако после нескольких случаев взрывов их выпуск был прекращен. Дело в том, что при нагревании лития выше критической температуры этот металл вступает в бурную реакцию с электролитом – и батарея взрывается. Повышение температуры батареи может происходить как при заряде, так и при больших токах разряда.

Выход из этой ситуации был найден в использовании соединений внедрения для изготовления не только положительного, но и отрицательного электродов. Такой вариант был назван литий-ионным аккумулятором (Li-ion battery). В литий-ионных аккумуляторах отрицательный электрод изготовлен из углеро-

да, в который ионы лития внедряются при заряде и извлекаются обратно при разряде. То же происходит и на катоде, так что ионы лития совершают челночные перемещения между анодом и катодом, а сама идея была названа "кресло-качалка" (rocking chair cells).

Первый работающий образец литий-ионного аккумулятора был продемонстрирован в 1990 г., тогда же японская фирма "Sony" начала их коммерческий выпуск. С тех пор рынок таких батарей заполняется с невероятной быстротой. Темпы роста промышленного производства литий-ионных аккумуляторов просто поразительны. Мировой объём продаж в период с 1991 по 1997 гг. вырос в 500 раз и составлял в 1997 г. 5 млрд. долларов (приводятся разные цифры). Та же фирма "Sony" выпускала их в 1997 г. 15 млн. штук ежемесячно (0,5 млн. штук в день). Столь быстрый прогресс объясняется тем, что литий-ионные аккумуляторы появились в благоприятное для себя время, которое совпало с периодом массовой популяризации портативной РЭА, для электропитания которой они используются. Так, в 2000 г. 67% всех литий-ионных аккумуляторов было предназначено для мобильных телефонов, 24% – для ноутбуков и 9% приходилось на все остальные области применения. В дальнейшем литий-ионные аккумуляторы начали использовать в военной и космической технике.

Как правило, литий-ионные аккумуляторы выпускают в цилиндрическом и призматическом вариантах; дисковые конструкции составляют лишь небольшую долю общего объёма производства (рисунок 2.21).

По величинам удельной энергии и рабочего напряжения литий-ионные аккумуляторы превосходят все другие вторичные ХИТ, но по некоторым параметрам уступают. Например, никель-кадмиевые аккумуляторы гораздо более работоспособны при отрицательных температурах, а никель-металлгидридные аккумуляторы допускают более быстрый заряд и разряд. Однако возможности улучшения характеристик традиционных вторичных ХИТ уже почти исчерпаны, между тем как литий-ионные аккумуляторы интенсивно развиваются.

Литий-ионные аккумуляторы более безопасны в эксплуатации, чем литиевые, однако их применение в РЭА требует соблюдения определенных правил и использования некоторых схемотехнических решений. Более того, использование литий-ионных систем без соответствующего уровня развития электроники было бы невозможным, так как они очень чувствительны как к режимам заряда, так и разряда. Чтобы обеспечить длительную и безопасную эксплуатацию, необходимо при заряде принимать во внимание температуру окружающей среды, не допускать перезаряд, ограничивать ток на уровне 1С и не допускать перезаряд ниже напряжения 2,2 В при разряде. Кроме того, к аккумуляторам, имеющим в результате саморазряда напряжения ниже 2,2 В, нельзя применять стандартные режимы заряда.



Рисунок 2.21 – Современные литий-ионные аккумуляторы

Так, внутри аккумулятора используют "отсекающий" сепаратор и предохранительные клапаны давления, размыкающие цепь нагрузки; внутри бата-

рей – электронные устройства для защиты от больших токов при заряде и разряде, а также от переразряда и чрезмерного повышения напряжения при заряде.

Большинство конструкций серийно выпускаемых зарубежных батарей для миниатюрной РЭА включает в себя микросхему, осуществляющую защитные функции. В других случаях (например, в мобильных телефонах) такая микросхема находится в самой аппаратуре. Рекомендуется выпускать литий-ионные аккумуляторы и батареи в габаритах, отличных от серийных, традиционно используемых в различных областях техники. Это необходимо для исключения возможности случайного попадания литий-ионных аккумуляторов в кассеты (корпуса) для других типов аккумуляторов, что может привести к взрывам.

Литий-ионные аккумуляторы являются наиболее перспективными аккумуляторами в настоящее время, их широко применяют в портативных компьютерах и мобильных устройствах связи. Это обусловлено:

- высокой плотностью электрической энергии, по крайней мере, вдвое большей, чем у NiCd того же размера, а значит и вдвое меньшими габаритами при той же самой емкости;
- большим числом циклов заряд/разряд (от 500 до 1000);
- хорошей работой на больших токах нагрузки, что необходимо, например, при использовании данных аккумуляторов в сотовых телефонах и портативных компьютерах;
- достаточно низким саморазрядом (2-5% в месяц плюс примерно 3% на питание встроенной электронной схемы защиты);
- отсутствием каких-либо требований к обслуживанию, за исключением необходимости предварительного заряда перед длительным хранением;
- позволяют проводить заряд при любой степени разряда аккумулятора.

Но и здесь примешивается "ложка дегтя": для аккумуляторов некоторых производителей гарантируется работа только при положительных температу-

рах, высокая цена (примерно вдвое превышающая цену NiCd-аккумуляторов) и подверженность процессу старения, даже в случае, если аккумулятор не используется. Ухудшение параметров наблюдается примерно после одного года с момента изготовления. После двух лет службы аккумулятор часто становится неисправным. Поэтому не рекомендуется хранить Li-ion аккумуляторы в течение длительного времени. Кроме этого, Li-ion-аккумуляторы должны храниться в заряженном состоянии. При длительном хранении в глубоко разряженном состоянии они выходят из строя.

Бум разработки и производства литий-ионных аккумуляторов пришёлся на 1990-е гг., что совпало с периодом кризисного развития науки и наукоёмкого производства сначала в СССР, а затем в России. Фактически в этой области отечественная промышленность длительное время оставалась на уровне конца 1980-х гг., в том числе отсутствовало производство литиевых аккумуляторов. Однако в последнее десятилетие ряд российских фирм начали демонстрировать опытные образцы литий-ионных аккумуляторов. Основными отечественными производителями литий-ионных аккумуляторов являются АО "Энергия" (г. Елец), АО "НПЦ "Ригель" (г. Санкт-Петербург), АО "Уралэлемент" (г. Верхний Уфалей), АО "НИАИ "Источник" (г. Санкт-Петербург), ООО "НПО ССК" (г. Москва).

В целом, достигнутый уровень отечественных литий-ионных аккумуляторов характеризуется показателями, приведёнными в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Характеристики отечественных литий-ионных аккумуляторов

№ п/п	Параметр	Значение
1	Разрядное напряжение	3,5-3,7 В
2	Ресурс	500-1000 циклов
3	Удельная энергия	100-160 Вт·ч/кг
4	Саморазряд	6-10% в месяц
5	Диапазон температур	минус 40°C ... 50°C
6	Максимальный ток разряда	2С
7	Нижний порог напряжения	2,5 или 2 В
8	Номинальная емкость	0,9-90 А·ч

№ п/п	Параметр	Значение
9	Масса	0,03-4,5 кг
10	Срок службы	5-10 лет

К наиболее значимым европейским производителям литий-ионных аккумуляторов относятся "Varta" и "Saft Groupe SA". В Северной Америке таковыми являются компании "Ultralife", "Quallion", "Yardney" в США и "Electrovaya Inc" и "Molicell" в Канаде. Наибольшая доля рынка в Азии принадлежит японским компаниям "Panasonic", "Sanyo", "Sony".

Дальнейшее развитие литий-ионных аккумуляторов, как считается, будет происходить как в направлении разработки сверхтонких конструкций, так и в направлении создания крупных и мощных аккумуляторов (например, для автомобильной промышленности).

В перечень приоритетных направлений фундаментальных и поисковых исследований в области систем энергетики радиоэлектронных комплексов, среди прочих, входит создание литий-ионных аккумуляторов с повышенной удельной энергией (свыше 2 кВт·ч/кг).

Литий-полимерный аккумулятор (Li-polymer, LiPo) – последняя новинка в литиевой технологии. Имея примерно такую же плотность энергии, что и Li-ion-аккумуляторы, литий-полимерные допускают изготовление в различных пластичных геометрических формах, нетрадиционных для обычных аккумуляторов, в том числе достаточно тонких по толщине, и способных заполнять любое свободное место в РЭА.

Этот аккумулятор, называемый также "пластиковым", конструктивно подобен Li-ion, но имеет гелевый электролит. В результате становится возможной упрощение конструкции элемента, поскольку любая утечка электролита невозможна. В настоящее время его часто применяют в мобильных телефонах, планшетных компьютерах и т. д.

Обычные бытовые литий-полимерные аккумуляторы не способны отдавать большой ток, но существуют специальные силовые литий-полимерные аккумуляторы, способные отдавать ток в 10 и даже 130 раз превышающий численное значение ёмкости в ампер-часах. Их широко применяют как аккумуляторы для радиоуправляемых моделей, а также в портативном электроинструменте, в некоторых современных электромобилях и беспилотных летательных аппаратах.

К их преимуществам можно отнести:

- бóльшая плотность энергии на единицу объёма и массы (в сравнении с литий-ионными);
- низкий саморазряд;
- толщина элементов от 1 мм;
- возможность получать очень гибкие формы;
- отсутствие эффекта памяти;
- незначительный перепад напряжения по мере разряда.

Диапазон рабочих температур литий-полимерных аккумуляторов довольно широкий: от минус 20°C до 40°C по данным производителей.

Среди недостатков отметим следующие:

- пожароопасность при перезаряде и/или перегреве (для борьбы с этим явлением все бытовые аккумуляторы снабжают встроенной электронной схемой, которая предотвращает перезаряд и перегрев вследствие слишком интенсивного заряда);
- необходимы специальные алгоритмы зарядки (зарядных устройств).

Глубокий разряд полностью выводит из строя литий-полимерный аккумулятор. Оптимальные условия хранения достигаются при 40%-м заряде от ёмкости аккумулятора. Аккумуляторы стареют, даже если не используются. На 2009 г. бытовало мнение, что через 2 года батарея теряет около 20% ёмкости. Соответственно, нет необходимости покупать аккумулятор "про запас" или

чрезмерно увлекаться "экономией" его ресурса. При покупке рекомендуется посмотреть на дату производства, чтобы знать, сколько данный ХИТ уже пролежал на складе.

На данный момент почти все производители добавляют в состав электролита консервант, так называемый ингибитор, который позволяет хранить аккумуляторы более двух лет. Это определяет особый порядок подготовки к первому использованию – расконсервацию. Расконсервация заключается в нескольких полных циклах, обычно 2-3, заряд-разряд, что разрушает ингибитор – происходит расконсервация и аккумулятор выходит на свою номинальную ёмкость. Если процедура расконсервации не производится, то происходит эффект, схожий с "эффектом памяти". А при больших токах во время эксплуатации консервант может начать интенсивно распадаться с выделением тепла и газов, что приведёт к вздутию аккумулятора и потере свойств электролита.

В России литий-полимерные аккумуляторы выпускает, например, ООО "Радиотех" (Санкт-Петербург). Так, батареи серии RT-LP являются универсальными источниками электроэнергии и разработаны для любых типов мобильных устройств и портативной техники. При толщине менее 20 мм батареи модели RT-LP 400W для 12 В потребителя обладает энергоемкостью 30 А·ч. Заряд батареи производится от промышленной сети 220 В с помощью встроенного зарядного устройства. Батареи имеют цветовую систему индикации заряда/разряда, встроенные средства защиты и обладают возможностью телеметрии состояния батареи и вывода ее основных параметров на персональный компьютер. Жизненный цикл батарей данного типа составляет не менее 5 лет (300-500 перезарядов).

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO_4) – это безусловный лидер среди аналогов, он не имеет равных по прочностным, емкостным и прочим характеристикам, быстро заряжается, устойчив к влажности, служит долгое время, может храниться на закрытом и открытом пространстве.

LiFePO₄ аккумуляторы изобрели в 1996 г. в США. По сравнению с популярными литий-ионными аккумуляторами он характеризуется меньшей себестоимостью, имеет повышенный уровень термоустойчивости, гораздо менее токсичен. Другие их преимущества:

- высокий коэффициент полезного действия (95%);
- полное отсутствие эффекта памяти и нетребовательность к алгоритму заряда;
- низкий уровень саморазряда – батарея LiFePO₄ способна потерять всего лишь около 20% за десятилетие;
- большое количество циклов заряда-разрядки – не менее 2000 при умеренной эксплуатации и до 8000 циклов в щадящем режиме;
- небольшая масса устройства даже при внушительных габаритах;
- отсутствие риска воспламенения и взрыва.

Благодаря удобству, надежности и компактным размерам, феррофосфатные аккумуляторы применяют в различных областях бытового направления, а также крупных промышленных объектах (автономных энергосистемах, освещении, приборах, коммунальном хозяйстве, на транспорте).

Сегодня производство LiFePO₄ аккумуляторов основано на применении нанотехнологий, что позволяет существенно повысить эффективность, мощность и безопасность устройства, его химическую и термическую стабильность. При этом вместо кобальта используются фосфаты, которые не наносят вред окружающей среде при некорректной утилизации.

Конструкция батарей типа LiFePO₄ включает в себя электроды, плотно прижатые к сепаратору с каждой стороны. Чтобы обеспечить полноценное питание устройства, анод и катод подключены к набору токосъемников. Внутренняя начинка находится в пластиковом корпусе, внутри которого присутствует электролит. На корпус устанавливают микроконтроллер, отвечающий за регулировку входящего тока в процессе зарядки.

Особенность принципа работы такого аккумулятора заключается во взаимодействии углерода и феррофосфата. В качестве переносчика электрического заряда выступает литиевый ион с положительным зарядом. В процессе эксплуатации он внедряется в кристаллическую решетку других веществ, образуя тем самым химические связи.

В России производством LiFePO_4 аккумуляторов занимаются фирмы «Бистион», «Лиотех», «Вело Аккумулятор».

Литий титанат – вариант литий-ионных аккумуляторов, использующий титанат лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) в качестве анода. Для увеличения площади анод имеет нанокристаллическое строение. Такое решение позволяет обеспечить площадь поверхности анода до $100 \text{ м}^2/\text{г}$, по сравнению с $3 \text{ м}^2/\text{г}$ для углерода, что позволяет значительно увеличить скорость перезарядки и обеспечить высокую плотность тока. Кроме того, эти аккумуляторы имеют высокую надежность и могут работать при более низких температурах, чем классические литий-ионные.

Недостатком литий-титанатных аккумуляторов является более низкое рабочее напряжение ($2,4 \text{ В}$), чем у обычных литий-ионных, имеющих стандартное напряжение $3,7 \text{ В}$.

Серебряно-цинковые аккумуляторы (система $\text{Zn} \mid \text{KOH} \mid \text{AgO}$) выгодно отличаются от кислотных и щелочных значительно бóльшей удельной ёмкостью (на единицу массы), которая у них в 4-5 раз выше, более высоким КПД и сравнительно небольшим саморазрядом. Кроме того, серебряно-цинковые аккумуляторы могут работать при значительном понижении атмосферного давления. Срок службы серебряно-цинковых аккумуляторов исчисляется 300-500 циклами заряд-разряд.

Серебряно-цинковые аккумуляторы собирают в корпусе из пластика. В качестве отрицательного электрода используют пластины из смеси порошка цинка и окиси цинка. Положительными электродами являются пластины из оксида серебра или чистого серебра. В качестве электролита используют раствор

едкого калия. Внешний вид отечественного аккумулятора СЦСЗ (производство АО "Электроисточник") приведён на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Отечественные серебряно-цинковые аккумуляторы СЦСЗ

Серебряно-цинковые аккумуляторы характеризуются следующими основными показателями:

- ЭДС заряженного аккумулятора 1,75-1,8 В;
- ЭДС разряженного аккумулятора 0,7-0,6 В;
- саморазряд в сутки 0,3-0,4%.

Напряжение серебряно-цинкового аккумулятора, подключенного к нагрузке, быстро падает до 1,5 В и на этом уровне держится до тех пор, пока не будет израсходована вся ёмкость аккумулятора. После этого напряжение быстро уменьшается, что является признаком того, что аккумулятор требуется ставить на зарядку. Благодаря высокой стабильности напряжения серебряно-цинковые аккумуляторы в ряде случаев используют в качестве источников опорного напряжения.

Серебряно-цинковые аккумуляторы малочувствительны к большим разрядным токам. Их можно разряжать в течение 15 мин. почти до полного использования ёмкости. Допускается частый глубокий разряд, возможен быстрый

заряд: до 80% ёмкости за 15 мин. Диапазон рабочих температур от минус 60°C до 80°C.

Этот тип аккумуляторных батарей имеет очень малое внутреннее сопротивление, а также большую величину удельной энергоёмкости. Основной отличительной особенностью серебряно-цинковых аккумуляторов можно назвать возможность высокой отдачи тока. На 1 А·ч ёмкости аккумулятора ток может достигать 50 А.

Следует помнить о том, что ёмкость серебряно-цинковой батареи сильно падает при отрицательных температурах. Примечательно, что серебряно-цинковые батареи, функционирующие при отрицательной температуре, обогревают.

Серебряно-цинковые аккумуляторы применяют там, где требуются аккумуляторы небольшого объёма и массы (военная техника, геофизическое и геологическое оборудование, космическая и авиационная техника).

Во время лунной программы "Аполлон" серебряно-цинковые аккумуляторы применяли в луноходах для перевозки астронавтов. Ёмкость этих аккумуляторов была равна 120 А·ч, напряжение 36 В. Ещё один пример использования – энергетические установки торпед СЭТ-65 и УСЭТ-80 в советских и российских подводных лодках. Кстати, последние активируются с помощью морской воды.

Таким образом, можно выделить следующие основные преимущества серебряно-цинковых аккумуляторов:

- удельная энергия в несколько раз превышает значения других типов аккумуляторов;
- механическая прочность;
- небольшие размеры и масса;
- чистое производство по сравнению с другими батареями;
- выдерживают высокие разрядные токи;

- небольшой ток саморазряда (до 15% от ёмкости в месяц);
- стабильные разрядные характеристики;
- устойчивы к недозаряду, перерыву при зарядке и глубокому разряду.

Отметим и недостатки:

- высокая цена;
- небольшой срок службы по сравнению с другими типами (до 100 циклов заряд-разряд);
- долго заряжаются (до 20 ч);
- сильное газовыделение;
- плохо переносят перезаряд.

2.2.4 Эксплуатация химических источников тока

Одно из важных преимуществ первичных ХИТ состоит в простоте их эксплуатации. Большинство таких источников не требуют никакого обслуживания. Подготовка к работе заключается в проверке внешнего вида и срока годности, а иногда и фактических параметров ХИТ. При подключении ХИТ необходимо следить за соблюдением полярности и надёжности контактов (особенно если эти контакты находятся в неблагоприятных коррозионных условиях). Несоблюдение полярности может привести к выходу из строя РЭА.

Первичные ХИТ, как правило, используют до выработки всей ёмкости. Однако в ряде случаев следует избегать их полного разряда и особенно длительного хранения в РЭА после окончания разряда. В некоторых случаях происходят взрывы герметичных элементов, в частности элементов ртутно-цинковой системы и отдельных типов литиевых элементов при хранении в разряженном состоянии.

Некоторые типы первичных ХИТ требуют более сложного обслуживания. Так, перед использованием резервных батарей необходимо провести определённые операции для их активизации. При эксплуатации ХИТ в условиях низ-

ких температур в ряде случаев приходится решать вопросы их обогрева.

Аккумуляторы и аккумуляторные батареи требуют более сложного ухода, чем первичные ХИТ, и эти осложнения в значительной степени связаны с необходимостью процесса заряда. Если режим разряда аккумуляторов определяется особенностью питаемой РЭА, то режим заряда зависит в основном от особенностей самих аккумуляторов. Из-за газовыделения при заряде большинство аккумуляторов имеет негерметичную конструкцию, что влечёт за собой дополнительные эксплуатационные осложнения по сравнению с первичными ХИТ.

Различают три режима эксплуатации аккумуляторов: переключения, буферный и аварийный.

В режиме *переключения* аккумуляторная батарея разряжается и заряжается поочередно. Это характерно, например, для портативной РЭА.

В *буферном* режиме аккумуляторную батарею подключают параллельно другому источнику электроэнергии, при возрастании нагрузки батарея частично разряжается, при снижении нагрузки она вновь подзаряжается. В буферном режиме работают стартерные батареи на автомобилях, аккумуляторные батареи космических аппаратов и т. д.

В *аварийном (резервном)* режиме аккумуляторную батарею постоянно поддерживают в состоянии готовности к работе, но подключают к цепи только в аварийной ситуации при прекращении подачи электроэнергии от основного источника.

В большинстве случаев зарядные устройства аккумуляторов снабжены системами, позволяющими поддерживать постоянным один из электрических параметров: напряжение или ток заряда. В зависимости от того, какой электрический параметр выдерживается, различают два основных способа заряда: при постоянном токе и при постоянном напряжении.

Устройства для заряда при постоянном токе обычно более просты. Так, например, ряд бытовых зарядных устройств для герметичных аккумуляторов выполняются по базовой схеме.

Удобством заряда при постоянном токе является простота расчёта количества пропущенного электричества как произведения тока и времени заряда. Однако этот способ заряда имеет и свои недостатки. При малом токе время заряда велико. При большом токе к концу заряда ухудшается заряжаемость, так как неравномерное распределение тока по толщине пористых электродов вызывает в наружных, уже заряженных слоях, значительное газовыделение, в то время как внутренние слои лишь медленно дозаряжаются.

Во время заряда при постоянном напряжении начальный ток велик и далее непрерывно уменьшается во времени. К концу заряда ток уменьшается до очень малых значений, из-за чего время полного заряда велико.

Большое значение имеет правильный выбор напряжения заряда – чем оно меньше, тем меньше побочные процессы и газовыделение при заряде, но тем больше продолжительность заряда. Оптимальное напряжение зависит от температуры и от состояния батареи, что усложняет применение этого способа. Недостатком этого метода является также перегрев аккумуляторов из-за большого начального тока.

Для преодоления недостатков, присущих выше рассмотренным простым способам заряда, используют разнообразные комбинированные способы заряда. Во всех этих способах с целью сокращения газовыделения используют в начальной стадии большие токи заряда, а в конечной – небольшие токи. В некоторых случаях для заряда аккумуляторов (особенно щелочных) используют асимметричный переменный ток, полученный наложением постоянного и переменного токов. Очень важно при заряде аккумуляторов определять окончание процесса заряда, так как для ряда аккумуляторов не допустимы недозаряды или перезаряды.

При нормальной эксплуатации большинство малогабаритных ХИТ не представляет экологической опасности. Как правило, они герметичны и не выделяют в окружающую среду вообще никаких веществ. Более крупные энерго-

установки – транспортные и стационарные аккумуляторные батареи с водным электролитом – негерметичны и даже при нормальной эксплуатации выделяют вредные вещества (взрывоопасные смеси водорода и кислорода, капли серной кислоты или щёлочи).

Более существенную экологическую нагрузку представляет работа ХИТ в аварийных режимах: марганцево-цинковые элементы при полном разряде текут, некоторые ртутные и литиевые ХИТ взрываются и т. д.

Существенную экологическую проблему представляет утилизация отработанных ХИТ. В этом отношении сложности начинаются со сбора таких ХИТ, особенно малогабаритных, которые обычно выбрасывают. Более крупные установки направляют на утилизацию.

2.2.5 Области применения химических источников тока

Транспортные средства (стартерные и вспомогательные батареи). Во всех транспортных средствах с двигателями внутреннего сгорания используют аккумуляторные батареи для запуска двигателей и для электропитания бортовых устройств. В автомобилях батарея выполняет три функции: электропитание стартера для запуска двигателя, электропитание системы зажигания при запуске, когда еще не работает генератор, и электропитание вспомогательных устройств при неработающем двигателе. Аккумуляторные батареи на самолётах, кроме того, должны обеспечивать аварийный режим, то есть работу всей жизненно важной бортовой РЭА при выходе из строя генератора.

Стартерные батареи работают в буферном режиме. При запуске двигателей они разряжаются большими токами. Работы в стартерном режиме кратковременны (не более 20 секунд на автомобилях и 60 секунд на самолетах). Поэтому в нормальных условиях стартерные батареи подвергаются неглубоким разрядам. При одиночном запуске расходуется от 3 до 10% ёмкости, после чего сразу начинается подзаряд. Одновременно батареи должны иметь достаточный энергозапас (для освещения, работы в аварийном режиме и т. д.).

В качестве стартерных батарей используют в основном батареи из свинцовых и значительно реже из никель-кадмиевых и серебряно-цинковых аккумуляторов (последние, как правило, только в авиации).

Автомобильные стартерные батареи имеют номинальное рабочее напряжение 12 В и ёмкость от 40 до 200 А·ч. Авиационные батареи рассчитаны на номинальное напряжение 24 В.

В транспортной энергетике значительное место занимают ХИТ, предназначенные только для обеспечения вспомогательных нужд, но не рассчитанные на запуск (рисунок 2.23). Сюда относятся железнодорожные, судовые и другие аналогичные батареи, применяемые для освещения, а также для электропитания кондиционеров, местных радиостанций, средств сигнализации и на остановках, когда не работают генераторы. Такие батареи составляют из свинцовых и никель-железных аккумуляторов. Вспомогательные батареи эксплуатируют в жёстких условиях: в широком диапазоне температур (практически от минус 50°С до 50°С), при повышенной влажности, повышенной загрязнённости (вагонные батареи), при значительных механических нагрузках. Ёмкость железнодорожных батарей составляет 70-500 А·ч.



Рисунок 2.23 – Аккумуляторы в составе железнодорожного локомотива

Электрические транспортные средства (тяговые батареи). В ряде случаев транспортные средства не могут иметь двигатель внутреннего сгорания. В этих случаях используют тяговые электродвигатели и специальные тяговые батареи. Тяговые батареи работают в режиме переключения и рассчитаны, как правило, на глубокий разряд в широком интервале нагрузок. К ним предъявляют требования большого срока службы и большого ресурса. Обычно они подлежат ремонту. В качестве тяговых источников используют большей частью свинцовые и никель-железные аккумуляторы. Они имеют ёмкость от 40 до 1200 А·ч, а для подводных лодок – до 5000 А·ч. Такие батареи, как правило, имеют способность к форсированному заряду.

Электромобили. За последние 40 лет число автомобилей в мире выросло на порядок и превысило 700 млн. шт. Автомобили представляют серьёзную угрозу для человека и окружающей среды с точки зрения экологии. В последние десятилетия все вновь производимые автомобили снабжают нейтрализаторами выхлопных газов, но они не решают проблему принципиально.

Одним из радикальных путей решения экологической проблемы транспорта является применение электромобилей. Сейчас все крупные мировые автоконцерны ("Toyota", "Ford", "Hyundai", "Honda", "GM" и другие) разрабатывают или уже производят электромобили, которые принято подразделять на три группы.

1. Электромобили с энергоустановкой на основе топливных (водородных) элементов. Они существуют, но пока очень дороги. Коммерциализация рассматривается лишь в далёкой перспективе.

2. Электромобили с тяговым аккумулятором. Производятся сейчас в небольших масштабах. Среди них наиболее известен электромобиль Tesla Model S (аккумуляторная батарея производства компании "Panasonic"). Согласно US Environmental Protection Agency (EPA) заряда литий-ионного аккумулятора с энергией 85 кВт·ч хватает на 426 км, что позволяет Tesla Model S преодолевать

наибольшую дистанцию из доступных на рынке электромобилей. Базовая модель Tesla Model S использует жидкостное охлаждение двигателя переменного тока, который производит 362 лошадиных силы. В основе аккумулятора автомобиля (их 16 блоков) находится около 7 тысяч литий-ионных аккумуляторов типа 18650 (18 мм в диаметре и 650 мм длиной), уложенных с особым распределением положительных и отрицательных контактов, который является коммерческой тайной.

В число других востребованных производителей аккумуляторных батарей для электромобилей входят швейцарская компания "MES DEA", "Beta Research&Development Ltd" из Великобритании, греческая фирма "Sunlight", немецкая "VARTA". Особого внимания заслуживает анонсированный на 2018 г. запуск крупнейшего в мире завода по производству аккумуляторных батарей от компании "TESLA".

3. Гибридные электромобили. Представляют собой гибрид электромобиля и традиционного автомобиля. Гибридные системы считаются сейчас более перспективными, чем "чистые" электромобили, перечисленные в предыдущих пунктах. В гибридных системах к дизельному двигателю добавлен электродвигатель с генератором, тяговым аккумулятором. В зависимости от нагрузки и скорости движения происходит автоматическое переключение между энергоустановками. В периоды работы дизеля происходит подзаряд тягового аккумулятора. Гибридные установки легче и дешевле, они уже давно коммерциализованы. В октябре 2007 г. было реализовано 13158 автомобилей Toyota Prius с гибридным двигателем – на 51 % больше, чем за соответствующий период прошлого 2006 г. Общее количество гибридных автомобилей Toyota Prius превысило 1 млн. шт. в мае 2007 г.

Ниже приведены требования стандарта USABC-2002 (United States Advanced Battery Consortium) к тяговому аккумулятору для электромобиля:

- удельная энергия при C/3 – 200 Вт·ч/кг и 300 Вт·ч/л;

- удельная мощность – 400 Вт/кг и 600 Вт/л (при 80% глубине разряда);
- срок службы – 10 лет;
- ресурс – 1000 циклов (при 80% глубине разряда);
- цена энергии – <100 долларов США за 1 кВт·ч;
- температурный диапазон – от минус 40°C до 85°C;
- продолжительность заряда – 3-6 ч;
- способность разряжаться на 75% за 1 ч;
- потеря мощности и ёмкости – 20%;
- КПД – не менее 80%;
- саморазряд – <15%/мес;
- необслуживаемость.

Нетрудно убедиться, что целиком этим требованиям не удовлетворяет ни одна из рассмотренных нами перезаряжаемых электрохимических систем. Ближе всего по ряду параметров никель-металлогидридные и литиевые аккумуляторы, которые и используют в гибридных электромобилях (рисунок 2.24).

Ещё ближе к этим требованиям первичные воздушно-цинковые механически перезаряжаемые ХИТ (но они тоже не удовлетворяют пока полностью). То есть они не являются аккумуляторами в обычном понимании, а являются первичными элементами с возможностью механической (по типу картриджа) замены анода. Израильская фирма "Electric Fuel Limited" создаёт в Европе сеть станций для механической перезарядки таких электромобилей, а также сеть заводов по регенерации цинка и электролита. Все это требует огромных капиталовложений.

Помимо в легковых электромобилях, тяговый аккумулятор широко используют в следующих видах транспорта:

- электроавтобусы;
- троллейбусы;
- трамваи;

- грузовые машины;
- промышленные транспортные средства (погрузчики, кары, штабелеры);
- скутеры, велосипеды, мотоциклы;
- поезда.



Рисунок 2.24 – Аккумулятор электромобиля Tesla Model S

Электрические самолеты. Электродвигатели на летательных аппаратах начали применять еще в XIX веке: 8 октября 1883 г. французский воздухоплаватель Г. Тиссандье совершил первый полет на дирижабле с использованием двигателя Вернера фон Сименса, питавшегося от аккумуляторной батареи массой 435 кг.

Первыми самолетами с повышенной электрификацией оборудования истории авиации называют две машины. Это бомбардировщик Пе-2 (СССР, 1939 г.) и истребитель "Focke-Wulf FW-190" (Германия, 1941 г.). На советской

машине насчитывалось около полусотни электромоторов. Они применялись, в частности, для систем управления самим самолетом и бомбосбрасывателем, поддержанием давления в гидравлике и т. д. В немецком самолете были электрифицированы подача топливной смеси, работа закрылков, перезарядка вооружения. Шасси "фоккера" оснастили электромеханическим механизмом выпуска.

Первая авиамодель самолета с электродвигателем поднялась в небо в 1957 г., а распространение электрических авиамоделей началось с 1970-х гг. В 1973 г., используя популярный австрийский мотопланер "Brditschka HB-3", Ф. Милишки и Х. Брдишка построили первый электрический самолет "Militky MB-E1", работавший от аккумулятора. Самолет пилотировал Х. Брдишка, который совершил на нем 14-минутный полет, показав принципиальную возможность использования электрических двигателей в авиации.

Первым человеком, поднявшим в 1941 г. в воздух электрический вертолет, был советский инженер-испытатель-летчик В.А. Карпов, а создателем этой машины был И.А. Гевондович – крупнейший советский ученый в области электротехники, работавший в ВЭИ в начале 1930-х гг.

Дальнейшему прогрессу в создании электрических самолетов и вертолетов мешал источник электроэнергии недостаточной емкости. Только в 1990-е гг., с появлением новых типов аккумуляторов, самолеты с электродвигателем получили новое рождение.

Идея использования электроэнергии в авиации всегда была чрезвычайно популярна, особенно среди экологов. В последнее время развитие электрических самолетов достигло широких масштабов. Реализация концепции "полностью электрического самолета" (ПЭС) планомерно осуществляется в США, Европе и азиатских странах.

Концепция ПЭС предполагает существенное изменение облика силовой установки самолета вследствие ликвидации отбора воздуха для системы конди-

ционирования и противообледенительной системы, устранения привода гидросистемы, интеграции источника электроэнергии с авиационным двигателем и т. д. Проведенные исследования показали, что за счет реализации концепции ПЭС масса силовой части системы управления полетом в ближайшие 5-7 лет может быть снижена на 20%, а через 10-15 лет – на 40%.

Так, на самолете А-380 электрогидростатические приводы используются в качестве резервных для отклонения внутренних и внешних секций руля высоты, средних и корневых элеронов (флаперонов). Это позволило отказаться от третьей центральной гидросистемы, что обеспечило уменьшение массы самолета на 450 кг. На самолете F-35 в системе управления полетом используются только электрогидростатические рулевые приводы, получающие питание от источников электроэнергии, за счет чего полностью центральная гидросистема самолета. Это позволило уменьшить массу системы управления на 350 кг.

В настоящее время создана и эксплуатируется система наземного передвижения воздушного судна с электроприводом колеса. Система включает в себя электропривод, интегрированный в шасси. Использование электропривода позволяет двигаться по перрону без использования основных двигателей, что позволяет повысить экономию топлива до 200 л за взлет и экологичность.

Для практически полного захвата авиации электрической тягой необходимы легкие и мощные электродвигатели на основе сверхпроводящих материалов и новые источники электроэнергии, обладающие большой мощностью и продолжительностью работы. Прогресс в области развития аккумуляторов позволит сделать малую авиацию полностью электрической.

Однако для больших и скоростных летательных аппаратов этого будет недостаточно. Потребуются принципиально новые источники электроэнергии, например, атомные.

К настоящему времени наибольших успехов в создании электрических самолётов добилась европейская авиастроительная корпорация "Airbus". Обу-

словлено это, в первую очередь, тем, что в будущем стоимость нефти, а равно и топлива, будет только расти. Исходя из этого корпорация "Airbus" уже несколько лет трудится над созданием электрических самолётов, причём речь идёт как о частных летательных аппаратах, так и о полномерных авиалайнерах, способных перевозить на своём борту до 150-180 пассажиров. Один из примеров таких самолетов – двухместный "Airbus E-Fan". Электросамолёт впервые поднялся в воздух 11 марта 2014 г., на аэродроме близ Бордо (Франция). Одно из колес основного шасси имеет привод от электромотора, что позволяет разогнать самолёт на земле до скорости 55 км/ч, что экономически более выгодно (позволяет сэкономить заряд батареи). Часовой полёт самолёта обходится в 16 долларов.

"Airbus E-Fan" обладает достаточно компактными размерами и хорошей аэродинамической формой, что обеспечивает ему при использовании относительной маломощных силовых электрических установок, максимально высокие показатели скорости и манёвренности. Более того, летательный аппарат выполнен с применением лёгких и прочных композитных материалов, что позволяет ему иметь высокую надёжность и обладать небольшим весом.

"Airbus E-Fan" обладает двумя электрическими авиадвигателями, каждый из которых способен развивать тягу в 40 л.с., что, в свою очередь, позволяет самолёту производить перелёты на дистанциях до 160-500 км при крейсерской скорости в 160 км/ч.

В полете самолет "Airbus E-Fan" получает энергию от батареи емкостью 40 А·ч, которая состоит из 120 литий-полимерных аккумуляторов.

В 2016 г. в Германии был осуществлен первый 15-минутный полет самолета "HY4" на водородных топливных элементах. На базе "HY4" планируется создать более крупный водородный пассажирский самолет, рассчитанный на перевозку до 19 человек.

Водород на самолете "НУ4" хранится под давлением в двух баках. Также на самолете установлена 45-кВт литий-полимерная аккумуляторная батарея, служащая дополнительным источником электроэнергии в моменты взлета, увеличения скорости и набора высоты.

Масса водородных баков составляет 170 кг. Они способны под давлением вмещать 9 кг водорода. Масса водородного топливного элемента составляет 100 кг, а аккумуляторной батареи – 135 кг. Пустой самолет имеет массу 1,5 т, он может развивать скорость до 200 км/ч и совершать полеты на расстояние до 1400 км.

Стационарные установки (стационарные батареи). Стационарные батареи эксплуатируют в более мягких условиях, чем транспортные. Они всегда находятся в нормальном положении, поэтому можно не заботиться об их тщательной герметизации. Отсутствие вибраций и других механических нагрузок существенно упрощает требования к конструкции батарей, аккумуляторов и электродов. Зачастую стационарная РЭА размещается в помещениях и работает в оптимальном температурном режиме. Однако в ряде областей применения, например, на автоматических удаленных метеостанциях, стационарные установки работают в жестких климатических условиях при температурах от минус 50°С до 50°С. Стационарные батареи часто имеют большую ёмкость (сотни и тысячи ампер-часов). Массогабаритные показатели обычно не имеют решающего значения.

Стационарные батареи, предназначенные для длительных разрядов небольшими токами, часто состоят из первичных элементов, например, щелочных. Такие батареи используют на железнодорожном транспорте для электропитания сигнализации, стрелочного хозяйства и т. д. Длительная работа без обслуживания характерна для автономных и удалённых метеостанций и т. д. На ряде телефонных станций аккумуляторные батареи используют в качестве источников постоянного тока. Свинцовые стационарные аккумуляторы большой

ёмкости, работающие в буферном режиме, используют на электростанциях для электропитания вспомогательного оборудования. Широко используют аварийные аккумуляторные установки, обеспечивающие освещение и работу важных агрегатов и устройств при перебоях в работе электросети. Такие источники находятся в постоянной готовности и рассчитаны на работу в течение нескольких часов. Аварийные установки монтируются в больницах (для бесперебойной работы операционных и реанимационных отделений), в защитных сооружениях гражданской обороны, на важных промышленных объектах и в вычислительных центрах.

Аварийные источники тока в обычных условиях редко разряжаются: для компенсации саморазряда их постоянно или периодически подзаряжают.

Портативная РЭА. Представляет собой наиболее широкую область применения ХИТ как по количеству отдельных источников тока, так и по их номенклатуре. Как правило, используют элементы и батареи малой и средней ёмкости – от 0,01 до 300 А·ч.

Номенклатура РЭА, работающей от ХИТ, включает в себя различные радиотехнические устройства (радиоприёмники, мобильные средства связи, навигационное оборудование) как бытового, так и военного назначения, переносные фонари, кино- и фотоаппаратуру, миниатюрные устройства (электронные часы, слуховые аппараты, калькуляторы), игрушки, бытовую технику, разнообразные измерительные приборы, медицинские устройства (электрокардиостимуляторы и т. д.).

Широкая номенклатура РЭА определяет и большое разнообразие условий её эксплуатации. Так, например, батареи для карманных фонарей работают в широком интервале температур. А батареи электрокардиостимуляторов – в практически изотермических условиях.

ХИТ, применяемые в военной технике и медицине, должны иметь очень высокую надёжность, которая не требуется, например, для батарей в электрофицированных игрушках.

Во многих случаях важной характеристикой ХИТ является стоимость и ради её уменьшения идут на некоторые ухудшения электрических характеристик. В других случаях наиболее существенной оказывается какая-нибудь одна характеристика, например, стабильность рабочего напряжения, удельная энергия, диапазон рабочих температур или срок годности.

В большинстве случаев ХИТ портативной РЭА должны иметь невыливающийся электролит и допускать транспортировку и эксплуатацию в любом положении.

Наибольшее распространение в этой области получили щелочные элементы и батареи, а также литий-ионные аккумуляторы.

Мобильные телефоны. Единицы современных пользователей помнят никель-кадмиевые аккумуляторы, которые устанавливались в мобильные телефоны, когда те не то что в карман, но даже в сумку не всегда помещались.

Главным преимуществом таких батарей была устойчивость к температурным перепадам. Они легко переживали повреждения и имели долгий срок службы (до 1000 циклов). Однако для поддержания эксплуатационных свойств аккумулятор необходимо было периодически полностью разряжать. Иначе те участки, которые не разряжаются, начнут кристаллизироваться (отмирать). Помимо того, у никель-кадмиевых аккумуляторов были высокий процент саморазряда (за первые сутки до 10%) и низкое соотношение ёмкости и физических размеров.

Следующим витком в развитии мобильных телефонов стало использование никель-металлгидридных батарей. Их период существования был невероятно коротким. Причиной тому послужило отсутствие каких-либо преимуществ на фоне своего предшественника.

В настоящее время практически во всех мобильных телефонах используют литий-ионные аккумуляторы (рисунок 2.25). Они более долговечные и менее вредные для окружающей среды, чем никель-кадмиевые, и при этом обладают гораздо большей энергетической плотностью: при скромных физических размерах имеют относительно высокую ёмкость. У них отсутствует "эффект памяти", им свойственна низкая скорость саморазрядки. Этот вид аккумуляторов не требует какого-либо особого обслуживания, но при правильном хранении (в заряженном состоянии) и эксплуатации с соблюдением температурного режима он прослужит гораздо дольше. Для литий-ионных аккумуляторов в среднем характерно от 500 до 1000 циклов зарядки-разрядки.



Рисунок 2.25 – Литий-ионный аккумулятор
в составе телефона iPhone 5s ("Apple")

Литий-полимерные аккумуляторы представляют собой усовершенствованную модель литий-ионных аккумуляторов, но при этом стоят дешевле. Они отличаются высокой энергетической плотностью, медленной саморазрядкой, а также они ещё более безопасны для окружающей среды. Как и литий-ионным

аккумуляторам, им свойственно постепенное старение. Для литий-полимерных аккумуляторов в среднем характерно от 500 до 600 циклов зарядки-разрядки.

Если учесть, что на одной зарядке аккумулятора мобильный телефон может непрерывно работать в течении 16-24 ч, то получается, что срок работы мобильного телефона определяется исключительно сроком службы аккумуляторной батареи, а это – около двух лет непрерывной эксплуатации, естественно, с использованием периодического заряда батареи.

Если оценивать срок работы мобильного телефона без подзарядки, то есть в автономном режиме, а это при эксплуатации в среднем по интенсивности режиме – около трех суток, то этот параметр, вообще, не идет ни в какое сравнение со сроком службы микросхемы (десятки лет). Если учесть тот фактор, что от энергетических характеристик батареи зависит количество и скорость обработки информации, возможности ее визуального отображения, то можно сделать вывод о том, что, практически, все потребительские свойства носимых электронных устройств определяются свойствами именно аккумуляторной батареи.

Получается, что такие параметры, как количество ядер процессора, быстродействие, объем памяти, размер экрана, то есть те параметры, на которые опираются рекламные компании фирм-производителей при продвижении товара на рынке, уходят на второй план, а определяющими являются характеристики аккумуляторной батареи, используемой в этом устройстве. Следовательно, особое внимание при эксплуатации электронного устройства следует уделять правильному обращению с аккумулятором.

Неверный уровень разряда, при котором осуществляется переход в режим заряда, приводит к снижению емкости аккумулятора, а, следовательно, снижению времени автономной эксплуатации электронного устройства. Использование неоригинальных зарядных устройств, неверный выбор режима заряда также снижают время службы аккумуляторов. Интересно, что в правилах эксплуа-

тации автономных электронных устройств не прописываются эти важные параметры. Контроль уровня заряда осуществляется с помощью программных средств, имеющих, как правило универсальный характер, т.е. без учета специфических свойств того или иного типа аккумуляторных батарей. Часто пороговый уровень заряда, при котором на экран электронного устройства выдается сообщение типа «Низкий уровень заряда. Подключите зарядное устройство!» предлагается установить самим пользователям, компетентность подавляющего большинства которых в этом вопросе, как правило, крайне низка.

Для некоторых типов аккумуляторных батарей уровень напряжения на электродах настолько критичен, что может привести не только к выходу аккумулятора из строя, но даже к возгоранию и взрыву. Например, литиевые аккумуляторы снабжаются электронным контроллером слежения за уровнем заряда. Контроль осуществляется по напряжению на электродах, причем, отключение аккумулятора от нагрузки или от зарядного устройства происходит как при превышении напряжением определенного порогового значения (4,2 В), так и при снижении напряжения (2,5 В), так как полный разряд литиевой батареи может привести к выходу ее из строя.

Интересно, что фирмы-разработчики автономных электронных устройств прекрасно понимают проблемы обеспечения качественными источниками энергии производимых ими телефонов. Однако низкое качество аккумуляторов фирмы-производители обращают себе во благо, искусственно снижая срок службы электронных устройств для возможности увеличения объемов продаж новых изделий.

Казалось бы, что может быть проще, как замена потерявшего емкость аккумулятора мобильного телефона? Эта операция должна быть не сложнее замены батареек в фонарике или SIM-карты. Однако выход из строя аккумулятора приводит, в большинстве случаев, к замене всего электронного устройства. И это сознательная политика фирм-изготовителей. Более того, некоторые фирмы

выпускают мобильные телефоны с неизвлекаемыми в домашних условиях аккумуляторами. Обращение же в сервисный центр довольно хлопотно, к тому же стоимость замены аккумулятора не многим ниже стоимости нового мобильного телефона. Как правило, клиент предпочитает замену электронного устройства на новое замене аккумулятора в старом. Такую политику можно отнести к способу шантажа клиента с целью приобретения последним нового «гаджета».

Специальные области применения ХИТ. Это военная и космическая техника, а также некоторое научное оборудование. Примерами специальных объектов, использующих ХИТ, могут служить искусственные спутники Земли и космические корабли, ракеты и торпеды, батискафы и другие подводные аппараты и т. д.

Анализ применяемости источников автономного электропитания в объектах специального назначения показывает, что наиболее массовыми по областям и количеству объектов применения являются ХИТ.

Среди ХИТ для таких объектов можно выделить две группы: источники, рассчитанные на кратковременную большую нагрузку, и источники, предназначенные для длительного разряда небольшими токами.

На космических объектах широко применяют энергосистемы, состоящие из полупроводниковых солнечных батарей и аккумуляторных батарей, работающих в буферном режиме. Аккумуляторные батареи на искусственных спутниках Земли обеспечивают энергоснабжение РЭА во время пребывания спутника в тени Земли, а также при больших нагрузках, превышающих возможности солнечных батарей. В остальное время аккумуляторы заряжают от солнечных батарей.

К таким ХИТ, как и к остальному оборудованию специальной техники, предъявляют повышенные требования по удельным характеристикам и по надёжности. Они должны иметь большое время хранения. Часто при их хранении в изделии они должны постоянно находиться в готовности к разряду. По-

этому многие задачи специальной техники решают с помощью резервных ХИТ. Объекты специального применения эксплуатируют, как правило, в широком диапазоне климатических условий: от арктических до тропических – а также при повышенных механических нагрузках.

Например, в качестве аварийных источников электроэнергии аппаратуры самолетов и вертолетов, а также в целях сглаживания пиков нагрузок используют батареи аккумуляторов свинцово-кислотной, никель-кадмиевой и серебряно-цинковой электрохимических систем. Свинцово-кислотные батареи серии САМ (12САМ-28, 12САМ-23, 12САМ-55) до настоящего времени находят довольно широкое применение, особенно в вертолетах. Несмотря на присущие им недостатки, такие как малый срок службы (до 2 лет), ограниченный диапазон рабочих температур (от минус 20 до 50°С), недостаточная удельная энергия (менее 30 Вт·ч/кг), по своим стоимостным показателям они наиболее приемлемы и, при отсутствии строгих ограничений по массогабаритным характеристикам со стороны объектов применения, не находят альтернативы среди источников других электрохимических систем.

Никель-кадмиевые батареи серии НКБН (20НКБН-25, 20НКБН-40, 20НКБН-28, 20КСХ-27) нашли широкое применение как в самолетах тяжелого класса, так и в истребителях благодаря высокой удельной энергии, сроку службы и работоспособности при низких температурах (до минус 40°С) по сравнению со свинцовыми.

Серебряно-цинковые аккумуляторные батареи представлены одним типом (15СЦС-45), исключительно применяющимся на самолетах истребительной авиации, где более жесткие требования к массогабаритным характеристикам. К недостаткам следует отнести высокую стоимость, малый срок службы, плохую работоспособность при отрицательных температурах.

2.3 Альтернативные источники тока

2.3.1 Общие замечания

ХИТ, несмотря на огромное распространение (если подключить одновременно все ХИТ в мире, то получившаяся мощность превысит мощность всех электростанций, работающих в мире в настоящее время), имеют множество недостатков, делающих их далеко не идеальными первичными источниками электроэнергии. Поэтому на всём протяжении времени развития ХИТ многие учёные и инженеры занимались разработкой других источников электроэнергии, составляющих альтернативу ХИТ.

Научно-технический прогресс в различных областях радиоэлектроники связан главным образом с интегральными полупроводниковыми нанотехнологиями, что приводит к резкому снижению массы и габаритов РЭА и расширению их функциональных возможностей. Ноутбуки и персональные компьютеры, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, мобильные телефоны и масса других устройств непрерывно обзаводятся новыми функциями, более мощными процессорами, экранами, беспроводной связью и при этом продолжают уменьшаться в размерах. Однако технологии электропитания мобильных систем и устройств развиваются существенно меньшими темпами. Емкости существующих аккумуляторов и батарей становится явно недостаточно для электропитания мобильных устройств в течение сколько-нибудь длительного времени. А без энергоемких аккумуляторов и батарей теряется весь смысл мобильности и беспроводности. Так что перед современной наукоемкой промышленностью все острее стоит проблема поиска и внедрения энергетически эффективных альтернативных источников электроэнергии.

Аналогичная ситуация имеет место в вооружении и военной технике. Ведь повышение боевых возможностей техники осуществляется за счет увеличения энерговооруженности.

Таким образом, тема альтернативных источников тока со временем будет всё более и более актуальна: пользователи портативной электроники становятся мобильнее, спрос на автономные источники тока только растёт. Что ни день появляются сообщения о достижении учёными новых успехов в разработке новых источников электроэнергии с использованием технологий, ещё год назад казавшихся совершенно неприемлемыми для этих целей.

Рассмотрим далее ряд первичных источников электроэнергии, которые составляют (или в будущем составят) альтернативу ХИТ.

2.3.2 Термобатареи

Термобатареи непосредственно преобразуют тепловую энергию в электрическую. Их делят на термоэлектронные генераторы и термоэлектронные преобразователи.

В 1821 г. немецкий физик Томас Иоганн Зеебек обнаружил, что температурный градиент, образованный между двумя разнородными проводниками, может производить электричество. В 1822 г. он опубликовал результаты своих опытов в статье "К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур", опубликованной в докладах Прусской академии наук. В основе термоэлектрического эффекта Зеебека лежит тот факт, что температурный градиент в токопроводящем материале вызывает тепловой поток – и это приводит к переносу носителей заряда. Поток носителей заряда между горячими и холодными областями, в свою очередь, создает разность потенциалов.

Термоэлектронные генераторы состоят из последовательно соединённых термопар (элементов Зеебека), у которых одни концы спаев нагреваются, а другие имеют достаточно низкую температуру, благодаря чему создаётся термо-ЭДС – и во внешней цепи протекает электрический ток. Каждая термопара может состоять из двух разнородных полупроводников или из проводника и полупроводника.

Большая теплопроводность металлических термопар не позволяет создавать значительную разность температур спаев, а следовательно, не даёт возможность получить большую термо-ЭДС. Лучшие результаты даёт использование в термогенераторах полупроводниковых термопар, или комбинированных, состоящих из проводника и полупроводника.

В термопаре, состоящей из полупроводников с n - и p - проводимостями, при нагревании спая количество электронов в полупроводнике n -типа и число дырок в полупроводнике p -типа увеличивается. Электроны и дырки вследствие диффузии в полупроводниках движутся от горячего слоя термопары к холодному. Перемещение дырок приводит к тому, что горячий конец полупроводника p -типа заряжается отрицательно, а холодный конец – положительно. В полупроводнике n -типа электроны, переходя от горячего конца к холодному, так же как, и в металле, заряжают горячий конец положительно, а холодный конец – отрицательно. Термо-ЭДС полупроводниковой термопары значительно больше термо-ЭДС металлической пары.

В 1834 г. французский физик Жан-Шарль Пельтье обнаружил обратный эффект, при котором происходит выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока через контакт двух разнородных проводников.

Термоэлектронные преобразователи представляют собой вакуумные или газовые приборы с твёрдыми нагреваемыми катодами. Преобразование тепловой энергии в электрическую осуществляется за счёт использования термоэлектронной эмиссии нагретых тел. Эмитированные катодом электроны движутся к аноду под действием разности температур. Для обеспечения этой разности температур необходимо охлаждение анода. В зависимости от температуры нагрева катода термоэлектронные преобразователи делят на низкотемпературные (1200-1600°C) и среднетемпературные (1900-2000°C). У среднетемпературных преобразователей КПД достигает 20%, что более чем в 2 раза превышает КПД термоэлектронных генераторов.

До недавнего времени применение этого эффекта для генерации напряжения электропитания для РЭА не рассматривалось по двум главным причинам: максимальная температура, выдерживаемая полупроводниками в термоэлектронных модулях, до сих пор не превышала 300°C , плюс, мощности, генерируемые такими элементами, были недостаточными, чтобы всерьёз говорить о коммерциализации идеи.

Однако в последнее десятилетие компания "Toshiba" представила термомодуль "Giga Toraz" (рисунок 2.26). Разработчики уверяют, что модули "Giga Toraz" способны генерировать электрическую энергию максимальной мощностью до 15 Вт при температуре порядка 20°C на одной стороне элемента и 500°C на другой – и всё это при площади элемента $14,4\text{ см}^2$ ($37 \times 39\text{ мм}^2$) и массе 40 г. Таким образом, по сравнению с лучшими современными образцами термоэлектронных пар производительность генератора удалось улучшить почти в три раза (до 1 Вт/см^2 и более), а максимальную рабочую температуру довести до 500°C .

Термомодули "Giga Toraz" можно объединять в батареи элементов, чему весьма способствуют их малые размеры. Конечно, ради обеспечения работоспособности ноутбука совсем не обязательно лезть с таким термоэлементом в жерло вулкана. Зато можно попробовать, например, облепить батареей из модулей "Giga Toraz" двигатель автомобиля, и использовать выделяемое им тепло в мирных целях, благо, что при достаточном количестве модулей для генерации достаточных объёмов электричества совсем не нужен перепад в 500°C . Разумеется, двигателем автомобиля сфера применения термоэлектронных генераторов электричества не ограничивается.

Так, термоэлектрогенераторы применяют в качестве бортовых источников электроэнергии космических аппаратов. В частности, такие генераторы, использующие тепло плутониевых тепловыделяющих элементов, установлены на космических аппаратах "Кассини" и "Новые горизонты".

В качестве источника электроэнергии космического аппарата "Новые горизонты" был взят радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ). На старте его мощность составляла 250 Вт, и, согласно прогнозам, она должна будет падать на 5% каждые четыре года.

РИТЭГ содержит около 11 кг радиоактивного топлива в виде 72 таблеток оксида плутония-238. Каждая таблетка заключена в силовой корпус из иридия и поверх него покрыта оболочкой из графита.

Особенностями этого изотопа являются высокое тепловыделение на единицу массы, а также радиоактивный распад, происходящий с испусканием только альфа-частиц, благодаря чему можно обойтись лёгкой радиационной защитой. Однако данный изотоп является побочным продуктом выработки оружейного плутония, производство которого остановлено и в США, и в России, что делает его крайне дефицитным материалом.

На борту космического аппарата отсутствуют иные источники электроэнергии – поэтому вся энергия полностью вырабатывается РИТЭГ, а периоды пиковых нагрузок покрываются батареями конденсаторов.

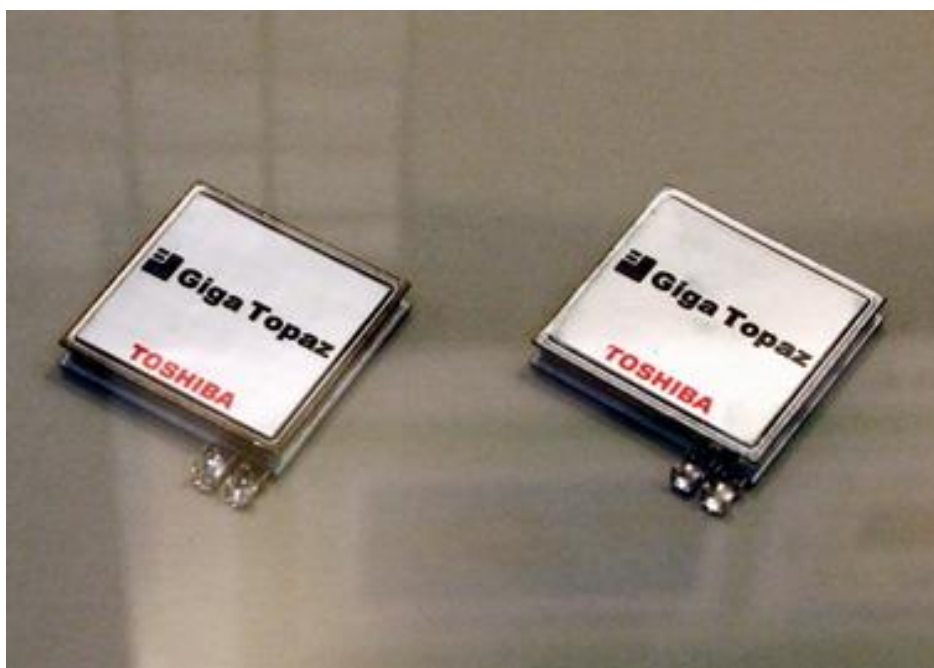


Рисунок 2.26 – Термомодуль "Giga Topaz" (производство "Toshiba")

2.3.3 Фотоэлектрические источники тока

Фотоэлектрические источники тока осуществляют преобразование световой энергии в электрическую.

В общем случае к фотоэлектрическим преобразователям относят:

- вентильные фотоэлементы;
- вакуумные и газонаполненные (ламповые) фотодиоды;
- фототранзисторы и фототиристоры;
- электрохимические (жидкостные) фотоэлементы.

Как источник тока в РЭА находят применение только первые из них, так как у остальных КПД преобразования с точки зрения энергетики слишком мал.

В вентильных фотоэлементах чаще всего используют кремний – полупроводник, атом которого состоит из ядра и трёх слоёв электронов, причём внешний слой состоит из четырёх электронов. Если ввести в кристаллическую решётку кремния атомы фосфора, у которого внешний электронный слой состоит из пяти электронов, то в таком полупроводнике (*n*-полупроводнике) могут в определённых условиях возникать свободные электроны; в полупроводниковых приборах он служит поэтому эмиттером. При добавке к кремнию атомов бора, имеющих во внешнем электронном слое три электрона, получается *p*-полупроводник, который в полупроводниковых приборах может служить коллектором. Между двумя тонкими слоями *p*- и *n*-полупроводников (толщиной в несколько микрон) образуется *p-n*-переход, или зона объёмного заряда. Если в эту зону через прозрачный, обращённый к источнику излучения электрод попадают фотоны, обладающие достаточно большой энергией, то они вызывают разделение отрицательных и положительных зарядов и движение носителей заряда (электронов и дырок) к противоположным электродам. В результате этого возникает ЭДС, составляющая в бестоковом состоянии приблизительно 0,6 В; если внешняя электрическая цепь замкнута, то в ней возникает

электрический ток. При нормальной токовой нагрузке напряжение фотоэлемента равно приблизительно 0,5 В.

Чтобы предотвращать нежелательное отражение излучения с поверхности фотоэлемента, её покрывают антиотражающим слоем, в качестве которого обычно используют двуокись титана.

Суммарная толщина фотоэлемента находится в настоящее время обычно в пределах от 0,2 мм до 0,3 мм, а его площадь может достигать $15 \times 15 \text{ см}^2$. Для получения подходящего напряжения и тока фотоэлементы объединяют путём комбинирования последовательного и параллельного соединений в модули, а те, в свою очередь, в батареи или их секции.

Фотоэлектрический эффект (в электропроводящей жидкости) открыл в 1839 г. француз Александр Эдмонд Беккерель. В 1877 г. английские физики Уильям Грильс Адамс и Р. Э. Дей изготовили первый (селеновый) вентильный фотоэлемент. Но только в 1954 г. в США при целенаправленном вводе в кремний различных добавок удалось изготовить фотоэлемент с КПД приблизительно 6%, пригодный для практического применения, и 4 октября 1955 г. там же была собрана первая в мире солнечная батарея. В июле 1962 г. солнечная батарея, состоящая из 3600 фотоэлементов, была установлена на искусственном спутнике связи "Telstar-1", после чего началось использование фотоэлементов как на искусственных спутниках Земли, так и в качестве источников электроэнергии различных наземных установок. В конце 2006 г. общая мощность наземных энергетических солнечных батарей составляла приблизительно 8 ГВт, и ежегодный прирост их мощности в настоящее время равен приблизительно 60%.

Модули фотоэлементов изготавливают мощностью от нескольких милливатт до нескольких сотен ватт. Модули малой мощности находят применение для электропитания часов, калькуляторов и т. д., а более крупные – для электропитания осветительных устройств, световых дорожных знаков и светосиг-

нальных систем. Чтобы обеспечить непрерывность электропитания, к фотоэлементным модулям подключают аккумуляторы. Модули могут соединяться и в батареи мощностью до нескольких десятков (иногда и до нескольких сотен) киловатт, используемые в качестве местных источников электропитания, обычно соединенных с электрической сетью. Такие батареи устанавливают обычно на крышах или на южных наружных стенах зданий. Солнечными батареями снабжают и все искусственные спутники Земли и космические станции (рисунок 2.27). На фотоэлектрических электростанциях суммарная мощность солнечных батарей может достигать 10 МВт и более. В опытном порядке солнечные батареи используют и как источники электроэнергии электромобилей и электрических лодок.

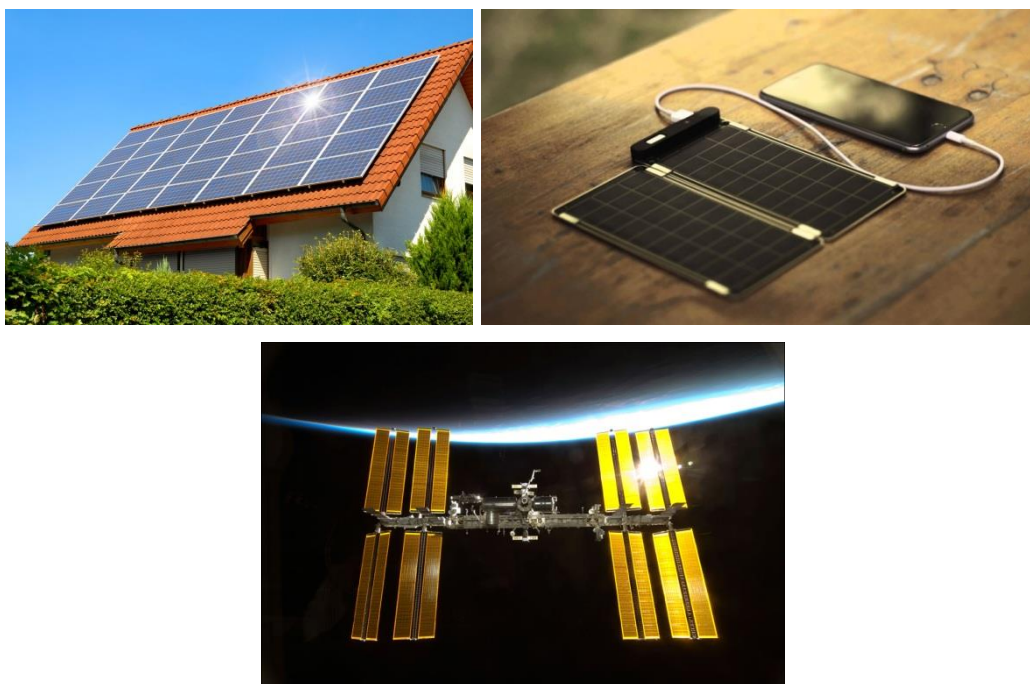


Рисунок 2.27 – Применение солнечных батарей

Преимущества фотоэлементов как источников тока заключаются в отсутствии подвижных частей, в отсутствии вредного действия на окружающую среду, в простоте обслуживания и в высокой надёжности. Их срок службы находится обычно в пределах от 30 до 40 лет. Их недостатками считают высокую удельную стоимость (1500-4000 евро/кВт), низкий коэффициент использования

максимальной мощности (даже в регионах с большим числом солнечных дней солнечная батарея мощностью 1 кВт может генерировать только 1000-2400 кВт·ч электроэнергии в год) и, следовательно, высокую себестоимость электроэнергии (обычно 10-50 евроцентов на 1 кВт·ч).

Так как облучённость от солнечного излучения составляет на уровне земли приблизительно 1 кВт/м², то площадь фотоэлектрических модулей, при их КПД от 5% до 15%, должна быть приблизительно 6-20 м²/кВт. Солнечные батареи требуют, следовательно, для своего размещения относительно больших земельных участков. Автономные солнечные батареи, чтобы обеспечить при их прерывистой работе беспереывное электропитание РЭА, должны снабжаться аккумуляторными батареями.

Рассмотрим далее основные виды солнечных батарей.

Наиболее популярными являются солнечные батареи **на основе кремния**. Они представляют собой панели с кремниевыми пластинами, покрытыми сверху закалённым стеклом. Панели полностью герметичны и отлично выдерживают сильный ветер, а также дождь, снег и т. д.

В **поликристаллических батареях** используют кремний невысокой степени очистки, который создаётся в процессе охлаждения кремниевого расплава. Это делает процесс производства менее трудоёмким и затратным. Эффективность поликристаллических солнечных батарей – 12-18%. Внешний вид – неоднородная структура, от голубого до светло-синего цвета.

Монокристаллические батареи дороже поликристаллических примерно на 15-20%, однако их КПД превышает 20%, и сохраняется до 80% первоначальной мощности в течение всего ресурса работы (около 25 лет). В конструкции используют специально выращенные кристаллы кремния, вывести такие – довольно сложная, долгая и трудоёмкая процедура. Монокристаллические солнечные батареи легко отличить по однородной структуре и насыщенному темно-синему цвету.

В **аморфных батареях** используют не кристаллический кремний, а силан или кремневодород, который наносится тонким слоем на материал подложки. В итоге получают гибкие пластины толщиной меньше 1 мкм, их показатель оптического поглощения в 20 раз выше, чем у поликристаллических и монокристаллических солнечных батарей. Однако КПД таких батарей составляет всего 5-6%.

Тонкоплёночные батареи бывают двух видов – батареи на основе теллурида-кадмия, а также меди-индия. Такие батареи могут поглощать необходимое количество солнечной энергии при толщине всего в несколько микрон, обладают КПД 15-17% и не снижают её даже в условиях рассеянного излучения.

Концентраторные батареи на основе Ge, GaAs, GaInP – одни из самых совершенных и дорогих на современном рынке. Их КПД составляет до 45%, к тому же они способны поглощать солнечный свет во всём доступном диапазоне длин волн. Но есть нюансы. Во-первых, такие солнечные батареи очень сложны технически и отличаются высокой стоимостью. Во-вторых, они должны монтироваться на механической системе, которая будет постоянно ориентировать оптику вслед за движением солнца, что также повышает их стоимость.

Германия является одной из самых успешных стран в мире в плане использования возобновляемых источников энергии. В этой стране более 1,4 млн. солнечных фотоэлектрических систем. Страна стремится довести процент возобновляемой энергии в общих потребностях страны до 40-45% к 2025 г., до 55-60% к 2035 г. и до 80% к 2050 г.

2.3.4 Топливные источники тока

Как известно, основная доля производимой в мире электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях. Принцип их работы в простейшем описании такой: сжигается топливо (твёрдое, жидкое или газообразное), нагревается вода и превращается в пар, пар и продукты сгорания вращают турбину, турбина

крутит генератор, который вырабатывает электрический ток. И сколько лет существует производство электричества, столько же лет вопросу: как напрямую превратить внутреннюю химическую энергию, заключённую в топливе, в электричество? Минуя фазы сжигания, парообразования и т. д., так как на всех этих ступенях теряется часть энергии, из-за чего КПД паровых машин и теплоэлектростанций недостаточно высок. Такое устройство для прямого преобразования химической энергии топлива в электричество называется *топливным элементом*.

Обычно топливные источники тока относят не к первичным ХИТ, а выделяют в особый класс. В отличие от ХИТ, в топливных источниках тока электроды являются нерасходуемыми (и неизменяемыми при работе), а реагенты хранятся вне элемента и подаются в него в процессе работы.

Таким образом, топливные элементы осуществляют непосредственное преобразование энергии химических реакций в электрическую энергию. Действие таких элементов основано на электрическом окислении вещества (топлива), которое подобно реакции горения топлива. Однако в отличие от горения в этих элементах окисление топлива и восстановление кислорода происходит на разных электродах. Поэтому энергия выделяется в нагрузке без промежуточного преобразования в энергию иного вида, что обеспечивает высокий КПД преобразователя. В топливных элементах химическая реакция протекает при взаимодействии активных веществ, которые в твердом, жидком или газообразном состоянии непрерывно поступают к электродам.

В простейшем топливном элементе происходит электролитическое соединение водорода с кислородом, которые предварительно ионизируются на катализаторных электродах (рисунок 2.28а). Эта реакция является обратным процессом электролиза воды (рисунок 2.28б). Топливный элемент и устройство электролиза отличаются друг от друга ещё тем, что электролиз воды может происходить на электродах из любого материала, а в топливном элементе тре-

буются электроды с ионизирующими (каталитическими) свойствами, изготовленные из платины, из пористых специальных сплавов или из других специальных материалов. Напряжение на зажимах топливного элемента составляет обычно 0,8-1 В, и для получения более высокого напряжения используют батареи, состоящие из нескольких десятков или сотен последовательно соединённых элементов.

Таким образом, топливный элемент вырабатывает электрическую энергию без использования электрогенератора, то есть без шума и перегрева с гораздо бóльшим КПД. Реализация более высокого КПД в топливном элементе объясняется, во-первых, отсутствием промежуточных механических устройств, во-вторых, топливный элемент не является тепловой машиной и не подчиняется закону Карно.

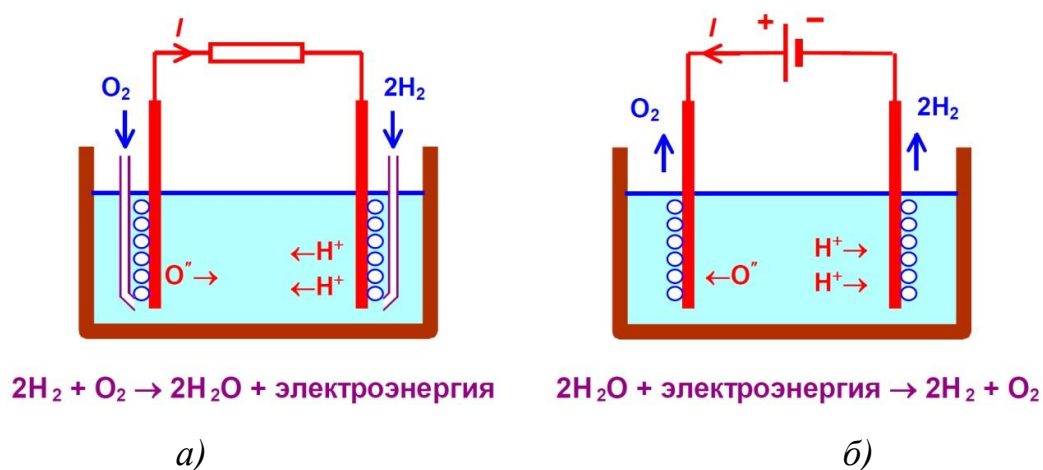


Рисунок 2.28 – Принцип работы простейшего водородно-кислородного топливного элемента (а) и устройства электролиза воды (б)

Первый топливный элемент предложил В. Гроув в 1839 г., когда тот изучал электролиз воды. Отключив от электролитической ячейки батарею, он обнаружил, что электроды начали поглощать выделившийся водород и вырабатывать ток. Открытие процесса электрохимического "холодного" горения водорода стало важным событием в водородной энергетике. Среди ученых, внесших

большой вклад в исследования топливных элементов в XIX веке, следует отметить П. Яблочкова, Ф. Бэкона, Т. Бауэра.

Несмотря на то, что за прошедшие почти два века в работах по созданию топливных элементов участвовали очень многие учёные, тем не менее, существенных сдвигов в этом направлении удалось добиться только во второй половине XX века. Первые работоспособные образцы появились в 1950-1960 гг., и они постепенно совершенствовались в последующие десятилетия.

Так, в 1959 г. фирма "Allis-Chalmers" (США) установила батарею топливных элементов мощностью 15 кВт на тракторе, а другие американские фирмы "Pratt & Whitney Aircraft" и "General Electric" разработали топливный элемент с полимерной мембраной, который в 1965 г. использовался на космическом корабле "Gemini 5". В 1968 г. на космическом корабле "Apollo" установили батарею щелочных топливных элементов, которая снабжала корабль не только электроэнергией, но и питьевой водой. Твердооксидный топливный элемент разработала в 1958 г. фирма "Westinghouse Electric" (США). В 1970-е гг. началось применение топливных элементов на малых электростанциях, и в 1983 г. фирма "United Technologies" построила две одинаковые электростанции (в Нью-Йорке и Токио) с фосфорнокислыми топливными элементами. В 1994 г. фирма "Mercedes-Benz" выпустила подготовленные для серийного производства первые легковые автомобили, а в 1997 г. – первые автобусы на топливных элементах. В качестве топлива в них используют водород; в легковых автомобилях находит применение и метанол. В 2006 г. в Японии построили первые электровозы, а в Германии – первые малые суда на топливных элементах. На подводных лодках топливные элементы стали использовать уже в 1980-х гг.

В СССР бурное развитие водородной техники началось в середине 1960-х гг. Создание энергоустановок на основе кислородно-водородных топливных элементов была обусловлена потребностями авиакосмической промышленности. К середине 1980-х гг. на Уральском электрохимическом комби-

нате были созданы электрохимические генераторы "Фотон" на основе щелочных топливных элементов для многоразового корабля "Буран", во ВНИИ источников тока в этот же период – воздушно-водородные генераторы для электробуса РАФ и кислородно-водородные мощностью до 280 кВт для подводных лодок.

Однако до широкого внедрения топливных элементов в экономику и жизнь общества дело дойдёт только в XXI веке. Причины – экономические. До тех пор, пока цена произведённой в топливном элементе электроэнергии была очень высокой, они не могли конкурировать с традиционными способами её получения. Высокая цена получалась из-за того, что топливный элемент – сложное и дорогое устройство. Для того чтобы токообразующая реакция на электродах шла с приемлемой скоростью, применяют катализаторы, содержащие драгоценные металлы (Pt, Pd, Au, Ag). По этой же причине большинство разработанных систем рассчитано на работу при повышенной (или просто высокой) температуре. Агрессивная среда, жёсткие условия эксплуатации приводят к довольно быстрому выходу топливного элемента из строя, поэтому цена электроэнергии получается высокой.

Вместе с тем по оценке экспертов к 2020-м гг. годовой объем мирового рынка водородных технологий и топливных элементов может составить 1-1,2 трлн долларов и превысит годовой объем информационных технологий.

Ниже приведены несколько примеров электрохимических систем, разработанных для топливных элементов.

1. Кислородно-водородный топливный элемент. Работает при 100°C. Ресурс – 10000 ч.

2. Кислородно-водородный топливный элемент. Работает при 200°C. Ресурс – 50000 ч.

3. Топливом являются продукты конверсии угля ($\text{CO} + \text{H}_2$), а электролитом – расплавленная эвтектическая смесь карбонатов лития и натрия. Работает при 650°C . Ресурс – 10000 ч.

4. Борогидридный топливный элемент. Топливом является щелочной раствор борогидрида натрия или калия. Работает при комнатной температуре. Ресурс – несколько тысяч часов.

Топливом (восстановителем) в представленных выше системах может являться водород, гидриды (борогидрид NaBH_4 , алюмогидрид NaAlH_4), металлы (алюминий, магний), смесь $\text{H}_2 + \text{CO}$ (генераторный газ, конверсионный газ, водяной газ), спирты (метанол, этанол), углеводороды и даже твердый уголь. Окислитель – воздух, кислород или обогащённый кислородом воздух.

Рассмотрим далее известные к настоящему времени топливные элементы.

Прямой метаноловый топливный элемент (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC) – это разновидность топливного элемента с протонообменной мембраной, в котором топливо (метанол) предварительно не разлагается с выделением водорода, а напрямую используется в топливном элементе.

Поскольку метанол поступает в топливный элемент напрямую, каталитический риформинг (разложение метанола) не нужен; хранить метанол гораздо проще, чем водород, поскольку нет необходимости поддерживать высокое давление, так как метанол при атмосферном давлении является жидкостью. Энергетическая ёмкость (количество энергии в данном объеме) у метанола выше, чем в таком же объёме сильно сжатого водорода. Например, современные баллоны высокого давления, позволяющие хранить водород при 800 атм., содержат 5-7 весовых % водорода по отношению к общей массе баллона. При подсчёте такого "водородного" эквивалента для метанола получается 13%. Такая энергоёмкость является максимальной из всех известных систем хранения топлива для топливных элементов.

Метанол ядовит, поэтому использование DMFC приложений в бытовой технике может быть опасным. Существенные ограничения на широкое применение топливных элементов накладывает использование в качестве катализаторов драгоценных металлов (платиноидов), что ведёт к дороговизне как самих установок, так и получаемого электричества.

В настоящее время ведутся работы по адаптации DMFC топливных элементов для применения в:

- транспорте (например, для бортового электропитания);
- портативной РЭА (мобильные телефоны, ноутбуки).

Внедрение DMFC-батарей в портативную РЭА позволит ей работать без подзарядки на протяжении нескольких суток или даже недель.

К настоящему времени компания "Samsung" продемонстрировала действующий прототип метанолового топливного элемента DMFC (рисунок 2.29).

Изделие разработано для применения в военных целях. Оно способно питать электронное снаряжение солдата в течение 72 ч, при этом вес батареи составляет 3,5 кг, а её энергоёмкость 1800 Вт·ч.



Рисунок 2.29 – Топливный источник тока (производство "Samsung")

Твердооксидные (твёрдоокисные) топливные элементы (Solid-oxide fuel cells – SOFC) – разновидность топливных элементов, электролитом в которых является керамический материал (например, на базе диоксида циркония), проницаемый для ионов кислорода. Эти элементы работают при очень высокой

температуре (700-1000°C) и применяются в основном для стационарных установок мощностью от 1 кВт и выше. Их отработанные газы могут быть использованы для приведения в действия газовой турбины, чтобы повысить общий КПД системы до 70%.

В этих топливных элементах ионы кислорода проходят через твёрдый оксид, который используется в качестве электролита, и при высокой температуре реагируют с водородом на аноде. Хотя в твердооксидных топливных элементах необходима высокая рабочая температура (что требует специальных керамических материалов), зато они не нуждаются в таком дорогом катализаторе, как платина (в отличие от топливных элементов с протонно-обменной мембраной). Это также значит, что твердооксидные топливные элементы не отравляются монооксидом углерода, и в них могут использоваться разные виды топлива.

Твердооксидные топливные элементы могут работать на метане, пропане, бутане, биогазе. Сера, содержащаяся в топливе, должна быть удалена перед поступлением его в топливный элемент, что легко сделать с помощью адсорбентов. Сера может и не удаляться из топлива, но тогда необходимо будет повысить рабочую температуру (не менее 700°C).

Приложениями данной технологии являются:

- крупные стационарные установки мощностью 1 МВт и выше;
- бытовые стационарные установки мощностью до 10 кВт;
- установки для бортового электропитания транспорта (например, автомобильные рефрижераторы) мощностью порядка 5 кВт;
- силовые установки водного транспорта.

В настоящее время ведутся исследования по снижению рабочей температуры данных топливных элементов. Уже удалось снизить температуру до 500-600°C.

В настоящее время в США создан альянс промышленных групп, работающих над ускорением коммерциализации SOFC-систем для стационарных,

транспортных и военных приложений. Альянс работает над программой, целью которой является строительство чистых угольных электростанций, производящих энергию в водородных топливных элементах.

В России производством энергоустановок на базе твердооксидных топливных элементов занимается ООО "Уральская производственная компания", являющаяся резидентом инновационного центра "Сколково".

Особый интерес представляют **твердоокисные топливные элементы с прямым окислением сероводорода** (Direct Hydrogen Sulfide Solid Oxide Fuel Cell – MS-SOFC). Выделяемый при этом диоксид серы может "дожигаться" в топливном элементе с протонно-обменной мембраной до триоксида серы, из которого затем производится серная кислота – ценное химическое сырье. Кроме того, в производство электроэнергии в данном случае вовлекается металлургическая промышленность, поскольку сероводород может быть получен при переработке сульфидных металлических руд. Учитывая, что запасы сульфидов (включая мантию и ядро Земли) составляют около 2,9% от массы планеты, данная технология может представлять собой практически неисчерпаемый источник энергии.

Щелочной топливный элемент (Alkaline Fuel Cell – AFC) – наиболее изученная технология топливных элементов, эти элементы летали с человеком на Луну.

NASA использует щелочные топливные элементы с середины 1960-х гг., (например, серия космических аппаратов "Аполлон" и "Спейс Шаттл"). Щелочные топливные элементы потребляют водород и чистый кислород – и производят воду, тепло и электричество. Они являются самыми эффективными из топливных элементов, их КПД доходит до 70%.

Топливный элемент вырабатывает энергию посредством окислительно-восстановительной реакции между водородом и кислородом. На аноде водород окисляется с образованием воды и высвобождения электронов. При этом элек-

троны текут через внешнюю цепь и возвращаются к катоду, кислород расходуется в реакции и производит гидроксид ионов. Полный цикл реакции потребляет одну молекулу кислорода и две молекулы водорода, производя две молекулы воды. Электроэнергия и тепловая энергия образуются как побочные продукты этой реакции.

AFC системы являются самыми дешёвыми из топливных элементов в производстве. Катализаторы, необходимые для электродов, изготавливают из химических веществ, которые недороги по сравнению с тем, которые требуются для других типов топливных элементов.

Коммерческие перспективы лежат в основном AFC с недавно разработанной версии этой технологии с биполярной пластиной, значительно превосходящей по производительности более ранние версии моноплит. Так, первый в мире корабль на топливных элементах "Hydra" использует систему AFC с 5 кВт выходом электроэнергии.

Другим недавним событием является появление твердотельного щелочного топливного элемента с использованием анионообменных щелочных мембран вместо жидкости. Это решает проблему отравления и позволяет развивать щелочные топливные элементы, способные работать на более безопасных богатых водородом носителях, таких как жидкие растворы мочевины или металлоаминовые комплексы.

Таким образом, в настоящее время интенсивно ведутся исследования по созданию топливных элементов на различном топливе: метаноле, боргидриде, бутане, даже обычном дизельном. Пока их стоимость чересчур велика, но прогноз на возможность снижения цены вполне оптимистичен. Вместе с тем их надёжность повысилась до такой степени, что они могут конкурировать с другими первичными источниками электроэнергии. И хотя характеристики топливных элементов находятся на уровне характеристик литий-ионных аккумуляторов, но теоретически достижимые характеристики в 5 раз выше. Предполага-

ется, что в XXI веке именно топливные элементы станут основными автономными источниками тока.

Сразу несколько компаний, среди которых "NEC", "Manhattan Scientifics", "Toshiba", уже объявили о готовности к выпуску топливных элементов для портативной РЭА, в первую очередь, для мобильных телефонов и ноутбуков.

2.3.5 Биохимические источники тока

Биохимические источники тока можно рассматривать как разновидность топливных элементов, так как в них протекают подобные окислительно-восстановительные процессы. Отличие биохимических элементов от топливных состоит в том, что активные вещества (или одно из них) создаются с помощью бактерий или ферментов из различных углеводов и углеродов.

Как известно, в настоящее время в некоторых странах биомасса (например, дрова) широко используется населением и достигает в общем энергетическом балансе 80%. Это существенно наносит вред окружающей среде: уничтожаются леса, увеличивается эрозия почвы, высыхают водоёмы. К тому же коэффициент конверсии горения дров очень низкий, а полезные элементы биомассы (N, P) не используются.

Ресурсы биомассы, как отходы в лесном и сельскохозяйственном производстве, значительно и ежегодно возобновляются, что и привлекает внимание к их использованию.

Существует два основных способа конверсии биомассы в горючий газ: термохимический и биохимический. При первом способе биомасса (древесина или отходы сельхозпроизводства) подвергаются пиролизу (разложение без доступа воздуха) в реакторе при 400-500°C.

При использовании метода биохимической конверсии биомасса поддается брожению с образованием горючего газа (70% CH_4 и 30% CO_2), удельная теплота сгорания близка до условного топлива (29,3 МДж/кг). При этом на

каждую тонну условного топлива одновременно вырабатывается до 1,5-1,8 т высококачественных органических удобрений. Особенно эффективен этот процесс в случае биохимической переработки отходов животноводческих ферм. В Китае работают миллионы биогазовых установок средней мощностью 14 тыс. м³ газа в год. В США биохимические источники обеспечивают 5% всей потребляемой в стране электроэнергии.

2.3.6 Атомные источники тока

Атомная электрическая батарея превращает атомную энергию непосредственно в электрический ток, минуя множество "посредников": паровые котлы, паропроводы, теплообменники, турбины, вращающиеся генераторы тока.

Конструкция атомных источников тока различна в зависимости от принципа их действия. Напряжение в таких элементах может достигать нескольких киловольт, а внутреннее сопротивление очень велико (порядка 10^{13} Ом). Разрядный ток не превышает одного миллиампера. Достоинством таких элементов является очень большой срок службы.

Наиболее простой является батарея, составленная из двух пластинок: *чистого β -излучателя* (стронция-90) и какого-либо *полупроводника* (например, кремния). Поток быстрых электронов, испускаемый стронцием, проходя через вещество полупроводника, выбивает из него большое количество дополнительных электронов – в десятки и сотни тысяч раз больше, чем поток, испускаемый самим радиоактивным изотопом. Усиленный таким образом поток электронов будет протекать только в каком-либо одном направлении. Он и является постоянным электрическим током.

Бета-вольтаический эффект является аналогом фотоэлектрического эффекта с тем отличием, что образование электрон-дырочных пар в полупровод-

нике с p - n переходом происходит под воздействием бета-частиц, а не светового излучения.

Один элемент такого устройства объёмом в доли кубического сантиметра позволяет получить электрический ток силой в несколько миллионных долей ампера при напряжении в десятые доли вольта. Соединив параллельно (для увеличения силы тока) несколько тысяч таких элементов, можно получать силу тока уже в сотни миллиампер, а соединяя такие наборы элементов ещё и последовательно друг с другом (для увеличения напряжения) – получать батарею в несколько вольт, вполне достаточную для электропитания портативной РЭА (рисунок 2.30).

Так как период полураспада стронция-90 равен 24 годам, такая атомная батарея может действовать без смены в течение 10-15 лет!

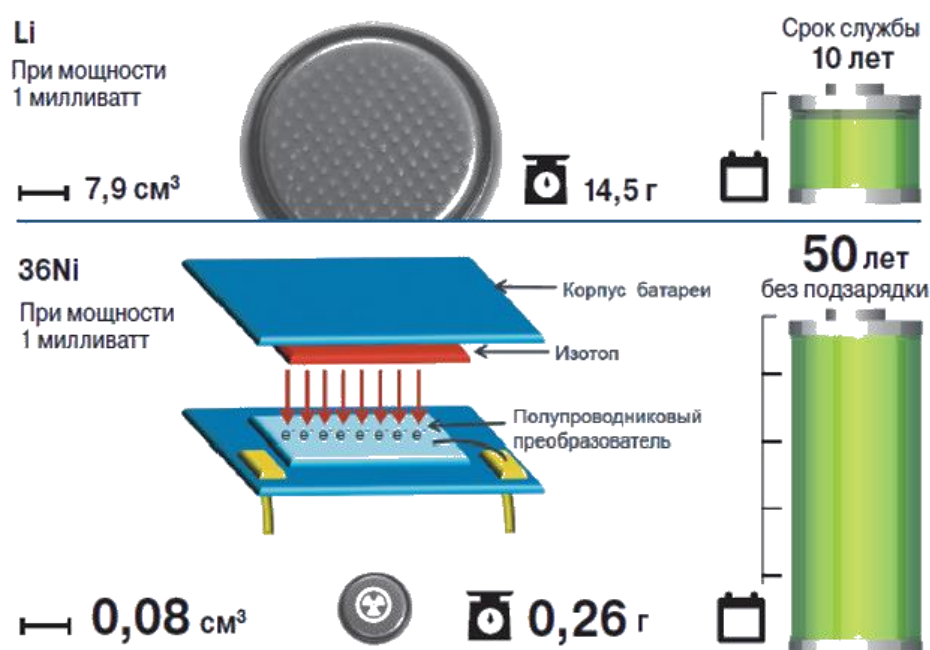


Рисунок 2.30 – Один из вариантов устройства атомной батареи

Бета-вольтаические полупроводниковые батареи обладают высокой энергоемкостью (на несколько порядков выше по сравнению с ХИТ). Эффективно работают в широком диапазоне рабочих температур (от 60°C до минус 120°C) без снижения выходных характеристик. Отсутствие дозиметрических проблем

делает возможным использование таких источников электроэнергии в РЭА микро- и милливаттного уровня мощности потребления.

Впервые бета-вольтаическая ячейка в сочетании с р-п переходом была описана в зарубежной научной литературе в середине 1950-х гг. В качестве радиоактивного источника использовался радионуклид стронция-90. В этой ячейке было получено 0,8 мкВт мощности при очень низком КПД (не более 0,2%).

Наиболее заметный прогресс был достигнут в разработке бета-вольтаических устройств с использованием прометия-147 в качестве источников тока для кардиостимуляторов. Такая батарея имела КПД около 4% и срок службы 10 лет. Однако из-за высокой стоимости и опасения по поводу побочного гамма-излучения впоследствии предпочтение было отдано литиевым батареям.

В 2005 г. фирма "Qynergy" разработала на основе криптона-85 бета-вольтаическую ячейку "Qyncell". Энергетическая эффективность была высокой, но возникли проблемы, связанные с деградацией из-за радиационных повреждений.

В 2008 г. фирма "City Labs" (США) начала производить тритиевые бета-вольтаические источники тока (NanoTritium батареи) с использованием запатентованных материалов. Такие источники имели КПД до 7,5% и самую высокую плотность энергии.

В настоящее время за рубежом исследованиями по разработке источников тока с использованием радионуклидов трития и никеля-63 (нановаттной мощности) наиболее активно продолжают заниматься ученые и специалисты США (компании "Widetronix", "City Labs" и "BetaBatt"). В частности, одна из новых программ Министерства обороны США – MAV (Micro Air Vehicles) – направлена на создание беспилотных летающих микроаппаратов, где в качестве источников тока планируется использовать бета-вольтаические батареи.

Высоковольтные (до 150 тыс. вольт) атомные батареи, правда, дающие ток ничтожно малой силы (10^{-10} - 10^{-12} А), конструируют по другому принципу. В них источник быстрых электронов помещают на изоляторе в центре металлической сферы или цилиндра. При радиоактивном распаде из источника излучений вылетает облако β -частиц (электроны), вследствие чего он заряжается положительно, а собиратель электронов (сфера) – отрицательно. Естественно, между ними образуется разность потенциалов, создающая при замыкании электродов на нагрузку электрический ток. Столь высокая разность потенциалов между источником электронов и сферой создаётся за счет огромной скорости испускаемых электронов.

Если активность источника β -частиц равна 1 Ки, то такая атомная батарея будет развивать мощность около 200 мкВт при рабочем напряжении 20 кВ. Срок её действия определяется периодом полураспада использованного радиоактивного вещества.

Атомные батареи могут быть устроены и по-другому: например, в виде наполненной газом трубки, в которой радиоактивное излучение сперва ионизирует атомы газа, а затем образовавшиеся ионы под действием небольшой разности потенциалов между двумя электродами трубки создают электрический ток. Или устройства, в котором энергия радиоактивного излучения нагревает до высокой температуры спаи батареи полупроводниковых термоэлементов, вырабатывающих постоянный электрический ток.

Из отечественных научных групп, которые исследовали возможности практической реализации бета-вольтаического эффекта, можно отметить коллективы ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Ульяновского государственного университета, ООО НПП "БИАПОС", Объединенного института высоких температур РАН и Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

В 2014 г. ГК "Росатом" совместно с Академией Наук РФ представили уникальную разработку: способ получения радионуклида никель-63 для бета-вольтаических источников тока.

Никель-63 (период полураспада – 100 лет) в природе не встречается – его создаёт человек. В США научились так обогащать природный никель, что в нём появляется 20% нового изотопа. Вот только для батарейки этого очень мало. Наши учёные достигли 80%-го обогащения.

Срок службы таких батарей – 50 лет. Для мироздания такой источник электроэнергии не вечный, но для человека это больше, чем половина жизни. Но самое главное, мягкое β -излучение никакой опасности для человека не представляет – это не γ -излучение. К тому же оно будет экранироваться корпусом устройства. А по истечении 50 лет никель превратится в... обычную медь, то есть даже если батарейку до окончания срока службы выбросят в лесу или поле, вреда природе в отличие от нынешних литиевых она не нанесёт.

Весьма и весьма большие перспективы у атомных батарей лежат в сфере производства мобильных телефонов. Сколько способен продержаться самый современный, самый мощный в плане автономной работы смартфон? Даже при пассивном использовании смартфон вряд ли продержится более 3 суток. В качестве источников электроэнергии в современных смартфонах используют аккумуляторные батареи литий-ионного типа. Чуть реже встречаются модели, работающие на полимерных аккумуляторах. На самом деле подобные телефоны не выдерживают очень долгой работы. Играть в них во время автономной работы, смотреть на них фильмы можно считанное количество часов, которое обычно не превышает десяти.

Вторым по перспективности направлением применения атомных батарей является космическая индустрия и медицина. На третьем месте, конечно же, находится промышленность.

Однако о серийном выпуске атомных батарей в промышленных масштабах говорить, пожалуй, слишком рано из-за их дороговизны (1 г вещества = 4 тыс. долларов). Остаётся надеяться только на то, что со временем будут найдены альтернативные технологии, позволяющие создать дешёвый атомный аккумулятор без ущерба его надёжности и практичности. Проблема заключается в самом изотопе. В природе его просто-напросто не существует, создают изотоп при помощи специальных реакторов. В нашей стране их всего лишь три.

2.4 Электромашинные генераторы

2.4.1 Общие сведения

Электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Их делят на генераторы постоянного и переменного тока.

Наиболее широкое применение нашли *синхронные* и *асинхронные* генераторы, действие которых основано на использовании вращающегося магнитного поля. В синхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при синхронной частоте, то есть когда частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля. В асинхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при асинхронной частоте, то есть когда частота вращения ротора отличается от частоты вращения магнитного поля.

Как правило, в электроэнергетике используют только вращающиеся электромашинные генераторы. В их основе лежит эффект возникновения ЭДС в проводнике, на который каким-либо образом действует изменяющееся магнитное поле (закон электромагнитной индукции – индуцирование ЭДС в прямоугольном контуре, находящемся в однородном вращающемся магнитном поле; или наоборот, прямоугольный контур вращается в однородном неподвижном магнитном поле).

Генератор превращает механическую энергию в электрическую путём вращения проводочной катушки в магнитном поле. Электрический ток выраба-

тывается и тогда, когда силовые линии движущегося магнита пересекают витки проволочной катушки. Электроны перемещаются по направлению к положительному полюсу магнита, а электрический ток течёт от положительного полюса к отрицательному. До тех пор, пока силовые линии магнитного поля пересекают катушку (проводник), в проводнике индуцируется электрический ток. Аналогичный принцип работает и при перемещении проволочной рамки относительно магнита, т. е. когда рамка пересекает силовые линии магнитного поля. Индуцированный электрический ток течёт таким образом, что его поле отталкивает магнит, когда рамка приближается к нему, и притягивает, когда рамка удаляется. Каждый раз, когда рамка изменяет ориентацию относительно полюсов магнита, электрический ток также изменяет своё направление на противоположное. Всё то время, пока источник механической энергии вращает проводник (или магнитное поле), генератор будет вырабатывать переменный электрический ток.

Ту часть генератора, которая предназначена для создания магнитного поля, называют *индуктором*, а часть, в которой индуцируется ЭДС – *якорем*. Вращающуюся часть машины называют *ротором*, а неподвижную часть – *статором*. В синхронных машинах переменного тока индуктором обычно является ротор, а в машинах постоянного тока – статор. В обоих случаях индуктор представляет собой обычно двух- или многополюсную электромагнитную систему, снабжённую обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током (током возбуждения), но встречаются и индукторы, состоящие из системы постоянных магнитов. В индукционных (асинхронных) генераторах переменного тока индуктор и якорь не могут чётко (конструктивно) различаться друг от друга (можно сказать, что статор и ротор одновременно являются и индуктором и якорем).

Более 95% электроэнергии на электростанциях мира производится при помощи синхронных генераторов переменного тока. При помощи вращающе-

гося индуктора в этих генераторах создаётся вращающееся магнитное поле, наводящее в статорной (обычно трёхфазной) обмотке переменную ЭДС, частота которой точно соответствует частоте вращения ротора (находится в синхронизме с частотой вращения индуктора). Если индуктор, например, имеет два полюса и вращается с частотой 50 об/с, то в каждой фазе статорной обмотки индуцируется переменная ЭДС частотой 50 Гц. Конструктивное исполнение такого генератора упрощённо изображено на рисунке 2.31.

Магнитная система статора представляет собой спрессованный пакет тонких стальных листов, в пазах которого располагается статорная обмотка. Обмотка состоит из трёх фаз, сдвинутых в случае двухполюсной машины друг относительно друга на $1/3$ периметра статора; в фазных обмотках индуцируются ЭДС, сдвинутые друг относительно друга на 120° . Обмотка каждой фазы, в свою очередь, состоит из многовитковых катушек, соединённых между собой последовательно или параллельно.

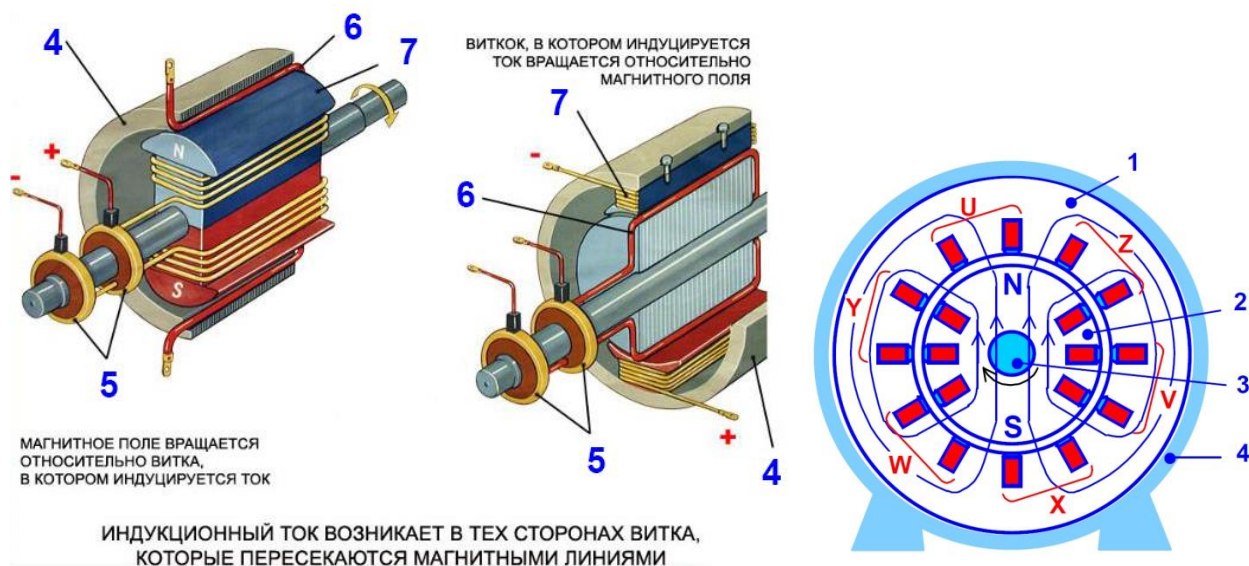


Рисунок 2.31 – Устройство двухполюсного синхронного генератора

1 – статор (якорь); 2 – ротор (индуктор); 3 – вал; 4 – корпус; 5 – скользящие контакты; 6 – виток; 7 – электромагнит; U-X, V-Y, W-Z – размещённые в пазах статора части обмоток трёх фаз

Полюсов индуктора и, в соответствии с этим, полюсных делений статора, может быть и больше двух. Чем медленнее вращается ротор, тем больше должно быть при заданной частоте тока число полюсов. Если, например, ротор вращается с частотой 300 об/мин, то число полюсов генератора для получения частоты переменного тока 50 Гц должно быть 20.

Обмотку возбуждения синхронного генератора обычно питают постоянным током от внешнего источника через контактные кольца на валу ротора. Раньше для этого предусматривался специальный генератор постоянного тока (возбудитель), жёстко связанный с валом генератора, а в настоящее время используются более простые и дешёвые полупроводниковые выпрямители.

Встречаются и системы возбуждения, встроенные в ротор, в которых ЭДС индуцируется статорной обмоткой. Если для создания магнитного поля вместо электромагнитной системы использовать постоянные магниты, то источник тока возбуждения отпадает и генератор становится значительно проще и надёжнее, но в то же время и дороже. Поэтому постоянные магниты применяют обычно в относительно маломощных генераторах (мощностью до нескольких сотен киловатт).

При работе генератора переменного тока в нём возникают потери энергии, вызванные активным сопротивлением обмоток (потери в меди), вихревыми токами и гистерезисом в активных частях магнитной системы (потери в стали) и трением в подшипниках вращающихся частей (потери на трение). Несмотря на то, что суммарные потери обычно не превышают 1-2% мощности генератора, отвод тепла, освобождающегося в результате потерь, может оказаться затруднительным. Если упрощённо считать, что масса генератора пропорциональна его мощности, то его линейные размеры пропорциональны кубическому корню мощности, а поверхностные размеры – мощности в степени $2/3$. С увеличением мощности, следовательно, поверхность теплоотвода растёт медленнее, чем номинальная мощность генератора.

Номинальное напряжение синхронных генераторов, в зависимости от мощности, находится обычно в пределах от 400 В до 24 кВ. Использовались и более высокие номинальные напряжения (до 150 кВ), но чрезвычайно редко.

Кроме синхронных генераторов сетевой частоты (50 или 60 Гц) выпускаются и высокочастотные генераторы (до 30 кГц) и генераторы пониженной частоты (16,67 или 25 Гц), используемые на электрифицированных железных дорогах некоторых европейских стран. Также генераторы переменного тока находят применение как резервные источники тока (рисунок 2.32).

Кроме синхронных генераторов относительно редко и при относительно малых мощностях (до нескольких мегаватт) используют и *асинхронные генераторы*. В обмотке ротора такого генератора ток индуцируется магнитным полем статора, если ротор вращается быстрее, чем статорное вращающееся магнитное поле сетевой частоты. Необходимость в таких генераторах возникает обычно тогда, когда невозможно обеспечить неизменную скорость вращения первичного двигателя (например, ветряной турбины, некоторых малых гидротурбин).



Рисунок 2.32 – Типовой дизель-генератор переменного тока

У генератора постоянного тока магнитные полюсы вместе с обмоткой возбуждения располагаются обычно в статоре, а обмотка якоря – в роторе. Так как в обмотке ротора при его вращении индуцируется переменная ЭДС, то якорь необходимо снабжать коллектором (коммутатором), при помощи которо-

го на выходе генератора (на щётках коллектора) получают постоянную ЭДС. В настоящее время генераторы постоянного тока применяют редко, так как постоянный ток проще получать при помощи полупроводниковых выпрямителей.

2.4.2 Трёхфазные системы электроснабжения

В общем случае электромашины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наибольшее применение находят трёхфазные генераторы.

Трёхфазная система электроснабжения – частный случай многофазных систем электрических цепей переменного тока, в которых действуют созданные общим источником синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые друг относительно друга во времени на определённый фазовый угол. В трёхфазной системе этот угол равен 120° .

Преимуществами трёхфазной системы электроснабжения являются:

- экономичность передачи электроэнергии на значительные расстояния;
- меньшая материалоемкость трёхфазных трансформаторов;
- меньшая материалоемкость силовых кабелей, так как при одинаковой потребляемой мощности снижаются токи в фазах (по сравнению с однофазными цепями);
- уравновешенность системы (это свойство является одним из важнейших, так как в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на генератор, что значительно снижает срок его службы;
- генераторы трёхфазного тока (асинхронные и синхронные) устроены проще, чем генераторы постоянного тока, одно- или двухфазные, и имеют высокие показатели экономичности;
- возможность получения в одной установке двух рабочих напряжений (фазного и линейного) и двух уровней мощности в зависимости от способа соединения.

Благодаря этим преимуществам трёхфазные системы переменного тока наиболее распространены в современной электроэнергетике.

Трёхфазная система электроснабжения состоит из трёх основных элементов: трёхфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трёхфазной системой ЭДС; линии передачи; приёмников (потребителей), которые могут быть как трёхфазными, так и однофазными.

Если ЭДС одной фазы (например, фазы А) принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС E_A , E_B , и E_C в каждой из фаз симметричной системы можно записать в виде:

$$E_A = E_m \sin \omega t, \quad (2.14)$$

$$E_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.15)$$

$$E_C = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.16)$$

где E_m – амплитудное значение напряжения фазы, а ω – циклическая частота. Формы ЭДС генератора в каждой из фаз приведены на рисунке 2.33.

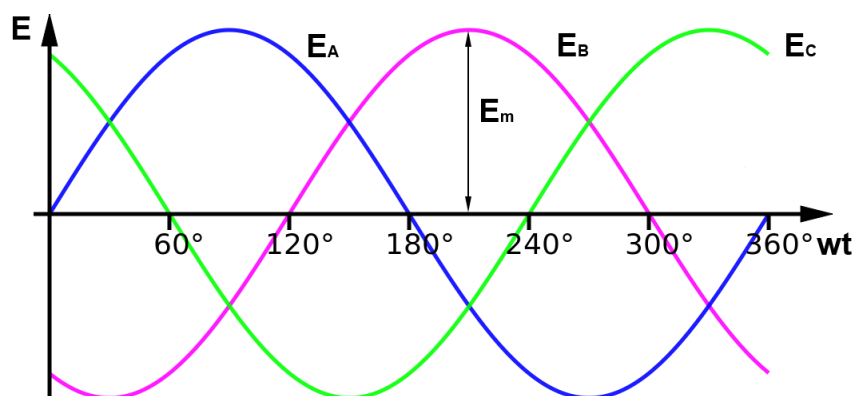


Рисунок 2.33 – Формы ЭДС в трёхфазном генераторе

Из графика на рисунке 2.33 следует, что

$$E_A + E_B + E_C = 0. \quad (2.17)$$

Векторная диаграмма трёхфазной системы ЭДС, у которой сопротивления потребителей равны между собой, показана на рисунке 2.34.

На диаграмме (рисунок 2.34) вектор \dot{E}_A направлен вертикально, так как при расчёте трёхфазных цепей принято направлять вертикально вверх ось действительных величин. Из диаграммы также следует, что для трёхфазной системы, у которой сопротивления потребителей равны между собой, геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю: $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

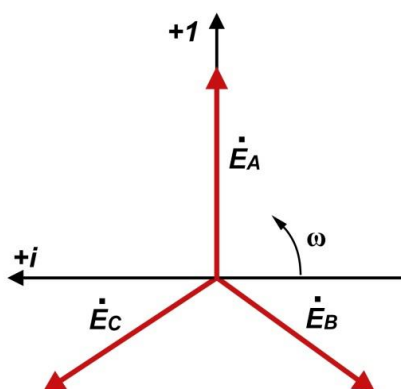


Рисунок 2.34 – Векторная диаграмма трёхфазной сети с равными сопротивлениями потребителей

Существуют различные способы соединения фаз трёхфазных систем электроснабжения и трёхфазных потребителей электроэнергии. Среди них наибольшее распространение получили:

- соединение "звездой";
- соединение "треугольником".

Как правило, наиболее распространено соединение "звездой" с нейтральным проводом (четырёхпроводная схема). Однако следует иметь в виду, что в общем случае способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трёхфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены "звездой", фазы потребителей соединяют либо "звездой", либо "треугольником". Таким образом, можно получить следующие виды трёхфазных цепей: "звезда-звезда", "звезда-треугольник", "треугольник-звезда", "треугольник-треугольник".

Так как на практике нагрузка на разные фазы не является симметричной (подключается разная электрическая мощность или, например, активная нагрузка на одной фазе, а на другой реактивная или ёмкостная), то при соединении без нейтрального провода можно получить такое неприятное явление как "перекос фаз": например, лампы накаливания, подключенные к одной из фаз, слабо светятся, а на другие фазы подаётся чрезмерно большое электрическое напряжение – и включенные приборы "сгорают".

На рисунке 2.35а приведена схема соединения "звездой". "Звездой" называют такое соединение, когда концы фаз обмоток генератора G соединяют в одну общую точку N , называемую нейтральной точкой, или нейтралью. Концы фаз обмоток потребителя M также соединяют в общую точку. Провода, соединяющие начала фаз генератора и потребителя, называют линейными. Провод, соединяющий две нейтрали, называют нейтральным.

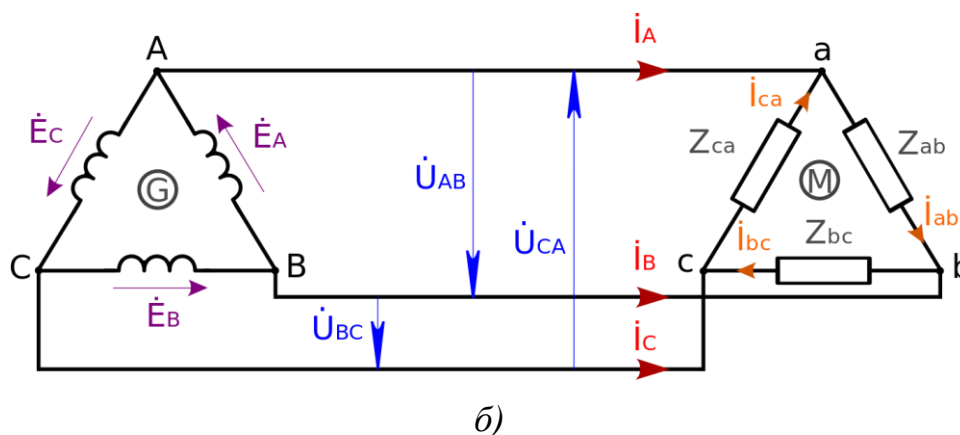
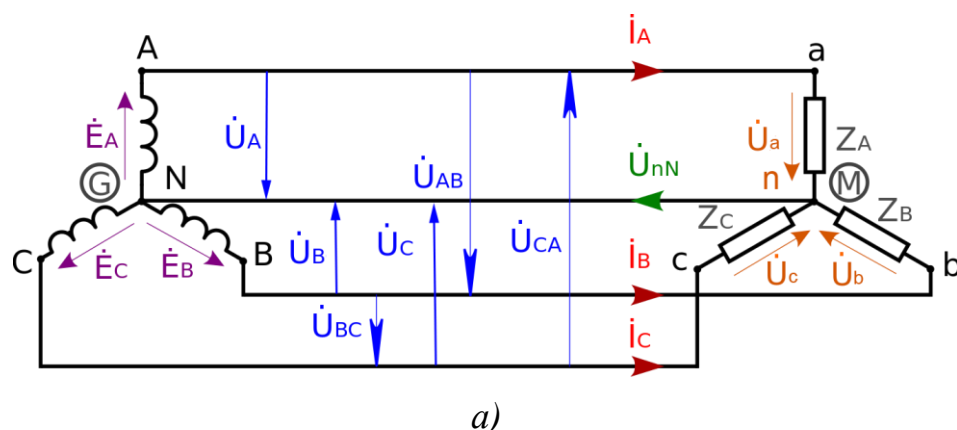


Рисунок 2.35 – Способы соединения трёхфазных систем электроснабжения: "звездой" (a) и "треугольником" (б)

Трёхфазную цепь, имеющую нейтральный провод, называют четырёхпроводной. Если нейтрального провода нет – трёхпроводной.

Напряжение между линейным проводом и нейтралью (U_A, U_B, U_C) называют фазным U_ϕ . Напряжение между двумя линейными проводами (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) называют линейным U_L . Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приёмнике считают таким же, как и в генераторе ($U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

- фазные (I_ϕ) – это токи в фазах генератора и приёмников;
- линейные (I_L) – это токи в линейных проводах.

При соединении в "звезду" фазные и линейные токи равны: $I_\phi = I_L$.

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки N имеем в комплексной форме

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \quad (2.18)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и \dot{I}_N – токи в каждой из фаз и в нейтральном проводе соответственно.

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений можно записать систему уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{cases} \quad (2.19)$$

Согласно (2.19) на рисунке 2.36 построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} (общее обозначение U_L) рав-

ны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений U_A , U_B , U_C (общее обозначение U_ϕ) на угол 30° .

Действующие значения линейных напряжений U_L можно определить графически по векторной диаграмме (рисунок 2.36) как:

$$U_L = 2U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi. \quad (2.20)$$

Зачастую векторную диаграмму удобно выполнить *топографической*, тогда каждой точке цепи соответствует определённая точка на диаграмме. Вектор, проведённый между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжения между одноимёнными точками цепи.

Приёмники, включаемые в трёхфазную цепь, могут быть либо однофазными, либо трёхфазными. К однофазным приёмникам относят электрические лампы накаливания и другие осветительные приборы, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т. д. К трёхфазным приёмникам относят, например, трёхфазные асинхронные двигатели и индукционные печи. Обычно комплексные сопротивления фаз трёхфазных приёмников равны между собой:

$$Z_a = Z_b = Z_c = Ze^{j\varphi}. \quad (2.21)$$

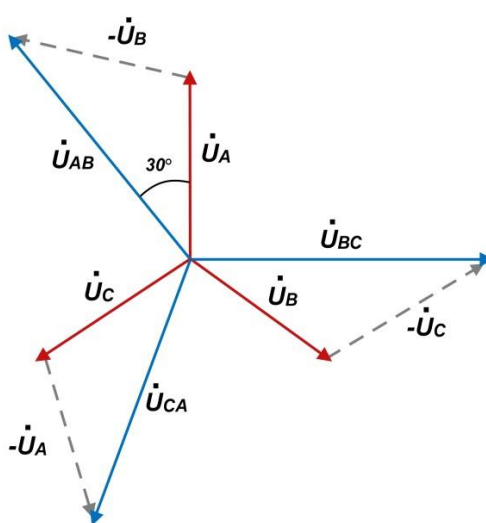


Рисунок 2.36 – Векторная диаграмма симметричной трёхфазной сети

Такие приёмники называют симметричными. Если это условие не выполняется, то приёмники называют несимметричными.

Для расчета трёхфазной цепи применимы все методы, используемые для расчёта линейных цепей. Поэтому токи в каждой фазе можно определить как

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (2.22)$$

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $Z_a = Z_b = Z_c$, т.е. когда $R_a = R_b = R_c = R_\phi$ и $X_a = X_b = X_c = X_\phi$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы:

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}, \quad (2.23)$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \arctg\left(\frac{X_\phi}{R_\phi}\right). \quad (2.24)$$

Построив векторную диаграмму токов для симметричного приёмника (рисунок 2.37), легко установить, что геометрическая сумма трёх векторов тока равна нулю: $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе $I_N = 0$, поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

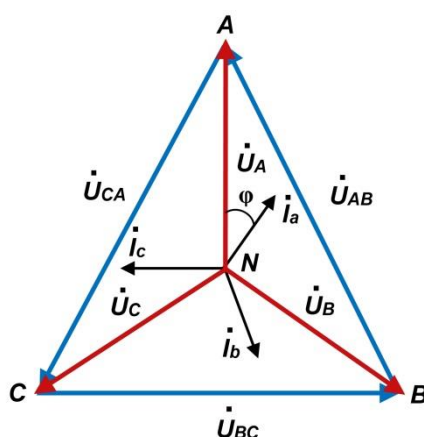


Рисунок 2.37 – Топографическая диаграмма трёхфазной сети ("звезда") при симметричной нагрузке

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, то есть когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ и $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$, токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома как в (2.22).

Ток в нейтральном проводе \dot{I}_N равен геометрической сумме фазных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

Напряжения будут иметь вид $U_a = U_A$, $U_b = U_B$, $U_c = U_C$, $U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$ благодаря нейтральному проводу при $Z_N = 0$. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приёмника при несимметричной нагрузке. Поэтому в четырёхпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

Векторная диаграмма токов при несимметричной нагрузке приведена на рисунке 2.38

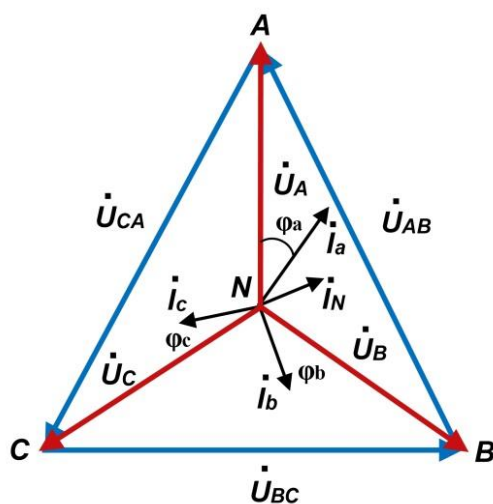


Рисунок 2.38 – Векторная диаграмма трёхфазной сети ("звезда") при несимметричной нагрузке

Рассмотрим случай отсутствия нейтрального провода.

При симметричной нагрузке, то есть когда $Z_a = Z_b = Z_c$, напряжение между нейтральной точкой генератора N и нейтральной точкой приёмника n равно нулю, то есть $U_{nN} = 0$.

В этом случае, по-прежнему, $U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$, а токи в фазах и углы определяются по тем же формулам (2.23, 2.24), что и для четырёхпроводной цепи. В случае симметричного приёмника достаточно определить ток только в одной из фаз. Сдвиг фаз между током и соответствующим напряжением $\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right)$.

При несимметричной нагрузке, то есть когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$, между нейтральными точками приёмника и генератора возникает напряжение смещения нейтрали U_{nN} .

Для определения напряжения смещения нейтрали можно воспользоваться формулой межузлового напряжения, так как схема трёхфазной сети со "звездой" без нейтрального провода представляет собой схему с двумя узлами:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{Y_a \dot{U}_A + Y_b \dot{U}_B + Y_c \dot{U}_C}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (2.25)$$

где $Y_a = \frac{1}{Z_a}$, $Y_b = \frac{1}{Z_b}$, $Y_c = \frac{1}{Z_c}$ – комплексы проводимостей фаз нагрузки.

Очевидно, что теперь напряжения на фазах приёмника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \quad (2.26)$$

Зная фазные напряжения приёмника, можно определить фазные токи:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (2.27)$$

Векторы фазных напряжений можно определить графически, построив векторную диаграмму фазных напряжений (рисунок 2.39).

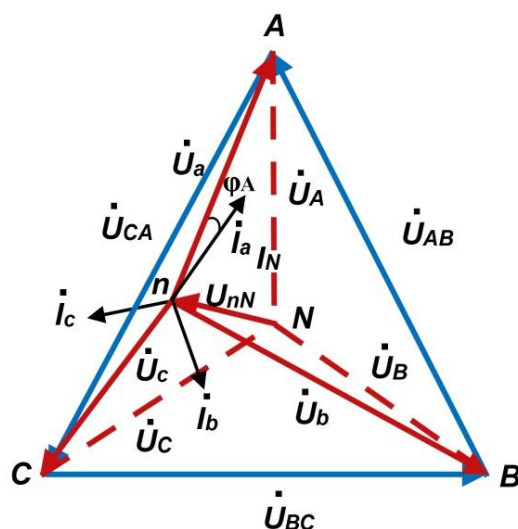


Рисунок 2.39 – Векторная диаграмма трёхфазной сети ("звезда") без нейтрального провода

При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещения нейтрали U_{nN} может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приёмника n на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приёмника могут отличаться друг от друга весьма существенно.

Таким образом, при симметричной нагрузке нейтральный провод можно удалить и это не повлияет на фазные напряжения приёмника. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода фазные напряжения нагрузки уже не связаны жёстко с фазными напряжениями генератора, так как на нагрузку воздействуют только линейные напряжения генератора. Несимметричная нагрузка в таких условиях вызывает несимметрию её фазных напряжений и смещение её нейтральной точки n из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).

Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.

Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнивать фазные напряжения приёмника при несимметричной нагрузке;

- подключать к трёхфазной цепи однофазные приёмники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

Следует иметь в виду, что в цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведёт к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

"Треугольником" называют такое соединение генератора с приёмником, когда конец первой фазы соединяется с началом второй фазы, конец второй фазы с началом третьей, а конец третьей фазы соединяется с началом первой (рис. 2.35б). Начала фаз A , B и C подключают с помощью трёх проводов к приёмникам.

Соединение фаз генератора в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для системы электроснабжения – и поэтому недопустим

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению: $U_\phi = U_L$.

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям генератора: $U_{ab} = U_{AB}$, $U_{bc} = U_{BC}$, $U_{ca} = U_{CA}$. По фазам Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} приёмника протекают фазные токи \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} и \dot{I}_{ca} . Условное положительное направление фазных напряжений \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} и \dot{U}_{ca} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное

положительное направление линейных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C принято от генератора к приёмнику.

В отличие от соединения "звездой" при соединении "треугольником" фазные токи не равны линейным. Токи в фазах приёмника определяют как

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (2.28)$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов a , b и c :

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (2.29)$$

Сложив левые и правые части системы уравнений (2.29), получим

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (2.30)$$

т.е. сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

При симметричной нагрузке

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Ze^{j\varphi}.$$

$$\text{т.е. } Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi. \quad (2.31)$$

Так как линейные (они же фазные) напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (2.32)$$

Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .

Линейные токи (2.29) образуют также симметричную систему токов (рисунки 2.40, 2.41).

На векторной диаграмме (рисунок 2.41) фазные токи отстают от фазных напряжений на угол φ (полагаем, что фазы приёмника являются индуктивными, т.е. $\varphi > 0$). Здесь принято, что напряжение U_{AB} имеет нулевую фазу. Из диа-

граммы следует, что любой линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток \dot{I}_A отстаёт по фазе от фазного тока \dot{I}_{ab} на угол 30° , на этот же угол отстаёт \dot{I}_B от \dot{I}_{bc} , \dot{I}_C от \dot{I}_{ca} .

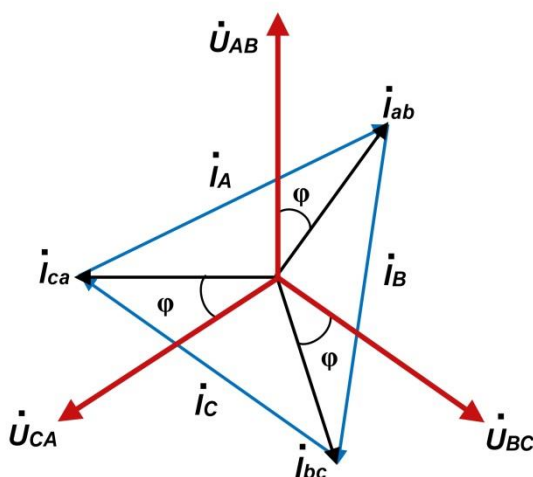


Рисунок 2.40 – Векторная диаграмма трёхфазной сети ("треугольник") с симметричной нагрузкой

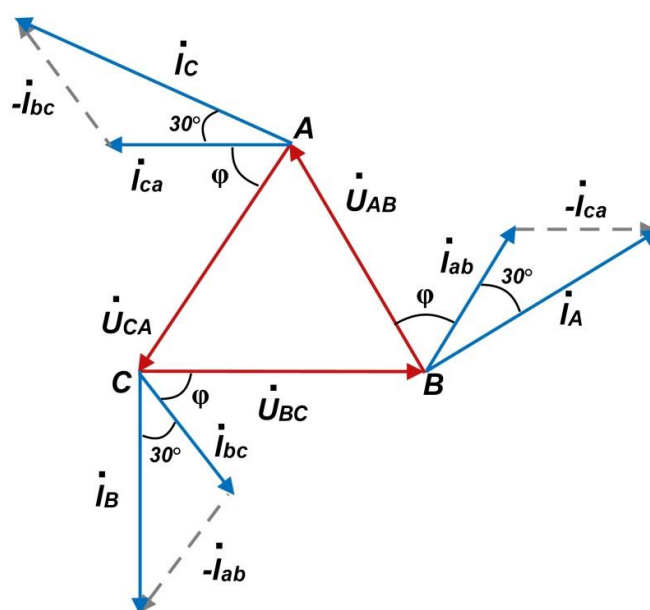


Рисунок 2.41 – Векторная диаграмма трёхфазной сети ("треугольник") с симметричной нагрузкой

При равномерной нагрузке фаз расчёт трёхфазной цепи, соединённой "треугольником", можно свести к расчёту одной фазы, то есть фазное напряже-

ние $U_\phi = U_\Delta$, фазный ток $I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}$, линейный ток $I_\Delta = \sqrt{3}I_\phi$, угол сдвига по фа-

зе $\varphi = \arctg\left(\frac{X_\phi}{R_\phi}\right)$.

В общем случае при несимметричной нагрузке $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно она возникает при электропитании от трёхфазной сети однофазных приёмников. Например, для нагрузки на рисунке 2.42, фазные токи, углы сдвига фаз и фазные мощности будут в общем случае различными.

Векторная диаграмма для случая, когда в фазе ab имеется активная нагрузка, в фазе bc – активно-индуктивная, а в фазе ca – активно-ёмкостная, приведена на рисунке 2.43, там же приведена топографическая диаграмма. Построение векторов линейных токов произведено в соответствии с выражениями (2.29).

Таким образом, при несимметричной нагрузке симметрия фазных токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} нарушается, поэтому линейные токи I_A , I_B , I_C можно определить только расчётом по вышеприведённым уравнениям (2.29) или найти графическим путём из векторных диаграмм (рисунок 2.43).

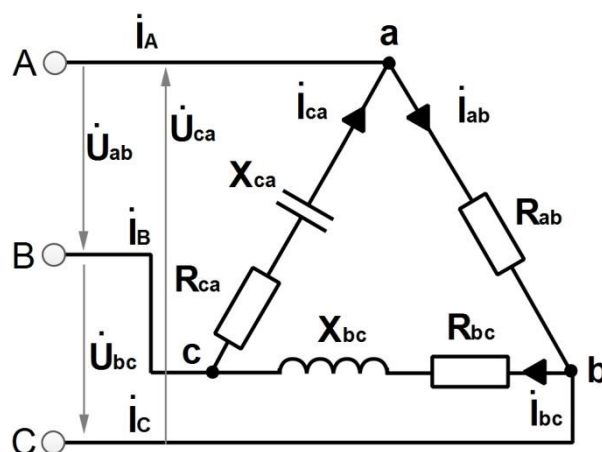


Рисунок 2.42 – Трёхфазная сеть ("треугольник") с несимметричной нагрузкой

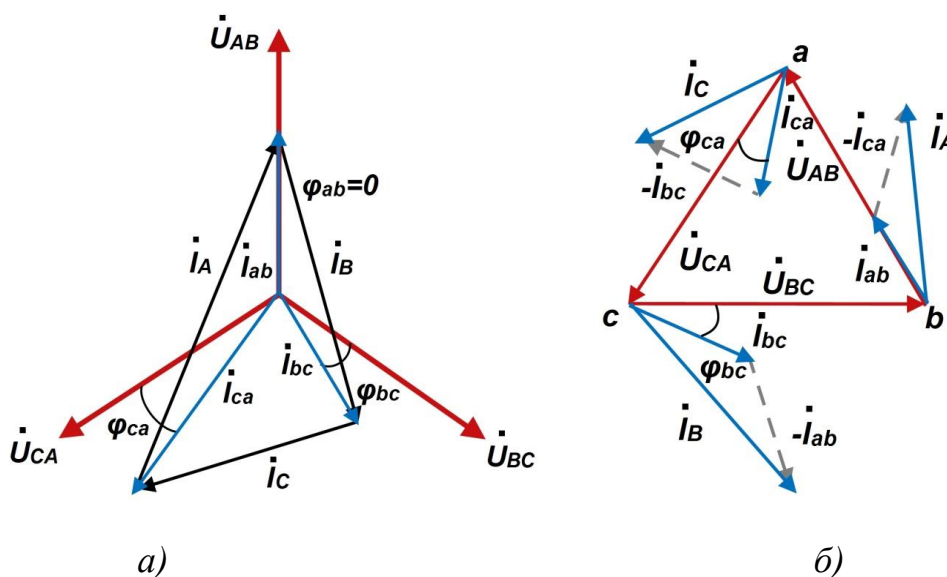


Рисунок 2.43 – Векторная (а) и топографическая (б) диаграммы трёхфазной сети ("треугольник") с несимметричной нагрузкой

Важной особенностью соединения фаз приёмника "треугольником" является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остаётся неизменным, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединённых с этой фазой. Поэтому схему соединения "треугольником" широко используют для включения несимметричной нагрузки.

При расчёте для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} и соответствующие им сдвиги фаз φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} . Затем определяют линейные токи с помощью уравнений (2.29) в комплексной форме или с помощью векторных диаграмм (рисунок 2.43).

Приведём дополнительно общие замечания к расчёту трёхфазных цепей.

1. При расчёте трёхфазных цепей исходят из предположения, что генератор даёт симметричную систему напряжений. На практике несимметрия нагрузки практически не влияет на систему напряжений генератора в том случае, если мощность нагрузки мала по сравнению с мощностью генератора или сети электроснабжения.

2. Схема соединения обмоток трёхфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в "звезду" нагрузка может быть соединена в "звезду" с нейтральным проводом, в "звезду" без нейтрального провода или, наконец, в "треугольник".

2.4.3 Расчет мощности в трехфазных системах электроснабжения

В трёхфазных цепях, так же как и в однофазных, пользуются понятиями активной, реактивной и полной мощностей.

А. Соединение потребителей "звездой"

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трёхфазного приёмника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (2.33)$$

где $P_a = U_a I_a \cos \varphi_a$; $P_b = U_b I_b \cos \varphi_b$; $P_c = U_c I_c \cos \varphi_c$; $U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$ – фазные напряжения и токи соответственно; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – углы сдвига фаз между напряжениями и токами.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (2.34)$$

где $Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a$; $Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b$; $Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c$.

Полная мощность отдельных фаз

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c. \quad (2.35)$$

Полная мощность трёхфазного приёмника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.36)$$

При симметричной системе напряжений ($U_a = U_b = U_c = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_a = I_b = I_c = I_\phi$; $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) фазные мощности равны $P_a = P_b = P_c = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$; $Q_a = Q_b = Q_c = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трёхфазного приёмника

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (2.37)$$

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi. \quad (2.38)$$

Полная мощность

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi. \quad (2.39)$$

Отсюда следует, что в трёхфазной цепи при симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке достаточно измерить мощность одной фазы и утроить результат.

Б. Соединение потребителей "треугольником"

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трёхфазного приёмника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}, \quad (2.40)$$

где $P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}$; $P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}$; $P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}$; U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} — фазные напряжения и токи соответственно; φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} — углы сдвига фаз между напряжением и током.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}, \quad (2.41)$$

где $Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}$; $Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc}$; $Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}$.

Полная мощность отдельных фаз

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab}; S_{bc} = U_{bc} I_{bc}; S_{ca} = U_{ca} I_{ca}. \quad (2.42)$$

Полная мощность трёхфазного приёмника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.43)$$

При симметричной системе напряжений ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi$; $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазные мощности равны $P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$; $Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трёхфазного приёмника

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi. \quad (2.44)$$

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi. \quad (2.45)$$

Полная мощность

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi}. \quad (2.46)$$

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз симметричного приёмника "звездой"

$$U_{\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, \quad I_{\phi} = I_L, \quad (2.47)$$

а при соединении "треугольником"

$$U_{\phi} = U_L, \quad I_{\phi} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}. \quad (2.48)$$

Поэтому независимо от схемы соединения фаз приёмника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi, \quad (2.49)$$

где U_L и I_L – линейные напряжение и ток соответственно.

Обычно индексы "л" и "ф" не указывают – и тогда формула принимает вид

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi. \quad (2.50)$$

Соответственно реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (2.51)$$

и полная мощность

$$S = \sqrt{3}UI. \quad (2.52)$$

При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазными напряжением и током, и что при неизменном линейном напряжении, переключая приёмник со "звезды" в "треугольник", его мощность увеличивается в 3 раза.

2.4.4 Измерение мощности в трехфазных системах электроснабжения

Для измерения активной мощности трёхфазной системы переменного тока применяют ряд способов. Выбор того или иного способа определяется схемой сети (трёх- или четырёхпроводная), схемой соединения фаз приёмника ("звезда" или "треугольник"), характером нагрузки (симметричная или несимметричная), доступностью нейтральной точки.

1. *Способ одного ваттметра* применяют для измерения мощности при симметричной нагрузке в четырёхпроводной или трёхпроводной линии ("звезда"), если доступна для подключения нейтральная (нулевая) точка нагрузки (рисунок 2.44). При этом общая мощность равна утроенному показанию ваттметра: $P = 3P_\phi$. Измерение активной мощности симметричного приёмника в трёхфазной цепи одним ваттметром применяют только при полной гарантии симметричности трёхфазной системы.

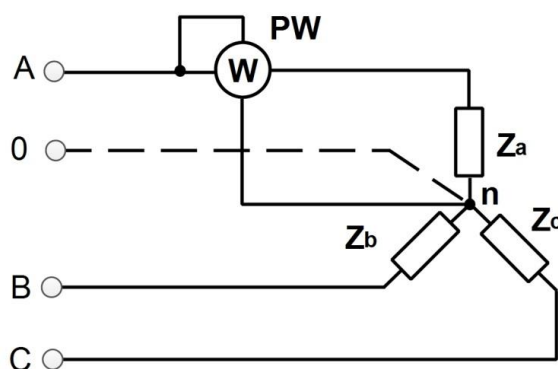


Рисунок 2.44 – К первому способу измерения активной мощности трехфазной системы переменного тока

2. *Способ одного ваттметра с созданием искусственной нулевой точки* применяют для измерения мощности при симметричной нагрузке в тех случаях,

когда нулевая (нейтральная) точка приёмника недоступна или вообще отсутствует (например, в соединении "треугольником"). При этом в одну из фаз включают токовую обмотку ваттметра, а нулевую (нейтральную точку) получают включением двух одинаковых сопротивлений между двумя другими фазами (рисунок 2.45). В этом случае общая мощность равна утроенному показанию ваттметра.

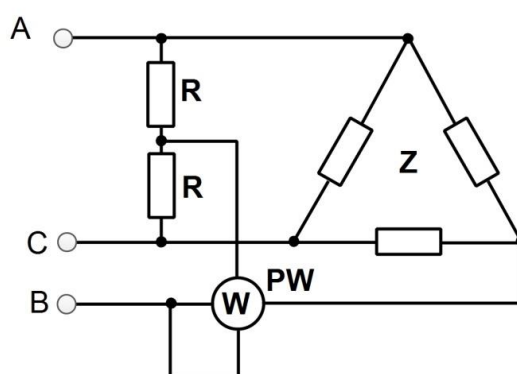


Рисунок 2.45 – Ко второму способу измерения активной мощности трехфазной системы переменного тока

3. *Способ трех ваттметров* применяют для измерения мощности при неравномерной нагрузке в четырёхпроводной линии (рисунок 2.46). Общая мощность при этом равна сумме показаний всех трёх ваттметров.

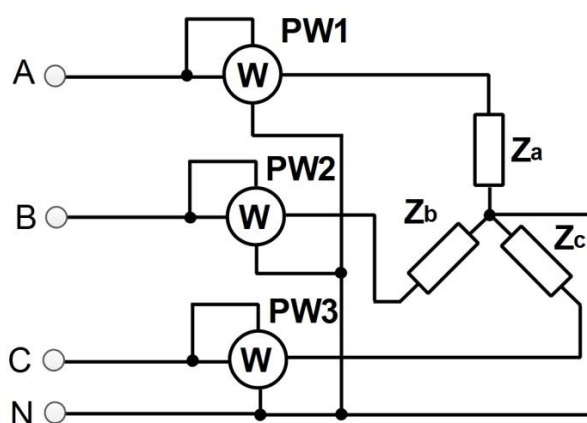


Рисунок 2.46 – К третьему способу измерения активной мощности трехфазной системы переменного тока

4. *Способ двух ваттметров* может быть применен в трёхпроводных линиях во всех случаях при измерении мощности трёхфазных приёмников (рисунок 2.47). По этой схеме токовые обмотки ваттметров включают в какие-либо две фазы, а обмотки напряжения между третьей (незанятой) фазой и той фазой, в которую включена токовая обмотка данного ваттметра. Общая мощность при этом равна сумме показаний обоих ваттметров.

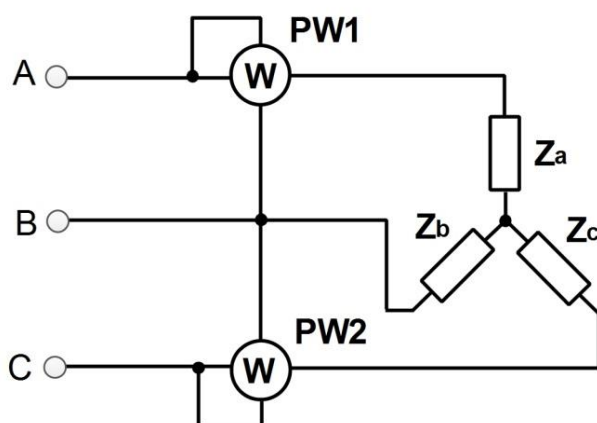


Рисунок 2.47 – К четвертому способу измерения активной мощности трёхфазной системы переменного тока

Контрольные вопросы и задачи

1. В чём состоит принципиальное отличие между первичными химическими источниками тока и вторичными?
2. Приведите примеры использования аккумуляторов в быту и в военной технике.
3. Какие химические источники тока обладают в настоящее время наибольшей удельной энергоемкостью?
4. Какие источники тока в перспективе могут найти применение в портативной радиоэлектронной аппаратуре вместо литий-ионных аккумуляторов?
5. Какие аккумуляторы используют в электромобилях? электрических самолетах? мобильных телефонах?
6. Каковы основные правила эксплуатации литий-полимерных аккумуляторов?

7. В чем состоит преимущество трёхфазных систем электроснабжения перед однофазными?

8. Какие преимущества имеют те или иные способы соединения генератора трехфазного переменного напряжения с нагрузкой?

9. За какое время полностью разрядится литий-полимерный аккумулятор ёмкостью 3000 мА·ч при разряде током, равным 10С?

Список литературы

1. Коровин Н.В., Скундин А.М. Химические источники тока. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 740 с.

2. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2008. – 317 с.

3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2008. – 350 с.

4. Каменев Ю.Б., Чезлов И.Г. Современные химические источники тока. Гальванические элементы, аккумуляторы, конденсаторы. – СПб.: СПбГУКиТ, 2009. – 90 с.

5. Дмитриков В.Ф., Лившиц А.И., Шушпанов Д.В. Современное состояние и перспективы развития водородной энергетики, топливных элементов и систем электропитания двойного назначения на их основе // Электропитание. – 2009. – № 1. – С. 42-45.

6. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Издательский центр "Академия", 2013. – 496 с.

7. ГОСТ Р МЭК 60050-482-2011. Источники тока химические. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2013.

8. Баранов Н.Н., Мандругин А.А. Принципиально новый источник питания многоцелевого назначения для портативной техники с неограниченным ресурсом работы. – М.: ОИВТ РАН, 2017. – 17 с.

9. Ситников А.В., Масленникова С.И. Аккумуляторные батареи носимых электронных устройств // Радиостроение. – 2017. – № 5. – С. 52-72.

10. Волковой С. Автопром как двигатель прогресса в электронике. Часть.2 Электромобили, их перспективы и промежуточные варианты // Современная электроника. – 2018. – № 6. – С. 12-15.

11. Афанасьев А.С., Болдырев М.А., Халютин С.П. Анализ номенклатуры химических источников тока, применяемой в объектах специального назначения // Электропитание. – 2018. – № 1. – С. 40-49.

12. Нижниковский Е., Григорьев А., Подлесный А. Современные аккумуляторы для питания РЭА. Часть 1 // Современная электроника. – 2018. – № 2. – С. 42-46.

13. Нижниковский Е., Григорьев А., Подлесный А. Современные аккумуляторы для питания РЭА. Часть 2 // Современная электроника. – 2018. – № 3. – С. 30-32.

14. Полностью электрический летательный аппарат (аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников) / Под. ред. А.Е. Федосова. – М.: ГосНИИАС, 2018. – 102 с.