

Mariusz TROJNAR\*

## ANALIZA LINII DŁUGICH ZA POMOCĄ PROGRAMU LTSPICE

W artykule przedstawiono przykłady zastosowania programu LTspice w analizie obwodów zawierających linie długie. Jeden z przykładów dotyczy analizy obwodu z linią długą stratną w stanie ustalonym, a drugi – analizy obwodu z linią długą bezstratną w stanie nieustalonym. W przykładach zaprezentowano różne sposoby analizy obwodów, przygotowanych w trybie graficznym (łączenie symboli elementów pobieranych z biblioteki programu) lub opisanych w trybie tekstowym (sekwencja linii zawierających deklarację elementów, rodzaje analizy itp.). Dokonano porównania wybranych możliwości programu LTspice w stosunku do wybranych możliwości programu PSpice Student. Programy te stosowane są w analizie obwodów elektrycznych i elektronicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: linia długa, symulacja komputerowa, LTspice

### 1. WPROWADZENIE

Komputerowa analiza linii długich sprowadza się do wyboru odpowiedniego programu, rozpoznania jego możliwości obliczeniowych, przygotowania określonego obwodu, zadeklarowania parametrów jego elementów. Po wyborze rodzaju analizy przeprowadzana jest symulacja komputerowa. Jej rezultatem są wyniki, uzyskane w postaci graficznej lub tekstowej, które poddawane są późniejszej analizie. Istnieje wiele użytecznych programów komputerowych służących do analizy obwodów elektrycznych i elektronicznych; niektóre z nich rozwijane są od lat. Znajdują one zastosowanie w badaniach naukowych i w działalności dydaktycznej. Przyspieszają obliczenia (w stosunku do obliczeń „ręcznych”), skracają czas oczekiwania na wyniki, pomagają we wnioskowaniu. Powszechność stosowania programów komputerowych w analizie obwodów elektrycznych jest w dzisiejszych czasach faktem. I właściwie trudno sobie wyobrazić bez nich codzienną zawodową rzeczywistość.

Zastosowaniu programu LTspice w analizie linii długiej poświęcono ten artykuł; zilustrowano go dwoma przykładami obliczeniowymi. W pierwszym dokonano analizy obwodu z linią długą stratną w stanie ustalonym, w drugim – analizy obwodu z linią bezstratną w stanie nieustalonym.

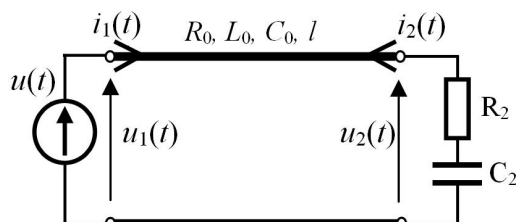
---

\* Politechnika Rzeszowska.

## 2. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

### 2.1. Linia długa stratna w stanie ustalonym

Linia długa (rys. 1) o parametrach jednostkowych:  $R_0 = 10,2 \Omega/\text{km}$ ,  $G_0 = 0$ ,  $L_0 = 4,2 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 4,7 \text{ nF}/\text{km}$  i długości  $l = 100 \text{ km}$ , obciążona dwójnikiem szeregowym RC o parametrach: rezystor  $R_2 = 100 \Omega$ , kondensator  $C_2 = 2,2 \mu\text{F}$  została zasilona napięciem  $u(t) = 200\sin(6280t+30^\circ) \text{ V}$ . Wyznaczyć napięcie  $\underline{U}_2$  na końcu linii oraz prądy na początku  $\underline{I}_1$  i na końcu  $\underline{I}_2$  linii długiej [3, 5].



Rys. 1. Linia długa stratna obciążona dwójnikiem szeregowym RC

Rozwiązanie analityczne. Wyznaczenie podanych w treści zadania wartości napięcia i prądów na końcach linii długiej, dokonuje się zgodnie ze znanymi z literatury zależnościami [1, 5].

Stała propagacji:

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)} = \\ &= \sqrt{(10,2 + j6280 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3}) \cdot (0 + j6280 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9})} = \\ &= \sqrt{(10,2 + j26,389) \cdot (0 + j2,953 \cdot 10^{-5})} = (0,0053 + j0,0284) = \\ &= 0,0289e^{j79,4338^\circ} \frac{1}{\text{km}} \end{aligned} \quad (1)$$

Impedancja falowa linii:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_C &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{10,2 + j6280 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3}}{0 + j6280 \cdot 4,7 \cdot 10^{-9}}} = \\ &= \sqrt{\frac{10,2 + j26,389}{j2,953 \cdot 10^{-5}}} = (962,2015 - j179,4843) = 978,7984e^{-j10,5662^\circ} \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

Impedancja obciążenia:

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} = 100 - j\frac{1}{6280 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = (100 - j72,343) = 123,4242e^{-j35,8832^\circ} \Omega \quad (3)$$

Impedancja wejściowa linii:

$$\underline{Z}_{we} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot l) + \underline{Z}_C \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l)}{\underline{Z}_2 \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l) + \underline{Z}_C \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot l)} \cdot \underline{Z}_C =$$

$$= (551,7673 - j342,2406) = 649,2887e^{-j31,8098^\circ} \Omega$$
(4)

Prąd płynący na początku linii:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{we}} = \frac{141,42e^{j30^\circ}}{649,2887e^{-j31,8098^\circ}} = (0,1029 + j0,192) = 0,2178e^{j61,8098^\circ} \text{ A}$$
(5)

Prąd płynący na końcu linii:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot l) + \underline{Z}_C \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot l)} = (-0,054 - j0,1802) = 0,1881e^{-j106,6716^\circ} \text{ A}$$
(6)

Napięcie na końcu linii:

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 = 123,4242e^{-j35,8832^\circ} \cdot 0,1881e^{-j106,6716^\circ} = 23,2108e^{-j142,5547^\circ} \text{ V}$$
(7)

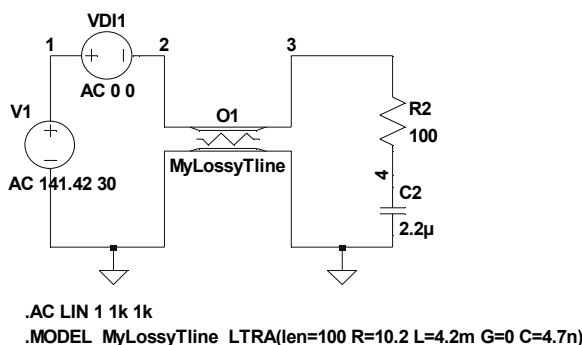
Rozwiązanie komputerowe. Parametry jednostkowe linii długiej i jej długość można w programie LTspice [2] zapisać w modelu linii długiej stratnej 0. *Lossy\_Transmission\_Line* (linia O1, rys. 2a); w rozważanym przykładzie jest to konkretnie w linii: `.MODEL MyLossyTline LTRA(len=100 R=10.2 L=4.2m G=0 C=4.7n)`. Obwód stanowi połączenie dostępnych w programie elementów, których wartości zadeklarowano zgodnie z danymi zadania. W obwodzie dodatkowo włączono źródło napięcia VDI1 o wartości 0 V dla określenia poprawnej wartości prądu na początku linii (prądu przepływającego przez to dodatkowe źródło). Prąd płynący na końcu linii zostanie odczytany jako prąd płynący przez rezystor R2. Po przygotowaniu obwodu wystarczy uruchomić symulację obwodu, by uzyskać rozwiązanie.

Z wyników przedstawionych na rys. 2b odczytujemy poszukiwane wartości: prąd na początku linii  $\underline{I}_1 = I(\text{Vdi1}) = 0,2178e^{j61,8098^\circ} \text{ A}$  i prąd na końcu linii  $\underline{I}_2 = I(\text{R2}) = 0,1881e^{-j106,6716^\circ} \text{ A}$  oraz napięcie  $\underline{U}_2 = V(3) = 23,2108e^{-j142,5547^\circ} \text{ V}$  na końcu linii długiej. Wartości te są takie same jak wartości uzyskane na podstawie obliczeń (5), (6), (7).

W porównaniu do popularnego programu PSpice Student v. 9.1, w programie LTspice wystarczy tylko przygotować obwód (rys. 2a), podać rodzaj analizy (w tym przypadku `.AC LIN 1 1k 1k`) i uruchomić symulację obwodu. W jej rezultacie otrzymamy wykaz (w postaci zespolonej; moduł i faza) wartości napięć w węzłach obwodu oraz wartości prądów płynących przez poszczególne elementy obwodu (rys. 2b). We wspomnianym programie PSpice Student v. 9.1 oprócz przygotowanego obwodu i podania rodzaju analizy (analysis/setup),

przed rozpoczęciem symulacji obwodu należy także umieścić w obwodzie markery do odczytu prądów w gałęziach obwodu i napięć na elementach (lub pomiędzy określonymi węzłami obwodu), a następnie, po wykonaniu symulacji, odczytać poszukiwane wartości w postprocesorze Probe. W przypadku przygotowywania w programie PSpice Student v. 9.1 pliku tekstowego, w którym zgodnie z przyjętymi regułami zapisywana jest struktura obwodu (elementy i ich wartości) oraz rodzaj analizy, przed rozpoczęciem symulacji obwodu należy także zapisać instrukcję otrzymania poszukiwanych wartości prądów i napięć w pliku wynikowym \*.out (czyli zapisać np. instrukcję typu: `.Print AC IM(VDI1) IP(VDI1) VM(2) VP(2) VM(3) VP(3)`, stowarzyszoną z instrukcją `.AC LIN 1 1k 1k`; przyrostki M oraz P oznaczają odpowiednio moduł oraz fazę).

a)



b)

```

--- AC Analysis ---
frequency:      1000      Hz
V(1):          mag:    141.42 phase:    30°      voltage
V(3):          mag:    23.2105 phase:  -142.555°  voltage
V(4):          mag:    13.6045 phase:  163.328°  voltage
V(2):          mag:    141.42 phase:    30°      voltage
I(C2):         mag:    0.188055 phase: -106.672°  device_current
Ia(O1):        mag:    0.217808 phase:  61.8098°  device_current
Ib(O1):        mag:    0.188055 phase:  73.3284°  device_current
Ic(O1):        mag:    0.217808 phase: -118.19°   device_current
Id(O1):        mag:    0.188055 phase: -106.672°  device_current
I(R2):         mag:    0.188055 phase: -106.672°  device_current
I(Vdi1):       mag:    0.217808 phase:  61.8098°  device_current
I(V1):         mag:    0.217808 phase: -118.19°   device_current

```

Rys. 2. Obwód zawierający linię długą stratną (a) i wyniki symulacji komputerowej obwodu (b)

Obwód przedstawiony na rys. 2a można w programie LTspice także zapisać jako plik tekstowy (zapis dokonywany w oknie „Edit Text on the Schematic”, dostępnym po wyborze opcji „Spice Directive” z menu „Edit”), w postaci sekwencji wierszy zawierających deklaracje elementów, rodzaje analizy i np.

polecenia wyprowadzenia poszukiwanych wartości napięcia i prądów do pliku wynikowego, a następnie poddać symulacji komputerowej. Na rys. 3 przedstawiono przykład pliku umożliwiającego uzyskanie rozwiązania (prąd na początku oraz napięcie i prąd na końcu linii długiej) w zależności od zmiany wartości elementu R2 (w przyjętym zakresie, w instrukcji: `.step param R2 1p 20k 100`) przy stałej wartości pojemności C2 (C2=2,2μF ustawione w linii `.param C2=2.2u`).

```
V1 1 0 AC 141.42 30
VD1 1 2 AC 0 0
R2 3 4 {R2}
C2 4 0 {C2}
O1 2 0 3 0 MyLossyTline
.model MyLossyTline LTRA(len=100 R=10.2 L=4.2m G=0 C=4.7n)
.AC LIN 1 1k 1k
.PRINT AC V(1) V(2) V(3) I(VD1) I(R2) I(C2)
.step param R2 1p 20k 100
.param C2=2.2u
.END
```

Rys. 3. Obwód z rys. 2a zapisany w postaci tekstowej; zmiana wartości R2 od 1 pΩ do 20 kΩ z krokiem 100

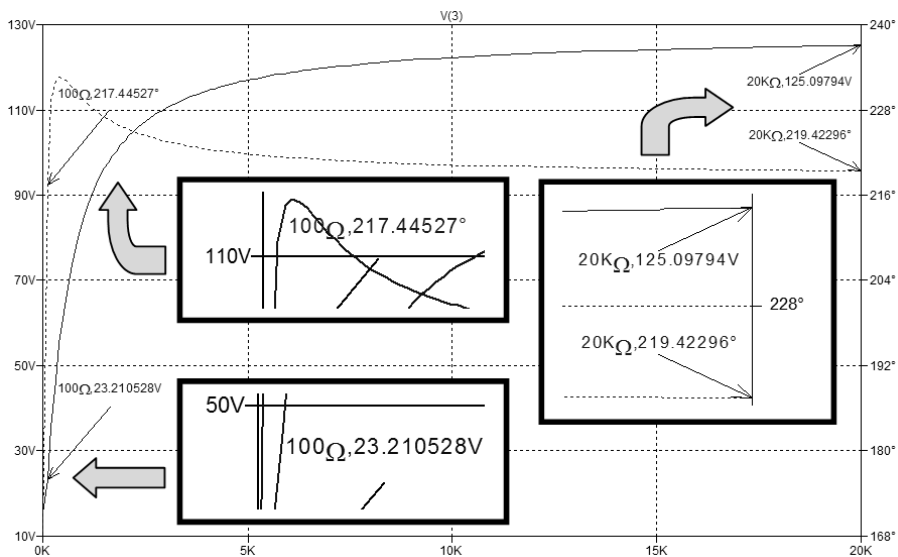
Zapis `.step param R2 1p 20k 100` oznacza zmianę wartości R2 od 1 pΩ do 20 kΩ z krokiem 100. Planowano przyjęcie zmiany wartości rezystancji R2 od 0 do 20 kΩ, ale zamiast wartości 0 podano wartość 1 pΩ, ponieważ program LTspice nie pozwala na wprowadzenie wartości 0 w wymienionej linii `.step param`. Wybrane wyniki symulacji komputerowej obwodu zamieszczono na rys. 4 oraz rys. 5. Na rysunkach tych mamy opisane dwie osie pionowe, z lewej strony – wartości modułu napięcia (rys. 4) i prądu (rys. 5), z prawej strony mamy fazę w stopniach. W zależności od wartości R2 otrzymujemy przebiegi modułu (linia ciągła) oraz fazy (linia przerywana).

Na rys. 6 przedstawiono przykład pliku służącego do analizy obwodu przy stałej wartości R2 (R2 = 100), ale przy zmieniającej się wartości C2, a konkretnie dla trzech zadanych wartości C2 (zmienia się w tym przypadku postać linii `.step param` – w stosunku do przykładu poprzedniego dochodzi wyraz `list`, po którym następuje zapis wartości), co znajduje swoje odniesienie w linii: `.step param C2 list 2.2u 5u 10u`.

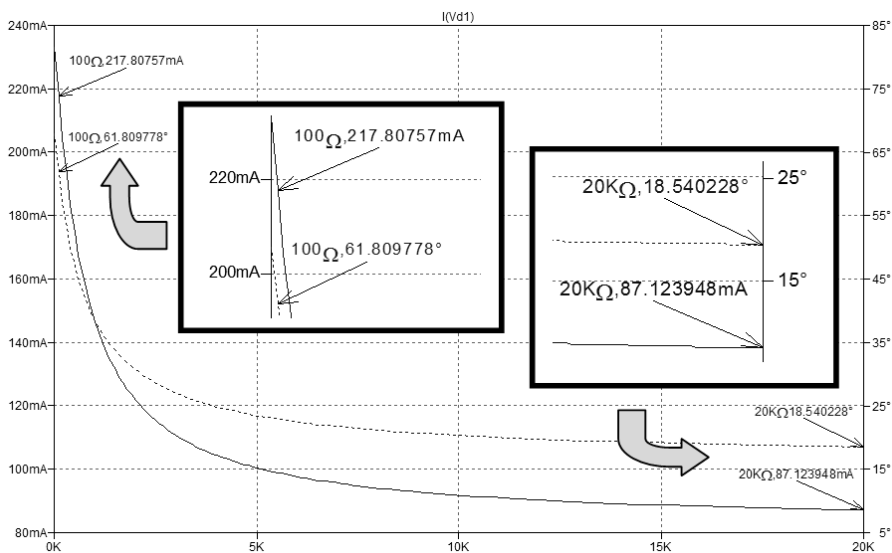
Zastosowanie linii `.step param` czy `.step param list` pozwala na uzyskanie graficznego rozwiązania, którego analiza pozwala na szybkie (ale też i dokładne) oszacowanie wyników (wartości prądu, napięcia) dla dowolnej wartości rezystancji (z przyjętego do analizy zakresu) lub dla jednej z kilku podanych do analizy wartości pojemności. Zamiast dokonywać każdorazowej zmiany wartości elementu R2 lub C2 i dla każdej z tych wartości przeprowadzać oddzielną symulację, można w jednym poleceniu (instrukcja `.step param`)

podać cały szeroki zakres zmian wartości elementu, i z określonego punktu widzenia oszacować najbardziej optymalną wartość R2 lub C2.

Wartości otrzymane na rys. 4, rys. 5 oraz rys. 7 (dla  $R = 100 \Omega$ ,  $C2 = 2,2 \mu\text{F}$ ) są takie same jak wartości uzyskane w obliczeniach analitycznych (5), (6), (7).



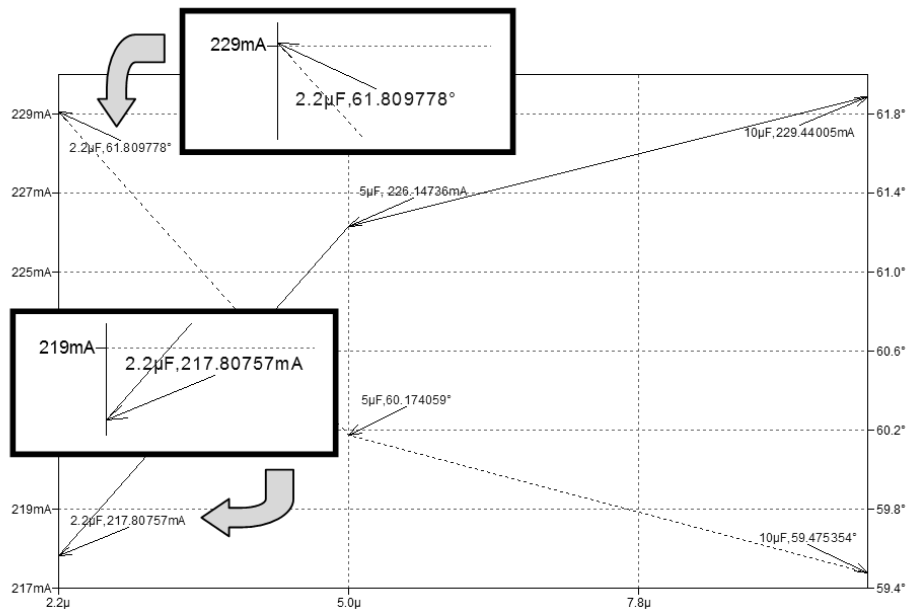
Rys. 4. Napięcie na końcu linii przy zmianie  $R2$  od 1 p $\Omega$  do 20 k $\Omega$  (przy stałym  $C2 = 2,2 \mu\text{F}$ )



Rys. 5. Prąd na początku linii przy zmianie  $R2$  od 1 p $\Omega$  do 20 k $\Omega$  (przy stałym  $C2 = 2,2 \mu\text{F}$ )

```
V1 1 0 AC 141.42 30
VD1 1 2 AC 0 0
R2 3 4 {R2}
C2 4 0 {C2}
O1 2 0 3 0 MyLossyTline
.model MyLossyTline LTRA(len=100 R=10.2 L=4.2m G=0 C=4.7n)
.AC LIN 1 1k 1k
.PRINT AC V(1) V(2) V(3) I(VD1) I(R2) I(C2)
.param R2=100
.step param C2 list 2.2u 5u 10u
.END
```

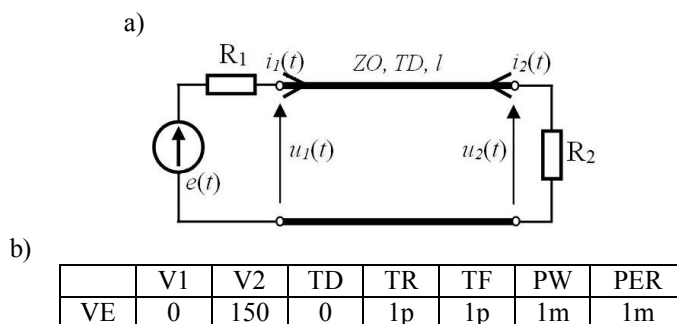
Rys. 6. Obwód z rys. 2a zapisany w postaci tekstowej; analiza dla trzech wartości:  $C2 = 2,2 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 5 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 10 \mu\text{F}$



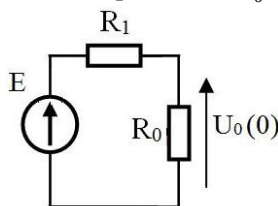
Rys. 7. Prąd na początku linii dla  $C2 = 2,2 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 5 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 10 \mu\text{F}$ ; (przy stałym  $R2 = 100 \Omega$  w każdym z przypadków)

## 2.2. Linia długa bezstratna w stanie nieustalonym

W obwodzie przedstawionym na rys. 8a linia długa bezstratna ma parametry:  $Z_0 = 200 \Omega$ ,  $TD = 0.2 \mu\text{s}$ . Parametry źródła  $e(t)$  zestawiono w tabeli na rys. 8b. Pozostałe dane:  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 400 \Omega$ . Wyznaczyć amplitudy fali padającej i fali odbitych [3, 4, 6].

Rys. 8. Obwód zawierający linię długą bezstratną (a) i parametry źródła  $e(t)$  (b)

Rozwiązanie analityczne. Po załączeniu siły elektromotorycznej źródła zasilającego  $e(t)$  linia długa zachowuje się jak odbiornik o impedancji równej impedancji charakterystycznej  $Z_0$  (rezystancji charakterystycznej  $R_0$ ). Schemat zastępczy dla  $t = 0$  został przedstawiony na rys. 9. Na zaciskach wejściowych pojawia się fala pierwotna napięcia o amplitudzie  $U_0$ .

Rys. 9. Schemat zastępczy obwodów wejściowych linii długiej z rys.8a dla czasu  $t = 0$ 

Amplituda napięcia dla  $t = 0$  wynosi ( $R_0 = Z_0 = 200 \Omega$ )

$$U_0(0) = \frac{R_0}{R_0 + R_1} \cdot E = \frac{200}{200 + 100} \cdot 150 = 100 \text{ V} \quad (8)$$

Współczynnik odbicia fali napięciowej od odbiornika:

$$n_2 = \frac{R_2 - R_0}{R_2 + R_0} = \frac{400 - 200}{400 + 200} = 0,333 \quad (9)$$

Współczynnik odbicia fali napięciowej od nadajnika:

$$n_1 = \frac{R_1 - R_0}{R_1 + R_0} = \frac{100 - 200}{100 + 200} = -0,333 \quad (10)$$

Amplituda pierwszej fali napięciowej odbitej od odbiornika:

$$U_1 = n_2 \cdot U_0 = 0,333 \cdot 100 = 33,333 \text{ V} \quad (11)$$

Amplituda fali napięciowej odbitej od nadajnika:

$$U_2 = n_1 \cdot U_1 = -0,333 \cdot 33,333 = -11,111 \text{ V} \quad (12)$$



Amplituda kolejnej fali napięciowej odbitej od odbiornika:

$$U_3 = n_2 \cdot U_2 = 0,333 \cdot (-11,111) = -3,704 \text{ V} \quad (13)$$

Amplituda kolejnej fali napięciowej odbitej od nadajnika:

$$U_4 = n_1 \cdot U_3 = -0,333 \cdot (-3,704) = 1,235 \text{ V} \quad (14)$$

Amplituda kolejnej fali napięciowej odbitej od odbiornika:

$$U_5 = n_2 \cdot U_4 = 0,333 \cdot 1,235 = 0,412 \text{ V} \quad (15)$$

Amplituda kolejnej fali napięciowej odbitej od nadajnika:

$$U_6 = n_1 \cdot U_5 = -0,333 \cdot 0,412 = -0,137 \text{ V} \quad (16)$$

W ten sposób wyznacza się amplitudy kolejnych fal napięciowych odbitych od nadajnika lub odbiornika.

Ustalona wartość napięcia:

$$U_{ust} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E = \frac{400}{100 + 400} \cdot 150 = 120 \text{ V} \quad (17)$$

Fala napięciowa o amplitudzie  $U_0$  (8) wędruje ku obciążeniu. W czasie od 0 do  $0,2 \mu\text{s}$  (czas propagacji linii) napięcie na wyjściu linii długiej wynosi 0. Po czasie  $t = 0,2 \mu\text{s}$  fala dociera do obciążenia, gdzie następuje jej odbicie ze współczynnikiem odbicia fali napięciowej od odbiornika  $n_2$ . Amplituda napięcia na końcu linii długiej jest superpozycją fali padającej i odbitej stąd:

$$U_{22}(0,2\mu\text{s}) = U_0 + U_1 = 100 + 33,333 = 133,333 \text{ V} \quad (18)$$

Na wejściu linii długiej amplituda napięcia wynosi  $U_0$  aż do chwili kiedy fala odbita od końca ( $U_1$ ) dotrze do początku linii długiej. Wówczas do napięcia  $U_0$  zostaną dodane fala padająca i odbita:

$$U_{11}(0,4\mu\text{s}) = U_0 + U_1 + U_2 = 100 + 33,333 - 11,111 = 122,222 \text{ V} \quad (19)$$

Fala odbita od początku linii długiej ( $U_2$ ) dotrze do końca linii długiej

$$\begin{aligned} U_{22}(0,6\mu\text{s}) &= U_0 + U_1 + U_2 + U_3 = \\ &= 100 + 33,333 - 11,111 - 3,704 = 118,519 \text{ V} \end{aligned} \quad (20)$$

Fala odbita od końca ( $U_3$ ) dotrze do początku linii długiej

$$\begin{aligned} U_{11}(0,8\mu\text{s}) &= U_0 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = \\ &= 100 + 33,333 - 11,111 - 3,704 + 1,235 = 119,753 \text{ V} \end{aligned} \quad (21)$$

Fala odbita od początku linii długiej ( $U_4$ ) dotrze do końca linii długiej

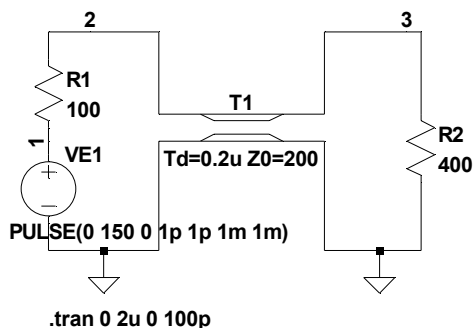
$$\begin{aligned} U_{22}(1\mu\text{s}) &= U_0 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 = \\ &= 100 + 33,333 - 11,111 - 3,704 + 1,235 + 0,412 = 120,165 \text{ V} \end{aligned} \quad (22)$$

Fala odbita od końca ( $U_5$ ) dotrze do początku linii długiej

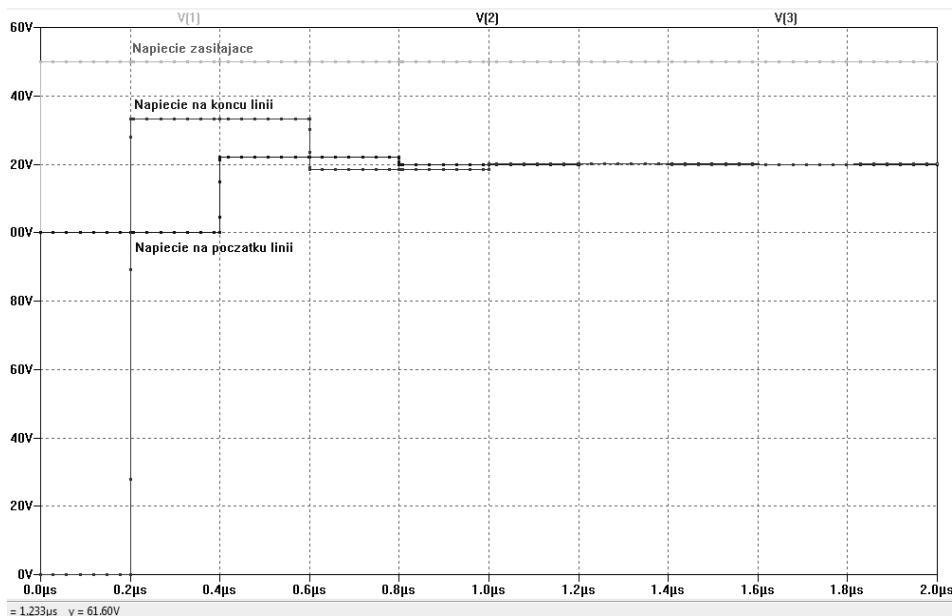
$$\begin{aligned} U_{11}(1,2\mu\text{s}) &= U_0 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 = \\ &= 100 + 33,333 - 11,111 - 3,704 + 1,235 + 0,142 - 0,137 = 120,027 \text{ V} \end{aligned} \quad (23)$$

W dowolnym punkcie linii długiej w dowolnym czasie wartość chwilowa napięcia jest równa sumie algebraicznej fali pierwotnej i wszystkich fal odbitych, które do tej chwili dotarły do tego punktu.

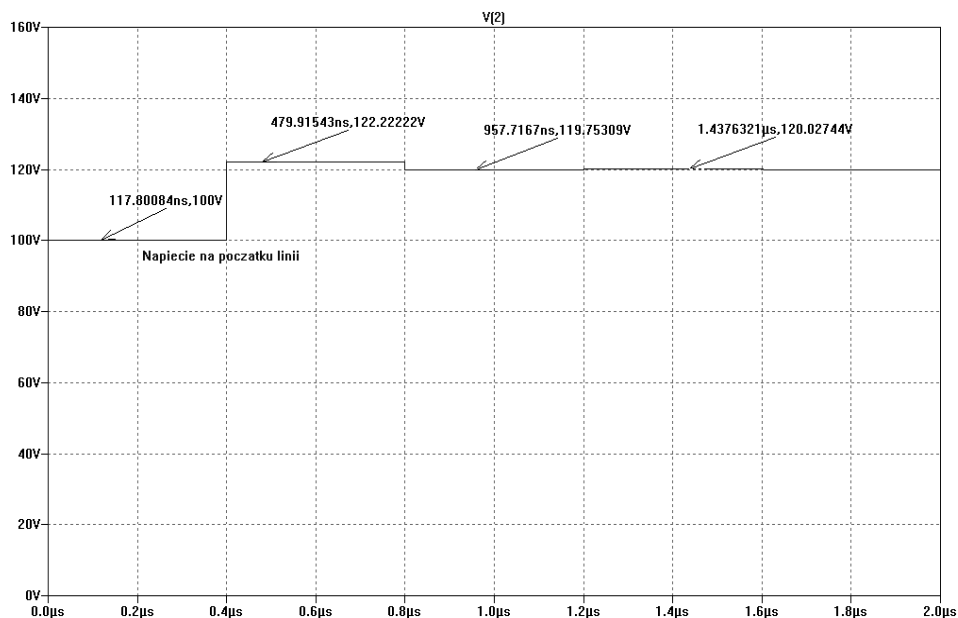
Rozwiązanie komputerowe. Na rys. 10 przedstawiono przygotowany w programie LTspice obwód zawierający linię długą bezstratną. Parametry linii, a więc czas propagacji (TD) i impedancja falowa  $Z_0$ , zapisane zostały w modelu linii długiej bezstratnej *T.Lossless\_Transmission\_Line* (linia T1, rys. 10). Źródło zasilające typu PULSE zapisano zgodnie z parametrami podanymi w tabeli na rys. 8b. Wyniki symulacji komputerowej przedstawiono na rys. 11, rys. 12 oraz rys. 13.



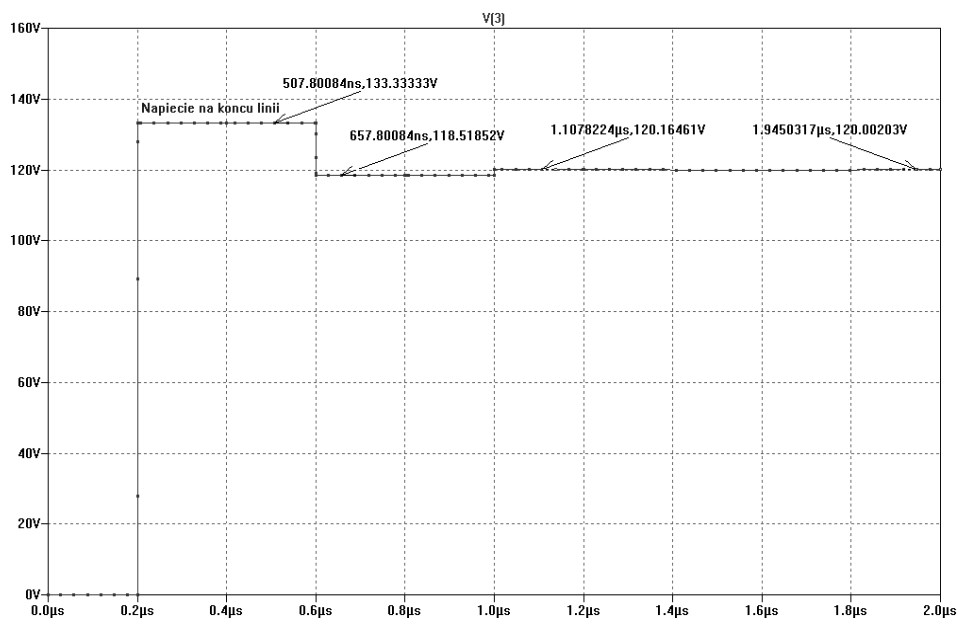
Rys. 10. Obwód zawierający linię długą bezstratną



Rys. 11. Napięcia: zasilające, na początku i na końcu linii długiej



Rys. 12. Napięcie na początku linii z uwzględnieniem dodawania do fali pierwotnej poszczególnych fal odbitych dochodzących w określonych chwilach czasu



Rys. 13. Napięcie na końcu linii długiej z uwzględnieniem dodawania do fali pierwotnej poszczególnych fal odbitych dochodzących w określonych chwilach czasu

Obwód przedstawiony na rys. 10 można w programie LTspice także zapisać jako plik tekstowy w postaci sekwencji wierszy zawierających deklaracje elementów, rodzaje analizy itp., a następnie poddać symulacji komputerowej.

Na rys. 11 przedstawiono przebiegi czasowe napięć w linii długiej przy braku dopasowania. Na rys. 12 oraz rys. 13 przedstawiono przebiegi czasowe napięcia na początku i napięcia na końcu linii, z uwzględnieniem dodawania do fali pierwotnej poszczególnych fal odbitych dochodzących w określonych chwilach czasu. Wartości odczytane na rys. 12 oraz na rys. 13 są takie same jak wartości uzyskane w obliczeniach analitycznych (18) – (23).

### 3. PODSUMOWANIE

Dostępne w programie LTspice modele linii długiej można z powodzeniem zastosować w analizie obwodów zawierających linie długie, zarówno w stanie ustalonym, jak i nieustalonym. W programie LTspice dostępne są trzy modele linii długiej: *O. Lossy Transmission Line*, *T. Lossless Transmission Line*, *U. RC Transmission Line*. Pierwsze dwa modele zastosowano w omówionych w artykule przykładach: model linii stratnej w przykładzie w pkt. 2.1 oraz model linii bezstratnej w przykładzie w pkt. 2.2. W przykładach zaprezentowano różne sposoby analizy obwodów (m.in. analiza parametryczna), przygotowanych poprzez łączenie ze sobą symboli elementów pobieranych z biblioteki programu lub opisanych jako sekwencje linii tekstu zawierających deklarację elementów, rodzaje analizy itp. W przypadku modelu linii długiej stratnej pewnym zaskoczeniem dla użytkownika programu LTspice może być fakt, że w zapisie parametrów jednostkowych stratnej linii długiej jedyną wartością jaką może przyjąć upływność jednostkowa jest zero. Powoduje to, że w przypadku analizy linii długiej, której upływność jednostkowa jest różna od zera, trzeba skorzystać z innego programu do symulacji obwodów elektrycznych (np. wspomniany w artykule PSpice Student v. 9.1 lub Multisim).

### LITERATURA

- [1] Bolkowski S., Teoria obwodów elektrycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998, ISBN 83-204-2218-3.
- [2] Brocard G., The LTspice IV Simulator. Manual, Methods and Applications. Würth Elektronik, 1<sup>st</sup> Edition May 2013, ISBN 978-3-89929-258-9.
- [3] Szczepański A., Trojnar M., Obwody i Sygnały cz.2. Laboratorium komputerowe. Instrukcje do ćwiczeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014, ISBN 978-83-7199-746-4.
- [4] Wrona J., Konspekt do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu „TECHNIKA CYFROWA”, [http://layer.uci.agh.edu.pl/~maglay/wrona/pl/podstrony/dydaktyka/Technika\\_Cyfrowa/RLC\\_LD/LinDluga\\_teor.pdf](http://layer.uci.agh.edu.pl/~maglay/wrona/pl/podstrony/dydaktyka/Technika_Cyfrowa/RLC_LD/LinDluga_teor.pdf), dostęp: 31.01.2016r.

- 
- [5] Szczepański A., Trojnar M., Teoria obwodów i sygnałów. Symulacja komputerowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011, ISBN 978-83-7199-670-2.
- [6] Wojtuszkiewicz K., Zachara Z., PSpice. Przykłady praktyczne, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2000, ISBN:83-7279-076-0.

#### THE ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES BY MEANS OF LTSPICE PROGRAM

The article presents examples of LTspice application in the analysis of circuits containing transmission lines. One of the examples concerns the analysis of a circuit with lossy transmission line in steady state. The other example concerns the analysis of a circuit with lossless transmission line in transient state. The examples present different means of circuit analysis prepared in a graphic way (combining elements of symbols available within the program) or described in a textual way (sequence of lines containing element declaration, types of analysis etc.). A comparison has been made between the chosen possibilities of LTspice program and those of PSpice Student program. These programs, used in the analysis of electrical and electronic circuits, have their advantages and disadvantages.

*(Received: 24. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)*