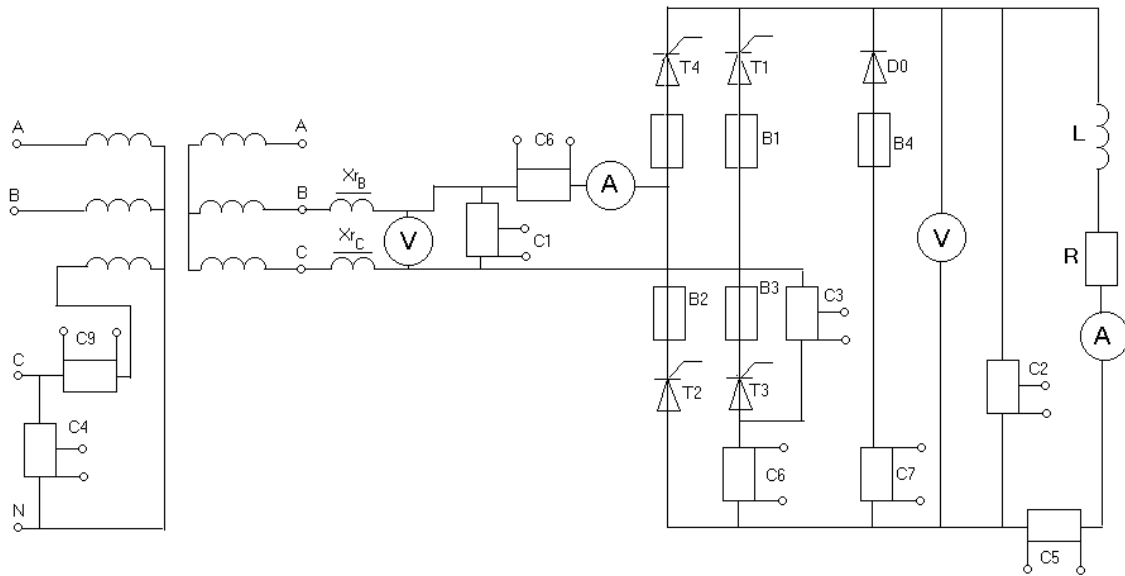


1. Wiadomości ogólne o prostownikach sterowanych

Układy prostownikowe sterowane są przekształtnikami sterowanymi fazowo. Umożliwiają płynną regulację średniej wartości napięcia wyprostowanego, a tym samym średniej wartości prądu i mocy czynnej odbiornika. Działają podobnie jak układy niesterowane, podobne są również zasady ich klasyfikacji. Zalicza się do nich układy prostownicze w pełni sterowane (tj. tyrystorowe) i półsterowane (mostki tyrystorowo-diodowe).

2. Schemat ideowy układu pomiarowego



3. Spis aparatury pomiarowej

Tabela 1

Wielkość mierzona	Skala [działki]	Zakres	Klasa dokładności
Strona zmiennego napięcia			
U_{SRMS}	75	150 V	0,5
P	100	200 V, 10 A	0.5
I	100	10 A	0,5
Strona wyprostowanego napięcia			
U_{dRMS}	75	150 V	0.5
U_{dAV}	75	750 V	1
I_{dRMS}	15	15 A	0,5
I_{dAV}	30	30 A	0,5

4. Opracowanie teoretyczne zagadnień statystyki

REGRESJA LINIOWA

Częstą sytuacją jest, że dwie mierzone wielkości powiązane są ze sobą zależnością liniową $y=ax+b$. Dokonując szeregu pomiarów tych wielkości uzyskujemy pary liczb (x_i, y_i) , a naszym zadaniem jest znalezienie równania prostej najlepiej opisującej zależność pomiędzy badanymi wielkościami.

Niech równanie będzie miało postać

$$y = \bar{a} \cdot x + \bar{b}$$

a dopasowanie zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów oznacza, że

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{a}x_i - \bar{b})^2 = \min.$$

gdzie a i b są empirycznym współczynnikami regresji liniowej.

Wyrażone w ten sposób zostaje odchylenie punktu eksperymentalnego (wyniku pomiaru) od odpowiadającej mu wartości wynikającej z równania prostej.

W dalszych rozważaniach prawdziwe jest, że

$$\bar{a} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n x_i \right)$$

Niepewności pomiarowe współczynników regresji a i b określa się za pomocą odchylenia standardowego S_a i S_b obliczanego jako

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{b} \sum_{i=1}^n y_i}{n-2}} \quad S_{\bar{y}} = S_{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Kryterium potwierdzające liniową zależność pomiędzy wielkościami x i y stanowi wartość współczynnika korelacji liniowej

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

Jego wartość zmienia się w granicach od ± 1 do 0. Gdy $|r| = 1$, to dopasowanie jest idealne, wszystkie punkty pomiarowe leżą na prostej. Gdy $r = 0$, to zależność liniowa pomiędzy x_i i y_i nie istnieje.

REGRESJA NIELINIOWA

Istnieje również możliwość, iż równanie opisujące zależność pomiędzy wielkościami Y i X będzie nieliniowe. W ogólnym przypadku może mieć ono postać wielomianu o nieznanymi współczynnikami. Naszym zadaniem jest wyznaczenie najbardziej wiarygodnych wartości tych współczynników. Sposób postępowania w tym przypadku jest analogiczny do przedstawionego w przypadku regresji liniowej. Zakładamy, że wielkości y_i podlegają rozkładowi normalnemu o jednakowych wartościach odchylenia standardowego wokół wartości rzeczywistych. Na tej podstawie możemy wyznaczyć układ równań, których rozwiązanie da nam szukane wartości współczynników. Dla wielomianu 2 rzędu otrzymujemy układ trzech równań postaci

$$\begin{aligned} n \cdot c + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i \\ c \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \\ c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 &= \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \end{aligned}$$

5. Charakterystyka sterowania

Tabela 2. Charakterystyka sterowania – pomiary

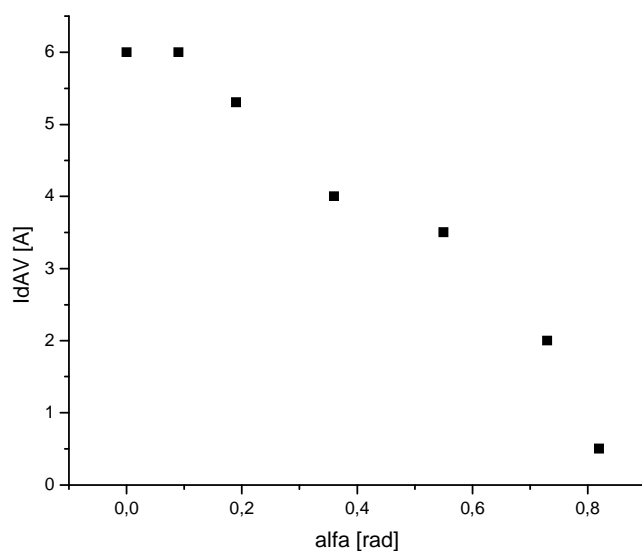
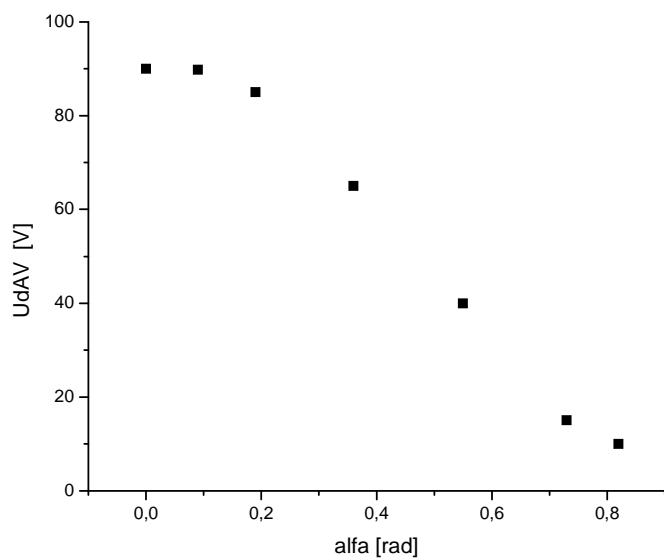
Lp.	α	U_d	I_d	P_d	U_S
	[rad]	[V]	[A]	[W]	[V]
1	0	90	6	540	100
2	$0,09 \cdot \pi$	89,8	6	538,8	100
3	$0,19 \cdot \pi$	85	5,3	450,5	100
4	$0,36 \cdot \pi$	65	4	260	100
5	$0,55 \cdot \pi$	40	3,5	140	100
6	$0,73 \cdot \pi$	15	2	30	100
7	$0,82 \cdot \pi$	10	0,5	5	100

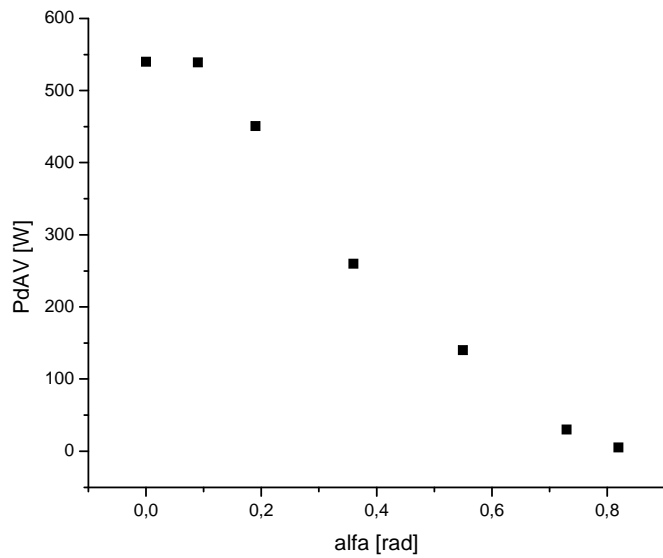
$U_S = \text{const.}$

$R_O = \text{const.}$

Tabela 3. Zależności funkcyjne dla charakterystyki sterowania układu tyrystorowego przekształtnika sterowanego.

Lp.	Przebieg badany (U_d, I_d, P_d)= $f(\alpha)$	Funkcja regresji – postać ogólna		Funkcja regresji przechodząca przez 2 węzły: P1=(0, max), P2=(π , 0)	
		$Y=A \cos[B(x+C)]+D$	R	$Y=A \cos[B(x+C)]+D$	R
1	U_d [V]				
2	I_d [A]				
3	P_d [W]				





6. Charakterystyka obciążenia

Tabela 3. Charakterystyka obciążenia – pomiary

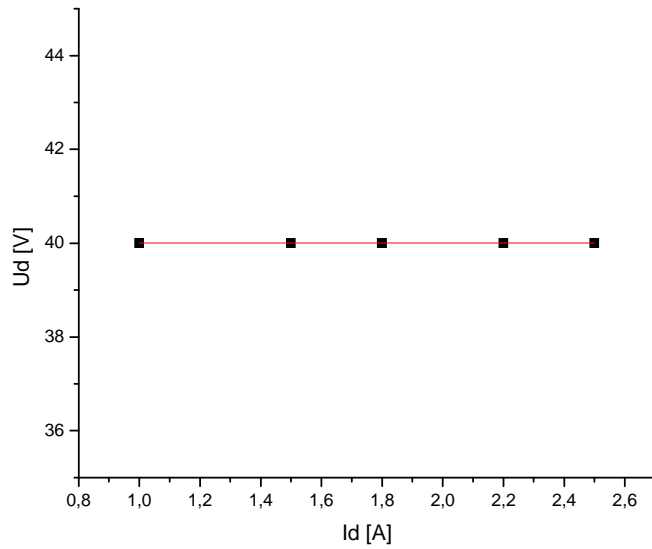
Wielkość mierzona		Punkty pomiarowe dla $\alpha = \text{const.} = 0,55 * \pi$ [rad]					
		1	2	3	4	5	6
I_d	[A]	2,5	2,2	1,8	1,5	1	1
U_d	[V]	40	40	40	40	40	40
$I_{d \text{ RMS}}$	[A]	4,2	3,9	3,5	3	2,5	2,3
$U_{d \text{ RMS}}$	[V]	63	63	63	63	63	63
$I_{S \text{ RMS}}$	[A]	3,9	3,5	3,05	2,5	1,84	1,82
$U_{S \text{ RMS}}$	[V]	100	100	100	100	100	100

$U_{S \text{ RMS}} = \text{const.} = 100$ [V]

$R_O = \text{var.}$

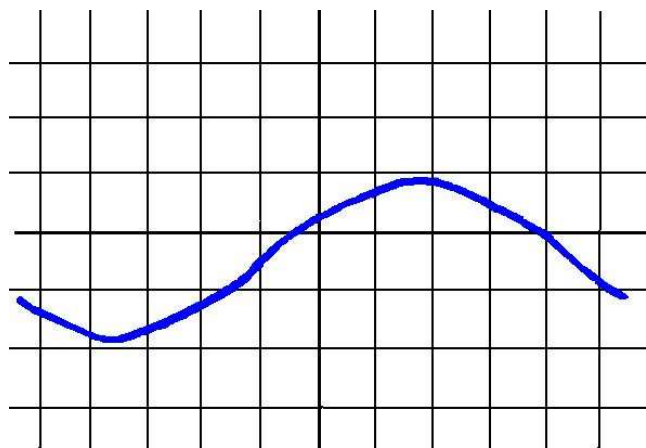
Tabela 4. Zestawienie funkcji regresji liniowej zastosowanej do charakterystyki obciążenia prostownika sterowanego

Lp.	Funkcja regresji liniowej	Funkcja dla charakterystyki obciążenia	Współczynnik regresji R
1	Funkcja liniowa $Y = Ax + B$	$A = 0, B = 40$	1
2	Funkcja potęgowa $Y = Ae^{Bx}$	$A = 40, B = 0$	$1 - 7.5731e-29$
3	Funkcja logarytmiczna $Y = A + B \ln(x)$	$A = 40, B = 0$	1
4	Funkcja wykładnicza $Y = Ax^B$	$A = 40, B = 0$	$1 - 7.5731e-29$

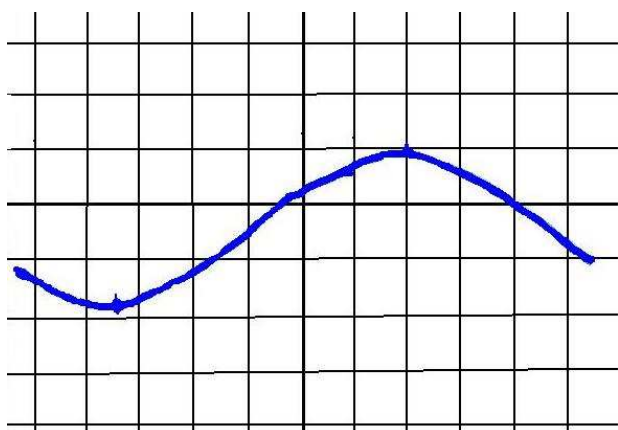


Dla wszystkich wybranych funkcji regresji liniowej charakterystyki pokrywają się. Biorąc pod uwagę współczynnik regresji R stwierdzamy, że najlepiej dopasowane do punktów pomiarowych są krzywe wykreślone w oparciu o funkcje liniową i logarytmiczną.

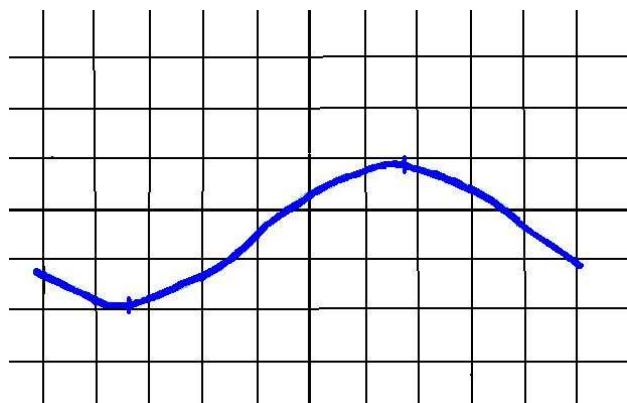
7. Badanie przebiegów czasowych w różnych punktach badanego obwodu.



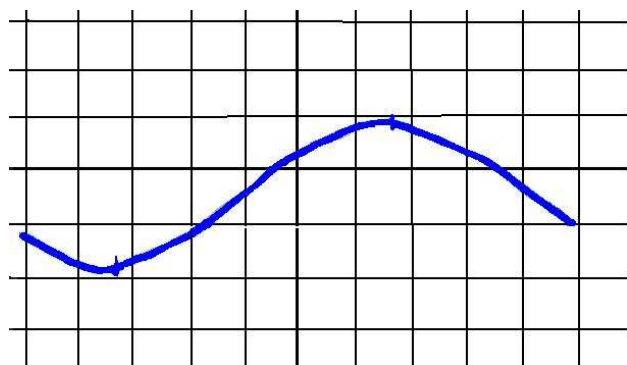
1. pkt. obwodu, obciążenie R, 1V/cm, 2ms/cm



1. pkt. obwodu, obciążenie RL, 1V/cm, 2ms/cm



1. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 1V/cm, 2ms/cm



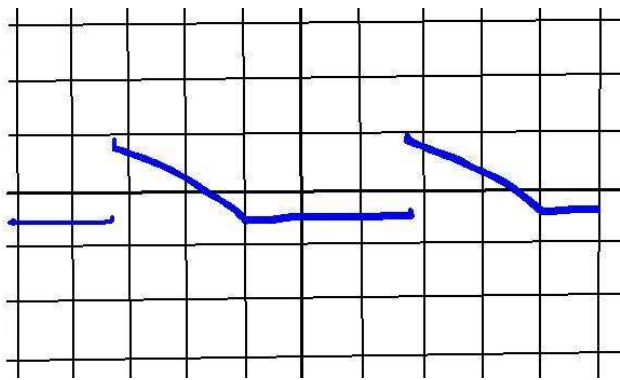
1. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 1V/cm, 2ms/cm



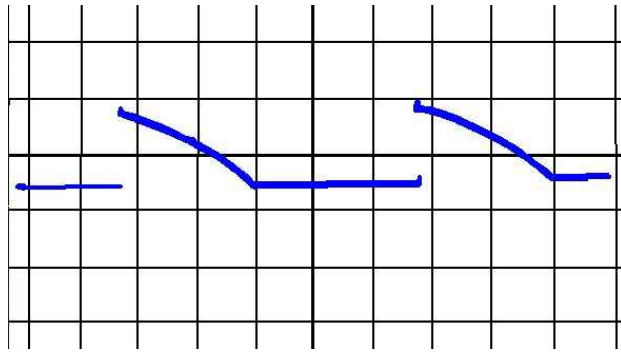
2. pkt. obwodu, obciążenie R, 1V/cm, 2ms/cm



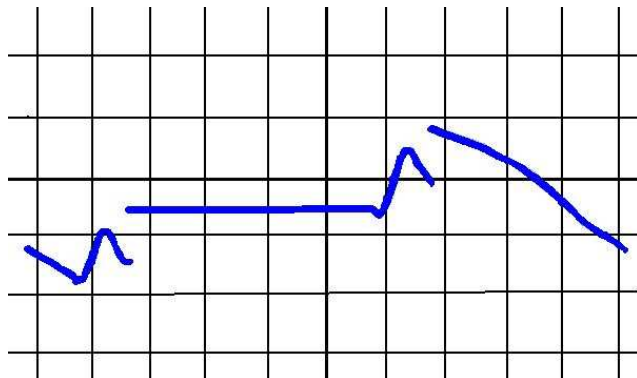
2. pkt. obwodu, obciążenie RL, 1V/cm, 2ms/cm



2. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 1V/cm, 2ms/cm



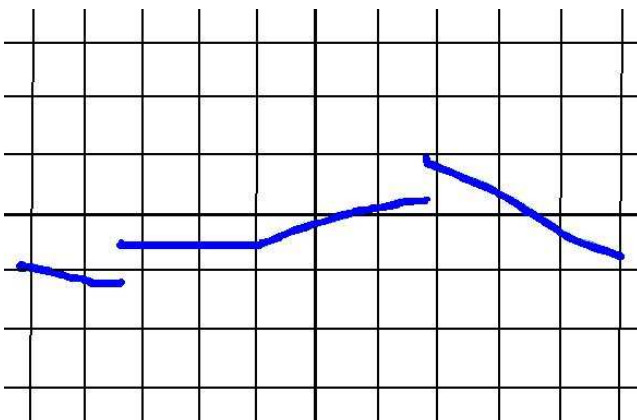
2. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 1V/cm, 2ms/cm



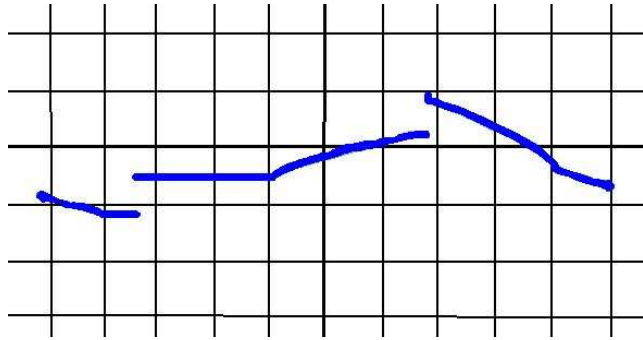
3. pkt. obwodu, obciążenie R, 1V/cm, 2ms/cm



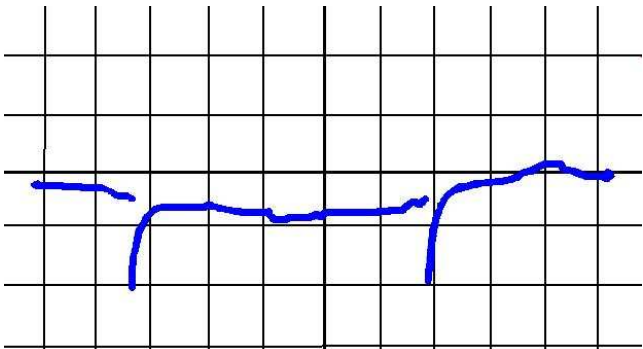
3. pkt. obwodu, obciążenie RL, 1V/cm, 2ms/cm



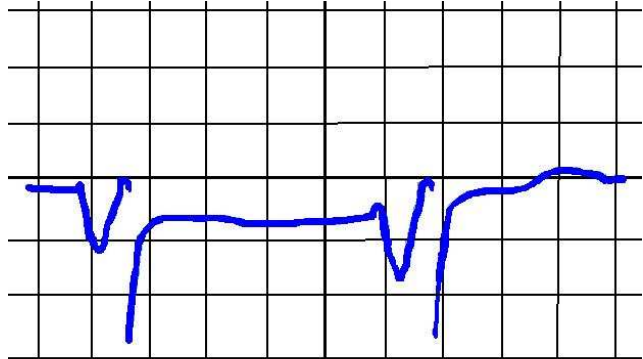
3. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 1V/cm, 2ms/cm



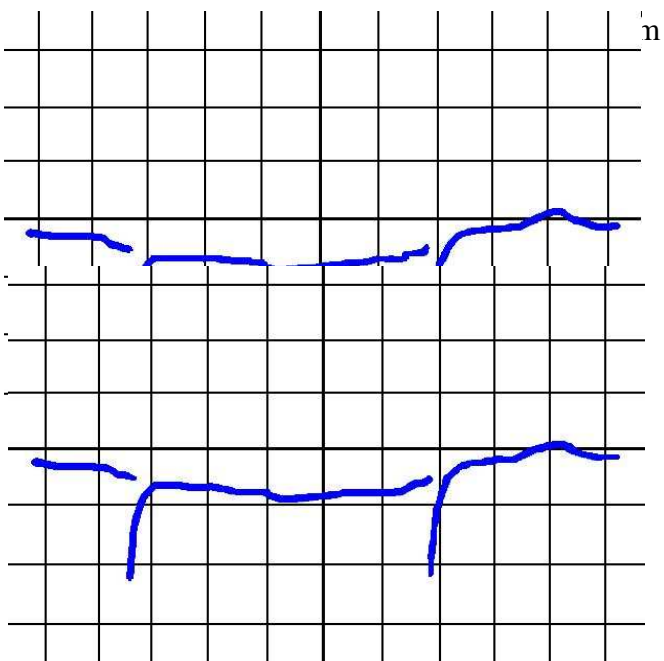
3. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 1V/cm, 2ms/cm



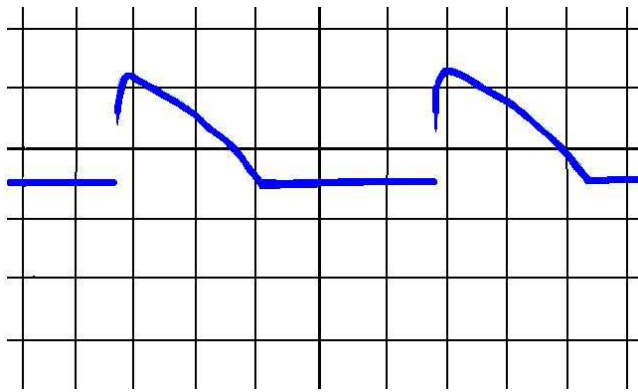
4. pkt. obwodu, obciążenie R, 1V/cm, 2ms/cm



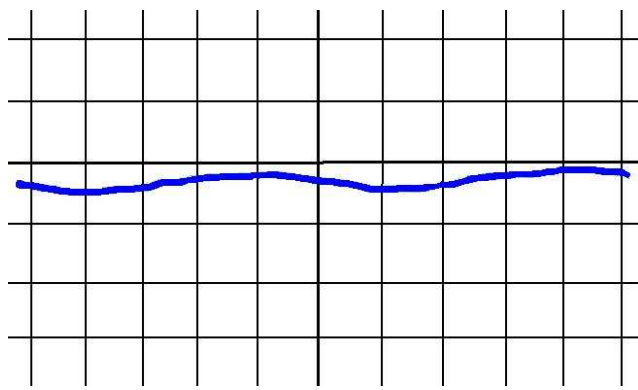
4. pkt. obwodu, obciążenie RL, 1V/cm, 2ms/cm



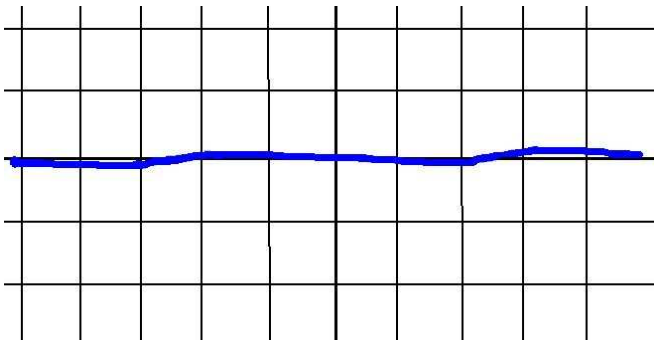
4. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 1V/cm, 2ms/cm



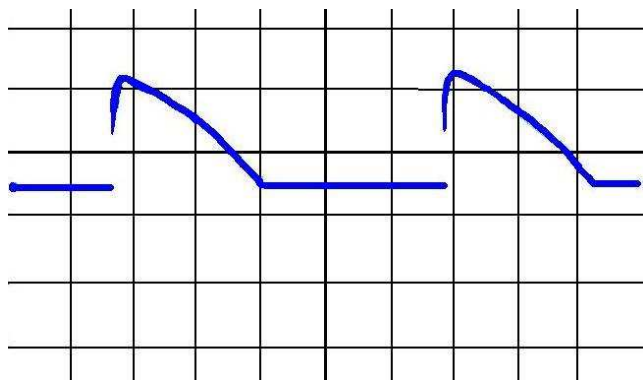
5. pkt. obwodu, obciążenie R, 50mV/cm, 2ms/cm



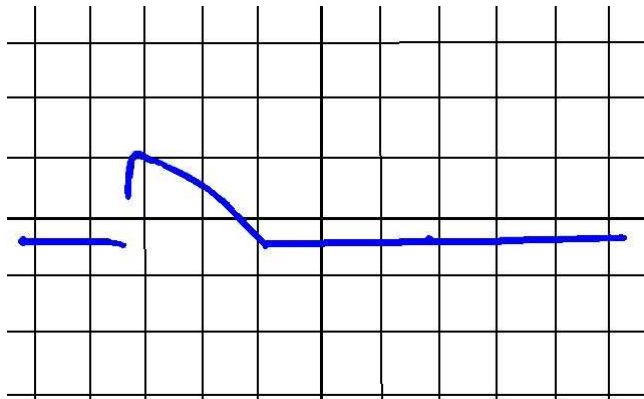
5. pkt. obwodu, obciążenie RL, 50mV/cm, 2ms/cm



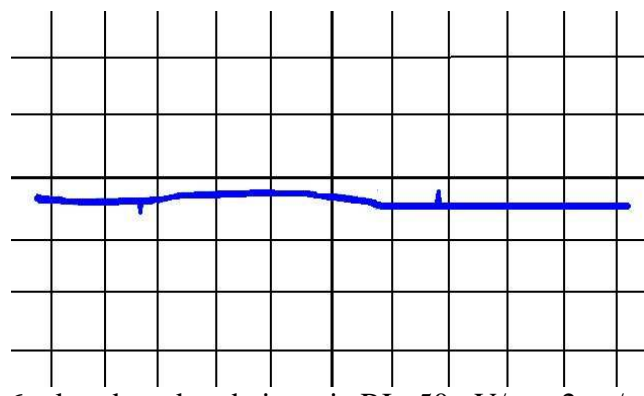
5. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 50mV/cm, 2ms/cm



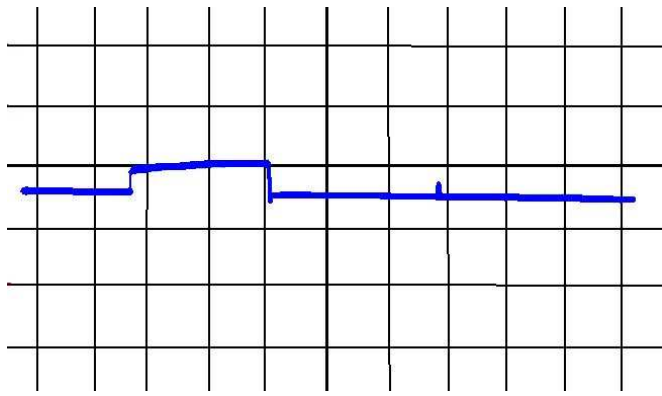
5. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 50mV/cm, 2ms/cm



6. pkt. obwodu, obciążenie R, 50mV/cm, 2ms/cm



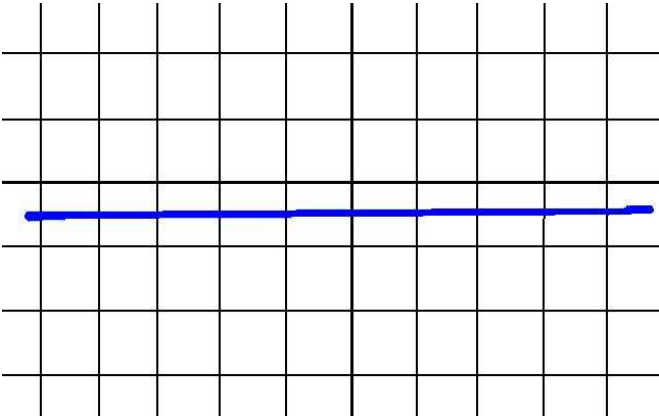
6. pkt. obwodu, obciążenie RL, 50mV/cm, 2ms/cm



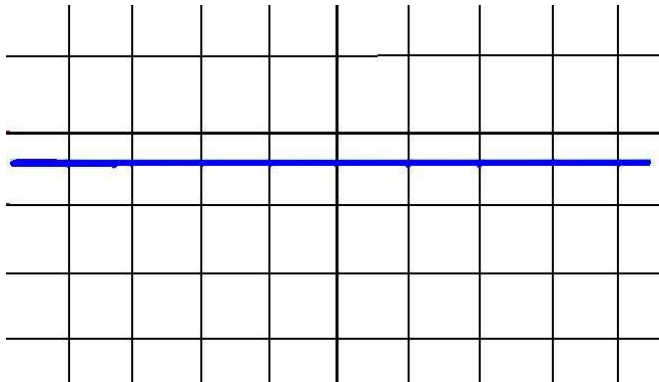
6. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 50mV/cm, 2ms/cm



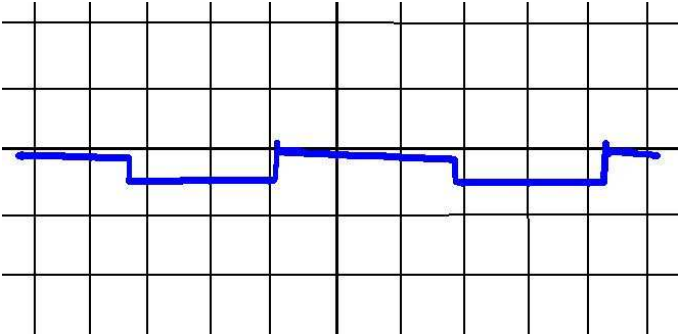
6. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 50mV/cm, 2ms/cm



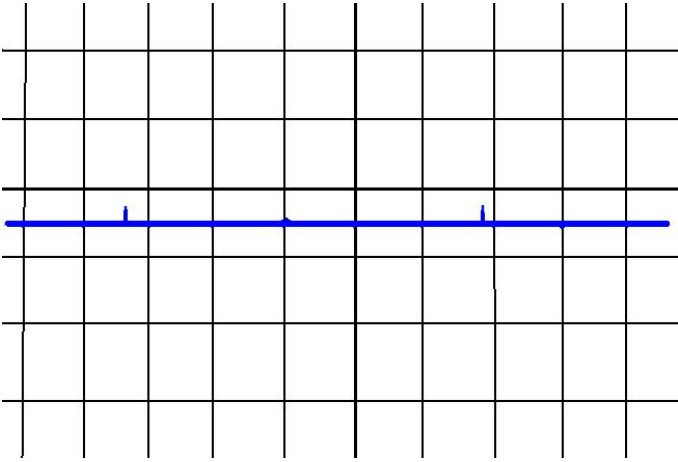
7. pkt. obwodu, obciążenie R, 50mV/cm, 2ms/cm



7. pkt. obwodu, obciążenie RL, 50mV/cm, 2ms/cm



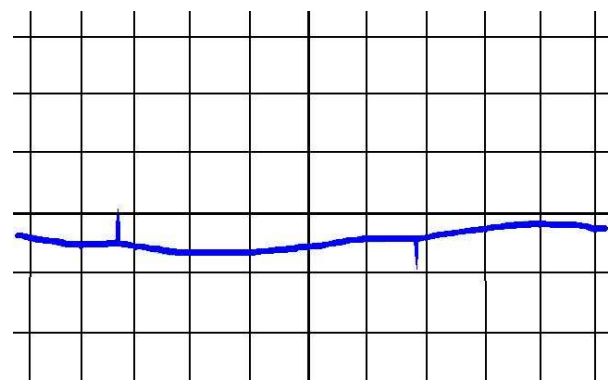
7. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 50mV/cm, 2ms/cm



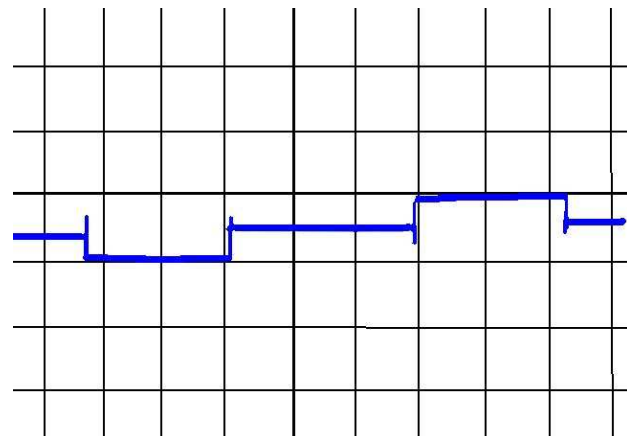
7. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 50mV/cm, 2ms/cm



8. pkt. obwodu, obciążenie R, 50mV/cm, 2ms/cm



8. pkt. obwodu, obciążenie RL, 50mV/cm, 2ms/cm



8. pkt. obwodu, obciążenie RL+D, 50mV/cm, 2ms/cm



8. pkt. obwodu, obciążenie R+D, 50mV/cm, 2ms/cm

Powyższe oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów w poszczególnych gałęziach obwodu prostownika sterowanego są w wielu przypadkach podobne do siebie, oczywiście w obrębie tego samego punktu pomiarowego. Zaobserwować tu możemy zachowawczy charakter obciążenia indukcyjnego. Sygnał przy włączonym w obwód obciążeniem RL jest łagodniejszy względem sygnału dla obciążenia czysto rezystancyjnego.