

CECHY ELEKTRYCZNE UKŁADU ROZRUCHOWEGO SILNIKA

W artykule scharakteryzowano właściwości elektryczne układu rozruchowego silnika, a więc akumulatora kwasowego oraz rozrusznika elektrycznego. Omówiono zależności napięcia pracy akumulatora od zmiennych niezależnych mających na niego wpływ, tj. pojemności, natężenia prądu, temperatury czy stanu naładowania. Scharakteryzowano zasady działania rozrusznika elektrycznego i przedstawiono jego charakterystyki uwzględniające właściwości obciążenia w postaci momentu oporowego oraz będącego źródłem energii akumulatora. Wskazano możliwości opisu charakterystyk układu rozruchowego oraz wyznaczenia parametrów elektrycznych akumulatora i rozrusznika jako elementów obwodu, czyli siły elektromotorycznej akumulatora, rezystancji, indukcyjności i pojemności.

WSTĘP

Prąd elektryczny i energia elektryczna występują powszechnie i pełnią ważną rolę w naszym otoczeniu. Energia ta może być łatwo przekształcona w inne formy energii, w tym mechaniczną i ma szerokie zastosowanie. Istotnym problemem jej stosowania jest trudność przechowywania. Jej bezpośrednie przechowywanie umożliwiają kondensatory, jednak przechowywane tu ilości energii są małe, w porównaniu do zapotrzebowania w większości zastosowań. Dlatego w zasadzie musi być ona wytwarzana z innych form energii i bezpośrednio zużywana. Magazynowanie energii elektrycznej wymaga także jej przekształcenia w inną formę energii. Jedną z form przechowywania jest energia związków chemicznych w akumulatorach (bateriach), gdzie podczas rozładowania powstaje energia w postaci prądu elektrycznego o pewnym napięciu. W przypadku wielu baterii akumulatorowych proces można odwrócić i baterię ponownie naładować.

Istotne jest także zapotrzebowanie i zastosowanie energii elektrycznej we współczesnych pojazdach i ona warunkuje ich właściwe funkcjonowanie i wykorzystanie. Instalacja elektryczna samochodu obejmuje kilka obwodów, wyposażonych w urządzenia i maszyny elektryczne, które pełnią określone zadania, spełniają funkcje. Najczęściej wyróżnia się w pojazdach następujące obwody:

- zasilania, który składa się z alternatora i akumulatora,
- rozruchu, który także zawiera akumulator, rozrusznik, urządzenia wspomagające rozruch (zwłaszcza w przypadku silników o zapłonie samoczynnym
- zapłonowy, składający się ze źródła wysokiego napięcia – aparatu zapłonowego, świec zapłonowych wielu czujników i sterownika;
- oświetlenia zewnętrznego i wewnętrznego,
- sygnalizacji,
- urządzeń kontrolno-pomiarowych dla celów sterowania i diagnostyki układów pojazdu,
- urządzeń pomocniczych i dodatkowych.

Elementami obwodów stanowiącymi wyposażenie elektryczne pojazdów samochodowych są: maszyny i aparaty elektryczne, sieć przewodowa i sprzęt instalacyjny. Maszyny elektryczne pojazdów, to m.in. prądnica, rozrusznik, dmuchawa, wycieraczki. Jako aparaty i sprzęt elektryczny można określić: akumulator, cewka zapłonowa, rozdzielacz zapłonu, sygnał dźwiękowy, reflektory i elementy oświetlenia, wskaźniki. Sieć przewodową stanowią przewody i wiązki przewodów niskiego i wysokiego napięcia. Sprzęt instalacyjny, to

elementy zapewniające połączenia i zabezpieczenia elementów strukturalnych i funkcjonalnych obwodów, takie jak: łączniki, przełączniki, złącza, bezpieczniki.

W okresie eksploatacji, w szczególności podczas użytkowania, urządzenia elektryczne samochodu narażone są na wiele procesów i oddziaływań destrukcyjnych. Wskutek tego narażone są na zużycie i starzenie – wymagają zatem rozpoznania stanu i dostosowania do potrzeb obsługiwanego. Niemal wszystkie obwody pojazdu są monitorowane, a ich niewłaściwe funkcjonowanie jest sygnalizowane za pomocą lampki kontrolnej lub odpowiedniej informacji, komunikatu w komputerze pokładowym. Jednak obwód rozruchu, którego zadaniem jest zapewnienie rozruchu silnika spalinowego, nie jest wyposażony w taki układ (wyłączając lampkę sygnalizacyjną ładowania akumulatora, która jest elementem układu zasilania).

Rozwój urządzeń i metod diagnozowania: diagnostów, testerów i rozbudowanych algorytmów programowych przetwarzania danych umożliwiają pomiar i rejestrację wielu wielkości fizycznych, dzięki którym możliwa jest ocena i prognozowanie stanu akumulatora. W pojazdach instalowane są elektroniczne czujniki akumulatora, dzięki którym można zapobiec dużemu jego rozładowaniu. Czujnik rejestruje podstawowe parametry pracy akumulatora (napięcie, natężenie prądu, temperaturę) a układ analizujący przetwarza wyniki pomiarów. Na podstawie uzyskanych danych prognozowane są wartości wielkości opisujących stan akumulatora (pojemność, stan naładowania). System zarządzania energią w pojeździe ma możliwość optymalizacji procesu ładowania akumulatora przez alternator.

Prace badawcze w zakresie diagnostyki układu rozruchowego prowadzone są w wielu ośrodkach. Stwierdzono, że realizacja procedur diagnostycznych we współczesnych konstrukcjach akumulatora jest utrudniona ze względu na brak dostępu do wnętrza, a także, ze względu na fakt, że elektrolit jest absorbowany w separatorach lub w postaci żelu. W badaniach diagnostycznych często wyznacza się zastępczy opór całkowity akumulatora, tj. jego rezystancję wewnętrzną. Pomiar natężenia prądu w instalacji pojazdu wykonywany jest za pomocą miernika cęgowego. Możliwość obciążenia akumulatora znacznym prądem i pomiar w tym stanie umożliwiają testery elektroniczne – jest to istotna funkcja testera, choć natężenie prądu i czas obciążenia nie są znaczne. Stan akumulatora można określić za pomocą testera, przeprowadzając jego badanie w pojeździe lub po odłączeniu od instalacji. Jedną z metod diagnostycznych badań laboratoryjnych akumulatora jest wyznaczenie jego charakterystyki napięciowo-prądowej. W badaniach diagnostycznych rozrusznika ważnym problemem jest wyznaczenie

rzeczywistej charakterystyki mocy i określenie zależności między jego cechami mechanicznymi i elektrycznymi. W tym kontekście ważny sygnał diagnostyczny stanowi natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik samochodowy, wykorzystywany w praktyce przy ocenie szczelności komory spalania. Prowadzone są badania naukowe nad nowymi metodami diagnozowania stanu układu rozruchowego i silnika.

Celem publikacji jest przedstawienie zasad działania, właściwości i charakterystyk elektrycznych układu rozruchowego silnika: akumulatora kwasowego i rozrusznika. Możliwe jest stosowanie różnych elektrycznych schematów zastępczych akumulatora – budowania jego modelu elektrycznego. Zbudowanie ogólnego elektrycznego modelu akumulatora i rozrusznika, wyznaczenie jego parametrów, wymaga przeprowadzenia badania charakterystyk jego pracy w warunkach stacjonarnych i dynamicznych. Charakterystyki te powinny przedstawiać zależność napięcia pracy akumulatora od parametrów niezależnych oraz charakterystyki rzeczywistej mocy rozrusznika w różnych warunkach napędzania wału korbowego.

Zdaniem autora, najlepszą metodą badania stanu samochodowego akumulatora rozruchowego i rozrusznika jest pomiar napięcia i prądu podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego za pomocą rozrusznika elektrycznego. Do rejestrowanych podczas napędzania wielkości należą: natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora (rozrusznika) i prędkość obrotowa wału korbowego. Pomiar natężenia prądu umożliwia wyznaczenie momentu siły rozrusznika. Następnie, na podstawie tych wielkości można wyznaczyć moc elektryczną i mechaniczną rozrusznika, a także moment oporu napędzanego przez rozrusznik silnika. Dla opracowania efektywnej, wiarygodnej metody diagnozowania układu konieczne jest poznanie jego cech mechaniczno-elektrycznych dla potrzeb zbudowania modelu diagnostycznego.

1. ELEKTROCHEMICZNE WŁAŚCIWOŚCI AKUMULATORA

Akumulator kwasowo-ołowiowy jest chemicznym źródłem prądu, w którym prąd elektryczny powstaje jako skutek procesów chemicznych zachodzących na jego elektrodach w obecności kwasu siarkowego. Umożliwia zgromadzenie i przechowywanie niewielkich ilości energii elektrycznej i łatwy dostęp do niej. Czynnikiem wymuszającym przebieg procesów prądowótworczych jest siła elektromotoryczna ogniwa wynikająca z różnicy potencjałów normalnych elektrod stanowiących to ogniwo. Metal uzyskuje określony potencjał w roztworze elektrolitu dzięki jego prężności roztwórczej, a więc zdolności przechodzenia atomów metalu z postaci metalicznej do roztworu w postaci jonowej. Na potencjały elektrod wpływa także stężenie elektrolitu w ich otoczeniu, a ilość masy czynnej podlegającej przemianie podczas ładowania lub rozładowania zależy od zdolności jonów do dyfuzji w elektrolicie i do wnętrza masy czynnej elektrod. Ogniwo elektrochemiczne w akumulatorze kwasowym stanowią ołów – elektroda ujemna i dwutlenek ołowiu – elektroda dodatnia, oddzielone separatorem. Elektrolitem jest stężony kwas siarkowy. W akumulatorze substancje reagujące (aktywne) są zwykle przechowywane w elektrodach. Elektroda dodatnia i ujemna są zanurzone w elektrolicie, który także bierze udział w reakcji prądowótworczej. Elektroda ujemna zawiera substancję, która podczas rozładowania jest utleniana i uwalnia elektrony, a elektroda dodatnia zawiera substancję utlenioną, która podlega procesowi redukcji i przyjmuje elektrony.

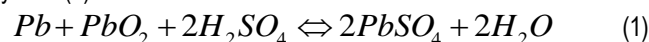
Stan i funkcjonowanie akumulatora opisują parametry termodynamiczne odnoszące się do stanu równowagi, czyli gdy w ogniwie nie ma przepływu prądu. Parametry kinetyczne opisują przebieg reakcji w akumulatorze i związane są z przepływem prądu. Opisują

one transport ładunku i masy, tj. migracji lub dyfuzji, które są niezbędne do wytworzenia ładunku na powierzchni elektrody. Parametry kinetyczne dotyczą także spadków napięcia w przewodnikach prądu (elementach konstrukcji i elektrolicie), zależą od cech projektowych akumulatora. Przepływ prądu o określonym natężeniu wymaga określonego kierunku transportu masy, a więc reakcji z odpowiednią szybkością, dla której konieczna jest dodatkowa energia [3]. Wskutek tego w akumulatorze występują odchylenia od napięcia równowagi, a ponadto tzw. omowe spadki napięcia wskutek przepływu prądu przez elementy przewodzące. Te zjawiska powodują straty energii i odpowiednie wytwarzanie ciepła. W rezultacie napięcie podczas wytwarzania prądu zmniejsza się przy rozładowaniu lub zwiększa podczas ładowania w porównaniu z wartością równowagową U_0 . Zatem odchylenie od napięcia równowagi obejmuje:

- tzw. nadnapięcie spowodowane reakcjami elektrochemicznymi i zmianą stężenia substancji z powodu zjawisk transportowych.
- spadek napięcia omowego, powodowany przez elektronowy przepływ prądu w elementach przewodzących, jak i jonowy przepływ prądu w elektrolicie.

Suma obydwu zjawisk nazywana jest polaryzacją – polaryzacja to zatem nadnapięcie i omowe spadki napięcia. Zwykle reakcja prądowótworcza składa się z wielu etapów, poprzedzających lub następujących po etapie wytworzenia ładunku. Niektóre z etapów obejmują transport masy, której dostarczenie jest niezbędne lub nie usunięcie zablokowałoby reagującą powierzchnię.

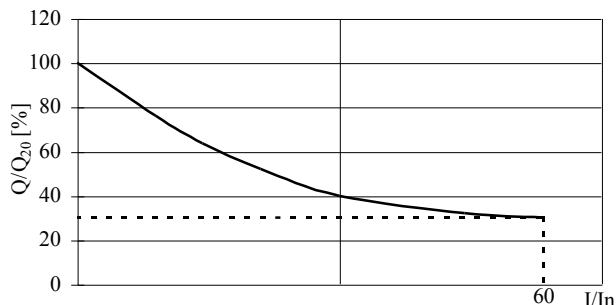
W wielu reakcjach elektrodowych produkt reakcji ulega rozpuszczeniu. W przypadku akumulatora ołowiowo-kwasowego, mała rozpuszczalność siarczan ołowiu $PbSO_4$ powoduje wytrącanie powstałego związku na elektrodzie. Podczas rozładowywania jony ołowiu Pb są rozpuszczane na elektrodzie ujemnej a odpowiednia liczba elektronów, jako ładunek ujemny, jest usuwana z elektrody. Rozpuszczalność jonów Pb^{2+} jest ograniczona i w obecności jonów HSO_4 lub SO_4 tworzą siarczan ołowiu $PbSO_4$ na powierzchni elektrody. Reakcja na elektrodzie dodatniej przebiega w taki sposób, że dwuwartościowe jony ołowiu Pb^{2+} powstają w wyniku redukcji czterowartościowych jonów ołowiu Pb^{4+} . Jony Pb^{2+} również ulegają rozpuszczeniu i natychmiast tworzą siarczan ołowiu $PbSO_4$. Ponadto podczas rozładowania elektrody dodatniej tworzy się woda po uwolnieniu jonów tlenu O^{2-} z dwutlenku ołowiu PbO_2 , które łączą się z protonami H^+ rozcieńczonego kwasu siarkowego do H_2O . Podczas ładowania akumulatora reakcje zachodzą w przeciwnym kierunku. Sumaryczny przebieg reakcji opisuje równanie stechiometryczne (1).



Reakcja elektrochemiczna może mieć miejsce wtedy, gdy elektrony mogą być dostarczane lub usuwane z elektrody. Przemiana nie może zachodzić na powierzchni siarczanu ołowiu, ponieważ nie przewodzi on prądu elektrycznego. Dlatego jony Pb^{2+} muszą zostać rozpuszczone i przetransportowane do przewodzącej powierzchni elektrody (ołowiu lub dwutlenku ołowiu). Transport masy reagentów następuje wskutek mechanizmów: dyfuzji spowodowanej gradientem stężenia i migracji jonów spowodowanej przepływem prądu. Parametry kinetyczne reakcji zależą od temperatury w sposób opisany równaniem Arrheniusa, jak szybkość reakcji chemicznych. Według tej zależności wzrost temperatury o 10 K (lub $10^\circ C$) podwaja szybkość reakcji i oznacza wysoką zależność temperaturową.

Krzywe wyładowań akumulatorów kwasowo-ołowiowych ilustrują wpływ parametrów kinetycznych na procesy rozładowania. Krzywa rozładowania na rys. 1 pokazuje stosunek ilości ładunku pobieranego z baterii do pojemności znamionowej przy różnych obciążeniach. Można zauważyć zmniejszenie pojemności, jaką można

pobrać z baterii wskutek wpływu parametrów kinetycznych (występuje także znaczny spadek napięcia ze wzrostem natężenia prądu). Jest to spowodowane przez zubożenie kwasu na powierzchni elektrody, które zmniejsza szybkość reakcji. Ponadto nierozładowane elementy masy czynnej mogą zostać zakryte rosnącą warstwą PbSO₄, szczególnie przy dużych obciążeniach prądowych.



Rys. 1. Krzywa wyładowania akumulatora przy różnym obciążeniu [5]

Reakcje elektrochemiczne powodują także efekt cieplny – przepływ prądu przez ogniwo wywołuje ciepło generowane przez rezystory omowe w elektrodach i elektrolicie, a także przez efekty polaryzacji. Odwracalny efekt cieplny reakcji nie zależy od szybkości rozładowania lub ładowania. Gdy reakcja chemiczna jest odwracana (ładowanie – rozładowanie), odwracalny efekt cieplny również jest odwracany. Strata energii w jednym kierunku oznacza wzrost energii po odwróceniu reakcji. Odwracalny efekt cieplny na jednostkę czasu jest związany z przepływem prądu.

Przepływ prądu przez dowolny obiekt przewodzący wytwarza ciepło proporcjonalne do spadku napięcia spowodowanego przez ten prąd – efekt Joule'a i zawsze oznacza stratę energii. W ogniwie elektrochemicznym spadek napięcia spowodowany przez prąd jest reprezentowany przez różnicę między napięciem ogniwa przy przepływie prądu (U) i obwodem otwartym – napięciem ogniwa (U_0). Różnica $U - U_0$ oznacza polaryzację. Obejmuje ona spadek napięcia spowodowany przepływem prądu przez opór (również elektrolit), ale także nadpięcie spowodowane przez kinetyczne przeszkody reakcji.

Funkcjonowanie akumulatora kwasowego opisują podstawowe prawa elektrochemii. Związek między ilością ulegającej przemianie chemicznej substancji a uzyskanym ładunkiem elektrycznym określają prawa Faradaya. Prawa te uzasadniają fakt generowania ściśle określonego ładunku ($Q = It$) w wyniku przemian substancji o masie m zawartej w elektrodzie. Pierwsze prawo Faradaya ma znaną postać (k – jest współczynnikiem elektrochemicznym substancji):

$$m = kIt \quad (2)$$

Zależność napięcia równowagowego ogniwa kwasowo-olowiowego w zależności od koncentracji (aktywności) jonów – a, elektrolitu określa wzór Nernsta (3).

$$U_0 = 1,931 + 0,0952 \log \frac{a_{H^+} \cdot a_{HSO_4^-}}{a_{H_2O}} \quad (3)$$

W praktyce stosuje się głównie jednak wzory przybliżone, np. dla napięcia pojedynczego ogniwa, tj. zależność siły elektromotorycznej ogniwa od gęstości elektrolitu – ρ_{20} w temperaturze +20°C wyraża się zależnością (4):

$$U_0 = \rho_{20} + 0,84 \quad [V] \quad (4)$$

Stosowany jest także wzór w postaci (5):

$$U_0 = 1,85 + 0,917(\rho_{20} - 1) \quad [V] \quad (5)$$

Ważnym parametrem elektrycznym akumulatora kwasowego jako źródła prądu jest jego rezystancja wewnętrzna. Moc odbiornika, np. rozrusznika jest zależna od wartości napięcia na zaciskach akumulatora U , które można wyrazić zależnością:

$$U = RI = E_A - IR_w \quad (6)$$

gdzie:

- E_A – siła elektromotoryczna akumulatora,
- I – natężenie prądu wyładowania,
- R, R_w – rezystancja obciążenia i wewnętrzna akumulatora.

Można przyjąć założenie, że rezystancję wewnętrzną akumulatora jest odwrotnie proporcjonalna do jego pojemności znamionowej. Jej wartość można wyrazić wzorem:

$$R_w = \frac{U_{zn}}{17,1 \cdot Q_{20}} \quad (7)$$

gdzie:

- U_{zn} – znamionowe napięcie akumulatora [V],
- Q_{20} – 20-godzinna pojemność znamionowa akumulatora [Ah].

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi właściwości elektryczne i energetyczne akumulatora pod względem technicznym, użytkowym są: napięcie, znamionowa pojemność dwudziestogodzinna i zdolność rozruchowa. Zdolność rozruchowa jest szczególnie istotną cechą do oceny jego przydatności do napędzania wału korbowego silnika spalinowego podczas rozruchu. Napięcie znamionowe pojedynczego ogniwa akumulatora kwasowo-olowiowego wynosi 2 V. Jest to wartość odpowiadająca napięciu wyładowania małym prądem w początkowym okresie. Napięcie biegu jałowego jest to napięcie na zaciskach nie obciążonego akumulatora, a więc jego siła elektromotoryczna E_A (SEM). Rozróżnia się ponadto napięcie w czasie ładowania i wyładowania.

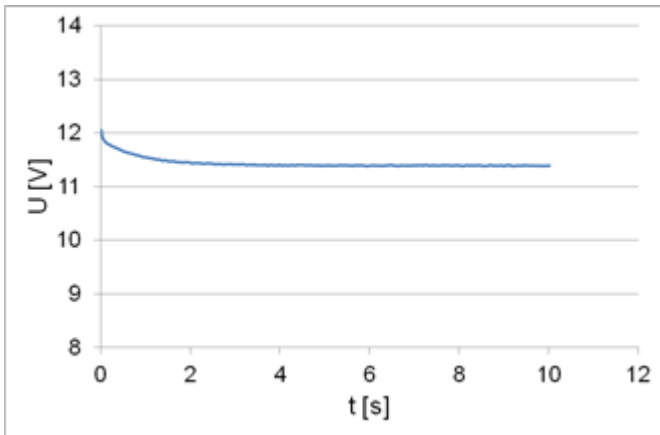
Przedstawione modele chemiczne akumulatora wyjaśniają mechanizm generacji siły elektromotorycznej oraz sumaryczne jego zdolności elektryczne i energetyczne, np. pojemność. Jednakże nie są one przydatne do analizy i rozwiązywania obwodów elektrycznych, których elementem jest akumulator kwasowy. Przy ich zastosowaniu nie jest możliwe wyznaczenie parametrów elektrycznych obwodu, natężeń prądu i napięć na elementach. W takim obwodzie konieczne jest zastosowanie modeli elektrycznych akumulatora, jako źródła prądu o określonym schemacie zastępczym, złożonym z typowych elementów obwodu: siły elektromotorycznej, rezystancji, pojemności, indukcyjności i innych. Modelowanie akumulatorów kwasowych jest uważane za proces trudny, niejasny, pracochłonny, kosztowny i niejednoznaczny [2, 4].

2. AKUMULATOR JAKO ELEMENT OBWODU ELEKTRYCZNEGO

Badania charakterystyk pracy akumulatorów przeprowadza się na stanowiskach wyposażonych w zestaw rezystorów obciążających, aparaturę i oprzyrządowanie umożliwiające zmianę warunków, sterowanie realizacją badania oraz rejestrację parametrów pracy akumulatora – napięcia i natężenia prądu.

Przykładowy przebieg zależności napięcia na zaciskach akumulatora podczas próby obciążenia rezystorem o stałej rezystancji przedstawiono na rys. 2. Z chwilą włączenia obciążenia można zauważyć charakterystyczne zmiany napięcia na zaciskach akumulatora (skorelowane odpowiednio z natężeniem pobieranego prądu) – zmiany te są identyczne w obwodzie zewnętrznym i łączy je wartość rezystancji obciążenia zgodnie z wyrażeniem (6). W początko-

wym okresie wyładowania napięcie na zaciskach akumulatora maleje w przybliżeniu wykładniczo, a następnie jego wartość stabilizuje się. Napięcie przyjmuje największą wartość w chwili włączenia obciążenia, a w trakcie jego trwania nieznacznie maleje. Wynika to ze zjawisk polaryzacji i wpływu procesów kinetycznych, a więc z faktu, że w chwili włączenia obciążenia w masie czynnej elektrod liczba jonów elektrolitu jest duża. W trakcie wyładowania ich ilość zmniejsza się, powodując zmniejszenie ładunku elektrycznego, jaki można pobrać z akumulatora. Skutkiem są omawiane zmiany napięcia i odpowiednio natężenia prądu związane z opóźnieniem dostarczania aktywnej masy elektrolitu.



Rys. 2. Przebieg napięcia na zaciskach akumulatora obciążonego stałą rezystancją

Rejestrowane wyniki pomiarów wymagają często wstępnego przekształcania w celu wyeliminowania zakłóceń. Jako przyczyny zniekształcenia sygnału zidentyfikowano:

- szумы własne układu pomiarowego,
- zakłócenia z zasilającej zewnętrznej sieci elektrycznej,
- błąd kwantowania przy przetwarzaniu analogowo-cyfrowym.

Jako stacjonarna charakterystyka obciążenia akumulatora traktowana jest zależność napięcia na jego zaciskach od czasu przy obciążeniu stałą wartością natężenia prądu lub stałą wartością rezystancji. Przy obciążeniu stałą wartością rezystancji zarówno natężenie pobieranego prądu, jak i wartość napięcia na zaciskach akumulatora (rys. 2) ulegają zmianie. Niewątpliwie dla celów analizy właściwości akumulatora korzystniejszym byłoby obciążenie go stałą wartością natężenia prądu i obserwacja jedynie zmian napięcia. Wymagałoby to zastosowania w obwodzie zmiennej rezystancji zewnętrznej. W efekcie napięcie w zewnętrznej części obwodu (na rezystorze obciążenia) powinno być takie samo (równe iloczynowi rezystancji i natężenia prądu), natomiast inne byłoby wówczas napięcie na oporze wewnętrznym akumulatora. Można przyjąć, w pewnych granicach, równoważność obciążenia stałym natężeniem prądu oraz stałą rezystancją.

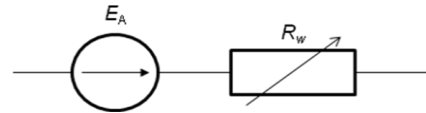
Akumulator kwasowo-ołowiowy jest najczęściej traktowany jako źródło napięciowe prądu elektrycznego o określonej sile elektromotorycznej oraz oporze wewnętrznym. W obwodzie elektrycznym akumulatora obciążonego rezystorem określone zmiany napięcia na jego zaciskach można uzasadnić zmianą jego siły elektromotorycznej lub oporu wewnętrznego. Wielkości te mogą być wzajemnie zamienialne, tzn. przyczyny zmian napięcia można interpretować jako zmianę siły elektromotorycznej lub rezystancji akumulatora. Są one powodowane kinetyką procesów w elektrolicie w otoczeniu elektrod lub na ich powierzchni. Przy przyjęciu stałej wartości siły elektromotorycznej w danych warunkach rozładowania klasyczny schemat elektryczny akumulatora można przedstawić jak na rys. 3. Dla analizowanego przebiegu wyznaczono ustaloną wartość rezy-

stancji wewnętrznej, osiąganą w końcowym okresie, równą 0,0133 Ω . Uzyskana wartość rezystancji jest dostatecznie zgodna z wartością wyznaczoną z (7), tj. 0,013 Ω . W okresie początkowym rozładowania jej wartość dość istotnie zmienia się i do jej opisu może być przyjęta funkcja wykładnicza postaci (8).

$$R_w = R_s - R_z \exp(-t/\tau) \quad (8)$$

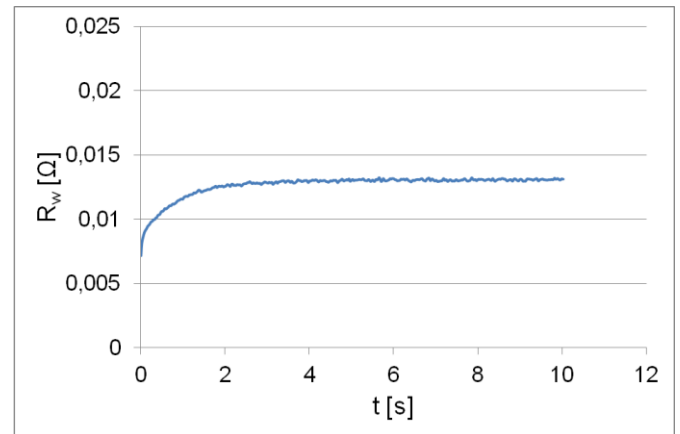
gdzie:

- R_s – rezystancja akumulatora w stanie ustalonym pracy,
- R_z – amplituda składowej zmiennej rezystancji akumulatora,
- τ – stała czasowa procesu zmian rezystancji wewnętrznej.



Rys. 3. Klasyczny schemat elektryczny akumulatora

Na podstawie równania (6) określono zmiany rezystancji wewnętrznej analizowanego akumulatora o pojemności 54 Ah (rys. 4) uwzględniając, że napięcie na zaciskach nieobciążonego akumulatora – jego siła elektromotoryczna – była równa 12,97 V.



Rys. 4. Zmiany rezystancji wewnętrznej obciążonego akumulatora

Analiza przebiegów na rys. 2, 4 wskazuje na potrzebę zastosowania do opisu ich części zmiennej więcej niż jednej funkcji wykładniczej. Jedną z możliwości jest zastosowanie funkcji sklejaney, czyli zbioru funkcji wykładniczych określonych w różnych przedziałach czasu, zapewniających łącznie opis przebiegu w całym zakresie. Funkcje powinny przynajmniej spełniać warunek ciągłości na granicach przedziałów. Ogólną postać funkcji sklejaney F i warunek ciągłości można zapisać za pomocą zależności:

$$\begin{aligned} F(t) &= F_i(t); & t_{i-1} &\leq t < t_i \\ F_i(t_i) &= F_{i+1}(t_i); & i &= 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (9)$$

W tym przypadku problemem jest odpowiednie dobranie liczby funkcji oraz przedziałów ich określoności (dziedziny funkcji), co jest związane ze złożonością i dokładnością opisu. Jako kryteria doboru i oceny tych cech można zastosować wartości współczynników determinacji R^2 dla poszczególnych funkcji oraz wartość odchylenia standardowego funkcji sklejaney dla całego przebiegu.

Drugi możliwy sposób opisu prezentowanych przebiegów funkcją wykładniczą polega na zastosowaniu ich kombinacji liniowej, czyli tzw. mieszaniny funkcji. Dziedziną funkcji jest tu pełny przedział zmienności analizowanej wielkości. Suma współczynników powinna być równa wartości amplitudy opisywanej zależności, czyli wartości początkowej, a suma funkcji odwzorowywać opisywaną

zależność z odpowiednią dokładnością. Sposób konstrukcji mieszanej funkcji przypomina budowanie funkcji sklepanych z tą różnicą, że od opisywanej zależności odejmuje się w pełnym przedziale zmienności jej udział określony przez kolejną wyznaczoną funkcję aproksymującą. Mieszanie funkcji F można zapisać:

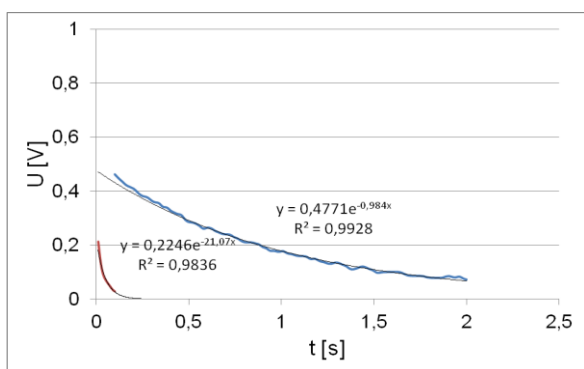
$$F(t) = \sum_{i=1}^n a_i F_i(t) \quad (10)$$

gdzie: a_i są współczynnikami wagowymi funkcji.

Dla analizowanego akumulatora dokonano opisu za pomocą mieszanej funkcji charakterystyki napięcia – rys. 5, w przedziale czasu od 0 do 2 s. Wyodrębniono składową stałą przebiegu o wartości $U_s = 11,37$ V. Dla części zmiennej tego przebiegu jako pierwszą wyznaczono składową wolnozmienną dla przedziału czasu od 0,1 do 2 s. Uzyskano tutaj bardzo dobrą zgodność opisu z przebiegiem rzeczywistym według (11), a wyodrębnione przedziały przebiegu i ich funkcje aproksymujące przedstawiono na rys. 5.

$$U(t) = 0,225 \exp(-21,1t) + 0,477 \exp(-0,984t) \quad (11)$$

Występuje tu ponad 20-krotne zróżnicowanie stałych czasowych obydwo funkcji – równe około 0,05 s dla składowej szybkozmiennej, w przedziale czasu do 0,1 s oraz 1 s dla wolnozmiennej.

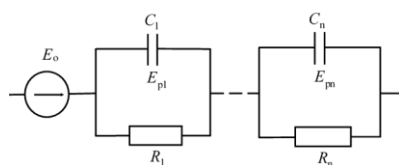


Rys. 5. Wyznaczone funkcje składowe napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora w przedziale czasu do 2 s

Na bazie powyższej analizy związków między charakterystykami ilościowymi i parametrami procesu rozładowania akumulatora można zbudować jego elektryczny schemat zastępczy. Wiadomo, że charakterystyka rozładowania kondensatora jest krzywą wykładniczą postaci (12):

$$U(t) = U_o \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = U_o \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (12)$$

Zatem stała czasowa procesu rozładowania $\tau = RC$. Stwarza to możliwości przypisania wartości fizycznych elementom obwodu zastępczego akumulatora, jak pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Elektryczny schemat zastępczy akumulatora kwasowego

Wyznaczenie parametrów elementów obwodu jest możliwe na podstawie wyników badania charakterystyk rozładowania akumulatorów. Takie podejście jest możliwe przy uwzględnieniu, że zmiana

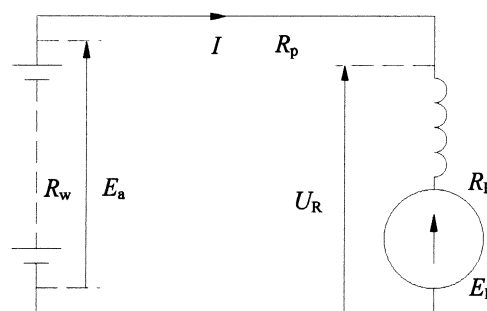
gęstości elektrolitu jest przyczyną zmiany potencjałów elektrod – siły elektromotorycznej akumulatora. Dlatego też jako przyczynę zmian napięcia na zaciskach można uznać zmianę siły elektromotorycznej, jej składowej określanej jako SEM polaryzacji.

Schemat elektryczny akumulatora kwasowego przedstawiony na rys. 3 może być wykorzystywany do opisu funkcjonowania akumulatora w warunkach stałego obciążenia. Zmienność rezystancji wewnętrznej w warunkach obciążenia dynamicznego praktycznie uniemożliwia korzystanie z tego schematu dla wyznaczenia odpowiedzi akumulatora na wymuszenie zmienne – dynamiczne.

Opis charakterystyk rozładowania akumulatora (napięcia na jego zaciskach) za pomocą funkcji wykładniczej stwarza możliwość wprowadzenia do schematu zastępczego akumulatora elementów obwodu, których właściwości elektryczne powodują generowanie odpowiedzi o charakterze funkcji wykładniczej. Takim elementem schematu zastępczego akumulatora może być układ składający się z kondensatora i rezystancji, poprzez którą następuje ładowanie bądź rozładowanie kondensatora. Możliwe jest zatem połączenie ze stacjonarnym źródłem siły elektromotorycznej akumulatora E_o nawet kilku obwodów RC, jak na rys. 6. W zmiennych warunkach obciążenia obwód taki generuje siłę elektromotoryczną polaryzacji.

3. ELEKTRYCZNE CECHY ROZRUSZNIKA

Elektryczny układ rozruchowy składa się z szeregowego lub szeregowo-bocznikowego silnika prądu stałego zasilanego z akumulatora kwasowego. Rozrusznik wyposażony jest w mechanizm pozwalający na jego połączenie w czasie rozruchu z wałem korbowym silnika za pomocą przekładni zębatej oraz w urządzenie wyłączające przekładnię z chwilą, gdy silnik zostanie uruchomiony. Dużą wartość momentu napędzającego wał korbowy uzyskuje się dzięki odpowiednio dużemu przelozieniu między wałem rozrusznika i wałem korbowym silnika od 10 : 1 do 14 : 1. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi układ rozruchowy są: moc znamionowa rozrusznika, pojemność akumulatora i przelozienie między wieńcem koła zamachowego i zębniem rozrusznika. Właściwości układu przedstawia się za pomocą zbioru charakterystyk obejmujących zależność momentu siły, prędkości obrotowej, mocy i napięcia na zaciskach od natężenia pobieranego prądu. Schemat elektryczny obwodu rozruchowego silnika przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat obwodu szeregowego silnika rozrusznika [5]

Napięcie na zaciskach rozrusznika U_R jest równe:

$$U_R = E_A - I(R_w + R_p) \quad (13)$$

– R_p – rezystancja przewodów łączących akumulator i rozrusznik.

Na skutek obracania wirnika silnika elektrycznego w uzwojeniach twornika indukują się siły elektromotoryczne E_R , która przeciwdziała przepływowi prądu przez to uzwojenie. Indukowanie siły elektromotorycznej wynika z jego charakteru indukcyjnego w sensie

elektrycznym. Indukcyjność L jest zatem cechą charakterystyczną obwodu rozrusznika. Powoduje ona powstawanie siły elektromotorycznej oraz momentu siły rozrusznika jako skutku oddziaływania pól elektrycznego i magnetycznego. Złożoność układu powoduje, że ich wartość może być wyznaczona przy zastosowaniu odpowiednich stałych konstrukcyjnych rozrusznika. Wartość siły elektromotorycznej jest zależna od strumienia magnetycznego Φ_{wz} wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia, stałej konstrukcyjnej rozrusznika c_m oraz prędkości obrotowej n :

$$E_R = c_m \Phi_{wz} n \quad (14)$$

Uwzględniając w równaniu (13) równowagę napięć w obwodzie rozrusznika, w tym spadek napięcia na szczotkach $-\Delta U_{SZ}$, i rezystancji uzwojenia twornika i szeregowego R_R , można zapisać:

$$E_R = E_A - \Delta U_{SZ} - I(R_w + R_p + R_R) \quad (15)$$

W stanie zwarcia rozrusznika (pełne zahamowanie: $n = 0$, $E_R = 0$), prąd zwarcia jest równy (R - całkowita rezystancja w obwodzie akumulator-rozrusznik):

$$I_Z = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{R_w + R_p + R_R} = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{R} \quad (16)$$

Moc elektromagnetyczna rozrusznika jest iloczynem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach twornika i natężenia prądu pobieranego przez silnik elektryczny:

$$P_E = E_R I = (E_A - \Delta U_{SZ}) I - I^2 R \quad (17)$$

Na podstawie wyrażenia (17) można wyznaczyć maksimum funkcji $P_E = f(I)$, którego wartość jest równa:

$$P_{E_{max}} = \frac{(E_A - \Delta U_{SZ})^2}{4R} \quad (18)$$

Można stąd również wyznaczyć natężenie prądu, przy którym uzyskiwana jest moc maksymalna rozrusznika:

$$I_{P_{max}} = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{2R} = \frac{1}{2} I_Z \quad (19)$$

Moc mechaniczna osiągnięta na wale rozrusznika P_2 jest mniejsza od jego mocy wewnętrznej elektromagnetycznej P_E o straty mechaniczne i magnetyczne, które rosną ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika i osiągają maksimum przy jego biegu jałowym. Charakterystyka $P_2 = f(I)$ przebiega poniżej charakterystyki $P_E = f(I)$ i rozpoczyna się w punkcie określającym prąd biegu jałowego I_0 . W stanie zwarcia moc elektromagnetyczna i moc na wale są równe zero, obie charakterystyki mają tutaj punkt wspólny.

Moment obrotowy rozrusznika (elektromagnetyczny) powstaje jako wynik oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem i jest równy:

$$M_{em} = c_1 \Phi_{wz} I = c_1 c_2 I^2 = c I^2 \quad (20)$$

gdzie: c_1, c_2, c – stałe konstrukcyjne silnika rozrusznika.

Moment obrotowy jest więc funkcją kwadratową natężenia prądu. Ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego rozrusznika, począwszy od pewnej wartości natężenia jego przebieg ma charakter prawie liniowy. Maksymalna wartość momentu siły wytworzonego przez rozrusznik zależy od jego cech konstrukcyjnych oraz od zdolności akumulatora – źródła energii do oddawania prądu i zachowania odpowiednio wysokiej wartości napięcia na zaciskach.

PODSUMOWANIE

Elektryczny układ rozruchowy jest, wraz z silnikiem spalinywym, złożonym układem elektromechanicznym. Jego zadaniem jest pokonanie oporów ruchu silnika spalinywego i nadanie prędkości obrotowej wału korbowego niezbędnej do zainicjowania pracy silnika. Akumulator kwasowy jest złożonym funkcjonalnie i strukturalnie chemicznym odwracalnym źródłem prądu. Wykazuje on złożoną zależność cech funkcjonalnych od wielu parametrów i złożone właściwości dynamiczne. W warunkach dynamicznych mogą być dla niego stosowane dwa różne modele zastępcze elektryczne, w postaci siły elektromotorycznej i zmiennej rezystancji wewnętrznej oraz siły elektromotorycznej stacjonarnej oraz układu lub układów RC o różnych charakterystykach, realizujących zmiany siły elektromotorycznej polaryzacji akumulatora w obwodzie.

Rozrusznik elektryczny jest źródłem momentu siły napędzającego wał korbowy silnika i w jego strukturze elektrycznej występują elementy o charakterze rezystancji i indukcyjności. Jego cechy elektryczne i mechaniczne wymagają wyznaczenia stałych eksperymentalnych. Uwzględnienie wielu parametrów niezależnych do opisu właściwości układu rozruchowego i jego parametrów strukturalnych wymaga przeprowadzenia długotrwałych obszernych badań eksperymentalnych. Stopień złożoności układu rozruchowego i jego modelu może zostać określony na podstawie badań jego współpracy z silnikiem, jako źródłem oporu.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E., Metody diagnostyczne w ocenie stanu samochodowego akumulatora rozruchowego. *Autobusy*, 12/2017
2. Ceraolo M., *New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000.
3. Gomółka J., Kowalczyk F., Franke A., *Współczesne chemiczne źródła prądu*. Wydawnictwo MON. Warszawa 1977.
4. Jackey Robyn A., *A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection*. The MathWorks, Inc. 2007-01-0778
5. Pszczołkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*. WAT, Warszawa 2009.

Electrical features of the engine starting system

The article describes the electrical properties of the engine starting system, that is the acid battery and the electric starter. The dependencies of battery voltage on independent variables affecting them, i.e. capacity, current, temperature or charge status, are discussed. The principles of operation of the battery and electric starter were described and its characteristics were presented, taking into account the properties of the load in the form of a resisting torque and being a source of battery energy. The possibilities of describing the characteristics of the starting system and determining the electrical parameters of the battery and the starter as components of the circuit, i.e. the electromotive force of the battery, resistance, inductance and capacity, are indicated.

Autorzy:

dr hab. inż. **Józef Pszczołkowski**, 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

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.151

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15