

Рис. 3

Примечания.

1) Проверку и ремонт БУ рекомендуется проводить в стационарных условиях с применением осциллографа. Для этого собирают схему, представленную на рис. 3. На конт. 1 ШП подают прямоугольные импульсы от звукового генератора амплитудой не менее 10...12 В и частотой 3,3 ...233 Гц.

2) Осциллографом проверяются сигналы на контрольных точках схемы БУ по указаниям таблицы.

3) После замены неисправных элементов БУ места пайки и сами элементы следует покрыть нитролаком.

&

АВТОМОБИЛЬНАЯ АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ*

Д. Соснин

Статья продолжает рассмотрение теоретических аспектов устройства и принципа действия автомобильной стартерной аккумуляторной батареи.

5. Заряд аккумулятора от внешнего источника тока

Совершенно очевидно, что электрическая энергия электродных потенциалов, первоначально полученная в аккумуляторе за счет его заливки электролитом, рано или поздно истощится. Это может произойти как от работы аккумулятора на полезную нагрузку, так и от длительного его хранения за счет саморазряда. В этом смысле аккумуляторы ничем не отличаются от одноразовых гальванических элементов, которые относят к химическим источникам тока (ХИТ) первого рода.

Однако, электрохимическая система [-Pb][H₂SO₄+H₂O][+PbO₂] аккумулятора обладает свойствами восстановления химических реагентов под воздействием обратного тока от внешнего источника электрической энергии. При этом внешняя электрическая энергия превращается в потенциальную химическую энергию восстановленных реагентов. Химические источники тока, обладающие

свойством вновь заряжаться от внешнего зарядного устройства, относятся к ХИТ второго рода. В таких источниках имеет место не накопление электрической энергии в виде энергии зарядов в конденсаторе, а аккумуляция, т.е. обратное собирание в элементах электрохимической системы химических активных реагентов, ранее затраченных на токообразование в прямом направлении.

На отрицательной пластине Pb обратное электрохимическое преобразование при заряде аккумулятора протекает по следующей закономерности:
 $Pb\ SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + Pb + O \downarrow$,
 а на положительной пластине PbO₂:
 $Pb\ SO_4 + 2H_2O \rightarrow H_2SO_4 + PbO_2 + 2H \downarrow$.

Стрелки вниз (↓) указывают на перемещение реагентов в электролите.

Данные химические реакции протекают под воздействием внешнего электрического тока от зарядного устройства, что вначале приводит к разложению сульфата свинца на ионы:

$Pb\ SO_4 + H_2O \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O$ — на отрицательной пластине;

$Pb\ SO_4 + 2H_2O \rightarrow Pb^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$ — на положительной пластине.

Далее на отрицательной пластине двухвалентный свинец нейтрализуется поступившими от зарядного устройства электронами и происходит восстановление губчатого свинца: $Pb^{2+} + 2e = Pb$. Одновременно образуется серная кислота и отрицательный ион O²⁻ кислорода: $H_2O + SO_4^{2-} = H_2SO_4 + O^{2-}$.

На положительной пластине при избытке воды двухвалентный ион свинца отдает два электрона во внешнюю цепь (зарядному устройству) и доокисляется до четырехвалентного иона Pb⁴⁺, который вступает в реакцию с водой и соединяется с двумя ионами атомарного кислорода 2O²⁻, за счет чего восстанавливается активная масса положительной пластины:
 $Pb^{4+} + 2H_2O = PbO_2 + 4H^+$.

Здесь так же образуется серная кислота в электролите и два иона водорода:

$4H^+ + SO_4^{2-} \rightarrow H_2SO_4 + 2H^+$.

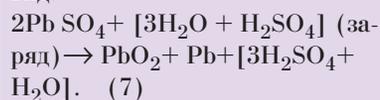
Ионизированные атомы кислорода, образовавшиеся у отрицательной пластины, и ионизирован-

* Окончание. Начало в №1-1999, с.39-42



ные атомы водорода, образовавшиеся у положительной пластины, в современных необслуживаемых аккумуляторах перемещаются в электролите в противоположных направлениях: отрицательные ионы O^{2-} кислорода к положительной пластине $+PbO_2$, а положительные ионы H^+ водорода — к отрицательной пластине $-Pb$. На положительных пластинах отрицательные ионы кислорода отдают электроны и переходят в атомарный кислород: $O^{2-} - 2e = O$. На отрицательных пластинах положительные ионы водорода нейтрализуются свободными электронами $2H^+ + 2e = H_2$, что приводит к «дефициту» электронов на отрицательном электроде, и как следствие к постепенному уменьшению тока заряда. Далее на пластинах происходит накопление ионов до тех пор, пока созданный ими дополнительный электродный потенциал не повысит напряжение на клеммах аккумулятора до запорного значения $U_3 = 5..2,7$ В. При этом внутреннее сопротивление аккумулятора резко возрастет и ток заряда практически прекратится. Наступает состояние полного заряда (полного восстановления активных реагентов) аккумулятора. После этого вся энергия электрического тока от зарядного устройства начнет затрачиваться только на разложение воды на водород и кислород: $H_2O \rightarrow 2H + O$. В прежних конструкциях аккумуляторов в конце заряда имело место интенсивное газовыделение, что являлось признаком окончания процесса заряда. В современных необслуживаемых и монолитных аккумуляторах газовыделение не происходит, так как наступает эффект запирания зарядного тока в начале газовыделения.

Общее токообразующее уравнение химических превращений в аккумуляторе при его заряде примет вид:



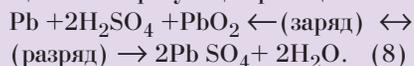
Из выражения 7 видно, что в процессе заряда аккумулятора

восстанавливаются не только реагенты, но и увеличивается концентрация серной кислоты: в электролите свободных молекул воды становится меньше, а молекул серной кислоты больше. Ясно, что при этом увеличивается плотность электролита, которая может служить мерой заряженности аккумулятора.

6. Обратимость процессов в аккумуляторе

Токообразующее уравнение 7 показывает, что свинцово-кислотный аккумулятор при заряде не накапливает электрическую энергию, а преобразует ее в число молекул химически активных реагентов. При разряде химическая энергия реагентов в процессе реакции растворения переходит в электрическую энергию электродных потенциалов, которая и создает ЭДС аккумулятора. В уравнении 7 из правой и левой части можно исключить по одной молекуле воды H_2O и по одной молекуле серной кислоты H_2SO_4 . Тогда станет очевидным, что выражения 6 и 7 совершенно идентичны, но направления описываемых ими электрохимических превращений противоположны. Это означает, что химические реакции разряда и заряда взаимнообратимы, и для их обратимости необходимо и достаточно поменять направление тока внутри аккумулятора.

Тогда разрядно-зарядному циклу химических превращений в аккумуляторе будет отвечать уравнение общей токообразующей реакции:



Формула 8 отображает обратимость химических процессов, происходящих в аккумуляторе, что было впервые описано теорией двойной сульфатации еще в 1883 г. Д. Гладстоном и А. Трайбом. Эта теория применительно к свинцово-кислотным аккумуляторам говорит о том, что когда аккумулятор разряжается, часть активных химических реагентов переходит в суль-

фат свинца и в воду. При заряде аккумулятора химические реакции протекают в обратном направлении и активные реагенты восстанавливаются. Однако следует иметь в виду, что полного восстановления активных масс во время заряда не происходит даже в совершенно новом аккумуляторе и даже при идеальных условиях заряда. От цикла к циклу на электродах в АКБ накапливается сернокислый свинец (сульфат) и рано или поздно батарея окончательно выходит из строя. Этому же способствует и так называемый саморазряд аккумулятора, который невозможно исключить полностью.

Выводы

1) Современная автомобильная аккумуляторная батарея относится к свинцово-кислотным химическим источникам тока (ХИТ) второго рода с активной электрохимической системой $[-Pb][H_2SO_4 + H_2O][+PbO_2]$ в каждом аккумуляторе.

2) Готовность к работе современного аккумулятора формируется технологически, сухим зарядом активных масс, в процессе производства. После заливки электролита и пропитки сухозаряженный аккумулятор готов к работе без подзарядки.

3) Если залитый аккумулятор длительное время хранить без подзарядки, он, как и гальванический элемент (ХИТ первого рода), может прийти в полную негодность под действием саморазряда.

4) Свинцовокислотный аккумулятор обладает свойством заряжаться под действием обратного электрического тока от внешнего зарядного устройства. При этом происходит не накопление электрических зарядов, а восстановление активных реагентов электрохимической системы аккумулятора, ранее израсходованных на прямое токообразование.

&



ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Д. Соснин

В предыдущей публикации подробно рассмотрены теоретические аспекты принципа действия и конструктивного исполнения автомобильной аккумуляторной батареи. Настоящая статья посвящена описанию основных параметров и характеристик этого устройства.

1. Предварительные замечания

Уже отмечалось [1], что идентичность отдельных аккумуляторов в исправной аккумуляторной батарее (АКБ) позволяет рассматривать ее устройство и принцип действия на примере одного аккумулятора. То же самое можно допустить при рассмотрении параметров и характеристик.

Под параметрами электротехнического устройства принято понимать совокупность эксплуатационно-технических показателей, каждый из которых отображает то или иное его свойство. Характеристикой устройства называют зависимость одного параметра от другого при постоянстве всех остальных.

К основным параметрам свинцово-кислотного аккумулятора относятся:

- ♦ электродвижущая сила ЭДС E_a (в вольтах);
- ♦ плотность электролита γ в аккумуляторе (в г/см³);
- ♦ полное внутреннее сопротивление R_a (в омах);
- ♦ напряжение на клеммах аккумулятора U_a (в вольтах);
- ♦ номинальная емкость аккумулятора C_n (в ампер-часах);
- ♦ продолжительность хранения t_{xp} и срок службы $t_{сл}$ (в месяцах).

Основными характеристиками аккумулятора являются электродная характеристика $E_a = f(\gamma)$ и временные разрядно-зарядные характеристики (зависимость основных параметров от времени t_p разряда или времени t_z заряда).

Рассмотрим указанные параметры и характеристики свинцово-кислотного аккумулятора.

2. Электродвижущая сила аккумулятора

Электродвижущая сила E_a является основным параметром свинцово-кислотного аккумулятора. Она определяется активностью химических реагентов (Pb, PbO₂, H₂SO₄, H₂O), входящих в состав электрохимической системы аккумулятора, но при этом никак не зависит от количества электролита и активных масс на электродных пластинах, а также от их форм и размеров.

Величина ЭДС E_a определяется как разность равновесных электрических потенциалов ϕ между электродами при отсутствии протекающего через аккумулятор электрического тока: $E_a = \phi_+ - \phi_-$. Так как $\phi_+ > \phi_-$, то ЭДС всегда положительна.

Таким образом ЭДС является стационарным физико-химическим параметром, зависящим от природы взаимодействующих реагентов и указывающим на потенциальную способность аккумулятора поддерживать на электродах электрическое напряжение в токовой цепи.

Электродвижущая сила заряженного аккумулятора сохраняется достаточно продолжительно.

Численное значение E_a может быть найдено из теоретической закономерности

$$E_a = 2,047 + K T \ln \alpha, \quad (1)$$

где T — абсолютная температура; K — постоянный коэффици-

ент, характеризующий физико-химические свойства активных масс электродов; α — коэффициент, характеризующий активность электролита.

Однако на практике пользуются эмпирической формулой для определения ЭДС:

$$E_a = 0,84 + [0,00075(T-25) + \gamma_T], \quad (2)$$

где выражение в квадратных скобках соответствует значению плотности γ_{25} электролита, приведенному к температуре 25°C; γ_T — плотность электролита при температуре T °C измерения.

Химическая активность реагентов, собранных в электрохимическую систему аккумулятора, слабо зависит от температуры, что наглядно может быть показано дифференцированием выражения (1) по температуре: $dE/dT \approx 0,0004$ (В/°C).

При изменении температуры от -30 до +50°C (в рабочем диапазоне для АКБ) электродвижущая сила каждого аккумулятора в батарее изменяется всего на 0,04 В. На практике таким незначительным изменением пренебрегают и считают, что ЭДС E_a , выраженная в вольтах, зависит только от приведенной плотности электролита, выраженной в г/см³: $E_a = 0,84 + \gamma_{25}$ (В). (3)

Так, если плотность электролита в банках полностью заряженной батареи при $T=25$ °C равна 1,28 г/см³, электродвижущая сила в каждом аккумуляторе

$$E_a = 0,84 + 1,28 = 2,12 \text{ В,}$$

а ЭДС батареи равна 12,72 В.

Практически электродвижущую силу аккумуляторной батареи можно измерить вольтметром



с высоким внутренним сопротивлением.

3. Плотность электролита

Электролит в автомобильном свинцово-кислотном аккумуляторе — это 30%-ный раствор серной кислоты H_2SO_4 в дистиллированной воде H_2O .

Аккумуляторная серная кислота, поступающая в продажу, содержит 94% химически чистой кислоты H_2SO_4 . Она прозрачна, не имеет цвета и запаха, кипит при температуре $33^\circ C$, замерзает при $T=7^\circ C$, имеет плотность $\gamma_K=1,83$ г/см³. Чаще в торговую сеть поставляется электролитный раствор с плотностью $\gamma_{эл}=1,4$ г/см³, или с плотностью, требуемой для данного климатического региона.

Под плотностью электролитного раствора (или кислоты) понимают отношение массы вещества (в граммах) к занимаемому им объему (в см³). Таким образом плотность — это параметр электролита, подобный его удельному весу. Плотности электролита 1,10...1,30 г/см³ соответствует массовая концентрация серной кислоты в 28...40%.

В исправной автомобильной аккумуляторной батарее плотность электролита может находиться в пределах от 1,07...1,3 г/см³. Разброс значений плотности электролита в банках полностью заряженной исправной АКБ не должен превышать 0,01 г/см³.

Однако, если батарея разряжена, значение плотности в банках АКБ может быть различным. Это зависит от состояния разряженности данного аккумулятора, от его технического состояния, а также от плотности первоначально залитого в него электролита.

При выборе плотности электролита для первоначальной заливки приходится выбирать между продолжительностью срока службы АКБ, который с уменьшением плотности увеличивается, и емкостью батареи, которая с понижением плотности электролита уменьшается.

| Климатическая зона | $t_{cp}^\circ C$ (январь) | Время года | $t_3^\circ C$ (замерз) | γ_{25} — плотность при $T=25^\circ C$, (г/см ³) | |
|-----------------------------|---------------------------|------------|------------------------|---|------------------|
| | | | | при заливке | после заряда АКБ |
| Очень холодная (заполярье) | -50...-30 | зима | -(64...68) | 1.28 | 1.30 |
| Холодная | -15...-5 | лето | -(50...58) | 1.24 | 1.26 |
| Московский регион | -30...-15 | весь год | -(58...64) | 1.26 | 1.28 |
| Умеренно-холодная | -9 | то же | -(52...60) | 1.25 | 1.27 |
| Теплая сухая | -15...-5 | то же | -(50...58) | 1.24 | 1.26 |
| Теплая влажная | -5...+5 | то же | -(40...50) | 1.22 | 1.24 |
| Жаркая влажная (субтропики) | 0...+5 | то же | -(28...40) | 1.20 | 1.22 |
| | +5...+10 | то же | -(22...28) | 1.18 | 1.20 |

Кроме того, с увеличением плотности электролита до 1,30 г/см³ батарея может храниться при более низкой температуре ($T_{1,30}=-60^\circ C$) без причинения ей ущерба (без размораживания активных масс электродов).

В рабочем свинцово-кислотном аккумуляторе плотность ниже 1,07 г/см³ недопустима, и не только из-за раннего замерзания электролита ($T_{1,07}=-5^\circ C$), но и по причине падения емкости аккумулятора при нормальных температурных условиях ($T > 10^\circ C$). Таким образом, плотность электролита во всех аккумуляторных банках автомобильной стартерной батареи должна поддерживаться одинаковой и в определенных границах в соответствии с заданными условиями эксплуатации, которые значительно отличаются для разных климатических регионов.

ГОСТ 16360-80 определяет климатические регионы по среднемесячной температуре $t_{cp}^\circ C$ воздуха в январе. С учетом требований ГОСТа составлена таблица.

Проводить сезонное изменение плотности электролита необходимо только в широтах, где средняя температура января ниже $-30^\circ C$.

Электролит приготавливают вливанием кислоты в воду, а не наоборот. Важно отметить, что в начале составляют электролит в пропорции 0,42 л 94%-ной кислоты и 0,65 л дистиллированной воды. При этом получается электролит с плотностью 1,4 г/см³ (при $T=25^\circ C$). Далее электролит разбавляют до нужной плотности в дистиллированной воде. Для получения одного литра электролита тре-

буемой плотности при эксплуатации батареи в средних широтах России 0,6 л электролита с плотностью $\gamma_{25}=1,40$ г/см³ необходимо влить в 0,4 л дистиллированной воды. Получится электролит с плотностью $\gamma_{25}=1,24$ г/см³. После полной зарядки плотность во всех банках АКБ достигает номинального значения 1,26 г/см³. Для московского региона круглогодичная плотность в полностью заряженной батарее несколько выше 1,27 г/см³.

Если необходимо повысить плотность электролита непосредственно в аккумуляторе, то доливают не кислоту, а электролит с плотностью 1,4 г/см³.

При этом производят также выравнивание плотности и уровня электролита в разных банках, что делают в процессе заряда батареи.

Измеряют уровень с помощью стеклянной мерной трубочки, а плотность электролита с помощью денсиметра (аэрметра) или с помощью поплавкового плотномера. Необходимо также наличие градусника.

После измерения плотности и температуры электролита измеренную плотность приводят к температуре $+25^\circ C$ по формуле $\gamma_{25}=\gamma_T + 0,0007 (T - 25)$, или с помощью графика, показанного на рис. 1, на котором слагаемое $0,0007 (T - 25)$ обозначено как величина температурной поправки $\Delta\gamma$ (г/см³).

Из графика видно, что в интервале температур (20...30) $^\circ C$ величина поправки $\Delta\gamma$ незначительна и ею можно пренебречь. Если же плотность электролита измеряется за пределами указанного диапазона,



приведенная плотность определяется с учетом поправки: $\gamma_{25} = \gamma_T + \Delta\gamma$, где γ_T — плотность электролита при температуре измерения T .

Например, если измеренная при температуре $T = -5^\circ\text{C}$ плотность $\gamma_T = 1,28 \text{ г/см}^3$, то согласно графику это означает, что при температуре $+25^\circ\text{C}$ плотность электролита $\gamma_{25} = 1,28 - 0,02 = 1,26 \text{ (г/см}^3\text{)}$.

Возможно и обратное использование графика: если известно, что при температуре $+25^\circ\text{C}$ плотность электролита $1,26 \text{ г/см}^3$, то при температуре $+40^\circ\text{C}$ она изменится и определится как: $\gamma_{40} = \gamma_{25} - \gamma_T = 1,26 - 0,02 = 1,24 \text{ (г/см}^3\text{)}$.

Разность между плотностью полностью заряженного аккумулятора γ_3 и полностью разряженного (γ_p) при температуре 25°C всегда равна $0,16 \text{ г/см}^3$, а $\Delta\text{Cp} = 100 (\gamma_3 - \gamma_{25}) / (\gamma_3 - \gamma_p)$. Тогда, если известна начальная плотность γ_n полностью заряженной аккумуляторной батареи, по измеренной плотности γ_T электролита можно определить степень разряженности $\Delta\text{Cp} (\%)$ каждого аккумулятора в отдельности:

$$\Delta\text{Cp} = 625 (\gamma_n - \gamma_T + \Delta\gamma) \%. \quad (4)$$

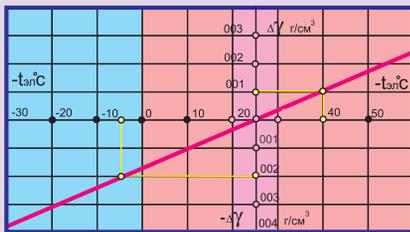


Рис. 1

Следует помнить, что серная кислота, входящая в состав электролита, исключительно активное химическое вещество, способное вызвать опасные кислотные ожоги на теле человека. Пары кислоты можно отравиться. Работа с электролитом требует особой осторожности, специальной химической посуды и индивидуальных средств защиты.

4. Электродная характеристика аккумулятора

Отличительным свойством свинцово-кислотного аккумулятора является почти линейная зависимость ЭДС E_a от плотности γ . Эта зависимость называется электродной характеристикой и отображает влияние плотности электролита на равновесные потенциалы электродов и на электродвижущую силу аккумулятора при определенной температуре. Графики функций: $\phi_+ = f(\gamma)$; $\phi_- = f(\gamma)$; $E_a = f(\gamma)$ приведены на рис. 2.

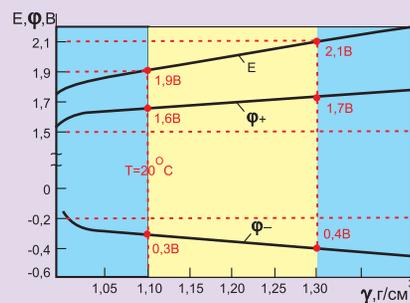


Рис. 2

В диапазоне изменения плотности ($1,05 \dots 1,35 \text{ г/см}^3$) все три функции абсолютно линейны и не зависят от конструкции и степени заряженности аккумулятора.

Установлено, что ЭДС E_a любого исправного свинцово-кислотного аккумулятора при плотности электролита $\gamma = 1,30 \text{ г/см}^3$ и температуре $T_{\text{э}} = 20^\circ\text{C}$, равна $2,1 \text{ В}$, а при $\gamma = 1,10 \text{ г/см}^3$, ЭДС $E_a = 1,9 \text{ В}$ (рис. 2). Однако плотность электролита незначительно уменьшается при увеличении температуры ($0,0007 \text{ г/см}^3$ на один градус), и очень заметно увеличивается при повышении степени заряженности аккумулятора. Получается так: в разряженном аккумуляторе с плотностью $\gamma_3 = 1,30 \text{ г/см}^3$, ЭДС $E_a = 2,1 \text{ В}$. А в заряженном аккумуляторе с плотностью $\gamma_3 = 1,20 \text{ г/см}^3$ — ЭДС $E_a = 2,0 \text{ В}$ (при одинаковой температуре аккумуляторов $T = 20^\circ\text{C}$). Таким образом, электродная характеристика показывает, что электродвижущая сила E_a не может служить метрологическим параметром для опре-

деления степени заряженности (или разряженности) аккумулятора. Как было показано ранее, таким параметром является плотность электролита.

5. Внутреннее сопротивление аккумулятора

Представим теперь электрохимическую систему $[-\text{Pb}] [\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}] [+ \text{PbO}_2]$ аккумулятора в виде элементов электрической цепи. На рис. 3 показана модель системы, составленная из реальных резистивных масс, имеющих место в аккумуляторе: Pb_k — свинцовая масса внутренних электрических соединений с омическим сопротивлением R_{k1} и R_{k2} ; Pb_p — масса свинцового сплава электродных решеток с сопротивлением R_{p1} и R_{p2} ; Pb_m — активная масса отрицательного электрода (губчатый свинец) с сопротивлением R_{m1} ; ЭК — масса электролита с сопротивлением $R_{\text{э}1}$ и $R_{\text{э}2}$; С — электропроводная масса сепаратора — параллельное соединение R_s и R_c , где R_c — сопротивление материала сепаратора; PbO_2 — активная масса положительного электрода (пористый сульфат свинца) с сопротивлением R_{m2} .

Если допустить, что в объеме перечисленных резистивных масс удельное сопротивление распределено равномерно и по аккумулятору электрический ток не протекает, то сумму внутренних резистивностей аккумулятора согласно рис. 3 можно представить как последовательное соединение сосредоточенных омических сопротивлений:

$$R_0 = [(R_{k1} + R_{k2}) + (R_{p1} + R_{p2})] + (R_{\text{э}1} + R_{\text{э}2}) + [R_s R_c / (R_s + R_c)] + (R_{m1} + R_{m2}),$$

где R_0 — суммарное сопротивление реальных внутренних резистивностей, которое называется **внутренним омическим сопротивлением** аккумулятора.

Если слагаемые для R_0 объединить по приближительному равенству удельных сопротивлений, то в сумме R_0 останется четыре слагаемых:



$R_0 = R_T + R_3 + R_c + R_M$; все они — омические сопротивления:

R_T — сопротивление внутренних тоководов ($R_K + R_P$);

R_3 — сопротивление электролита ($R_{31} + R_{32}$);

R_c — сопротивление сепаратора [$R_3 R_c / (R_3 + R_c)$];

R_M — сопротивление активных масс ($R_{M1} + R_{M2}$).

Сопротивление R_3 электролита в свинцово-кислотном аккумуляторе составляет примерно 50% от внутреннего омического сопротивления R_0 .

го сопротивления R_a аккумулятора в сильной степени зависит от тока через аккумулятор, а также от температуры (рис. 5).

6. Напряжение аккумуляторной батареи

Напряжение U_6 аккумуляторной батареи — это сумма напряжений U_a от шести последовательно соединенных аккумуляторов. Так как напряжения отдельных аккумуляторов равны между собой, то $U_6 = 6 U_a$.

же самое относится и к отдельному аккумулятору.

Напряжение, как и электродвижущая сила, измеряется в вольтах, но является более удобным эксплуатационным параметром. Его принято рассматривать для каждого аккумулятора в отдельности и подразделять на напряжение разряда U_{ap} и напряжение заряда U_{az} . (Одним из недостатков необслуживаемых АКБ является невозможность измерения напряжения на каждом аккумуляторе в отдельности).

Значения U_{ap} и U_{az} легко определяются по эквивалентным электрическим схемам замещения (рис. 6).

Когда аккумулятор находится под установившимся током I_{ap} разряда (рис. 6, а), то уравнение баланса потенциалов, согласно второму закону Кирхгофа, имеет вид: $E_a = I_{ap}(R_n + R_a) = I_{ap}R_n + I_{ap}R_a$, где R_n — внешняя резистивная нагрузка; R_a — полное внутреннее сопротивление аккумулятора.

Тогда $I_{ap}R_n = U_{ap} = E_a - I_{ap}R_a$, (5)

При заряде аккумулятора (рис. 6, б) постоянным током I_{az} баланс потенциалов в замкнутом контуре зарядной цепи определяется как равенство алгебраической суммы ЭДС и суммы падений напряжений (тот же второй закон Кирхгофа): $E_b - E_a = I_{az}R_a + I_{az}R_b$, здесь E_b , R_b — ЭДС и внутреннее сопротивление выпрямительного устройства.

Так как $E_b - I_{az}R_b = U_{az}$, то

$$U_{az} = E_a + I_{az}R_a. \quad (6)$$

В алгебраической сумме ЭДС ($E_b - E_a$) знак минус означает, что E_b и E_a при заряде должны быть включены встречно, и E_b должна быть больше E_a .

Таким образом, зарядное устройство подключается к АКБ по правилу «плюс с плюсом — минус с минусом».

Из формул 5 и 6 следует, что напряжение аккумулятора при разряде меньше ЭДС E_a , а при заряде больше — на величину падения напряжения $U_a = I_a R_a$ на полном внутреннем сопротивлении R_a аккумулятора.

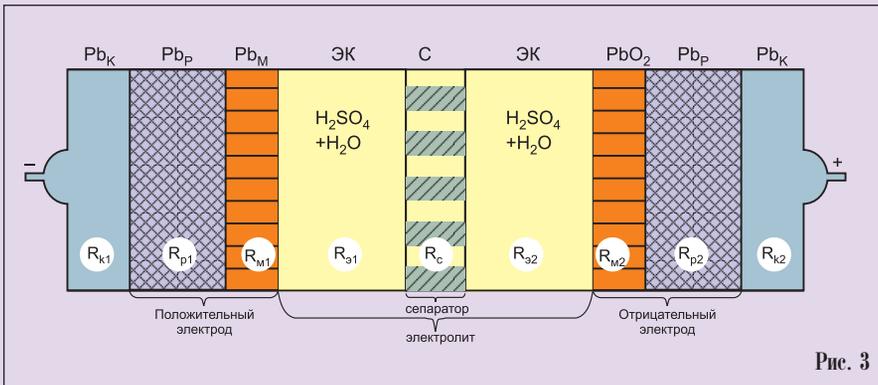


Рис. 3

При разряде аккумулятора активные массы $+Pb$ и $+PbO_2$ частично превращаются в сульфат свинца $PbSO_4$, а электролит теряет часть своей кислоты. Это приводит к увеличению внутреннего омического сопротивления R_0 . Еще более заметное влияние на величину R_0 оказывает температура. При изменении температуры в диапазоне $(-30...+40)^\circ C$ величина удельного сопротивления электролита $\rho_{31} = \rho_{30} (1 + \alpha_3 T)$ изменяется более, чем в 8 раз (α_3 — температурный коэффициент сопротивления). При этом в 3 раза изменяется внутреннее омическое сопротивление R_0 аккумулятора (см. рис. 4).

При прохождении тока через аккумулятор к его внутреннему омическому сопротивлению R_0 добавляется сопротивление $R_{п}$ токовой поляризации, и тогда **полное внутреннее сопротивление аккумулятора определяется как: $R_a = R_0 + R_{п}$.** Поляризационная составляющая $R_{п}$ полного внутренне-

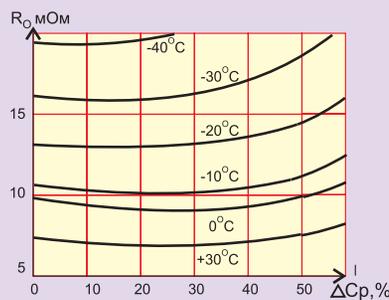


Рис. 4

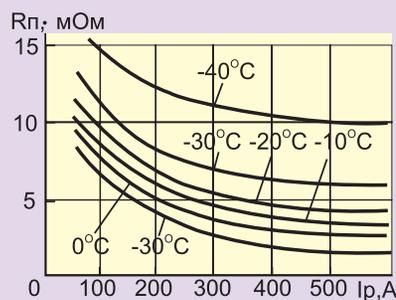


Рис. 5

При этом под напряжением U_6 понимается разность потенциалов на выводах батареи, когда по ней протекает электрический ток I_a . То

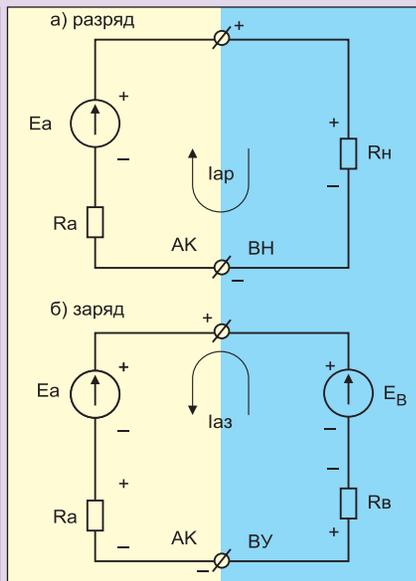


Рис. 6

Следует заметить, что на формирование текущего значения напряжения $U_a(t)$ аккумулятора как при разряде, так и при заряде большое влияние оказывают переходные процессы токовой поляризации у электродных пластин.

Эти процессы учитываются в формулах 5 и 6 полным внутренним сопротивлением R_a аккумулятора: $R_a = R_0 + R_n$. В состав R_a входит сопротивление R_n поляризации и омическая составляющая внутреннего сопротивления — R_0 .

Поляризация — это явление изменения потенциалов электродов от их значения в обесточенном аккумуляторе до значения потенциалов под током.

Скорость протекания процессов поляризации на электрических эквивалентных схемах замещения учитывается введением поляризационной емкости C_n .

Поляризация является основной причиной потерь внутри аккумулятора при переходе его из режима разряда в режим заряда или при обратном переходе (подробно о поляризации см. [2]).

7. Емкость и разрядно-зарядные характеристики аккумулятора

Сухозаряженная свинцово-кислотная аккумуляторная батарея

(АКБ) после первичной заливки электролитом и пропитки электродов практически полностью заряжена и готова к эксплуатации без подзарядки.

Если теперь АКБ поставить под разряд, то в течение некоторого времени батарея будет поддерживать на нагрузке электрический ток разряда. При неизменном сопротивлении нагрузки ток разряда будет постепенно уменьшаться, пока не станет равным нулю. Тогда количество электричества, отданное батареей в нагрузку, можно определить как:

$C_n = \int_0^t I(t) dt$, где C_n — полная емкость аккумулятора; $I(t)$ — ток разряда на постоянную нагрузку; t — продолжительность полного разряда.

За время t произойдет полный, т.е. предельно глубокий, разряд батареи (до $I_p = 0$), что в реальных условиях эксплуатации недопустимо из-за дальнейшей непригодности батареи к работе. Поэтому на практике емкость аккумулятора определяют при его частичном (например, при 60% - ном) разряде постоянным током I_p , а время разряда t_p ограничивают достижением наперед заданной величины напряжением U_{pn} разряда на клеммах аккумулятора.

$$Тогда C_n = I_p t_p, \quad (7)$$

где t_p — время разряда (в часах) постоянным током разряда I_p (в амперах) до заданного напряжения разряда U_{pn} (в вольтах); C_n — нормированная разрядная емкость батареи (в ампер-часах).

Так как нормированная емкость C_n определяется наперед заданными величинами — разрядным током I_p и конечным напряжением разряда U_{pk} , то время разряда t_p является метрологическим параметром, по которому при заданных I_p и U_{pk} можно определить емкость.

В формуле 7 конечное напряжение разряда в явном виде не присутствует, но именно по нему определяется конечное время разряда. Таким образом величины I_p , t_p , U_{pk} являются исходными параметрами выбора для определения величины нормированной емкости батареи, которая в разных странах выбира-

ется по-разному. Общий подход такой: нормированная емкость C_n должна быть меньше полной емкости C_n на столько, чтобы при разряде новой полностью заряженной батареи на величину C_n , она не теряла бы своей способности к полному восстановлению при заряде. Кроме того, имеется ввиду, что конечное напряжение разряда не может быть меньше 6 В, так как иначе нарушается работоспособность бортовых электрических и электронных устройств автомобиля. Для определения номинальной емкости батареи разряд проводят при постоянном токе $I_p = 0,05 C_{20}$. При этом переменной величиной является напряжение разряда. Зависимость основных параметров аккумулятора от продолжительности разряда называется временными разрядными характеристиками (рис. 7).

Обычно считается (при $T = 25^\circ C$ и $I_p = 0,05 C_{20}$), что при достижении конечным напряжением разряда значения $U_{pk} = 10,2$ В (1,7 В на отдельном аккумуляторе) батарея полностью разряжена, хотя до полного истощения ее емкости еще далеко ($C_n = 0,4 C_n$).

Величина нормированной емкости батареи, выбранная в качестве паспортного параметра, называется номинальной емкостью батареи.

Согласно российскому стандарту ГОСТ 959-91Е параметрами, по которым определяется номинальная емкость новой батареи, являются температура $T = 25^\circ C$, конечное напряжение разряда $U_{pk} = 10,2$ В, время разряда $t_p = 20$ ч, ток разряда $I_p = 0,05 C_{20}$ (А), где C_{20} — емкость батареи при 20-ти часовом разряде при температуре измерения $T = 25^\circ C$ до значения $C_p = 0,4 C_n$. Полная емкость C_n определяется экспериментально на этапе конструктивной разработки и испытаний новой модели аккумуляторной батареи. (В обычных обслуживаемых АКБ полная емкость C_n в 3-4 раза меньше теоретически возможной (конструктивной) емкости C_k , ко-

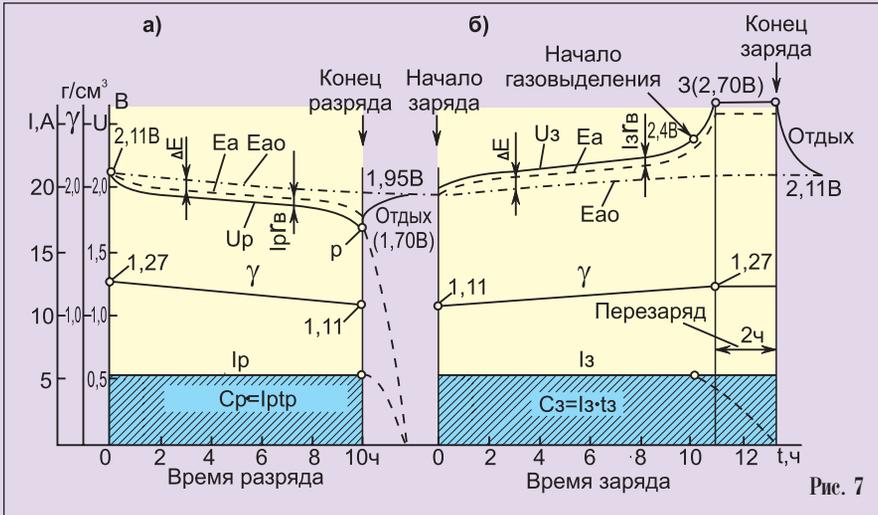


Рис. 7

ке заряда ($I_3 = \text{const}$) и при постоянном напряжении ($U_3 = \text{const}$).

При постоянном токе заряда емкость определяется как:

$$C_3 = I_3 t_3, \quad (8)$$

где t_3 — время заряда до заданного конечного напряжения заряда $U_{\text{зк}}$.

В отличие от разрядной, зарядную емкость нормировать невозможно. Ее можно только приблизительно оценить по количеству электричества, отданного зарядным устройством аккумулятору.

Для всех свинцово-кислотных аккумуляторов номинальным током заряда являются значения $I_3 = 0,1C_{20}$ и $I_3 = 0,05C_{20}$. Конечное напряжение заряда для различных конструкций АКБ может несколько отличаться. Для обслуживаемых батарей $U_{\text{зк}} = 6,2 \text{ В}$, для необслуживаемых $U_{\text{зк}} = 14,5 \text{ В}$.

Однако окончание заряда контролируют не только по конечному напряжению $U_{\text{зк}}$, но и по интенсивному газовыделению у обслуживаемых батарей, или по резкому падению тока заряда у необслуживаемых.

В стационарных условиях АКБ чаще заряжают в режиме постоянного тока ($I_3 = 0,05C_{20}$). На автомобилях — в режиме постоянного напряжения ($U_{\text{зк}} \leq 14,5 \text{ В}$), при ограничении максимального тока заряда значением $I_{3\text{max}} = (0,2 \dots 0,3) C_{20}$.

Время заряда непосредственно зависит от степени разряженности батареи до начала заряда и измеряется в процессе заряда в часах. Время заряда полностью разряженной батареи током $I_3 = 0,05C_{20}$ равно 20-ти часам, а током $I_3 = 0,1C_{20}$ — 10-ти часам.

Зависимости всех основных параметров аккумулятора от продолжительности заряда (от времени заряда t_3) при постоянном токе заряда называются временными зарядными характеристиками. На рис. 7 приведены такие характеристики для $I_3 = 0,1 C_{20}$ с продолжительностью заряда 12...13 ч.

В момент включения зарядного устройства напряжение $U_3 = E_{a0} +$

которая рассчитывается по количеству активных масс реагентов, затрачиваемых на получение одного ампер-часа количества электричества при разряде). АКБ паспортизируется по номинальной емкости, которую часто указывают как C_{20} .

Однако, для оценки пусковых качеств стартерной батареи ее номинальная емкость C_{20} малоинформативна. При стартерных токах разряда 200...500А и особенно при температурах ниже -18°C , количество электричества, которое может отдать батарея электростартеру, ограничивается из-за ускоренной сульфатации электродов под действием больших токов, а при понижении температуры еще и за счет загустения электролита.

Для стартерных режимов разряда ГОСТ 959-91Е рекомендует определять пусковую способность батареи при двух различных значениях температуры (25°C и -18°C) и не по номинальной емкости C_{20} , а по току разряда $I_p = 3C_{20}$ и по заданному конечному напряжению разряда $U_{\text{рк}}$.

Так, для необслуживаемой батареи разряд током $3C_{20}$ при температуре $+25^\circ\text{C}$ до напряжения 9 В должен длиться не менее 30 с. Это означает, что батарея номинальной емкостью C_{20} до стартерного разряда была полностью заряжена при температуре $+25^\circ\text{C}$. Если батарея разряжается током $3C_{20}$ при температуре -18°C , то за время 30 с она

должна разрядиться до напряжения $U_{\text{рк}} \geq 6 \text{ В}$.

Немецкий стандарт DIN несколько ужесточает требования к автомобильным АКБ, вводя нормирование по току холодной прокрутки. Это такой ток (близкий к значению $I_p = 3C_{20}$), при котором в конце 30-й секунды разряда при температуре -18°C конечное напряжение разряда становится равным заданной величине (для DIN $U_{\text{рк}} = 7,2 \text{ В}$). Добавляется также требование обеспечения напряжения $U_{\text{рк}} = 6 \text{ В}$ в конце 150-й секунды разряда при температуре $+25^\circ\text{C}$.

Английский (BSR) и американский (ASR) стандарты по основным требованиям близки к немецкому стандарту DIN.

Если на импортной батарее не указана номинальная емкость C_{20} , ее можно ориентировочно определить по току $I_{\text{хп}}$ холодной прокрутки: $C_{20} = I_{\text{хп}}/3$ (Ач).

Для оценки способности батареи к восприимчивости заряда введено понятие зарядной емкости C_3 . Эта емкость определяется как количество электричества, которое необходимо сообщить каждому аккумулятору, чтобы в его электрохимической системе произошло полное восстановление химических реагентов, ранее израсходованных на прямое токообразование.

Существуют два основных способа заряда АКБ: при постоянном то-



$I_3 R_0$ устанавливается мгновенно. Далее начинается переходной процесс токовой поляризации (нелинейный участок на зарядной характеристике) и $U_3 = E_{a0} + \Delta E$, где $\Delta E = I_3 R_a$ — так называемая электродвижущая сила поляризации. После этого равновесная электродвижущая сила E_{a0} аккумулятора начинает линейно возрастать из-за линейного возрастания плотности электролита под действием постоянного тока заряда. Этот процесс будет длиться 8...9 ч (при $I_3 = 0,1 C_n$), до тех пор пока активные массы на поверхности электродов полностью не восстановятся. Напряжение заряда на аккумуляторе станет равным 2,4 В, и далее при росте U_3 ток заряда будет «работать» на газообразование и разложение воды. Достигнув значения 2,7 В в обслуживаемой батарее, рост зарядного напряжения прекратится, и U_3 будет оставаться постоянным на протяжении всего времени последующего заряда. Участок зарядной характеристики $U_3 = f(t_3)$, на котором параметры U_3 , γ , I_3 длительно не изменяются, соответствует процессу **перезаряда аккумулятора**. Обычно перезаряд продолжают 2...3 ч с целью более полного восстановления активных реагентов в порах электродных масс; в этом случае перезаряд выполняет функции ремонтно-восстановительного заряда, выравнивающего в аккумуляторах батареи значения величин γ и E_{0a} .

Во время перезаряда электролит бурлит в аккумуляторах от газовых пузырьков. Газы, выделяющиеся из заливных отверстий, взрывоопасны.

Принципиальным отличием современных аккумуляторных батарей является отсутствие в них активного газыделения, а также участка перезаряда на зарядной характеристике. Это позволяет делать АКБ необслуживаемыми (без заливных пробок) и даже монолитными (без аккумуляторных банок).

Достигнутое реализовано исклю-

чением из активных масс электродов и конструктивных свинцовых сплавов веществ, способствующих образованию газыделения.

Очень важную роль, как положительную, так и отрицательную, в прежних конструкциях аккумуляторов играла сурьма. Она вводилась в состав свинцового сплава решеток (до 6 %) для придания им требуемой жесткости. Но, попадая в электролит, сурьма понижает напряжение начала газыделения (до $U_3 = 2,3$ В), которое наступает задолго до полного заряда аккумулятора. В современных аккумуляторах процентное содержание сурьмы значительно снижено (не более 1,2 %). Это позволило приблизить напряжение начала газыделения ($U_3 = 2,4$ В) к напряжению окончания заряда ($U_3 = 2,41$ В). При достижении зарядным напряжением значения 14,5 В (2,416 В на один аккумулятор), даже при попытке удерживать U_3 постоянным и равным 2,45 В, ток заряда начинает падать. Это приводит к эффекту записания процесса заряда; газообразования при этом не происходит.

Разрушительный перезаряд необслуживаемой батареи может иметь место при длительном ее заряде напряжением U_3 более 14,6...15 В.

То, что касается жесткости пластин, которая при уменьшении содержания сурьмы ослабевает, то она компенсируется как внесением в конструктивные свинцовые сплавы новых добавок, так и новым конструктивным исполнением электродов, например, помещением пластин электродов в сепараторные конверты, в которых некоторое коробление пластин неопасно.

8. Саморазряд аккумуляторной батареи

Саморазрядом называют разряд бездействующей аккумуляторной батареи, от которой на борту автомобиля отключены все потребители или которая снята с автомобиля для хранения. Саморазряд можно разделить на случайный, ускорен-

ный и естественный. Случайный и ускоренный протекают непосредственно на автомобиле и являются следствием нарушения правил эксплуатации АКБ.

Случайный саморазряд — это неучтенный разряд АКБ скрытым током утечки на корпус автомобиля, например, слаботочной утечкой через неисправные бортовые электронные схемы, которые постоянно подключены к АКБ.

Ускоренный саморазряд — это преждевременный разряд токами утечки через грязевые мостики снаружи батареи между ее клеммами, или внутри аккумуляторов из-за наличия случайно попавших посторонних примесей, а также из-за замыкания между пластинами при осыпании активных масс.

Естественный саморазряд — это неотвратимое, присущее любому ХИТ падение его заряженности при длительном пребывании в обессточенном состоянии. Применительно к автомобильной АКБ естественный саморазряд имеет место главным образом не на автомобиле, а при хранении на складе. Естественный саморазряд есть проявление постоянного взаимодействия химически активных реагентов аккумулятора, как между собой, так и с окружающей средой. В естественном саморазряде проявляется физическая природа активных химических веществ терять со временем свою активность.

Если АКБ не заправлена электролитом, она подвержена воздействию кислорода воздуха, его температуры и влажности. Как следствие электроды сухозаряженных АКБ могут утратить свою активность, а свинцовые решетки и внутренние электросоединения — окислиться. Такая батарея при ее заливке электролитом не наберет номинальной емкости, даже после тренировочного зарядного цикла.

Чтобы свести к минимуму вредное влияние атмосферного воздуха на батарею, хранящиеся в сухозаряженном состоянии, в последнее время заводы-изготовители стали по-



ставлять свою продукцию потребителю только в герметичной целлофановой упаковке и в картонной коробке. В таком состоянии сухозаряженная АКБ может храниться до 3-х лет на складе при пониженной температуре.

Но особенно сложно защитить от саморазряда уже залитую электролитом и полностью заряженную АКБ. В такой батарее естественный саморазряд связан со следующими причинами:

- ♦ оседание серной кислоты в электролите (имеет место перераспределение плотности электролита по высоте и как следствие — возникновение внутренних токов разряда);

- ♦ проникновение электролита к свинцовым решеткам через трещины в активных массах (вспучивание активных масс внутренней сульфатацией и возникновение разрядных токов между решеткой и активной массой);

- ♦ появление поверхностной сульфатации на электродах и на внутренних тоководах (возникновение крупных кристаллов сульфата свинца и образование поверхностных токов утечки);

- ♦ наличие примесей в химически активных веществах на электродах и в свинцовых сплавах решеток (образование мелких узлов сульфатации и микротоков разряда вокруг них).

Все эти причины приводят к медленному, но неотвратимому разряду запасенной в батарее емкости. Они же являются причинами сокращения срока службы АКБ.

Показателем случайного и ускоренного саморазряда является самопроизвольный разряд батареи на борту автомобиля за непродолжительное время, например, за одну ночь, который проявляется по медленной прокрутке ДВС стартером в обычных условиях пуска.

Естественный саморазряд неустраним. Он нормируется ГОСТом 959-91Е по среднесуточному разряду в процентах от номинальной емкости полностью заряженной батареи. Для обычной батареи среднесуточный разряд, рассчитанный за 14 дней хранения, не должен быть бо-

лее чем 0,5% от C_{20} и не более 0,7%, рассчитанный за один месяц.

Для новых необслуживаемых батарей саморазряд в течение одного года не превышает 40% от номинальной емкости. Это в среднем около 0,1% саморазряда в сутки от величины C_{20} и не менее четырех лет надежной работы при правильной эксплуатации. По рекламным данным фирм, выпускающих монолитные трубчатые АКБ, их саморазряд за один год хранения не превышает 25...30% от C_{20} , а срок службы, выраженный в пусковых циклах, равен 10...12 тыс. (7-8 лет ежедневной эксплуатации).

На рис. 8 показано, как снижается скорость саморазряда и увеличивается срок службы по мере совершенствования конструкций аккумуляторных батарей. На рисунке цифрами 1, 2, 3, 4 соответственно обозначены обслуживаемая, малообслуживаемая, необслуживаемая и монолитная батареи.

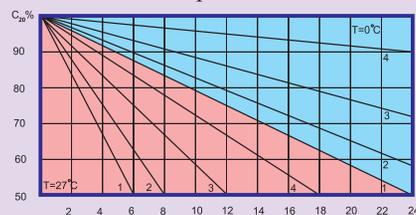


Рис. 8

Следует заметить, что при любой конструкции АКБ суточный саморазряд протекает медленнее при уменьшении плотности электролита и при понижении его температуры.

С уменьшением плотности электролита уменьшается концентрация серной кислоты, что понижает интенсивность растворения свинца на отрицательных пластинах. Саморазряд батареи замедляется. При изменении плотности в интервале от 1,3 до 1,15 г/см³ суточный саморазряд уменьшается на 10...15%. Срок службы батареи при этом увеличивается.

При падении температуры ниже 0°С саморазряд резко ограничивается. Из этого следует практическая рекомендация хранить залитые электролитом батареи при минусовой темпера-

туре и в полностью заряженном состоянии.

При температуре хранения $T = -30^{\circ}\text{C}$ естественный саморазряд практически прекращается. Батарея может храниться достаточно долго (более 8...10 лет) как в сухозаряженном, так и в залитом состоянии.

Так же как и при обычном разряде плотность электролита может служить достоверной мерой саморазряда батареи $\Delta C(\%) = 625 (\gamma_3 - \gamma_{25})$. Именно по плотности электролита в заряженной и залитой батарее определяют состояние ее разряженности при хранении в складских условиях.

Следует отметить, что по мере углубления саморазряда скорость его возрастает. Это приводит к необходимости постоянного подзаряда АКБ во время хранения. Скорость саморазряда возрастает и к концу срока службы батареи. Батарея, потерявшая при хранении более 30...40% своей номинальной емкости, непригодна для установки на автомобиль без проведения полного цикла зарядно-разрядной тренировки в стационарных условиях.

Если после такой процедуры АКБ не набирает больше 60% от номинальной емкости, она подлежит утилизации.

Литература

1. Д.Соснин. Автомобильная аккумуляторная батарея. Ремонт & Сервис, №1, 1999 г., с.39-43

2. Ют В.Е. Электрооборудование автомобиля. — М.:Транспорт, 1995 г.

Читатели спрашивают:

«Можно ли заменить сгоревший интегральный регулятор напряжения (ИРН) на импортном генераторе какой-либо отечественной схемой?» Отечественных аналогов нет. Заменить сгоревшую микросхему ИРН можно, если сохранились контактные щетки. От щеток необходимо сделать отводы и подсоединить к ним схему регулятора, которую можно собрать самому на базе отечественных РН: РР362 (ГАЗ) или 2013702 (ЗИЛ).