

Józef Pszczółkowski, Grzegorz Dyga

Procedury badawcze akumulatora kwasowego dla celów diagnostycznych

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.160

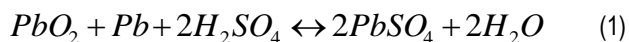
Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule opisano zasady pracy akumulatora kwasowo-olowiowego. Scharakteryzowano najczęściej stosowane metody oceny stanu technicznego oraz wskazano niektóre objawy i przyczyny nieodpowiedniego funkcjonowania akumulatorów. Wskazano czynniki mające wpływ na wartość napięcia akumulatora w trakcie obciążenia prądowego. Opisano plan eksperymentu opracowany w celu wyznaczenia współczynników liniowego modelu matematycznego opisującego wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienną zależną. Przedstawiono liniowy model matematyczny opracowany na podstawie danych uzyskanych podczas badań akumulatorów zgodnie z przyjętym planem eksperymentu.

Słowa kluczowe: akumulator kwasowo-olowiowy, elektryczny układ rozruchowy, diagnostyka.

Wstęp

Akumulator kwasowo-olowiowy jest odwracalnym, chemicznym źródłem prądu elektrycznego. W dużym uproszczeniu, jest zbudowany z płyt pokrytych masą czynną i zanurzonych w elektrolicie, którym jest wodny roztwór kwasu siarkowego. W procesie produkcji płyty akumulatora są odpowiednio formowane, w wyniku czego na płytach dodatnich powstaje dwutlenek ołowiu (PbO_2), natomiast na ujemnych ołów gąbczasty (Pb). Uformowane w ten sposób płyty mają określony potencjał normalny, a zanurzone w elektrolicie i odpowiednio połączone stanowią źródło energii elektrycznej o napięciu $U = 2,1 - 2,2$ V na ogniwo. Zestawienie 6 ogniw powoduje powstanie akumulatora, którego nominalna wartość napięcia jest równa 12 V, a rzeczywista wartość napięcia biegu jałowego zawiera się w przedziale $U = 12,6 - 12,8$ V. Pracę akumulatora jako odwracalnego chemicznego źródła prądu opisuje równanie 1.



Z analizy powyższego równania wynika, że w chwili wyładowania akumulatora produktem reakcji fizykochemicznych jest siarczan ołowiu oraz woda. Siarczan ołowiu jest bardzo słabo rozpuszczalny w wodzie, co powoduje jego odkładanie się na powierzchni płyt akumulatora w postaci stałej i zatykanie porów masy czynnej. Utrudnia to dyfuzję jonów elektrolicy w głąb masy czynnej, w wyniku czego wzrasta rezystancja wewnętrzna akumulatora, a to powoduje spadek napięcia na elektrodach. Wzrost wartości natężenia prądu obciążenia powoduje wzrost intensywności procesów prowadzących do powstawania siarczanu ołowiowego.

Realizacja procesu odwrotnego do rozładowania – dostarczenie energii z zewnętrznego źródła podczas ładowania powoduje, że odłożony na elektrodach siarczan ołowiowy łączy się z wodorem tworząc kwas siarkowy, przez co wzrasta gęstość elektrolicy. Rozkład $PbSO_4$ otwiera pory masy czynnej umożliwiając dyfuzję stężonego elektrolicy znajdującego się między płytami i w otoczeniu elektrod do wnętrza płyt, zmniejszając w ten sposób rezystancję wewnętrzną akumulatora, co powoduje wzrost wartości napięcia [2].

Zadaniem akumulatora jest wytworzenie, magazynowanie i oddawanie ładunku elektrycznego w chwili, kiedy jest to niezbędne. Zwiększanie liczby elektrycznych i elektronicznych urządzeń w samochodach sprawia, że rola akumulatora jako źródła zasilania jest bardzo duża. We współczesnych samochodach jest on źródłem energii elektrycznej nie tylko dla rozrusznika podczas rozruchu silnika spalinowego, ale także dla systemów i urządzeń elektrycznych zamontowanych w samochodzie, które do prawidłowej pracy wymagają energii elektrycznej w trakcie jazdy oraz w chwili postoju samochodu – przy niepracującym silniku spalinowym (nie działającym alternatorze). W związku z tym, z punktu widzenia działania systemów i urządzeń elektrycznych i elektronicznych, niezbędne jest ciągle dostarczanie energii elektrycznej do wyposażenia, które tego wymaga. To sprawia, że stan techniczny źródła zasilania (akumulatora) musi być odpowiedni, aby wyeliminować możliwe braki dostawy energii elektrycznej w czasie, gdy nie działa silnik spalinowy, a zwłaszcza podczas dużych fluktuacji napięcia spowodowanych włączeniem urządzeń elektrycznych o znacznym poborze prądu (np. rozrusznik). Akumulator powinien również zapewniać dostarczenie energii elektrycznej do systemów w warunkach ujemnej wartości temperatury otoczenia, w których zmienia się gęstość i lepkość elektrolicy, a przez to ruchliwość jonów, powodując utrudnienia wytwarzania i dostarczania energii do obwodu elektrycznego.

Ocena stanu technicznego akumulatora jest bardzo ważnym elementem diagnostyki elektrycznego układu rozruchowego. Pozwala stwierdzić, czy w akumulatorze zgromadzony jest ładunek niezbędny do zasilania urządzeń pokładowych oraz do rozruchu silnika spalinowego. Istnieje wiele metod oceny stanu technicznego akumulatora kwasowego, które są mniej lub bardziej zaawansowane technicznie i technologicznie i które pozwalają z mniejszą lub większą dokładnością oszacować stan techniczny akumulatora. Najdokładniejszą metodą oceny stanu akumulatora jest metoda wyznaczenia jego pojemności elektrycznej. Metoda ta ze względu na konieczność wykorzystania specjalnego stanowiska testowego oraz czasochłonność obciążania akumulatora odpowiednim natężeniem prądu wynikającym z jego pojemności znamionowej 20-sto godzinnej, nie jest stosowana w warunkach warsztatowych. Najczęściej stosowane metody to:

- pomiar napięcia na zaciskach akumulatora w stanie biegu jałowego – pomiar siły elektromotorycznej,
- pomiar gęstości elektrolicy,
- pomiar napięcia na zaciskach akumulatora w trakcie obciążenia prądowego,
- pomiar rezystancji wewnętrznej akumulatora lub wyznaczenie konduktancji, która jest miarą zdolności akumulatora do przewodzenia prądu elektrycznego.

Napięcie na zaciskach obciążonego natężeniem prądu akumulatora jest jednym z najlepszych estymatorów stanu technicznego akumulatora. Determinowane jest przez wiele czynników, m.in.:

- pojemność znamionową akumulatora,
- temperaturę elektrolicy,
- stopień naładowania i stan akumulatora,
- natężenie prądu obciążenia.

W dalszej części artykułu przybliżone zostaną metody oceny stanu technicznego akumulatora oraz przedstawiony zostanie eksperyment pozwalający ocenić ilościowy wpływ wymienionych powyżej czynników mających wpływ na wartość napięcia obciążonego akumulatora.

1. Metody oceny stanu technicznego akumulatora

Elektrolitem w akumulatorach kwasowo-ołowiowych jest roztwór kwasu siarkowego z wodą. Jego właściwości eksploatacyjne, w tym elektryczne, są zależne od stężenia. Wzrost stężenia do około 31% masy kwasu siarkowego w roztworze powoduje spadek rezystancji, natomiast wzrost stężenia powyżej tej wartości powoduje zwiększenie rezystancji elektrolitu. Od stężenia zależy także temperatura krzepnięcia elektrolitu, której wartość jest ważnym eksploatacyjnym parametrem ze względu na warunki użytkowania samochodu, a więc i akumulatora. Ze względu na przewodność elektrolitu optymalne są wartości jego gęstości zawierające się w przedziale $1,17 \div 1,28 \text{ g/cm}^3$, co odpowiada stężeniu $23,4 \div 36,8\%$ masy kwasu siarkowego w roztworze [5]. Wysokie stężenie elektrolitu, około 90% masy kwasu, powoduje jego zamarzanie już w temperaturze dodatniej. Stężenie elektrolitu determinuje jego gęstość.

Pomiar gęstości elektrolitu wykonywany jest m.in. za pomocą refraktometru. W tym celu niewielką ilość roztworu aplikuje się za pomocą pipety w odpowiednie miejsce urządzenia pomiarowego. Zamknięcie klapki refraktometru powoduje równomierne rozprzodzenie elektrolitu na powierzchni pomiarowej. Urządzenie, na podstawie współczynnika załamania światła przechodzącego przez dwa ośrodki, wyznacza wartość gęstości elektrolitu. Od gęstości elektrolitu zależy wartość stopnia naładowania akumulatora – tabela 1.

Tab. 1. Zależność stopnia naładowania akumulatora od gęstości elektrolitu [1]

Gęstość elektrolitu [g/cm ³]	1,28	1,24	1,20	1,15	1,10
Stopień naładowania [%]	100	75	50	25	0

Pomiar gęstości elektrolitu możliwy jest wyłącznie dla akumulatorów, których cele zamknięte są odpowiednim korkiem wkręcany w obudowę. Dla akumulatorów bezobsługowych, bez dostępu do cel i elektrolitu, pomiar gęstości elektrolitu jest niemożliwy do wykonania. Można jedynie wstępnie oszacować wartość gęstości elektrolitu z zależności 2 mierząc SEM akumulatora.

$$SEM = \gamma_{20} + 0,84 [V] \quad (2)$$

Wartość napięcia mierzonego na zaciskach akumulatora w warunkach obciążenia prądowego jest jednym z parametrów diagnostycznych oceny stanu technicznego akumulatora. Ten sposób pomiaru wykorzystywany jest w wielu stosowanych na rynku testerach akumulatora, np. PAS-45 lub BT-12. Różnią się między sobą wartością obciążenia prądowego akumulatora i sposobem prezentowania wyników pomiarów. Podczas testów z wykorzystaniem testera PAS-45 obciążenie prądowe ma większą wartość w porównaniu do testera BT-12, co powoduje większy spadek napięcia w chwili badania akumulatora. Urządzenie starsze (PAS-45) ponadto umożliwia zmianę wartości prądu obciążenia poprzez zmianę rezystancji drutu oporowego wykonanego jako rezystor obciążeniowy. Związane jest to z pojemnością znamionową badanych akumulatorów. Akumulatory o pojemności znamionowej nie przekraczającej $Q_{zn} = 100 \text{ Ah}$ powinny być sprawdzane pod obciążeniem nie większym niż 80 A, natomiast akumulatory o pojemności większej niż 100 Ah sprawdza się pod obciążeniem prądowym wynoszącym 150 A. Uzyskany wynik pomiaru wartości napięcia na obciążonym akumulatorze jest adekwatny do jego stanu technicznego oraz stopnia naładowania akumulatora.

Wartość stopnia naładowania akumulatora i odpowiadające mu wartości napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora przedstawia tabela 2. Akumulator wykazujący oznaki niedostatecznego naładowania należy doładować używając odpowiedniego urządzenia. Przyczyną niedoładowania akumulatora może być:

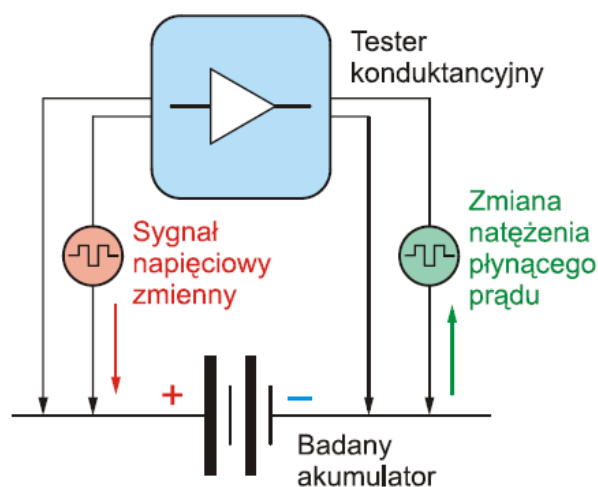
- nieprawidłowe działanie alternatora,
- nieprawidłowe działanie regulatora napięcia,
- nieprawidłowo napięty pasek alternatora,
- upływność prądu w instalacji elektrycznej samochodu,
- zaszarczenie płyt akumulatora,
- zbyt mała ilość elektrolitu w celach akumulatora.

Tab. 2. Zależność stopnia naładowania od napięcia mierzonego podczas obciążania akumulatora [1]

Stopień naładowania akumulatora [%]	0–25	25–50	50–75	75–100
Napięcie akumulatora pod obciążeniem [V]	< 9,3	9,3–10,2	10,2–11,1	>11,1

W przypadku testera PAS-45 wynik pomiaru zakodowany jest w postaci świecących diod odpowiadających wartości napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora, a czas trwania testu uzależniony jest od operatora. Wynik pomiaru dla testera BT-12 wyświetlany jest w postaci cyfrowej napięcia mierzonego podczas obciążenia akumulatora oraz świecącej odpowiednim kolorem, zależnie od stanu technicznego akumulatora, diodzie LED. Jeżeli dioda świeci kolorem zielonym oznacza to, że akumulator jest w dobrym stanie technicznym, jeżeli kolor jest żółty, akumulator wymaga doładowania, a jeżeli na kolor czerwony to akumulator jest uszkodzony i wymaga wymiany. Czas trwania testu urządzeniem BT-12 jest ustalony przez producenta i wynosi około 10 s. Po tym czasie obciążenie akumulatora zostaje wyłączone.

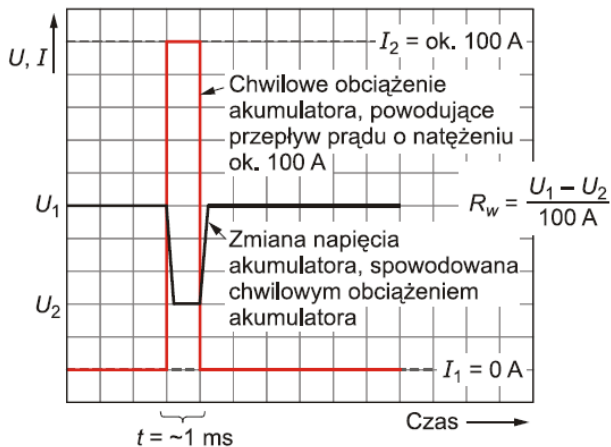
Większość automatycznych urządzeń do oceny stanu technicznego akumulatora wykorzystuje pomiar konduktancji – mierzy przewodność elektrolitu – lub wyznaczenie wartości rezystancji wewnętrznej akumulatora. Zasadę działania urządzenia, które do oceny stanu akumulatora wykorzystuje pomiar konduktancji, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Sposób wyznaczenia konduktancji akumulatora [1]

W trakcie pomiaru urządzenie wysyła zmienny sygnał napięciowy, a następnie rejestruje przebieg natężenia przepływającego przez akumulator prądu, będącego efektem zastosowania sygnału testowego [1]. W celu wyznaczenia rezystancji wewnętrznej – rys. 2,

tester krótkotrwale – około 1 ms – obciąża akumulator natężeniem prądu $I = 100$ A i mierzy spadek napięcia podczas działania obciążenia prądowego.



Rys. 2. Sposób wyznaczania rezystancji wewnętrznej akumulatora podczas badania diagnostycznego [1]

Iloraz różnicy napięć U_1 [V] i U_2 [V] oraz natężenia prądu obciążenia I [A] pozwala wyznaczyć rezystancję wewnętrzną akumulatora i na tej podstawie wnioskować o jego stanie technicznym. Przy czym zmienna U_1 [V] wyraża wartość napięcia bezpośrednio przed włączeniem obciążenia prądowego, natomiast U_2 [V] wartość napięcia na zaciskach akumulatora w chwili obciążenia prądowego.

Wynikiem zastosowania elektronicznych testerów akumulatora, w których pomiar oparty jest na badaniu konduktancji lub rezystancji wewnętrznej, jest informacja o stanie akumulatora w postaci parametru SOH (state of Health) oraz SOC (state of charge) oraz wartość natężenia prądu zimnego rozruchu. Urządzenie diagnostyczne na podstawie zrealizowanych pomiarów wyświetla również komunikat o zalecanym działaniu związanym ze stanem akumulatora, tzn. czy go wymienić, doładować lub nie podejmować żadnych działań.

Stan techniczny akumulatora jest bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na działanie elektrycznego układu rozruchowego. Od niego zależy czy układ rozruchowy zapewni odpowiednie warunki do uruchomienia silnika spalinowego. Jednym z czynników mających istotny wpływ na parametry elektrycznego układu rozruchowego jest napięcie pracy akumulatora, które wyznaczane jest w chwili obciążenia prądowego akumulatora i zależy m.in. od natężenia prądu obciążenia I [A], stopnia naładowania akumulatora k , temperatury elektrolitu T [°C], pojemności znamionowej akumulatora Q_{zn} [Ah]. Przedstawione zostaną wyniki badań pozwalające określić ilościowy wpływ ww. zmiennych niezależnych na wartość zmiennej zależnej – napięcia podczas pracy akumulatora. Wyznaczenie struktury modelu akumulatora i określenie wartości liczbowej poszczególnych jego składników jest niezbędne w celu opracowania modelu matematycznego pozwalającego określić stan elementów układu rozruchowego i silnika (w szczególności ciśnienia sprężania ładunku) na podstawie diagnostycznych sygnałów rozruchu.

2. Wyznaczenie wielowymiarowej charakterystyki pracy akumulatora kwasowego

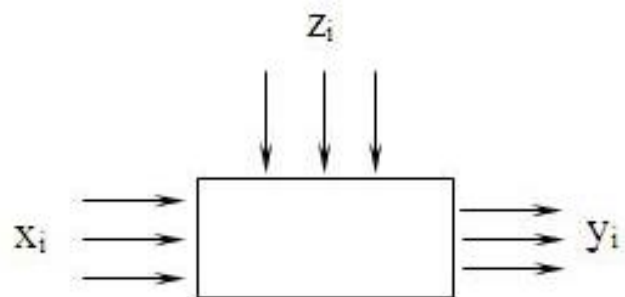
Akumulator kwasowy jest chemicznym źródłem energii elektrycznej, którego napięcie pracy zależne jest od jego pojemności znamionowej, natężenia pobieranego prądu, temperatury i stanu naładowania (technicznego). Na podstawie badań grupy akumulatorów kwasowo-ołowiowych, których wyniki przedstawiono w [3, 4, 5] wykazano, że do opisu zależności między zmiennymi może zostać wykorzystany model liniowy, a do opracowania jego współczynników za-

stosowana metoda najmniejszych kwadratów. Zaprezentowane wyniki uwzględniają jedno i dwuwymiarowe modele opisujące wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na wartość napięcia obciążonego akumulatora. W niniejszym opracowaniu podjęto próbę wyznaczenia wartości współczynników wielowymiarowego modelu regresyjnego opisującego zależności między zmiennymi z wykorzystaniem eksperymentu planowanego. Dokonano analizy ogólnego, uniwersalnego obiektu badań oraz wybranych planów doświadczeń stosowanych w technice, umożliwiających osiągnięcie założonego celu przy minimalnym nakładzie pracy. Opracowano plan eksperymentu umożliwiający wyznaczenie współczynników liniowego równania opisującego związku między napięciem obciążonego akumulatora, a czynnikami mającymi na nie wpływ.

Poznanie właściwości obiektu badań, jego zachowania pod wpływem wymuszeń, wymaga przeprowadzenia wielu, czasem kosztownych oraz pracochłonnych doświadczeń. Ilość wykonywanych pomiarów uzależniona jest również od stopnia złożoności modelu, liczby zmiennych niezależnych wpływających na obiekt badań oraz poziomów wartości, jakie te zmienne przyjmują. Aby ograniczyć liczbę pomiarów, a przy tym uzyskać jak najwięcej informacji konieczne jest zaplanowanie doświadczeń, a następnie ich wykonanie według zasad wynikających z przyjętego planu. W badaniach doświadczalnych najczęściej wykorzystuje się strukturę liniową modelu, wykładniczą lub logarytmiczną, które można sprowadzić do postaci liniowej. Do wyznaczenia współczynników takiego modelu wykorzystywana jest najczęściej metoda najmniejszych kwadratów. Wyznaczone w ten sposób współczynniki modelu zapewniają minimalizację sumy kwadratów odchyień modelu od wartości rzeczywistej. Metoda najmniejszych kwadratów jest wykorzystywana do identyfikacji modeli liniowych oraz wielomianów drugiego rzędu, jak również funkcji wykładniczych, potęgowych lub logarytmicznych. Adekwatność wyznaczonych współczynników modelu sprawdza się za pomocą testu t-Studenta.

Istotność wpływu danej zmiennej niezależnej na zmienną zależną – model obiektu obserwacji, określa się przy wykorzystaniu metod statystycznych, np. statystyki Fishera-Snedecora. O istotności poszczególnych współczynników (zmiennych niezależnych) decyduje wynik porównania wartości krytycznej statystyki z obliczoną jej wartością na podstawie wyników pomiarów.

Obiekt badań jest charakteryzowany poprzez zmienne niezależne (wejściowe) x_i , czyli zbiór parametrów wpływających na jego właściwości, zmienne zależne y_i , czyli wielkości wyjściowe (wyniki oddziaływań wielkości wejściowych i zakłócających), wielkości stałe – wpływają na działanie układu. Wielkości zakłócające z_i – są wynikiem oddziaływania czynników losowych na obiekt badań i niedokładności metod oraz środków pomiarowych. Uniwersalny model obiektu badań przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Uniwersalny model obiektu badań: x_i – zmienne niezależne, y_i – zmienne zależne, z_i – zmienne zakłócające

Obiekty badań można klasyfikować ze względu na czas oraz liczbę zmiennych określających. Można zatem wyróżnić obiekty badań statyczne i dynamiczne oraz jednoczynnikowe i wieloczynnikowe (wymiarowe).

Badania realizowane są według sporządzonego planu doświadczenia (eksperymentu), zazwyczaj zgodnie z zawartą w planie tablicą eksperymentu. Wyznaczenie niedokładności wyników pomiarów możliwe jest w przypadku kilkukrotnego powtarzania tego samego doświadczenia, a jako miary można zastosować średnią arytmetyczną, jako miarę położenia, oraz odchylenie standardowe, jako miarę rozproszenia. Nawet przy jednokrotnym wykonaniu pomiaru wartości wyjściowej możliwe jest oszacowanie niedokładności wyników, ale niemożliwe jest zbadanie istotności modelu opisującego obiekt. Optymalizacja modelu opisującego obiekt rzeczywisty polega głównie na znalezieniu najlepszego, przy wszystkich możliwych ograniczeniach, modelu opisującego zależności między badanymi zmiennymi.

2.1. Plan doświadczenia dla napięcia akumulatora

Jak zaznaczono wyżej, plan eksperymentu opracowano przy założeniu liniowej struktury modelu matematycznego opisującego zależność między napięciem obciążonego akumulatora (zmienna zależna) oraz wielkościami fizycznymi mającymi na nie wpływ (zmiennie niezależne): pojemność znamionowa akumulatora – Q_{zn} [Ah], natężenie prądu obciążenia – I [A], temperatura (elektrolitu) – T [°C], stan akumulatora – k . Przyjęto eksperyment statyczny dwupoziomowy, zdeterminowany, kompletny.

W planie zakłada się, że czynniki wejściowe – zmienne niezależne przyjmują dwa poziomy wartości: górny oznaczony jako „+1” i dolny oznaczony jako „-1”. Wobec tego liczba doświadczeń dla planowanego eksperymentu dla czterech zmiennych niezależnych wynosi $N = 2^4 = 16$ [7, 8].

Dla poszczególnych zmiennych niezależnych przyjęto odpowiednie oznaczenia x_i , oraz założono poziomy ich zmienności. Poziomy zmienności określają przedziały, w zakresie których przyjmują one wartości [$x_{min} \div x_{max}$]. Ponadto do opracowania modelu konieczne jest zakodowanie wielkości wejściowych. Kodowanie polega na przekształceniu wartości dowolnej wielkości wejściowej na wartość kodowaną (unormowaną), która zawiera się w przedziale ograniczonym przez poziomy zmiennych wejściowych z zakresu $[-1 \div +1]$. W tym celu wykonano operacje matematyczne, polegające na wyznaczeniu jednostki zmienności dla poszczególnych wielkości – wartości jednostkowej zmiany czynnika wejściowego i wyznaczenia wartości centralnych – obliczenia średnich arytmetycznych dla poszczególnych zmiennych oraz ich kodowania.

Obliczenie jednostek zmienności polega na wyznaczeniu wartości jednostkowej zmiany zmiennej niezależnej. Jednostkę zmienności określano na podstawie wyrażenia (3). Wartość x_{imax} oraz x_{imin} w równaniu (3) odpowiada maksymalnej i minimalnej wartości zmiennej niezależnej o numerze i , tj. x_i w przyjętym przedziale zmienności [7, 8].

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}; \quad (3)$$

Wartości centralne to średnie arytmetyczne poszczególnych zmiennych niezależnych (4) [7].

$$x_{io} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}; \quad (4)$$

Kodowanie zmiennych niezależnych powoduje przekształcenie wartości wielkości wejściowych na bezwymiarowe liczby zawierające się w zbiorze $[-1 \div +1]$. Kodowanie powoduje uniezależnienie planu

od rzeczywistych wartości oraz sensu fizycznego zmiennych niezależnych opisujących obiekt badań i zastępuje je wartościami bezwymiarowymi. Stąd metody planowania eksperymentu stają się uniwersalnymi, niezależnymi od fizycznego znaczenia czynników opisujących dane zjawisko i mogą być wykorzystywane w różnych dziedzinach badań [7, 8].

$$x_{ik} = \frac{x_i - x_{io}}{\Delta x_i} \quad (5)$$

Gdzie poszczególne składowe wyrażenia (5) oznaczają:

- x_{ik} – zakodowana wartość zmiennej niezależnej,
- x_i – zmienna niezależna podlegająca kodowaniu,
- x_{io} – wartość centralna, wyznaczona za pomocą równania (4),
- Δx_i – jednostka zmienności zmiennej niezależnej podlegającej kodowaniu.

Kodowaniu podlega także zmienna zależna, tj. napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora: U [V]. Po przeprowadzeniu kodowania utworzono tablicę planu przedstawiającą zbiór realizowanych doświadczeń – pomiarów. Liczba doświadczeń wynika z ilości zmiennych opisujących obiekt badań oraz liczby poziomów wartości, jakie te zmienne przyjmują. Zbiór doświadczeń planu przedstawia tabela 3. Wartość x_0 stanowi wyraz wolny modelu liniowego opisującego obiekt, a kolejne kolumny reprezentują zmienne niezależne, odpowiednio: pojemność znamionową akumulatora, natężenie prądu obciążenia, temperaturę elektrolitu oraz stan akumulatora. Pojedyncze doświadczenie wynikające z tabeli 3 określa układ pomiaru jako zbiór wartości zmiennych niezależnych utworzonych przy zachowaniu warunku, że do zbioru tego należy tylko jedna wartość każdej zmiennej, a jednocześnie uwzględnione zostały wszystkie zmienne niezależne opisujące obiekt badań. W utworzonym planie liczba doświadczeń wynosi 16. Zakłada się także, że poszczególne doświadczenia zawarte w tabeli 3 powinny być wykonywane w kolejności losowej.

Ponadto wskazane jest, aby każde doświadczenie był powtarzane wielokrotnie (minimum 3 razy), a ich wynik (w szczególności wartość średnia) wpisany do tabeli planu. Takie działanie jest niezbędne do wyznaczenia miary rozproszenia wyników pomiarów, oceny istotności zmiennych niezależnych oraz adekwatności modelu matematycznego opisującego badany obiekt [7, 8].

Tab. 3. Matryca eksperymentu

L.p.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$y_{\text{śred}}$
1	+1	+1	+1	+1	+1	
2	+1	+1	+1	+1	-1	
3	+1	+1	+1	-1	+1	
4	+1	+1	+1	-1	-1	
5	+1	+1	-1	+1	+1	
6	+1	+1	-1	+1	-1	
7	+1	+1	-1	-1	+1	
8	+1	+1	-1	-1	-1	
9	+1	-1	+1	+1	+1	
10	+1	-1	+1	+1	-1	
11	+1	-1	+1	-1	+1	
12	+1	-1	+1	-1	-1	
13	+1	-1	-1	+1	+1	
14	+1	-1	-1	+1	-1	
15	+1	-1	-1	-1	+1	
16	+1	-1	-1	-1	-1	

Liniowe równanie regresji opisujące związki między zmiennymi dla prezentowanego planu ma postać (6):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4; \quad [V] \quad (6)$$

Współczynniki równania regresji wyznaczono za pomocą następujących zależności: [7]

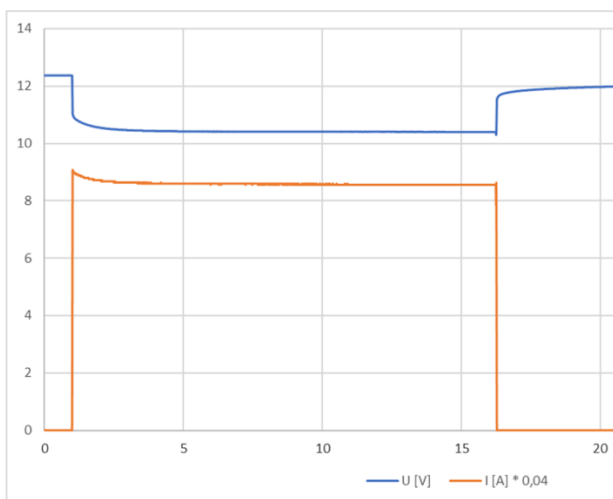
$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i} \cdot y_{sred} \quad (7)$$

$$a_{1 \div 4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1 \div 4i} \cdot y_{sred} \quad (8)$$

Po stwierdzeniu adekwatności modelu, odkodowano równanie i zapisano w postaci funkcji liniowej uwzględniającej wszystkie istotne zmienne niezależne. Jest to poszukiwany liniowy model obiektu opisujący zależności między zmiennymi.

$$U = a_0 + a_1 \cdot \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} + \dots + a_n \cdot \frac{x_n - x_{n0}}{\Delta x_n}; [V] \quad (9)$$

Badania realizowano wykorzystując przygotowane i umieszczone w komorze niskiej temperatury stanowisko do badań charakterystyk akumulatorów, umożliwiające zmianę warunków pracy akumulatora. Przykładowy wynik badania – przebieg zależności natężenia prądu i napięcia na zaciskach akumulatora przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebieg zależności natężenia prądu i napięcia na zaciskach akumulatora o pojemności 110 Ah

W początkowym okresie obciążenia widoczne są zmiany wartości natężenia prądu i napięcia wynikające z dynamicznego charakteru pracy badanego akumulatora (włączenia obciążenia). Ponieważ celem badania było wyznaczenie charakterystyki w warunkach obciążenia stacjonarnego, wartości parametrów opisujących stan pracy akumulatora określano dla czasu trwania obciążenia około 10 s, a więc po ich ustabilizowaniu.

Poniżej przedstawiono uzyskany w wyniku badań opis matematyczny obiektu badań – akumulatora kwasowo-olowiowego. Jego model ilościowy opisuje zależność napięcia na zaciskach jako zmiennej zależnej od pojemności znamionowej, natężenia prądu wyładowania, temperatury otoczenia (elektrolitu) i jego stanu, jako zmiennych niezależnych. Opracowano plan eksperymentu umożliwiający wyznaczenie współczynników liniowego modelu akumulatora przedstawionego za pomocą wyrażenia (9). Umożliwia on poznanie „stopnia wpływu” poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienną zależną.

Przyjęto odpowiednie poziomy zmienności czynników, których wartości wynoszą odpowiednio:

- Pojemności znamionowej: Q = 110 i 170 Ah;

- Natężenia prądu: I = 84 i 224 A;
- Temperatury: T = 0 i +22oC;
- Stanu (naładowania) akumulatora: k = 0,7 i 1.

Umowne poziomy wartości czynników są opisane jako -1 dla wartości niższej oraz +1 dla wyższej. Pierwszą czynnością w przyjętym eksperymencie jest zakodowanie zmiennych, które w dalszej części będą przyjmowały umowne, bezwymiarowe wartości. Obliczono jednostki zmienności czynników „biorących udział” w doświadczeniu wg (3). Następnie wyznaczono wartości centralne zmiennych niezależnych w postaci średniej arytmetycznej wartości, jakie przyjmują te zmienne na poziomie górnym i dolnym wg (4). Po wykonaniu obliczeń jednostek zmienności oraz momentów centralnych zakodowano zmienne zgodnie z wyrażeniem (5). Wyniki działań prowadzące do przedstawienia zmiennych w postaci zakodowanej zapisane zostały w tabeli 4.

Tab. 4. Wyniki kodowania zmiennych

Operacja Zmienna	Jednostki zmienności	Momenty centralne	Zmienne zakodo- wane
Pojemność znamionowa Q	30	140	$x_Q = \frac{Q - 140}{30}$
Natężenie prądu I	70	154	$x_I = \frac{I - 154}{70}$
Temperatura T	11	11	$x_T = \frac{T - 11}{11}$
Stan (techniczny)	0,15	0,85	$x_k = \frac{k - 0,85}{0,15}$
Napięcie U	-	-	$y = U$

Po przeprowadzeniu kodowania zmiennych kolejnym elementem przygotowania planu eksperymentu jest sporządzenie tablicy planu, według których realizowane są pomiary. Tablicę planu dla omawianego eksperymentu przedstawia tabela 5. Dla przedstawionych w tabeli prób wykonano pomiary, a ich wyniki w postaci średniej arytmetycznej wartości napięcia na zaciskach akumulatora w danych warunkach obciążenia wpisano także do tabeli 5.

Tab. 5. Tablica planu eksperymentu

L.p.	x ₀	x _Q	x _I	x _T	x _k	y
1	+1	+1	+1	+1	+1	11,32
2	+1	+1	+1	+1	-1	11,03
3	+1	+1	+1	-1	+1	11,09
4	+1	+1	+1	-1	-1	10,63
5	+1	+1	-1	+1	+1	11,89
6	+1	+1	-1	+1	-1	11,78
7	+1	+1	-1	-1	+1	11,82
8	+1	+1	-1	-1	-1	11,34
9	+1	-1	+1	+1	+1	11
10	+1	-1	+1	+1	-1	10,78
11	+1	-1	+1	-1	+1	10,86
12	+1	-1	+1	-1	-1	10,41
13	+1	-1	-1	+1	+1	11,7
14	+1	-1	-1	+1	-1	11,61
15	+1	-1	-1	-1	+1	11,59
16	+1	-1	-1	-1	-1	11,21

Po przeprowadzeniu pomiarów wg tabeli planu wyznaczono współczynniki liniowego równania opisującego związku między zmiennymi wg (7, 8). Po wyznaczeniu współczynników otrzymuje się równanie w postaci zakodowanej (9):

$$U = 11,25 + 0,109x_Q - 0,364x_I + 0,135x_T + 0,155x_k \quad (10)$$

Wyrażenie to przedstawia liniowy model matematyczny obiektu – akumulatora kwasowego, którego współczynniki wyznaczone na podstawie danych zawartych w tabeli 5 wskazują, o ile zmieni się wartość zmiennej zależnej (napięcia akumulatora), gdy wartość kodowanej zmiennej niezależnej zmieni się o jeden.

Równanie (10) poddano dekodowaniu w celu wyznaczenia współczynników opisujących ilościowy wpływ poszczególnych zmiennych fizycznych na wartość napięcia obciążonego akumulatora. Odkodowany liniowy model obiektu badań – zależności napięcia obciążonego akumulatora U od jego pojemności znamionowej Q_{zn} , natężenia prądu wyładowania I , temperatury T i stanu naładowania (technicznego) – przedstawia wyrażenie (11):

$$U = 10,53 + 0,0036Q - 0,0052I + 0,0123T + 1,033k \quad (11)$$

Zatem przy wykorzystaniu zasad planowania eksperymentu użytkano wielowymiarowy model akumulatora kwasowego w stacjonarnych warunkach pracy. Metoda ta istotnie wpływa na ograniczenie czasu niezbędnego do przeprowadzenia doświadczeń pozwalających osiągnąć zamierzony cel badań, zwłaszcza gdy celem jest opracowanie modelu matematycznego o znanej (zakładanej) postaci, który opisuje zależności między czynnikami.

Zastosowanie opracowanego modelu akumulatora dla realizacji procedury diagnostycznej polega na dokonaniu, w znanych warunkach obciążenia (natężenie prądu, pojemność znamionowa, temperatura) pomiaru napięcia na jego zaciskach i obliczeniu nieznannej wartości parametru k charakteryzującego stan naładowania – stan techniczny akumulatora. Ponadto podkreślić należy, że opracowany model akumulatora można stosować w ograniczonym do warunków badania zakresie zmienności zmiennych niezależnych. W szczególności, na podstawie przeprowadzonych badań [4, 5], stwierdzono ograniczony do wartości większych od 0,5 zakres liniowej zależności napięcia pracy akumulatora od jego stanu naładowania k .

Podsumowanie

Stan techniczny akumulatora jest czynnikiem determinującym skuteczny rozruch silnika spalinowego. Nieodpowiedni stan akumulatora powoduje, że nie może on dostarczyć wystarczającej ilości energii elektrycznej do elektrycznego układu rozruchowego, przez co napędzać wał korbowy z dostatecznie dużą prędkością obrotową, aby silnik mógł rozpocząć samodzielną pracę. Wartość napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora jest bardzo dobrym sygnałem diagnostycznym pozwalającym ocenić stan techniczny akumulatora. Na wartość napięcia mierzonego podczas obciążenia prądowego akumulatora wpływ mają takie czynniki, jak: natężenie prądu obciążenia, temperatura elektrolitu, pojemność znamionowa oraz stopień jego naładowania. Poznanie ilościowego wpływu poszczególnych zmiennych na wartość napięcia jest niezbędne dla celów opracowywanej metody diagnozowania układu rozruchowego, w tym akumulatora i szczelności przestrzeni nadłokowej cylindra. Ilościowy wpływ poszczególnych zmiennych może zostać opracowany przy wykorzy-

staniu eksperymentu planowanego, co znacznie skraca czas realizacji badań oraz pozwala stwierdzić istotność wyznaczonego modelu lub jej brak.

Model charakterystyki akumulatora oraz model charakterystyk układu rozruchowego zostanie wykorzystany do opracowania metody diagnozowania elektrycznego układu rozruchowego w aspekcie opracowywania metody wyznaczania wartości ciśnienia sprężania w cylindrze silnika na podstawie sygnałów rozruchu.

Bibliografia:

1. Dyga G, Trawiński G.: Obsługa, diagnozowanie oraz naprawa elektrycznych oraz elektronicznych układów pojazdów samochodowych cz.1. WSiP, Warszawa 2017.
2. Gomółka J, Kowalczyk F., Franke A.: Współczesne chemiczne źródła prądu. Wydawnictwo MON, Warszawa 1977.
3. Pszczółkowski J., Dyga G.: Badanie cech i charakterystyk akumulatora kwasowego. Technika Transportu Szynowego TTS, Koleje Tramwaje, Metro nr 10/2013, str. 3363+3373.
4. Pszczółkowski J., Dyga G.: Badanie zależności charakterystyk akumulatora od jego stanu. Technika Transportu Szynowego TTS, Koleje Tramwaje, Metro nr 10/2013, str. 3415+4327.
5. Pszczółkowski J., Dyga G.: Funkcja napięcia akumulatora kwasowego: Logistyka nr 3/2014
6. Pszczółkowski J.: Charakterystyki rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym. Stowarzyszenie Edukacyjne Pedagogów Praktyków „Cogito”, Zbąszynek 2004.
7. Korzyński M., Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2013.
8. Polański Z., Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.

Test procedures for an acid battery for diagnostic purposes

The article describes the principle of the work of the lead-acid battery. The most common methods of assessing the technical condition of the battery were characterized and some causes of battery undercharging were indicated. The factors influencing the value of the battery voltage during the current load were indicated. An experimental plan was developed to determine the coefficients of a linear mathematical model describing the influence of individual independent variables on a dependent variable. A linear mathematical model was elaborated based on data obtained during battery tests in accordance with the adopted plan of the experiment.

Keywords: lead-acid battery, electric starting system, diagnostics.

Autorzy:

dr hab. inż. **Józef Pszczółkowski**, prof. WAT – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny: 00-908 Warszawa: ul. Gen. W. Urbanowicza 2. Tel 261 837 206, email: jozef.pszczolkowski@wat.edu.pl

mgr inż. **Grzegorz Dyga** – 02-495 Warszawa, ul. Warszawska 29 m. 48, Tel 504443588, email: grzegorz-dyga@wp.pl