

Одређивање регресионих функција процеса пражњења и пуњења херметизованих оловних батерија

Владимир Ђ. Вукић

Електротехнички институт Никола Тесла, Универзитет у Београду, Београд,
Србија

vladimir.vukic@ieent.org

Кратак садржај: Након дубоког пражњења оловних херметизованих батерија типа AGM SVT 300 струјом десеточасовног пражњења, извршено је њихово пуњење променљивом струјом. На основу добијених резултата анализирани су експоненцијалне и полиномне регресионе функције за апроксимацију наведених процеса. Основна величина за оцену квалитета извршених апроксимација био је прилагођени коефицијент детерминације, \bar{R}^2 . Утврђено је да процес пражњења батерије константном струјом десеточасовног пражњења може успешно да се апроксимира како експоненцијалном, тако и полиномном функцијом другог реда. У свим случајевима је вредност прилагођеног коефицијента детерминације била већа од 0,995. Процес пуњења дубоко испражњене батерије променљивом струјом успешно је апроксимиран експоненцијалном функцијом, уз вредности прилагођеног коефицијента детерминације од око 0,95. И поред високих вредности прилагођеног коефицијента детерминације, полиномне апроксимације другог и трећег реда нису дале добре резултате у интерполацији карактеристика пуњења батерија. Описана је могућност практичне примене добијених регресионих функција у системима непрекидног напајања.

Кључне речи: регресиона функција, прилагођени коефицијент детерминације, херметизована оловна батерија, пражњење, пуњење, експоненцијална апроксимација, полиномна апроксимација

1. Увод

Одређивање преосталог капацитета приликом пражњења батерије, односно обновљеног капацитета приликом процеса пуњења, представљају важне поступке за одређивање аутономије система непрекидног напајања [1],[2]. Процеси пражњења оловних батерија константном струјом углавном могу добро да се апроксимирају експоненцијалним функцијама. На овај начин је могуће вршити процену преосталог капацитета батерије на основу података о напону батерије и струје пражњења. Ипак, ова претпоставка важи за релативно нову батерију, са константном струјом пражњења и умереном температуром ћелија. Међутим, уколико се приликом процеса пражњења батерије или накнадног пуњења мењају вредности струје батерије и температуре ћелија, степен испражњености батерије је знатно теже проценити. Када се у анализу укључи и податак о старости батерије, односно промена карактеристика пражњења батерије у зависности од времена проведеног у експлоатацији, моделовање процеса пражњења постаје још сложеније [3].

Тренутно су у свету актуелна истраживања везана за естимацију преосталог капацитета литијум-јонских батерија, првенствено намењених за употребу у електричним аутомобилима [2]. Ипак, веома је важно дефинисање оптималних естимационих функција за процесе пражњења батерија и у системима непрекидног напајања [1]. У стационарним системима је доминантна примена оловних батерија, и то херметизованих ћелија у случају да у постројењу није предвиђена посебна просторија за смештај акумулаторске батерије.

Приликом рада батерија са савременим исправљачима могуће је праћење и архивирање података о батерији добијених приликом процеса пражњења [4]. Веома је важан податак о преосталом капацитету батерије приликом пражњења, односно аутономији система непрекидног напајања. Податак о аутономији мора да се естимира на основу расположивих података о батерији (струја пражњења, температура, напон ћелија, старост батерије...). Такође, и приликом процеса пуњења је неопходно вршење естимације обновљеног капацитета батерије. Због тога је важно да се што прецизније одреде аналитичке функције које квалитетно апроксимирају реалне процесе пуњења и пражњења батерије.

У раду су приказани резултати снимљени приликом пражњења и накнадног пуњења две херметизоване стационарне оловне акумулаторске батерија типа AGM SVT 300. Као регресионе функције за апроксимирање процеса пуњења и пражњења батерија коришћене су експоненцијалне и полиномне функције. Батерије су испитиване након шестогодишње експлоатације (половина номиналног животног века) у једном индустријском погону у Србији.

2. Карактеристике херметизованих оловних акумулаторских батерија AGM SVT 300

За уградњу у два развода једносмерне струје једног индустријског предузећа изабране су херметизоване оловне ћелије AGM SVT 300 компаније “Sunlight” [5]. Херметизоване оловне батерије (eng. “Valve Regulated Lead-Acid”, VRLA) серије AGM (eng. “Advanced Glass Mat”) користе апсорпциони сепаратор направљен од микрофилерних влакана ради смањивања самопражњења и губитка активног материјала [5]. Код батерија серије AGM не постоји режим пуњења, па се у свим режимима рада напон на ћелијама батерије одржава у опсегу 2,25 – 2,3 V (овај опсег напона није примарно предвиђен за температурну компензацију, већ као опсег у коме треба да се налази напон било које ћелије батерије у реалним условима експлоатације, када долази до дебаланса напона појединих ћелија батерије). Због тога исправљач намењен за рад са VRLA батеријама серије AGM може да буде додатно поједностављен, односно да функционише без прекидача за избор режима рада (рад само у режиму допуњавања; нема потребе за режимима пуњења и форсираног пуњења, као и аутоматског режима пуњења батерије) [5]. Исправан рад ових батерија не зависи од положаја монтаже. Значајна погодност батерија AGM SVT 300 је могућност пуњења веома високом струјом од $2,5 \cdot I_{C10}$ (I_{C10} – струја десеточасовног пражњења; $2,5 \cdot I_{C10} = 75$ A за 300 Ah батерију). На овај начин је процес пуњења испразњене батерије знатно убрзан, уз могућност неометаног рада батерије у режиму допуњавања са исправљачем знатно веће снаге од уобичајених вредности. Подешени лимит струје исправљача не би смео да премаши вредност максималне дозвољене струје батерије (мора се предвидети могућност да током свог животног века испразњена батерија остане прикључена на исправљач без потрошача). Номинални животни век батерија AGM SVT је 12 година, при температурама амбијента до 25°C, односно 15 година за температуре амбијента до 20°C [5]. И поред наведених ограничења, произвођач наводи да батерије серије AGM могу да раде у широком опсегу температура од -15°C до +45°C [5] (јасно, уз велики утицај на ограничење животног века и расположиви капацитет батерије [6]).

3. Поступак испитивања батерија и примењени аналитички критеријуми

Две батерије “Sunlight” AGM SVT 300 су испитиване приликом капацитивне пробе и, потом, приликом пуњења дубоко испразњених батерија. Приликом пражњења, као и током пуњења батерија, сваког часа је мерен напон на ћелијама батерија. Мерен је и укупни напон на крајевима батерије, као и струја батерије (пражњења или пуњења).

Напон ћелија батерија је мерен инструментом “Fluke” 289, декларисане мерне несигурности 0,025% приликом мерења једносмерног напона у опсегу до 5 V [7].

Батерије номиналног капацитета 300 Ah су пражњене струјом десеточасовног пражњења (30 A). Батерије су пражњене док из ћелија није испражњено 80% номиналног капацитета [6]. Уколико је напон појединих ћелија падао испод прага од 1,8 V, процес пражњења је прекидан, а слабе ћелије су преспајане, односно избациване из ланца акумулаторске батерије. Слабе ћелије су накнадно враћане у ланца батерије приликом процеса пуњења.

На почетку процеса пуњења испражњених батерија максималну струју пуњења је дефинисао исправљач номиналних излазних параметара 220 V, 63 A. Будући да потрошачи једносмерне струје у погону нису могли да буду искључени током циклусирања и испитивања батерија, максимална струја исправљача од 63 A је била додатно умањена за 3 - 5 A. Због тога је почетна струја пуњења батерија била 58 – 60 A. Рад исправљача у режиму регулације струје је трајао кратко (један до два часа), након чега је струја пуњења батерија знатно опала. Неколико дана након завршетка процеса пуњења батерија спроведено је још једно узимање података о свим ћелијама батерија.

Приликом анализе резултата праћене су средње вредности напона ћелија батерија. Вршена је интерполација добијених резултата применом експоненцијалне и полиномне апроксимације. Основни параметар који је коришћен за одређивање квалитета извршене интерполације је био прилагођени коефицијент детерминације (\bar{R}^2 , eng. “Adjusted R-Square”). У општем случају, коефицијент детерминације (R^2) представља квадрат корелације између две опште променљиве [8]. У случају обичне линеарне регресије, коефицијент детерминације представља квадрат коефицијента корелације, R . Коефицијент детерминације има вредности између 0 и 1, и представља меру квалитета интерполације. Вредност коефицијента детерминације једнака 1 значи да се регресиона крива идеално поклапа са анализираним подацима. Коефицијент детерминације (R^2) дефинише се релацијом [8]:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

где су: RSS : резидуална сума квадрата, TSS : укупна сума квадрата, y_i : резултати мерења, \bar{y}_i : средња вредност свих резултата мерења, \hat{y}_i : теоријска вредност резултата (тачна вредност добијена коришћењем регресионе функције).

Прилагођени коефицијент детерминације (\bar{R}^2) представља знатно бољу меру квалитета интерполације криве у случају када се анализира мали узорак података. Прилагођени коефицијент детерминације (\bar{R}^2) може да има и позитивне, и негативне вредности, а његова апсолутна вредност је увек мања или једнака од вредности коефицијента детерминације (R^2). За разлику од коефицијента детерминације (R^2), прилагођени коефицијент детерминације (\bar{R}^2) се увећава само када нови члан суштински унапређује регресиону функцију. Прилагођени коефицијент детерминације се дефинише релацијом [9]:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \frac{df_{Total}}{df_{Error}} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (2)$$

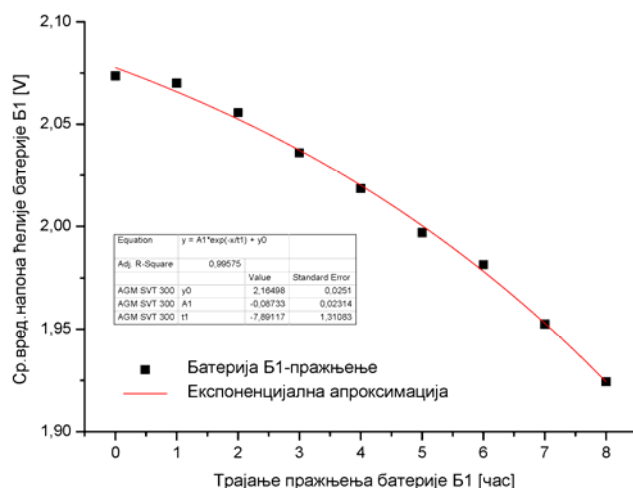
где су: df_{Total} : степен слободе естимације варијансе зависне променљиве, df_{Error} : степен слободе естимације варијансе фундаменталне грешке, n : број резултата мерења у узорку, p : укупан број непознатих параметара [9].

4. Резултати испитивања и дискусија

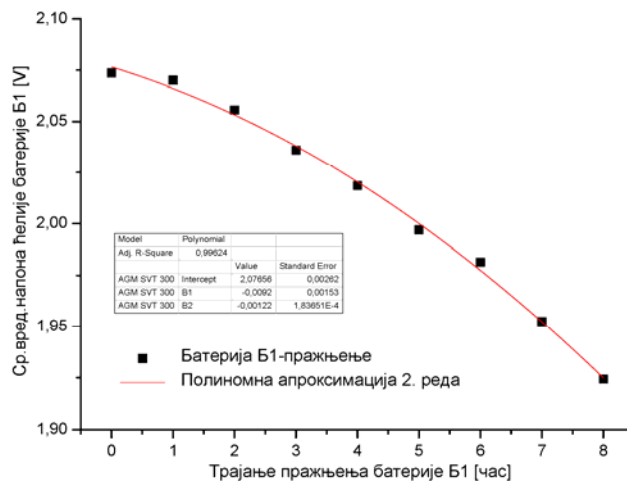
Након истека половине номиналног животног века две батерије AGM SVT 300 у индустријском постројењу извршена је њихова капацитивна проба. Ово је била прва капацитивна проба са дубоким пражњењем батерија уграђених пре шест и по (батерија Б1, 106 ћелија), односно пет и по година (батерија Б2, 102 ћелије). Дубоко пражњење 80% капацитета батерије је било неопходно ради вршења процене исправности и могућности даље експлоатације [6] батерија AGM SVT 300. На слици 1 је приказана зависност промене средње вредности напона ћелија батерије Б1 од трајања пражњења. Пре почетка пражњења је из ланца батерије избачена једна лоша ћелија. Батерија Б1 је потом пражњена осам часова, просечном струјом од 30,1 А. На сликама 1 и 2 су приказане зависности средњег напона ћелија батерије Б1 у функцији времена пражњења, али са различитим интерполационим функцијама.

На слици 1 је приказана експоненцијална апроксимација функције процеса пражњења батерије, док је на слици 2 приказана полиномна апроксимација 2. реда. Основни параметар процене квалитета интерполације је био прилагођени коефицијент детерминације, \bar{R}^2 . Као што се види са слика 1 и 2, обе апроксимације су веома добре. Коефицијент детерминације експоненцијалне функције је био $\bar{R}_{exp}^2 = 0,99575$, док је исти параметар полиномне апроксимације 2. реда био $\bar{R}_{pol2}^2 = 0,99624$. Обе вредности су готово једнаке 1, односно блиске су идеалном случају коефицијента детерминације. Због тога су, у случају

празњења батерије Б1, обе апроксимације прихватљиве. Будући да је струја празњења одржавана на приближно константној вредности блиској струји десеточасовног празњења, процес празњења је добро апроксимиран експоненцијалном функцијом. Ипак, елементарна полиномна апроксимација 2. реда је показала за нијансу бољи резултат.



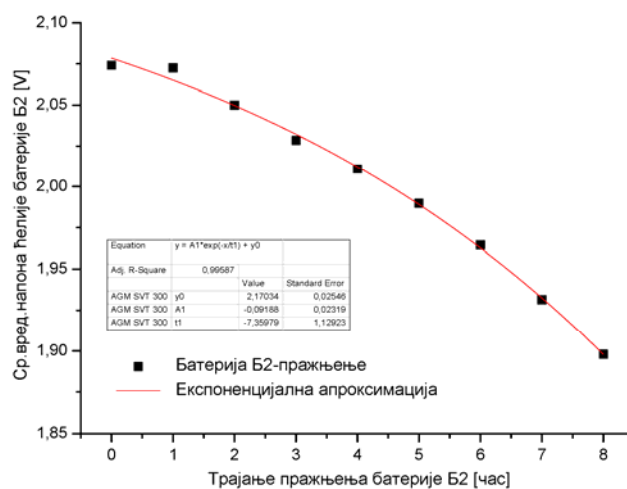
Слика 1. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса празњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења



Слика 2. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса празњења и полиномна апроксимација 2. реда резултата мерења

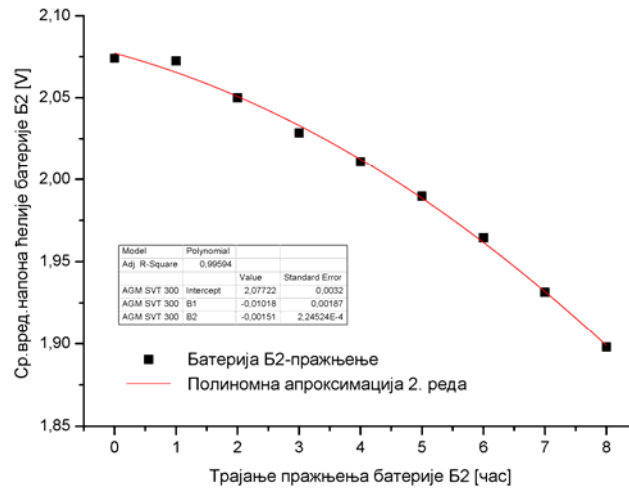
На сликама 3 и 4 је приказана зависност промене средње вредности напона ћелија батерије Б2 од трајања празњења. Батерија је такође празњена осам часова, али са нешто већом просечном струјом од 31,3 А. Због тога је испразњено нешто више од 80% номиналног капацитета

батерије Б2, па је и средња вредност напона ћелије батерије након осам часова пражњења била мало нижа у односу на батерију Б1 (упоредити слике 1 и 3). На слици 3 је приказана експоненцијална апроксимација функције процеса пражњења батерије, док је на слици 4 приказана елементарна полиномна апроксимација 2. реда. И у овом случају интерполационе функције процеса пражњења веома верно прате податке о процесу пражњења. Добијене вредности прилагођеног коефицијената детерминације су сличне као у случају пражњења батерије 1 (прилагођени коефицијент детерминације експоненцијалне функције је био $\bar{R}_{exp}^2 = 0,99587$, док је исти параметар полиномне апроксимације 2. реда био $\bar{R}_{pol2}^2 = 0,99594$). У случају интерполације вредности добијених приликом пражњења батерије Б2 готово да нема разлике између експоненцијалне и полиномне апроксимације 2. реда.

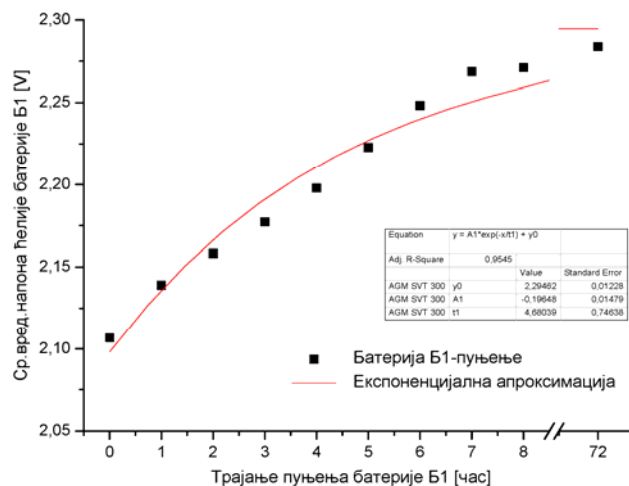


Слика 3. Средње вредности напона ћелија батерије Б2 током процеса пражњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења

Након завршетка осмочасовног процеса пражњења батерије започет је процес пуњења батерије Б1. Због неисправности уграђеног клима-уређаја у просторији батерије, и пражњење, као и пуњење батерије, вршени су на релативно високој температури од око 30°C. Процес пуњења батерије је почео са радом исправљача у режиму регулације струје, односно константном струјом пуњења од 58 А (још 5 А је текло у потрошаче), да би већ након једног часа струја батерије пала на 44 А. До краја процеса пуњења су, због превеликог раста напона, избачене две ћелије, али је напон на још четири ћелије порастао преко 2,6 V. На осталих 100 ћелија напон је био у дозвољеном опсегу 2,25 – 2,3 V.



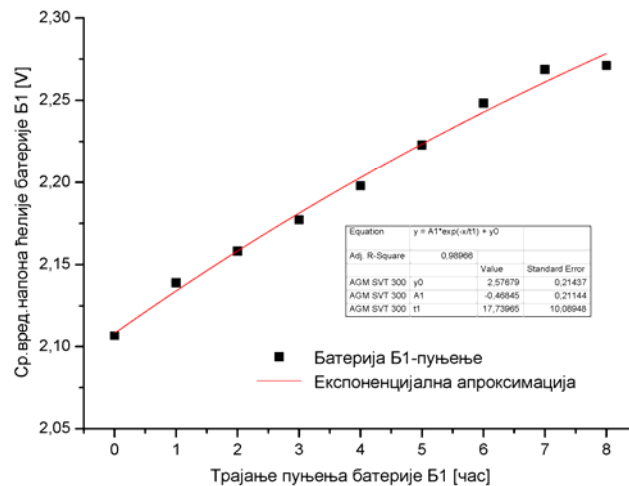
Слика 4. Средње вредности напона ћелија батерије B2 током процеса пражњења и полиномна апроксимација 2. реда резултата мерења



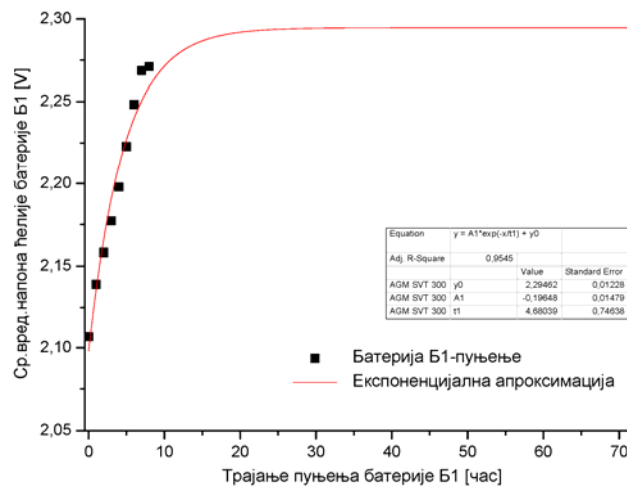
Слика 5. Средње вредности напона ћелија батерије B1 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења

На слици 5 је приказан раст средње вредности напона ћелија батерије B1 током комплетног 72-часовног процеса пуњења, док су на слици 6 приказане средње вредности напона ћелија батерије B1 током првих осам часова пуњења. Будући да је струја пуњења батерије B1 имала велике варијације, од 58 A на почетку до 11 A након осам часова пуњења, експоненцијална апроксимација није могла да има висок коефицијент детерминације као приликом пражњења (добијено је $\overline{R}_{\text{exp}}^2 = 0,9545$). На први поглед, у случају пуњења батерије B1 успешније је била

примењена полиномна апроксимација ($\overline{R}_{pol2}^2 = 0,99087$). Ипак, случај пуњења батерије Б1 представља добру илустрацију лошег закључивања до кога може да доведе само узимање у обзир прилагођеног коефицијента детерминације.



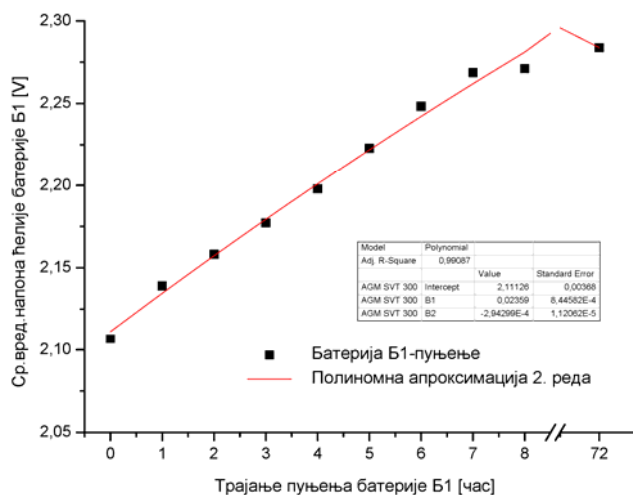
Слика 6. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења (првих осам часова пуњења)



Слика 7. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења (свих 72 часова пуњења)

Посебан проблем у одређивању прецизне апроксимационе функције представљао је укључивање у анализу податка о средњој вредности напона ћелије батерије снимљеног након 72 часа од почетка процеса

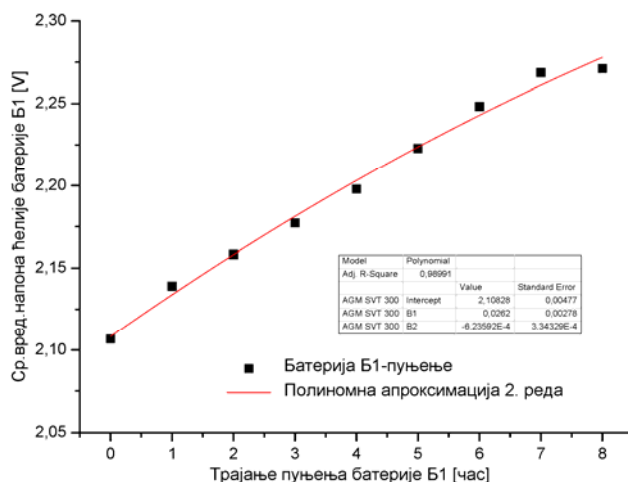
пуњења. Приликом осмочасовног процеса пуњења батерије напуни се око 90% номиналног капацитета, док се наредних дана батерија малом струјом пуни до достизања 100% капацитета. Током поменутог вишедневног процеса напон батерије се стабилизује, а напони појединих ћелија батерије се уједначавају. Слика 7 је добра илустрација експоненцијалне природе описаног процеса пуњења. У случају када се не узима у обзир податак о напону батерије снимљен након 72 часа пуњења, експоненцијална апроксимација је веома прецизна, а прилагођени коефицијент детерминације има сличну вредност ($\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,98966$) као у случају полиномне апроксимације 2. реда приказане на слици 8. Полиномна апроксимација 2. реда примењена на подацима о првих осам часова пуњења батерије има готово идентичну вредност као и експоненцијална апроксимација у овом случају ($\bar{R}_{\text{pol}2}^2 = 0,98991$, слика 9).



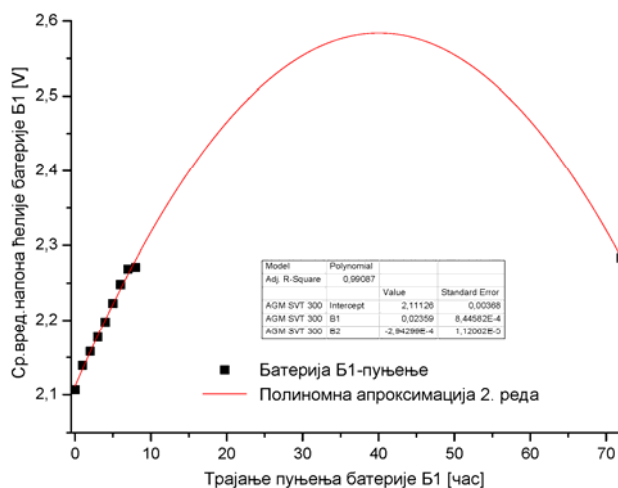
Слика 8. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 2. реда резултата мерења

Ипак, слика 10 је јасна илустрација неуспешне примене полиномне апроксимације процеса пуњења херметизоване оловне батерије Б1. У завршној фази процеса пуњења (између 8. и 72. часа) не постоји никакав раст напона ћелија батерије Б1 до 2,55 V након 40 часова пуњења, као ни каснији пад на напон од 2,25 V. Без обзира на изузетно високу вредност прилагођеног коефицијента детерминације ($\bar{R}_{\text{pol}2}^2 = 0,99087$, слика 8), као и добру апроксимацију првих осам часова пуњења ($\bar{R}_{\text{pol}2}^2 = 0,98991$, слика 9), полиномна апроксимација је неупотребљива у случају када се анализира дуготрајан процес пуњења батерије и када нема података о напону батерије у дугом временском интервалу.

Дакле, без обзира на нешто нижи коефицијент детерминације ($\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,9545$), дуготрајни процес пуњења батерије треба апроксимирати експоненцијалном функцијом. Краткотрајни процес пуњења батерије Б1 (првих осам часова) подједнако је успешно апроксимиран и експоненцијалном, и полиномном функцијом 2. реда.



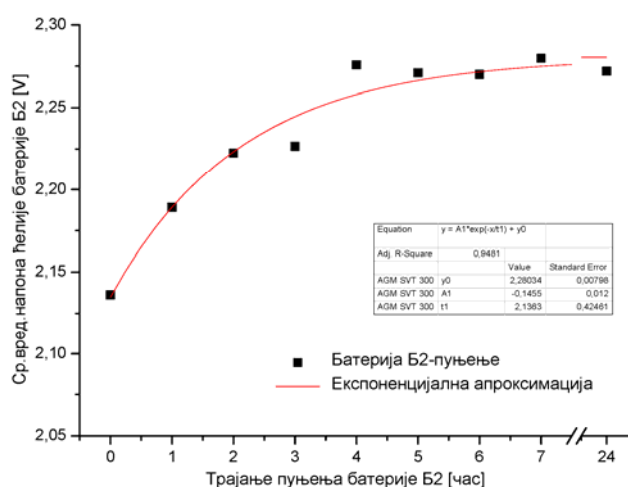
Слика 9. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 2. реда резултата мерења (првих осам часова пуњења)



Слика 10. Средње вредности напона ћелија батерије Б1 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 2. реда резултата мерења (свих 72 часова пуњења)

На слици 11 приказана је карактеристика пуњења батерије Б2 са експоненцијалном апроксимацијом. Ћелије батерије Б2 су биле у бољем

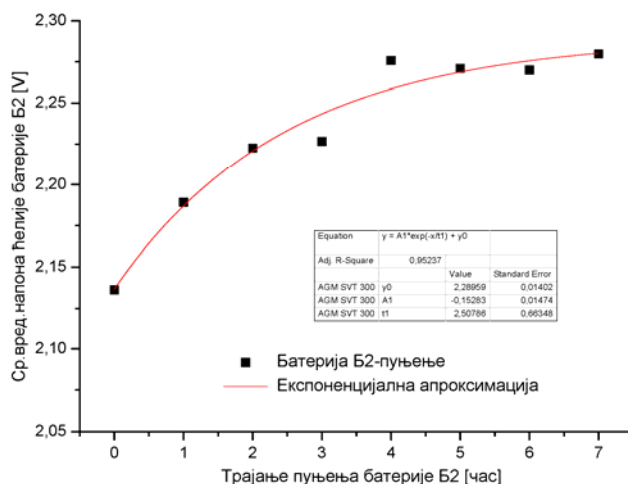
стању у односу на ћелије батерије Б1, првенствено због рада у бољим температурним условима. Због тога се батерија Б2 брже напунила од батерије Б1 (процес пуњења је раније ушао у засићење). Разлог за брже пуњење батерије Б2 је рад на температури нижој од 25°C, због чега су термички губици у батерији били занемарљиви. Са друге стране, батерија Б1 је пуњена на температури амбијента од око 30°C, због чега је дошло до значајног повећања термичких губитака у ћелијама батерије Б1, односно до протицања веће струје кроз коло батерије и каснијег отказа појединих ћелија.



Слика 11. Средње вредности напона ћелија батерије Б2 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења

Подаци о процесу пуњења батерије Б2 су узимани током првих седам часова, као и након 24 часа процеса пуњења. Ипак, приликом апроксимирања процеса пуњења батерије Б2 експоненцијалне интерполационе криве су имале мало слабију корелацију са добијеним резултатима. Експоненцијална апроксимација 24-часовног процеса пуњења батерије Б2 је имала прилагођени коефицијент детерминације $\overline{R}_{\text{exp}}^2 = 0,9481$, али ни експоненцијална апроксимација почетног периода пуњења (првих седам часова, слика 12) није била много прецизнија ($\overline{R}_{\text{exp}}^2 = 0,95237$). Ови регресиони модели су нешто лошији у односу на апроксимације спроведене на резултатима пуњења батерије Б1. Ипак, слика 13 је и у случају батерије Б2 добра илустрација успешне апроксимације дуготрајног процеса пуњења оловне батерије експоненцијалном функцијом. Треба још једном поменути да је апроксимирање процеса пуњења било знатно теже у односу на процес пражњења, будући да се струја пуњења мењала у изузетно широким границама (од приближно 0,3 А па све до 60 А), док је струја пражњења била готово константна.

На слици 14 је приказана карактеристика пуњења батерије Б2 са полиномном апроксимацијом. За разлику од карактеристика батерије Б1, које су прецизније апроксимирани полиномном функцијом 2. реда, у случају пуњења батерије Б2 добијена је много прецизнија апроксимација полиномном функцијом 3. реда. Разлике између добијених вредности прилагођеног коефицијента детерминације (за 24-часовни процес пуњења) су велике: $\bar{R}_{pol2}^2 = 0,86334$ (полином 2. реда) и $\bar{R}_{pol3}^2 = 0,94928$ (полином 3. реда, слика 14). Интересантно је да је у случају апроксимације седмочасовног процеса пуњења батерије Б2 бољи резултат дала полиномна апроксимација 2. реда ($\bar{R}_{pol2}^2 = 0,94969$) него интерполациона полиномна функција 3. реда ($\bar{R}_{pol3}^2 = 0,94183$, слика 15). Ипак, и у случају регресионе полиномне функције 3. реда слика комплетне карактеристике пуњења (слика 16) је најбоља потврда неупотребљивости полиномне апроксимације. Повећање реда регресионог полинома је само довело до још лошије процене завршног периода процеса пуњења (од 8. до 24. часа). У овом периоду напон ћелије батерије улази у засићење (око 2,28 V, слика 13), а у стварности нема никаквих драстичних смањивања и повећавања напона ћелија приказаних на слици 16.



Слика 12. Средње вредности напона ћелија батерије Б2 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења (првих седам часова пуњења батерије)

На основу наведених података могу да се наведу оптималне регресионе експоненцијалне функције пуњења и пражњења батерија Б1 и Б2 (у једначинама 3-6 су x : време пражњења, односно пуњења (у часовима), y : напон ћелије батерије (у волтима)).

У случају пражњења батерије Б1 може да се примени следећа

регресиона експоненцијална функција (уз вредност прилагођеног коефицијента детерминације $\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,99575$):

$$y = -0,08733 \cdot e^{\frac{x}{7,89177}} + 2,16498 \quad (3)$$

Пражњење батерије Б2 се добро апроксимира следећом функцијом ($\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,99587$):

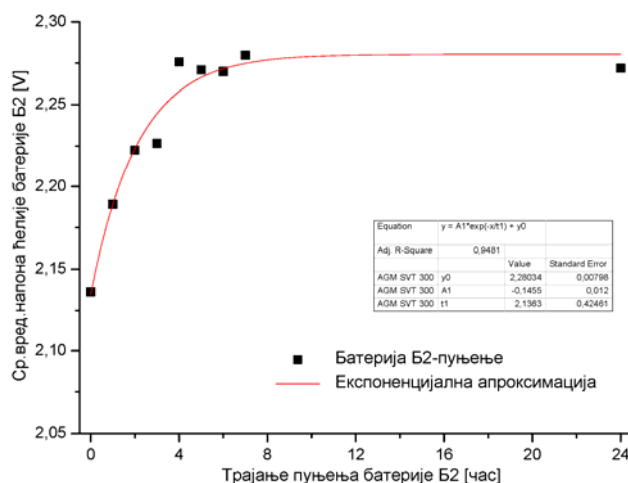
$$y = -0,09188 \cdot e^{\frac{x}{7,35979}} + 2,17034 \quad (4)$$

У случају пуњења батерије Б1 најбоља апроксимација је постигнута применом следеће експоненцијалне функција ($\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,9545$):

$$y = -0,19648 \cdot e^{\frac{x}{4,68039}} + 2,29462 \quad (5)$$

За апроксимирање процеса пуњења батерије Б2 искоришћена је следећа регресиона функција ($\bar{R}_{\text{exp}}^2 = 0,9481$):

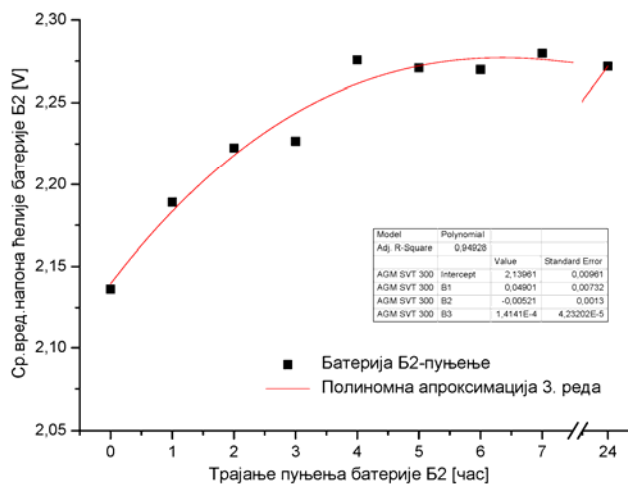
$$y = -0,1455 \cdot e^{\frac{x}{2,1363}} + 2,28034 \quad (6)$$



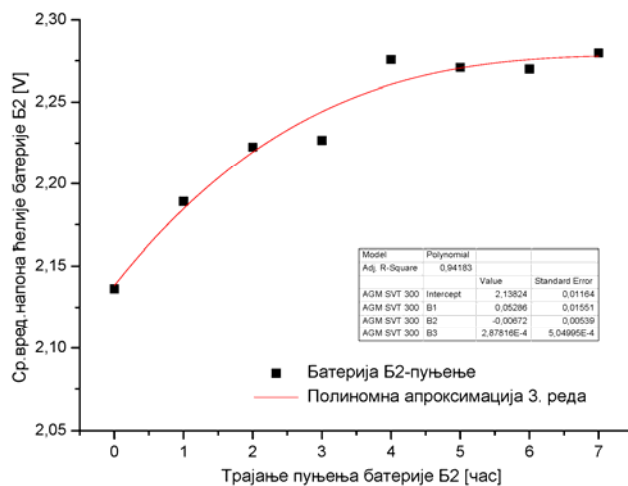
Слика 13. Средње вредности напона ћелија батерије Б2 током процеса пуњења и експоненцијална апроксимација резултата мерења (свих 24 часа пуњења батерије)

Наведене релације указују на малу разлику између регресионих функција пражњења батерије Б1 и Б2 константном струјом. Због тога било која од ових релација може да се искористи за успешно апроксимирање процеса пражњења херметизованих оловних батерија

AGM SVT 300. Са друге стране, интерполационе функције (5) и (6) за апроксимирање пуњења батерија AGM SVT 300 променљивом струјом се значајно разликују. Због тога би могле да се примене за апроксимирање процеса пуњења батерија само у случају да су дозвољена значајна одступања регресионих функција од реалних параметара.



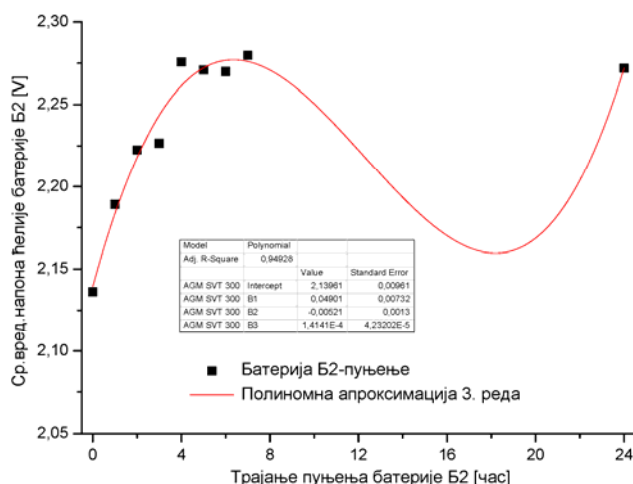
Слика 14. Средње вредности напона ћелија батерије B2 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 3. реда резултата мерења



Слика 15. Средње вредности напона ћелија батерије B2 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 3. реда резултата мерења (првих седам часова пуњења)

Након завршетка циклусирања обе батерије дошло је до даљег погоршавања карактеристика батерије B1 и отказа додатних ћелија. Због тога је оспособљена и унапређена климатизација просторије ове

батерије, а неколико месеци касније је извршена и замена батерије Б1 новим ћелијама типа AGM SVT 300. Са друге стране, комплетан ланац од 102 ћелије батерије Б2 је остао у погону. Због тога је након примене поступка испитивања батерија AGM SVT 300 могао да се изведе недвосмислен закључак да је батерија Б2, која је скоро шест година радила на температури амбијента нижој од 25°C, демонстрирала добре карактеристике, док је батерија Б1, која је неколико година провела без адекватне климатизације у летњим месецима, морала да буде замењена након истека половине номиналног животног века од дванаест година.



Слика 16. Средње вредности напона ћелија батерије Б2 током процеса пуњења и полиномна апроксимација 3. реда резултата мерења (свих 24 часа пуњења)

На крају, поставља се питање ефикасности примене наведених регресионих функција у реалним условима експлоатације херметизованих оловних батерија. Већина исправљача у експлоатацији нема могућност анализе параметара, па чак ни провере батерије [10],[11]. Одређени модели имају могућност провере присуства батерије, односно вршења краткотрајног периодичног испитивања напона на излазу исправљача [12]. Повољно решење за естимацију капацитета батерије представља прикључивање батерија на исправљаче који имају опцију аутоматске провере стања батерије [4]. Код оваквих исправљача могуће је аутоматско покретање процеса пражњења батерије (нпр. једном недељно или месечно). У том случају задаје се проценат номиналног капацитета који би био испражњен (нпр. 10%; 30 Ah за 300 Ah батерију). На овај начин би се омогућило пражњење батерије само са постојећим потрошачима, које би могло да буде и вишечасовно. Овим поступком би се без интервенције руковалаца и одвајања потрошача од батерије омогућило циклусирање батерија, уз очекивано очување декларисаног радног века батерије и њеног капацитета [4],[13]. Приликом наведеног поступка периодичне провере стања батерије дошао би до

изражаја правилан избор регресионе функције за описивање процеса пуњења и пражњења батерије. На основу пражњења дела капацитета батерије (нпр. поменутих 10%), уз праћење напона батерије и струје пражњења, било би могуће прецизно одређивање преосталог капацитета батерије, без потребе за њеним даљим пражњењем. Сличан приступ би могао да буде примењен и приликом процеса пуњења испражњене батерије. Годишње циклусирање батерије, са пражњењем 80% номиналног капацитета струјом десеточасовног пражњења и накнадним пуњењем, могло би да послужи за снимање референтних напона, односно референтних кривих пражњења и пуњења батерије. На овај начин би могао да буде превладан негативан утицај старења батерије на естимацију њеног капацитета.

5. Закључак

У раду су приказани резултати добијени приликом пражњења и накнадног пуњења две батерије “Sunlight” AGM SVT 300, које су испитиване након шестогодишње експлоатације у једном индустријском постројењу у Србији. Обе батерије су радиле са идентичним индустријским протрошачима, али у различитим температурним условима. Батерија Б2, која је скоро шест година увек радила на температури амбијента нижој од 25°C, демонстрирала је добре карактеристике током поступка циклусирања. Са друге стране, батерија Б1, која је неколико година провела без адекватне климатизације у летњим месецима, морала је да буде замењена након истека половине номиналног животног века од дванаест година.

Као регресионе функције за апроксимирање процеса пражњења и пуњења батерије коришћене су експоненцијалне и полиномне функције. Квалитет извршене интерполације је оцењиван анализом прилагођеног коефицијента детерминације. Приликом процеса пражњења 80% номиналног капацитета константном струјом десеточасовног пражњења, подједнако добро могу да се примене и експоненцијалне, и полиномне регресионе функције. И у случајевима регресионих експоненцијалних функција, као и у случајевима полиномних функција 2. реда, вредности прилагођених коефицијената детерминације су биле $\bar{R}^2 > 0,995$. Са полиномима 2. реда су обично постизани бољи резултати у односу на вршење интерполације полиномним функцијама 3. реда.

Приликом процеса пуњења батерије променљивом струјом након њиховог дубоког пражњења нису добијене тако добре регресионе функције као у случају пражњења батерија. Полиномне регресионе функције 2. и 3. реда су имале високе вредности прилагођеног коефицијента детерминације (\bar{R}_{pol}^2 од 0,949 до 0,99), али су биле неупотребљиве за апроксимацију дуготрајних процеса пуњења (24 или

72 часа). Полиномне функције нису могле да опишу засићење раста напона батерије након првих осам часова пуњења. У случајевима дуготрајних процеса пуњења херметизованих оловних батерија “Sunlight” AGM SVT 300 променљивом струјом добри резултати су постигнути применом експоненцијалних регресионих функција ($\overline{R}_{\text{exp}}^2$ око 0,95).

Између регресионих функција пражњења батерије Б1 и Б2 константном струјом постоји мала разлика, па је могуће коришћење ових релација за успешно апроксимирање процеса пражњења херметизованих оловних батерија AGM SVT 300. Са друге стране, интерполационе функције за апроксимирање пуњења батерија AGM SVT 300 променљивим струјама се значајно разликују. Због тога би њихова примена била прихватљива за апроксимирање процеса пуњења батерија само у случајевима када су прихватљива значајна одступања података добијених из регресионих функција од реалних параметара батерије.

Наведене регресионе функције би могле да нађу практичну примену на исправљачима који имају опцију аутоматске провере стања батерије. На основу праћења напона и струје могуће је вршење естимације преосталог капацитета приликом пражњења батерије.

Захвалница

Рад је настао у оквиру пројекта TP33020, „Повећање енергетске ефикасности хидроелектрана и термоелектрана Електропривреде Србије развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”, који је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Литература

- [1] D. Doerfell, S. Abu Sharkh, “A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, vol. 155, pp. 395-400, 2006.
- [2] N.A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, A. Kojić, “Algorithms for advanced battery-management systems - Modeling, estimation and control challenges for lithium-ion batteries”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 30, no. 3, pp. 49-68, 2010.
- [3] Y.H. Sun, H.L. Jou, J.C. Wu, “Aging estimation method for lead-acid battery”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 264-271, 2011.

- [4] В. Вукић, Р. Проле, Д. Јевтић, “Ново постројење са тиристорским исправљачима и разводом једносмерне струје за напајање хидроелектране”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 20, стр. 143-156, 2010.
- [5] *SVT SGM VRLA Batteries*, Germanos Sunlight S.A., 2006.
- [6] *IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications*, IEEE Std 1188-1996, 20th June 1996.
- [7] *287/289 True-rms Digital Multimeters, Calibration Manual*, Fluke Corporation, 2009.
- [8] B.S. Everitt, *The Cambridge Dictionary of Statistics*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2002.
- [9] H.Theil, *Economic Forecasts and Policy*, North, Amsterdam, Holland, 1961.
- [10] В. Вукић, “Тиристорски исправљачи са дигиталним регулаторима заснованим на микроконтролеру 80С196 за системе непрекидног напајања”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 21, стр. 139-155, 2011.
- [11] В. Вукић, “Енергетска ефикасност и дигитална комуникација фазно регулисаних исправљача за индустријске системе непрекидног напајања”, *Пољопривредна техника*, Година XXXVI, бр. 3, стр. 19-28, 2011.
- [12] В. Вукић, “Тиристорски исправљач управљан програмабилним логичким контролером са модуларним чоперским излазним степеном”, *Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”*, Књига 19, стр. 85-92, 2008.-2009.
- [13] R.C. Cope, Y. Podrazhansky, “The art of battery charging”, *The 14th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, pp. 233-235, 1999.

Abstract: Following a deep discharge of AGM SVT 300 valve-regulated lead-acid batteries using the ten-hour discharge current, the batteries were charged using variable current. In accordance with the obtained results, exponential and polynomial functions for the approximation of the specified processes were analysed. The main evaluation instrument for the quality of the implemented approximations was the adjusted coefficient of determination \bar{R}^2 . It was perceived that the battery discharge process might be successfully approximated with both an exponential and the second order polynomial function. On all the occasions analysed, values of the adjusted coefficient of determination were greater than 0.995. The charging process of the deeply discharged batteries was successfully approximated with the exponential function;

the measured values of the adjusted coefficient of determination being nearly 0.95. Apart from the high measured values of the adjusted coefficient of determination, polynomial approximations of the second and third order did not provide satisfactory results regarding the interpolation of the battery charging characteristics. A possibility for a practical implementation of the procured regression functions in uninterruptible power supply systems was described.

Key words: regression function, adjusted coefficient of determination, valve-regulated lead-acid battery, discharging, charging, exponential fit, polynomial fit

Determination of Regression Functions for the Charging and Discharging Processes of Valve Regulated Lead-Acid Batteries

Рад примљен у уредиштво 12.9.2012. године
Рад прихваћен 12.10.2012. године