

Оценка пульсаций тока в режиме поддерживающего заряда аккумуляторных батарей

ГУСЕВ Ю.П., КУПЧИНОВ А.Д., СМОТРОВ Н.Н.

В системах оперативного постоянного тока электростанций и подстанций наблюдаются отказы и сокращение срока службы аккумуляторных батарей (АБ) из-за пульсаций тока в режиме поддерживающего заряда. Для проверки соответствия АБ нормам по пульсациям тока необходима методика расчета пульсаций при выборе зарядных устройств. Предложена модель, наиболее подходящая для оценки пульсаций тока в режиме поддерживающего заряда. Рассмотрено влияние различных факторов на параметры АБ и влияние параметров схемы замещения АБ на пульсации тока. Показано, что при расчете пульсаций тока допустимо не учитывать внутреннюю индуктивность АБ и использовать паспортное значение внутреннего активного сопротивления АБ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электростанции, системы оперативного тока, аккумуляторная батарея, пульсации тока, поддерживающий заряд, внутреннее сопротивление

При заряде свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АБ) от наиболее широко применяемых шестипульсных тиристорных зарядных устройств в пульсационной составляющей протекающего через АБ тока основным является ток с частотой 300 Гц. Пульсации тока снижают срок службы АБ из-за дополнительного нагрева, коррозии и «роста» электродов [1–4], при этом наиболее опасны они в режиме поддерживающего заряда, составляющем 99 % продолжительности срока службы АБ. Для предотвращения выхода из строя и сокращения срока службы АБ необходима проверка совместной работы зарядных устройств (ЗУ) и АБ на соответствие нормам по пульсациям тока в режиме поддерживающего заряда. Норма по среднеквадратичному значению пульсаций тока для современных аккумуляторов, применяющихся в системах оперативного постоянного тока (СОПТ), составляет 5А на 100 Ач электрохимической емкости АБ [5]. Для подтверждения соответствия ЗУ и АБ нормам необходимо использовать параметры АБ, однако на данный момент обоснование схем замещения АБ и их параметров для расчета пульсаций тока частотой 300 Гц отсутствует.

Для расчета токов короткого замыкания (КЗ) часто используется линеаризованная модель АБ, схема которой представлена на рис. 1. Схема содержит ЭДС и внутреннее активное сопротивление АБ [6, 7]. Внутреннее активное сопротивление согласно [8, 9] рекомендуется измерять двухимпульсным методом [9, 10] на постоянном токе. Внутреннее сопротивление АБ зависит от степени ее разряженности и частоты тока, поэтому при расчете пульсаций параметры АБ необходимо определять

для переменной составляющей тока частотой 300 Гц при полностью заряженной АБ в режиме поддерживающего заряда. Значение активного сопротивления АБ определяется для режима разряда АБ большим током и задается в технической документации производителем аккумуляторов. Это активное сопротивление зависит как от электрохимической емкости АБ, так и от технологии изготовления пластин и от вида электролита. Электродвижущая сила каждого аккумулятора принимается равной 2 В, что соответствует напряжению разомкнутой цепи свинцово-кислотных аккумуляторов, применяемых в СОПТ.

Для более полного учета электрохимических процессов в аккумуляторах для расчета пульсаций тока рассмотрена модель с электростатической емкостью [6], представленная на рис. 2. Во внутреннем активном сопротивлении R_1 кроме сопротивления борнов, электролита и межэлементных контактных соединений учитывается составляющая, связанная с кинетикой перемещения электронов. Сопротивление R_1 составляет около 60% полного

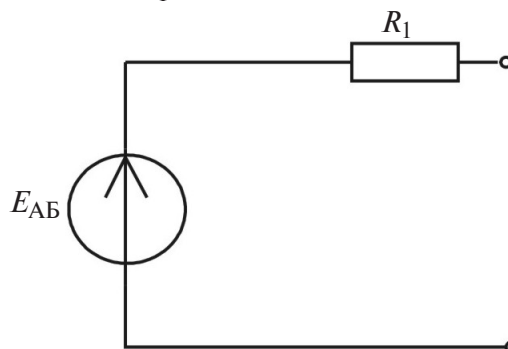


Рис. 1. Линеаризованная модель АБ

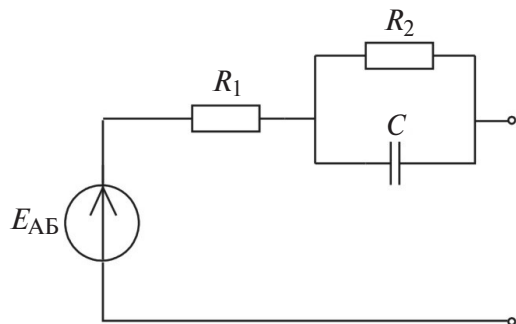


Рис. 2. Схема замещения АБ, учитывающая электрохимические процессы в аккумуляторах

сопротивления АБ. Сопротивление R_2 , связанное с перемещением ионов, отражает сопротивление пластин и составляет около 40% суммарного активного сопротивления АБ. Емкость C учитывает наличие двойного электрического слоя на границе электролита и электрода, для свинцово-кислотных АБ в среднем для каждого аккумулятора она составляет $1,5 \Phi$ на 100 Ач электрохимической емкости [11]. Все эти параметры имеют зависимость не только от электрохимической емкости и типа батареи, но также степени ее разряженности и значения протекающего через АБ тока.

Кроме выбора схемы замещения АБ возникает вопрос о том, какое значение внутреннего сопротивления использовать для расчетов. В паспортах производителей АБ указывается ее активное внутреннее сопротивление, определяемое двухимпульсным методом [10] и предназначенное для расчета токов КЗ.

Активное внутреннее сопротивление аккумуляторов зависит от степени их разряженности. На рис. 3 представлена разрядная характеристика свинцово-кислотного аккумулятора, состоящая из двух зон — экспоненциальной и линейной.

Режиму малых токов, к которому относится и режим поддерживающего заряда, соответствует экспоненциальная зона, в связи с этим паспортные данные нуждаются в дополнительном обосновании. Также есть существенное отличие во внут-

Напряжение на аккумуляторе, В

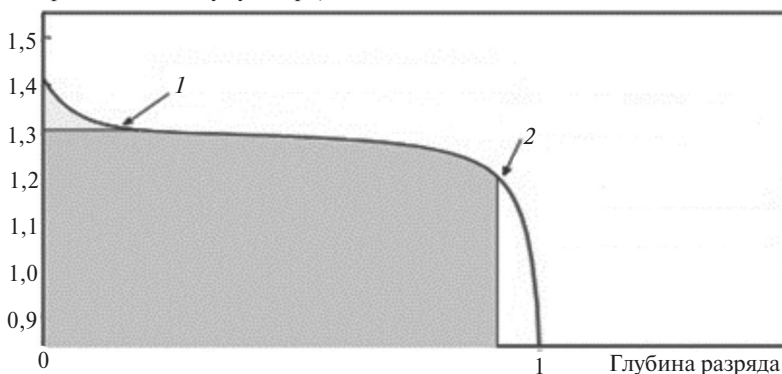


Рис. 3. Разрядная характеристика свинцово-кислотного аккумулятора [12]: 1 — конец экспоненциальной зоны; 2 — конец линейной зоны

реннем сопротивлении между режимами заряда и разряда в зоне малых токов в связи с гистерезисом в экспоненциальной зоне, показанном на рис. 4. Из рис. 4 следует, что внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи при заряде больше, чем при разряде. Это подтверждается и данными, приведенными в [13] для свинцово-кислотной аккумуляторной батареи Varta Vb 624 емкостью 120 Ач. Результаты измерения внутреннего сопротивления показаны на рис. 5.

Исходя из рис. 5 внутреннее сопротивление аккумулятора при заряде при степени разряженности, близкой к 0, примерно в 5–7 раз превышает внутреннее сопротивление аккумулятора при разряде до той же глубины.

При наложении пульсирующего напряжения на постоянную составляющую в период положительной полуволны пульсации электролит вытесняется из межэлектродного промежутка, что приводит к значительному росту сопротивления АБ.

В [14] проводились измерения параметров АБ согласно схеме замещения, соответствующей рис. 2. При проведении эксперимента АБ была частично разряжена, затем при фиксированном значении тока заряда (3 А) была проведена серия измерений методом спектроскопии электрохимического импеданса, позволяющим представить внутреннее сопротивление АБ как функцию частоты [15], а следовательно, определить параметры схемы замещения АБ, не доступные для измерения на постоянном токе. Всего было проведено 15 измерений от разряженного до заряженного состояний. Результаты измерений приведены на рис. 6. Внутреннее сопротивление и емкость двойного электрического слоя соответствуют свинцово-кислотной АБ электрохимической емкостью 700 Ач.

Исходя из результатов измерений виден значительный рост активного сопротивления R_2 постоянному току (на несколько порядков) по мере приближения и превышения состояния полной разряженности, при этом наблюдается снижение вдвое емкости двойного электрического слоя, остающейся на уровне 5Φ , а сопротивление R_1 остается почти постоянным, так как включает в себя неизменные сопротивления борнов, терминалов и межаккумуляторных контактных соединений. При этом практически вся пульсационная составляющая будет проходить через емкостное сопротивление двойного электрического слоя, так как это емкостное сопротивление на частоте 300 Гц значительно меньше, чем параллельное ему активное сопротивление R_2 . При этом эквивалентное сопротивле-

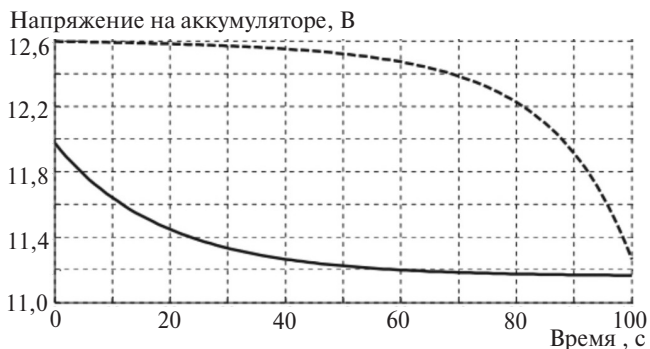


Рис. 4. Гистерезис в экспоненциальной зоне свинцово-кислотного аккумулятора [12]: — — разрядная кривая; ---- — зарядная

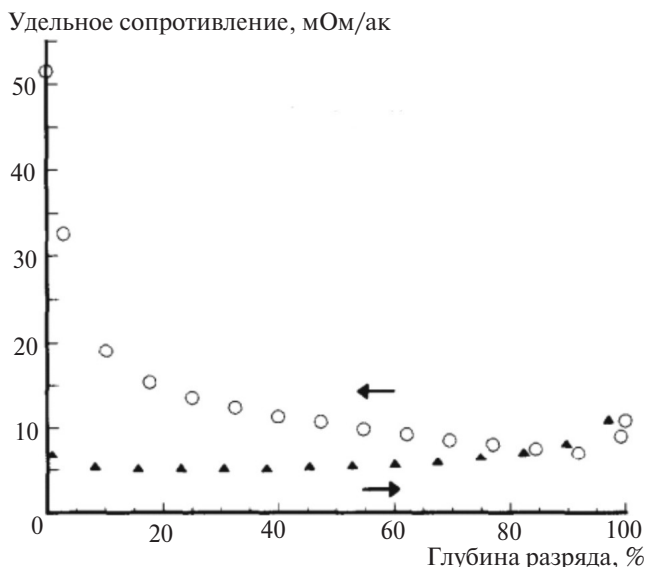


Рис. 5. Результаты измерения внутреннего сопротивления аккумулятора Varta емкостью 120 Ач [13]: ○ — заряд; ▲ — разряд

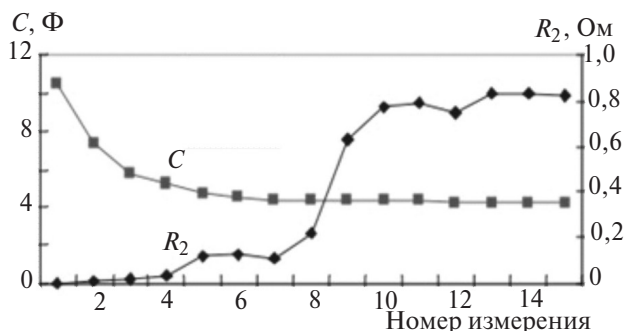


Рис. 6. Изменение параметров схемы замещения АБ по мере заряда [14]

ние АБ для пульсационной составляющей будет стремиться к значению R_1 из-за того, что активно-емкостное сопротивление параллельной ветви будет стремиться к нулю, таким образом, рост сопротивления при малых токах заряда не будет оказывать влияния на пульсационную составляющую тока АБ. Соответственно, при проведении измерений на постоянном токе емкость двойного слоя не будет оказывать шунтирующего действия и при малых токах заряда будет расти сопротивление. Та-

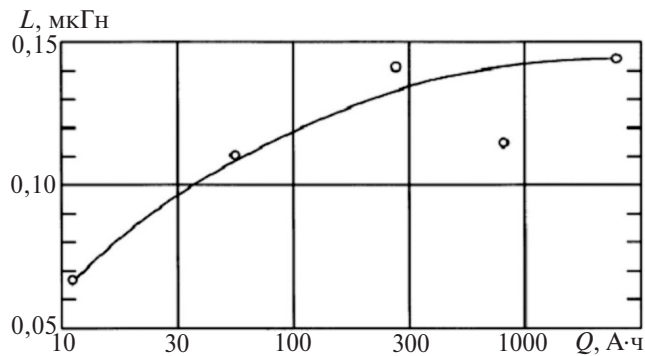


Рис. 7. Индуктивность свинцово-кислотных аккумуляторов в зависимости от электрохимической емкости [16]

ким образом, при больших значениях пульсаций происходят одновременно два противоположных процесса: с одной стороны, увеличение внутреннего сопротивления приводит к падению напряжения, что снижает газообразование внутри АБ, с другой стороны, повышенное выделение тепла впоследствии может привести к тепловому разгону АБ [14]. Пренебрежение сопротивлением R_2 при оценке пульсаций тока приводит к небольшому повышению пульсационной составляющей тока, что обуславливает предъявление к ЗУ более жестких требований и способствует увеличению срока службы АБ.

Известно, что АБ, кроме активной и емкостной составляющих внутреннего сопротивления, имеют собственную внутреннюю индуктивность, которая зависит от электрохимической емкости АБ (рис. 7).

В соответствии с рис. 7 индуктивность АБ емкостью 600 Ач, состоящей из 104 элементов, будет составлять 13,5 мкГн, в то время как индуктивность сглаживающих фильтров современных ЗУ составляет от 2 до 10 мГн. Таким образом, для ЗУ, укомплектованных LC-фильтрами, к которым относится большинство ЗУ, обслуживающих СОПТ на электростанциях и подстанциях, при расчете пульсаций тока допустимо не учитывать индуктивность АБ. При этом индуктивное сопротивление фильтра на частоте 300 Гц будет составлять несколько Ом, что на порядок превышает эквивалентный импеданс АБ. Таким образом, для проведения расчетов пульсаций тока, протекающего через АБ в режиме поддерживающего заряда, допустимо использовать паспортное значение внутреннего сопротивления постоянному току, предоставляемое производителем для расчета токов КЗ.

Выводы. 1. Для расчета пульсаций тока с приемлемой точностью для выбора зарядных устройств может использоваться линеаризованная модель на основе схемы замещения АБ с источником ЭДС и активным сопротивлением без учета емкости двойного электрического слоя.

2. Поскольку внутренняя индуктивность АБ не оказывает существенного влияния на результаты расчета пульсаций при заряде от ЗУ с LC-фильтром, для расчета пульсаций тока ее допустимо не учитывать.

3. Для расчета пульсаций тока в АБ допустимо использовать значение внутреннего сопротивления аккумуляторов, применяемое при расчете токов КЗ и измеренное на постоянном токе двухимпульсным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Okazaki S., Higuchi S., Nakamura O., Takahashi S. Influence of superimposed alternating current on capacity and cycle life for lead-acid batteries. — Journal of Applied Electrochemistry, 16, 1986, pp. 894–898.
2. Gerner S.D., Ruhlmann T.E. Effect of AC Ripple on VRLA Battery Performance. — Proc. of BattCon 1999: <http://www.battcon.com/PapersScanned1999/GernerPaper1999.pdf>. Дата обращения: 20.02.2018.
3. Nelson R.F., Kepros M.A. AC Ripple effects on VRLA Batteries in Float Applications. — Battery Conference on Applications and Advances, 1999. The Fourteenth Annual, pp. 281–289.
4. Uddin R., Moore A.D., Barai A., Marco J. The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance. — Applied Energy, 178, 2016, pp.142–154.
5. СТО 56947007-29.120.40.041-2010. Системы оперативно-го постоянного тока подстанций. Технические требования.
6. Ceraolo M. New dynamical models of lead-acid batteries. — IEEE Trans. on Power Systems, November 2000, vol. 15, No. 4, pp. 1184–1190.
7. Salameh Z.M., Casacca M.A., Lynch W.A. A mathematical model for lead-acid batteries. — IEEE Transactions on Energy Conversion, March 1992, vol.7 No. 1, pp. 93–98.
8. ГОСТ Р МЭК 60896-1—99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытания. Открытые типы.
9. ГОСТ Р МЭК 60896-21—2013. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Ч. 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний.
10. Гусев Ю.П., Поляков А.М., Дороватовский Н.М. Оценка состояния аккумуляторных батарей электростанций и подстанций в процессе эксплуатации. — Электро, 2002, № 5.
11. Alber G. Ohmic measurements. The history and the facts, 2003: <https://ru.scribd.com/document/307321291/Ohmic-Measurements-The-History-and-the-Facts>. Дата обращения: 26.02.2018.
12. Gallo D., Landi C., Lusio M., Morello R. Optimization of experimental model parameter identification for energy storage systems. — Energies, 2013, No. 6 pp. 4572–4590.
13. Copetti F.B., Chenlo F. Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modeling. — Journal of Power Sources, 1994, No. 47, pp. 109–118.
14. Catherino H.A. Alternating currents. — Encyclopedia of Electrical power sources, 2009, pp. 489–498.
15. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. — John Wiley & Sons Inc., 2005, 595 p.
16. IEEE 399—1997. IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.

[12.03.2018]

А в т о р ы : Гусев Юрий Павлович в 1974 г. окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне НИУ «МЭИ»). В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию «Установившиеся режимы и электромагнитные переходные процессы в электрической части МГДГ с многомостовой инверторной подстанцией». Заведующий кафедрой «Электрические станции» НИУ «МЭИ».

Купчинов Александр Дмитриевич в 2014 г. окончил Институт электротехники НИУ «МЭИ». Аспирант кафедры «Электрические станции» НИУ «МЭИ».

Смотров Николай Николаевич в 2014 г. окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ». Аспирант кафедры «Электрические станции» НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo, 2018, No. 7, pp. 26–30

DOI:10.24160/0013-5380-2018-7-26-30

Estimates of current ripple in the mode of supporting battery charge

GUSEV Yuri P. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia). — Head of the Department, Cand. Sci. Eng.

KUPCHINOV Aleksandr D. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Ph.D. Student

SMOTROV Nikolai N. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Ph.D. Student

Failures of storage batteries (SBs) and reduction of their service life due to current ripple in the supporting charge mode are observed in the control DC power supply systems at power plants and substations. For checking whether an SB is in compliance with the current ripple level permitted by the relevant regulations, it is necessary to have a procedure for calculating the ripple level in selecting the SB charging devices. The article proposes a model most suitable for estimating the current ripple level in the supporting charge mode. The effect of different factors on the SB parameters and the influence of the SB equivalent circuit on the current ripple are considered. It is shown that in calculating the current ripple it is possible to neglect the SB inner inductance and use the nameplate value of the SB inner resistance.

Key words: *power plants, control DC power supply systems, storage battery, current ripple, supporting charge, inner resistance*

REFERENCES

1. **Okazaki S., Higuchi S., Nakamura O., Takahashi S.** Influence of superimposed alternating current on capacity and cycle life for lead-acid batteries. — *Journal of Applied Electrochemistry*, 16, 1986, pp. 894–898.
2. **Gerner S.D., Ruhlmann T.E.** Effect of AC Ripple on VRLA Battery Performance. — *Proc. of BattCon 1999*: <http://www.battcon.com/PapersScanned1999/GernerPaper1999.pdf>. Дата обращения: 20.02.2018.
3. **Nelson R.F., Kepros M.A.** AC Ripple effects on VRLA Batteries in Float Applications. — *Battery Conference on Applications and Advances*, 1999. The Fourteenth Annual, pp. 281–289.
4. **Uddin R., Moore A.D., Barai A., Marco J.** The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance. — *Applied Energy*, 178, 2016, pp.142–154.
5. **STO 56947007-29.120.40.041–2010** (*Standart organizatsii. Sistemy operativnogo postoyannogo toka podstantsii. Tekhnicheskiye trebovaniya* (Organization standart). (The system of DC voltage substation. Specifications).
6. **Ceraolo M.** New dynamical models of lead-acid batteries. — *IEEE Trans. on Power Systems*, November 2000, vol. 15, No. 4, pp. 1184–1190.
7. **Salameh Z.M., Casacca M.A., Lynch W.A.** A mathematical model for lead-acid batteries. — *IEEE Transactions on Energy Conversion*, March 1992, vol.7 No. 1, pp. 93–98.
8. **GOST R MEK 60896-1–99.** *Svintsovo-kislotnye statsionarnye batarei. Obshchiye trebovaniya i metody ispytaniya. Otkrytye Tipy* (Lead stationary batteries. General requirements and test methods. Open type).
9. **GOST R MEK 60896-21–2013.** *Batarei svintsovo-kislotnye. Chast' 21. Tipy s reguliruyushchim klapanom. Metody ispytanii* (Lead-acid batteries. Part 21. Types with control valve. Test method).
10. **Gusev Yu.P., Polyakov A.M., Dorovatovskii N.M.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2002, № 5.
11. **Alber G.** Ohmic measurements. The history and the facts, 2003: <https://ru.scribd.com/document/307321291/Ohmic-Measurements-The-History-and-the-Facts>. Дата обращения: 26.02.2018.
12. **Gallo D., Landi C., Lusio M., Morello R.** Optimization of experimental model parameter identification for energy storage systems. — *Energies*, 2013, No. 6 pp. 4572–4590.
13. **Copetti F.B., Chenlo F.** Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modeling. — *Journal of Power Sources*, 1994, No. 47, pp. 109–118.
14. **Catherino H.A.** Alternating currents. — *Encyclopedia of Electrical power sources*, 2009, pp. 489–498.
15. **Barsoukov E., Macdonald J.R.** *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications.* — John Wiley & Sons Inc., 2005, 595 p.
16. **IEEE 399–1997.** *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.*

[12.03.2018]