

*Rezystory warstwowe,
stałość czasowa rezystancji,
sztuczne starzenie rezystorów.*

Jerzy BARTOSZEWSKI*, Józef KOLASA*

PRECYZYJNE REZYSTORY WARSTWOWE ASPEKTY STAŁOŚCI CZASOWEJ

Rezystory warstwowe są produkowane na masową skalę i w konsekwencji są łatwo dostępne w handlu. Możliwość wykorzystania rezystorów w technice pomiarowej jest uwarunkowana spełnieniem wysokich wymagań dotyczących dokładności wyrównania wartości do założonej wartości znamionowej rezystora, małych zmian wartości rezystancji z czasem, (zarówno w warunkach eksploatacji jak i podczas przechowywania) niezależności wartości rezystancji od częstotliwości, itp. W artykule przedstawiono wyniki siedmioletnich badań doświadczalnych zmian wartości rezystancji rezystorów warstwowych, węglowych, produkcji krajowej, poddanych obróbce cieplnej sztucznego starzenia. Badano zmiany rezystancji rezystorów zarówno obrabianych jak i nie obrabianych cieplnie. Podano wnioski dotyczące obróbki termicznej wykonywanej przez użytkownika rezystorów mającej na celu poprawę stałości rezystancji w czasie.

1. WSTĘP

Rezystory są najbardziej rozpowszechnionymi elementami biernymi stosowanymi w obwodach elektrycznych. Szacuje się, że stanowią one około 40 % wszystkich stosowanych elementów [2]. Około 80 % całej produkcji rezystorów przypada na rezystory nie drutowe, a wśród nich największą grupę stanowią rezystory warstwowe. Produkcja rezystorów jest wielkoseryjna a więc koszty wykonania są niskie. Występuje znaczna różnorodność konstrukcji, wymiarów geometrycznych i właściwości rezystorów. Rezystory są łatwo dostępne w handlu, szczególnie rezystory ogólnego przeznaczenia o wartości znamionowej rezystancji zawartej w granicach od 1Ω do $1\text{ M}\Omega$, tolerancji rezystancji równej $\pm (5, 10 \text{ lub } 20) \%$ i mocy od $0,125\text{ W}$ do 100 W . Rezystory wykonane w tolerancji rezystancji $\pm 1 \%$ i $\pm 2 \%$ nazywane są rezystorami dokładnymi, a rezystory o tolerancji $\pm 0,5 \%$ i mniejszej są nazywane rezystorami precyzyjnymi. Moc tych rezystorów jest na ogół mniejsza od 5 W .

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej,
50—370 Wrocław, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27; e-mail: jozef.kolasa.pwr.wroc.pl

Rezystory dokładne i precyzyjne są stosowane między innymi do budowy przyrządów pomiarowych. Rezystory te muszą spełniać duże i ciągle rosnące wymagania dotyczące stałości wartości rezystancji w czasie. Stałość rezystancji zależy od wielu czynników; między innymi od rodzaju materiału i kształtu elementu rezystancyjnego, konstrukcji rezystora, jakości wykonania, itd. Ważnym czynnikiem jest również obróbka termiczna rezystorów wykonywana w procesie produkcji rezystorów jak i po jej zakończeniu. Stałość rezystancji w czasie eksploatacji zależy także od warunków eksploatacji rezystorów. Parametry procesu obróbki termicznej rezystorów drutowych są dobrze znane [3]. Natomiast w przypadku rezystorów warstwowych nie ma pełnej informacji czy i jak wykonywać obróbkę termiczną. Jest to wynikiem dużej różnorodności stosowanych materiałów i wykonań. W artykule przedstawiono wyniki ponad siedmioletnich badań doświadczalnych stałości rezystancji rezystorów warstwowych, węglowych, produkcji krajowej, obrabianych i nie obrabianych cieplnie.

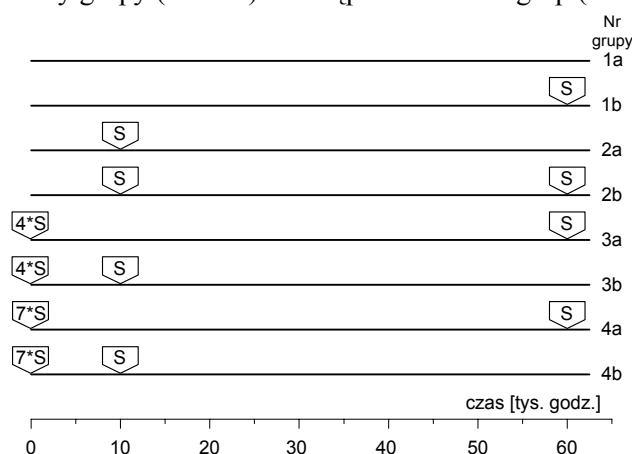
2. BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI REZYSTORÓW WARSTWOWYCH

Rezystory warstwowe stałe mają bardzo prostą konstrukcję. Element rezystancyjny stanowi cienka warstewka o grubości $(0,1 \div 100) \mu\text{m}$, naniesiona na powierzchnię cylindryczną korpusu w kształcie walca lub rurki wykonanej z ceramiki o wysokiej jakości [2]. Na końcach korpusu są zamontowane mosiężne kołpaczki z końcówkami z drutu miedzianego. Cały rezystor jest pokryty lakierem ochronnym. Rezystory specjalne są umieszczane w hermetycznych obudowach wykonanych z ceramiki lub metalu. Warstwy rezystywne wykonuje się z: czystych metali, stopów metali, różnych przewodników niemetalicznych (węgiel, bor i inne) i najrozmaitszych kompozycji. Najbardziej rozpowszechnione są warstwy węglowe i warstwy wykonane ze specjalnych wieloskładnikowych stopów MŁT [1]. Warstwy węglowe wykonane są z węgla pirolitycznego uzyskiwanego w wyniku termicznego rozkładu (pirolizy) par węglowodorów (benzenu, metanu, heptanu) w próżni w temperaturze $(1000 \dots 1200) ^\circ\text{C}$. Współczynnik temperaturowy rezystancji warstw węglowych mieści się w granicach $(-1 \div -20) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ i wykazuje małe rozrzuty wartości w kolejnych seriach produkcji. Stałość rezystancji jest dobra i na ogół nie przekracza wartości $0,5 \text{ \%}/1000$ godzin [2]. Warstwy rezystancyjne wykonane ze stopów metalowo-krzemowych typu MŁT przewyższają warstwy węglowe: obciążalnością przypadającą na jednostkę powierzchni, odpornością na wysokie temperatury, trwałością mechaniczną i odpornością na utlenianie. Warstwy typu MŁT są mniej jednorodne niż warstwy węglowe a w konsekwencji mniej odporne na duże prądy impulsowe. Podstawowe składniki stopów MŁT stanowią: krzem (30 %), żelazo (30 %), chrom (5 %), nikiel (10 %), wolfram (25 %) [1]. Stosowane są one w różnych proporcjach (w nawiasach podano proporcje przykładowe) z różnymi dodatkami stopowymi (aluminium, miedź,

itp.). Warstwa rezystancyjna jest uzyskiwana w procesie naparowywania w próżni. Rezystory po wykonaniu poddaje się obróbce termicznej w próżni: wygrzewanie przez 10 minut w temperaturze $(360 \pm 10) ^\circ\text{C}$ a następnie schłodzenie powietrzem do $160 ^\circ\text{C}$ [2]. Rezystory po takiej obróbce wykazują nieodwracalne zmiany rezystancji rzędu $\pm(0,5 \div 2) \%/1000$ godzin. Współczynnik temperaturowy zmian rezystancji warstw MŁT jest dodatni lub ujemny o wartości (od kilku do kilkunastu) $\cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ w zakresie temperatur $(+20 \dots +150) ^\circ\text{C}$.

3. METODY I WYNIKI BADAŃ STAŁOŚCI REZYSTANCJI

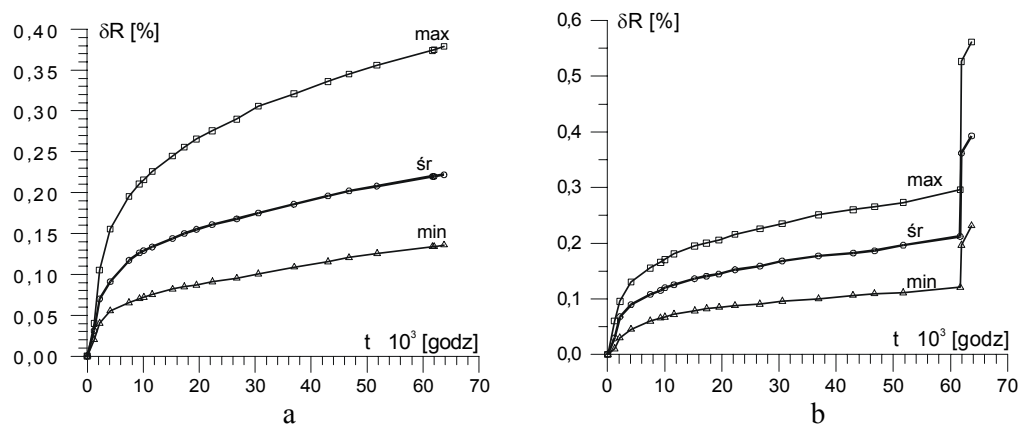
Badaniom poddano rezystory warstwowe, węglowe produkcji krajowej typu RWP o mocy znamionowej 1 W, tolerancji wartości rezystancji $\pm 1 \%$ i wartości znamionowej rezystancji równej 200Ω (74 sztuki) i $499 \text{ k}\Omega$ (20 sztuk) oraz współczynnikiem temperaturowym rezystancji odpowiednio TK-25 i TK-50. Badania stałości rezystancji rozpoczęto po około dwóch tygodniach od zakończenia produkcji rezystorów. Rezystory 200Ω , ze względu na ich większą liczbę, podzielono początkowo na cztery grupy (nr 1...4) a następnie na osiem grup (nr 1a, 1b, 2a, ... ,4b).



Rys. 1. Diagram obrazujący momenty wykonywania obróbki cieplnej rezystorów w okresie badań (S)
 Fig. 1. Diagram illustrating moments of thermal processing of resistors in the course of tests (S)

Rezystory $499 \text{ k}\Omega$ podzielono na dwie grupy. Badane rezystory przechowywano (leżakowano) w temperaturze $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$ i w określonych odstępach czasowych poddawano obróbce termicznej sztucznego starzenia (rys.1). Rezystory grupy 1a nie poddawano obróbce cieplnej. Obróbkę termiczną sztucznego starzenia (S – rys.1) rezystorów grupy 3 i 4 wykonywano na początku badań oraz jednorazowo w okresie badań. Obróbkę termiczną na początku badań wykonano dla rezystorów grupy 3 w czterech cyklach (4*S) a rezystorów grupy 4 w siedmiu cyklach (7*S), wygrzewając

je w powietrzu o temperaturze 100 °C lub 120 °C przez 5, 10 lub 24 godziny. Między kolejnymi cyklami obróbki cieplnej stosowano przerwy trwające 24 godziny. W wyniku tych działań rezystory grupy 3 były wygrzewane łącznie przez 50 godzin na początku okresu badań a rezystory grupy 4 około dwukrotnie dłużej (106 godzin). Pozostałe obróbki cieplne, zaznaczone literą *S* na diagramie przedstawionym na rysunku 1, wykonywano jednorazowo przez 24 godziny w temperaturze 100 °C.



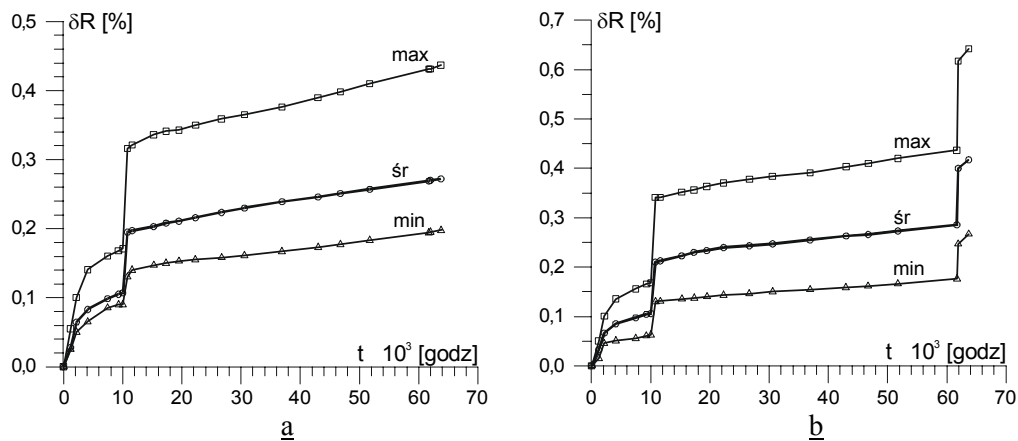
Rys. 2. Względne zmiany rezystancji rezystorów 200 Ω, a – wyłącznie leżakowanych (grupa 1a), b – leżakowanych i po 60 tysiącach godzin poddanych obróbce cieplnej-24 godz., 100 °C, (grupa 1b)
 Fig. 2. Relative changes of the resistance of the resistors 200 Ω, a – solely seasoned (group 1a), b – seasoned and subject to thermal processing for 60 thousand hours and 24 hours, 100 °C (group 1b)

Obciążenia prądowe rezystorów występowały jedynie podczas pomiarów ich rezystancji. Zmiany wartości rezystancji poszczególnych rezystorów wyznaczano na podstawie wyników pomiarów rezystancji wykonywanych w określonych momentach okresu badań, a szczególnie przed i po obróbce cieplnej. Pomiarów wykonywano za pomocą multimetru cyfrowego i mostka prądu stałego (dla wybranych kilku rezystorów). Wskazania wyżej wymienionych przyrządów weryfikowano każdorazowo metodą podstawienia z wykorzystaniem wzorców rezystancji 100 Ω /1 W/ kl 0,01 i 100 kΩ /1 W/ kl 0,02. Otrzymane wyniki przedstawiają wykresy na rysunkach 2-4. Względną zmianę rezystancji obliczano ze wzoru

$$\delta R = \frac{R_t - R_0}{R_0} \cdot 100 \quad (1)$$

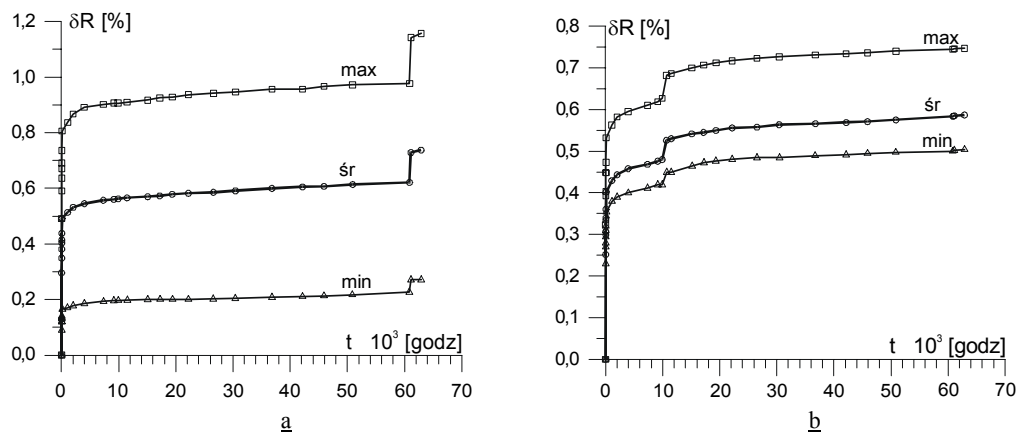
w którym R_t oznacza wartość rezystancji w czasie t od rozpoczęcia badań a R_0 – wartość rezystancji w momencie rozpoczęcia badań. Jak widać na wykresach przedstawionych na rysunkach 2 i 3 rezystory przechowywane bez poddawania ich obróbce cieplnej (grupy 1 i 2) wykazują początkowo silny, a z upływem czasu malejący wzrost rezystancji. Po 10 tysiącach godzin zmiana rezystancji osiąga średnio wartość około 0,1 %. Jeżeli na początku badań rezystory poddano obróbce cieplnej, jak w przypadku grup 3 i 4, to występuje duża zmiana rezystancji, na przykład dla

grupy 4 średnio o około 0,5 % (rys. 4). W przypadku grupy 3, gdy zastosowano o połowę krótszy czas starzenia niż w grupie 4 otrzymano dwa razy mniejszą zmianę rezystancji. Również zastosowanie wyższej temperatury starzenia (120°C) powoduje wzrost zmian rezystancji. Dobór temperatury obróbki cieplnej rezystorów jest ograniczony maksymalną dopuszczalną temperaturą dla danego typu rezystorów.



Rys. 3. Względne zmiany rezystancji rezystorów $200\ \Omega$, a – leżakowanych i starzonych po 10 tysiącach godzin (grupa 2a), b – leżakowanych i starzonych po 10 i 60 tysiącach godzin (grupa 1b)

Fig. 3. Relative changes in the resistance of the resistors $200\ \Omega$, a- seasoned and aged for 10 thousand hours (group 2a), b – seasoned and aged for 10 and 60 thousand hours (group 1b)



Rys. 4. Względne zmiany rezystancji rezystorów $200\ \Omega$, a – starzonych w siedmiu cyklach, następnie leżakowanych i starzonych po 60 tys. godzin (grupa 4a), b – starzonych w siedmiu cyklach, następnie leżakowanych przez 10 tysięcy godzin, jednorazowo starzonych i ponownie leżakowanych, (grupa 4b)

Fig. 4. Relative changes in the resistance of resistors 200 Ω , a- seasoned in 7 cycles, then seasoned and aged for 60 thousand hours (group 4a), b – aged in seven cycles, then seasoned for 10 thousand hours, single aged and again seasoned (group 4b)

Mimo zastosowania obróbki cieplnej już na początku badań obserwuje się u rezystorów grupy 3 i 4 dalszą naturalną zmianę rezystancji, podobnie jak to ma miejsce u rezystorów nie poddawanych obróbce cieplnej. Proces ten trwa jednak krócej, około 4 tysięcy godzin. W przypadku, gdy rezystory wcześniej obrabiano termicznie w siedmiu cyklach przez około 100 godzin zmiany rezystancji rezystorów obserwowane w czasie leżakowania wynoszą około 0,01 %/10000 godzin. Natomiast rezystory nie obrabiane termicznie zmieniają w tym samym czasie swoją wartość o około 0,02 %.

Tendencje zmian czasowych rezystancji rezystorów 499 k Ω są podobne do obserwowanych dla rezystorów 200 Ω , ale wartości zmian są około dwukrotnie mniejsze w stosunku do zmian rezystorów 200 Ω .

4. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że rezystory warstwowe węglowe produkcji krajowej o wartości znamionowej 200 Ω przechowywane w temperaturze pokojowej zwiększyły swoją rezystancję średnio około 0,2 % w ciągu siedmiu lat (około 60 000 godzin). Największe zmiany zaszły w pierwszych 10 000 godzin osiągając poziom 60 % całkowitej zmiany obserwowanej po siedmiu latach badań. Znaczne przyspieszenie zmian, do około 0,5 %/100 godzin, uzyskano w wyniku wygrzewanie rezystorów w temperaturze 100 $^{\circ}\text{C}$ przez 24 godziny wykonanego w siedmiu cyklach. Po 60 tysiącach godzin przechowywania wzrost wyniósł już tylko 0,08 %. Zastosowanie sztucznego starzenia poprawia stałość rezystancji w czasie. Proces wzrostu rezystancji trwa nadal chociaż w znacznie mniejszym tempie.

LITERATURA

- [1] KORICKIJ Ju. V., PASYNKOV V. V., TAREJEV B. M., *Spravočnik po elektrotečničeskim materialam*, tom 3, Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 239-293.
- [2] STALBOVSKIJ V. V., ČETVERTKOV I. I., *Rezistory*, Moskva, Sovetskoje Radio, 1973.
- [3] ŽELEZNOV M. T., ŠIRŠEV L. G., *Provoločnyje rezistory*, Moskva, Energija, 1970.

The possibility of using layer resistors in measurements is subject to some requirements concerning precision of levelling the values to the assumed rated value of the resistor, small changes of the value of the resistance with time, independence of the value of the resistance on frequency etc. Results of seven year experimental studies on changes of the resistance of layer resistors, coal resistors made in Poland and subject to thermal processing of artificial ageing are described in the article. Conclusions referring to resistors thermal processing, improving stability of the resistance in time are given.