

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МОДЕЛИ НА ШИРОКОЛЕНТОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ С ПРЕДАВАТЕЛНИ ЛИНИИ

MODEL STUDY OF TRANSMISSION LINE TRANSFORMERS

Боян Димитров Карапенов
ТУ - Габрово

Abstract

This report presents a model study of broadband transmission line transformers in frequency responses of the used ferrite toroidal cores 10÷200 MHz and 0,5÷30 MHz with coefficient of resistant ratio 1:1. Two models are shown as a lumped equivalent circuit of the broadband transmission line transformer and their model parameters have been calculated. It is determined the influence of the model parameter values on amplitude-frequency responses and qualitative parameters. The models can be used in carrying out simulation studies of circuits in radiocommunications.

Keywords: research; model; model and qualitative parameters; transmission line transformers.

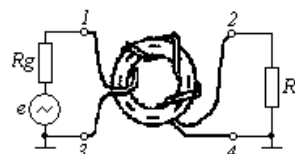
ВЪВЕДЕНИЕ

Широколенгово съгласуване на входното и изходното съпротивление при високочестотните усилвател както и между две съседни усилвателни стъпала може да се осъществи с помощта на трансформатори с предавателни линии, използващи електромагнитна връзка между първичната и вторичната навивка. При сравнително малки размери те осигуряват необходимия коефициент на трансформация на съпротивленията и минимално разсъгласуване в широка честотна лента. Те притежават висок КПД и надеждност, осигуряват преход от несиметричен към симетричен вход/изход и обратно, широко-ленгово сумиране и делене на мощности, и т.н.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Широколенговите трансформатори с предавателни линии (ШТПЛ) се изграждат чрез подходящо свързани помежду си предавателни линии, разположени върху феромагнитна сърцевина, която най-често има тороидална форма [1], [4]. Принципът на действие на такъв вид трансформатори е илюстриран на фиг. 1. Критерият за широколенговост е изпълнен, ако

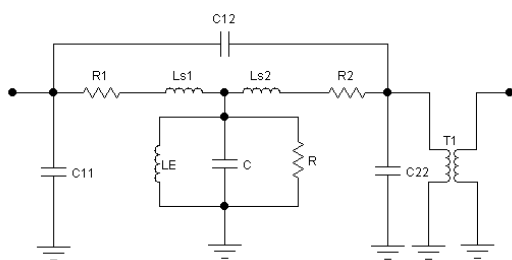
$$\frac{\Delta f}{\sqrt{f_h \cdot f_b}} \geq 0,05 \quad (1)$$



Фиг. 1. Широколенгов трансформатор с предавателни линии

В резултат на извършено моделиране [2], [3], [5] на фиг. 2 е показан пълният модел на ШТПЛ с приведени параметри на вторичната към първичната страна и идеален трансформатор. Последователно свързаните съпротивления R_1 и R_2 представят съществуващите активни загуби, съответно в предавателните линии на първичната и вторичната навивка.

C_{11} и C_{22} представят разпределените шунтиращи капацитети съответно на първичната и вторичната навивка, а C_{12} - разпределения капацитет между предавателните линии, който осъществява електромагнитната връзка при високи честоти. Заедно с разпределените индуктивности на намотките L_{s1} и L_{s2} , капацитетът C_{12} може да образува предавателна линия, чийто характеристичен импеданс може да се регулира чрез изменение в дължината на проводника, броя на навивките, ъгъла и стъпката на усукване, разположението на навивките върху феритната основа и т.н.



Фиг. 2. Пълен модел на ШТПЛ с идеален трансформатор

А. Определяне стойностите на моделните параметри на ШТПЛ

В таблица I са дадени основните каталожни параметри на тороидални ферити, произведени от фирмата Amidon.

Таблица I
Каталожни параметри на тороидални ферити на фирмата Amidon

Параметър	Марка ферит, Amidon			
	FT82-43	FT82-61	FT82-77	FT114-77
D_{dim} , mm	21,000	21,000	21,000	29,000
d_{dim} , mm	13,100	13,100	13,100	19,000
h_{dim} , mm	6,350	6,350	6,350	7,000
l_e , cm	5,260	5,260	5,260	7,420
A_e , cm ²	0,246	0,246	0,246	0,375
V_e , cm ³	1,290	1,290	1,290	2,790
Δf_s , MHz	1÷50	10÷200	0,5÷30	0,5÷30
A_l , mH/1000w	557	73,3	1170	1270
μ_r	850	125	2000	2000
ρ , Ω.cm	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$

Моделните параметри на ШТПЛ се определят както следва:

- стойностите на активното съпротивление R_1 и R_2 на първичната и вторичната навивка са

$$R1 = R2 = N \cdot \frac{\rho_{Cu} (2\pi r_{cp})}{\pi (r_2 - r_1)^2}, \Omega \quad (2)$$

при $\rho_{Cu} = 1,66 \mu\Omega/\text{cm}$;

- индуктивностите на разсейване (утечка) L_{S1} и L_{S2} , чиято типична стойност е 1÷2 %, се приема да бъде 1,3 % от стойността на индуктивността на феритната основа L при наличие на N навивки на първичната и вторичната страна, изчислена по (3) – $L_{S1} = L_{S2} = 1,3\% \cdot L$.

$$L \approx \frac{\mu_r N^2 A_e [cm^2]}{l_e [cm]} \cdot 10^{-2}, \mu H \quad (3)$$

Моделният параметър $LE = L_{11} + L_{22} + L_{\Phi IN}$ ($L_{11} = L_{22} = L$), където $L_{\Phi IN}$ е индуктивността на тороидалния ферит при наличие на една навивка;

- капацитетът на ферита C се определя от неговите геометрични размери по

$$C = 2,8 \left(1,2781 - \frac{h_{dim}}{D_{dim}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\pi^2 (D_{dim} - h_{dim}) \frac{h_{dim}}{2}}{4\pi}}, \text{ pF} \quad (4)$$

където D_{dim} и h_{dim} са в инчове (1 inch = 25,4 mm);

- активното съпротивление R се определя от каталожния параметър ρ по

$$R = \frac{\rho l_e}{S} = \frac{\rho \cdot (2\pi r_{cp})}{\pi (r_2 - r_1)^2}, \Omega \quad (5)$$

при размерности на r_2 , r_1 и r_{cp} (l_e) в m.

- собствените капацитети – C_{11} и C_{22} са измерени на практика с помощта на пасивен мост на реализиран ШТПЛ по зададените изходни данни и $C_{11} = C_{22} = 5 \text{ pF}$, а в зависимост от стъпката на усукване на използваните предавателни линии (емайлираните медни проводници) се приема стойността на междунавивковия капацитет C_{12} в границите (0,1÷10) pF.

За модела на ШТПЛ с идеален трансформатор от фиг. 2 са изчислени **моделните параметри** при следните изходни данни: марка ферити Amidon FT82-61 и FT82-77, коефициент на трансформация на съпротивлението $n_z = 1:1$, брой навивки $N = 7$, диаметър на използвания меден емайлиран проводник $d_{Cu} = 0,62 \text{ mm}$, които са представени съответно в таблица II и таблица III.

Таблица II
Моделни параметри на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61

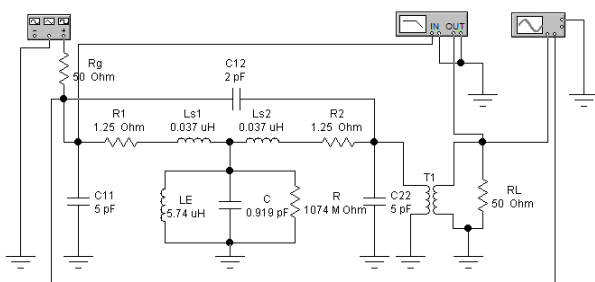
ШТПЛ	Стойности на моделните параметри		
	R, Ω	L, μH	C, pF
Ферит FT82-61	$R = 1,074 \cdot 10^9$	$L = 0,058$	$C = 0,919$
Първична страна	$R1 = 1,25$	$L11 = 2,84$ $Ls1 = 0,037$	$C11 = 5$
Вторична страна	$R2 = 1,25$	$L22 = 2,84$ $Ls2 = 0,037$	$C22 = 5$
Моделен параметр LE	-	$LE = 5,74$	-
Междунавивков капацитет $C12 = 2 \text{ pF}$ (3 ус./1 cm)			

Таблица III
Моделни параметри на ШТПЛ
с ферит Amidon FT82-77

ШТПЛ	Стойности на моделните параметри		
	R, Ω	L, μH	C, pF
Ферит FT82-77	$R=1,074 \cdot 10^9$	$L=0,935$	$C=0,919$
Първична страна	$R_1=1,25$	$L_{11}=45,82$ $L_{s1}=0,6$	$C_{11}=5$
Вторична страна	$R_2=1,25$	$L_{22}=45,82$ $L_{s2}=0,6$	$C_{22}=5$
Моделен парам. LE	-	$LE=92,58$	-
Междувивков капацитет $C_{12}=2 \text{ pF}$ (3 ус./1 см)			

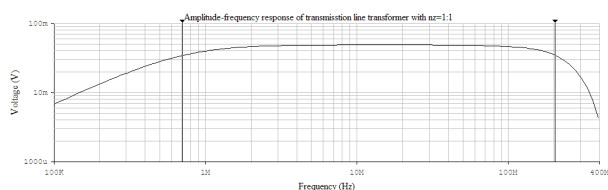
В. Симулационни изследвания на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61 и идеален трансформатор

С помощта на програмния продукт Electronics Workbench 5.12 Pro е извършено симулационно изследване на схемата с модела на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61, който с получените стойности на моделните параметри (от таблица III) е представен на фиг. 3.



Фиг. 3. Еквивалентна схема и моделни параметри на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61

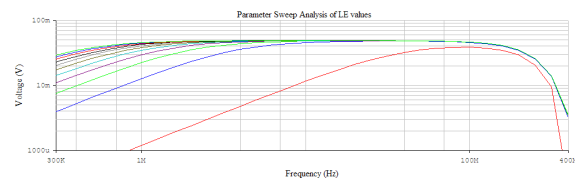
Получената амплитудночестотна характеристика (АЧХ) в резултат на извършения АС Frequency анализ е представена на фиг. 4, от която се установява, че пропусканата честотна лента на ниво -3 dB е $\Delta f = 203,7 \cdot 10^6 - 704,5 \cdot 10^3 \approx 203 \text{ MHz}$ и моделираният ТПЛ е широколентов.



Фиг. 4. АЧХ на модела на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61

За установяване влиянието на стойностите на моделните параметри на ШТПЛ върху широчината на пропусканата честотна лента са извършени параметрични анализи - Parameter Sweep Analysis.

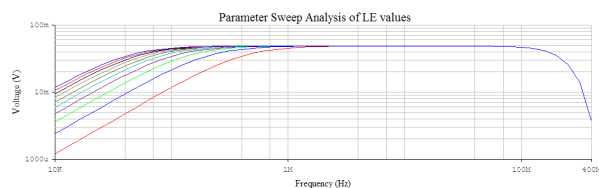
На фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7 е представено съответно влиянието на стойностите на моделните параметри LE, Ls1, и C12 върху АЧХ на модела на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61.



Легенда:

- LE Inductance: 0.1uH
- LE Inductance: 1.1uH
- LE Inductance: 2.1uH
- LE Inductance: 3.1uH
- LE Inductance: 4.1uH
- LE Inductance: 5.1uH
- LE Inductance: 6.1uH
- LE Inductance: 7.1uH
- LE Inductance: 8.1uH
- LE Inductance: 9.1uH
- LE Inductance: 10uH

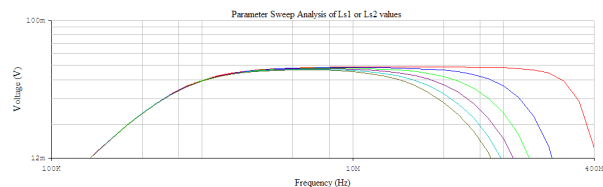
Фиг. 5,а. АЧХ на модела на ШТПЛ при стойности на моделния параметър $LE=0,1 \div 10 \mu\text{H}$



Легенда:

- LE Inductance: 10uH
- LE Inductance: 20uH
- LE Inductance: 30uH
- LE Inductance: 40uH
- LE Inductance: 50uH
- LE Inductance: 60uH
- LE Inductance: 70uH
- LE Inductance: 80uH
- LE Inductance: 90uH
- LE Inductance: 100uH

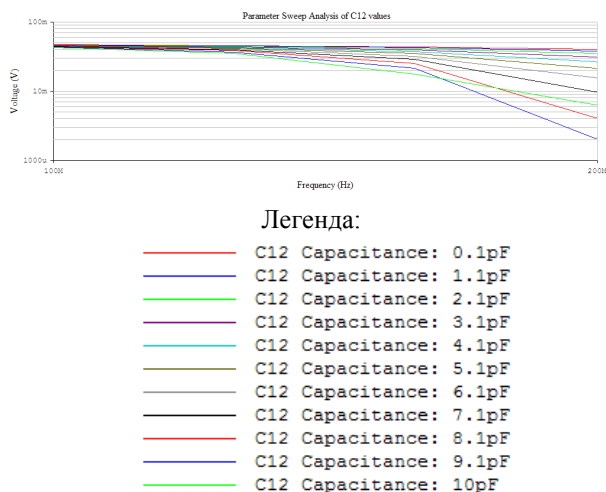
Фиг. 5,б. АЧХ на модела на ШТПЛ при стойности на моделния параметър $LE=10 \div 100 \mu\text{H}$



Легенда:

- Ls1 Inductance: 0.011uH
- Ls1 Inductance: 0.111uH
- Ls1 Inductance: 0.211uH
- Ls1 Inductance: 0.311uH
- Ls1 Inductance: 0.411uH
- Ls1 Inductance: 0.511uH

Фиг. 6. АЧХ на модела на ШТПЛ при различни стойности на моделния параметър Ls1 или Ls2



Фиг. 7. Влияние на стойността на моделния параметър C12 върху АЧХ на модела на ШТПЛ

Получените симулационни резултати (фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7 и др.) дават възможност да се направят следните **изводи**:

- стойността на активното съпротивление на тороидалния ферит R не оказва влияние върху получената АЧХ – широчина и затихване на сигнала;

- увеличаването на стойността на еквивалентната индуктивност LE , включваща индуктивността на феритната основа L с 1 навивка и собствените индуктивности на първичната и вторичната страна $L11$ и $L22$ ($LE=L11+L22+L$), което може да се извърши с увеличаване броя на навивките и/или с увеличаване на магнитната проницаемост на ферита μ_r разширява нискочестотния обхват. Ефективността при НЧ може да се увеличи от порядъка до 175 пъти ($f_{b(LE=5,74\mu H)}=704,5$ kHz, $f_{b(LE=1000\mu H)}=4$ kHz);

- намаляването на стойността на индуктивността на разсейване $Ls1$ (или $Ls2$) значително разширява ефективността на ШТПЛ при ВЧ ($f_{h(Ls1=0,01\mu H)}=280$ MHz, $f_{h(Ls1=0,5\mu H)}=31,5$ MHz);

- по-малките стойности на междунавивковия капацитет $C12$ в границите $0,1\div 10$ pF разширяват ВЧ обхват като увеличават стойността на горната гранична честота на ШТПЛ f_h ($f_{h(C12=0,1pF)}=272,7$ MHz, $f_{h(C12=10pF)}=127$ MHz) от порядъка на „ $\pm$ ” 35 %. Това се постига с по-малка стъпка или без усукване на използваните предавателни линии и равномерно разпределение на навивките по дължината на използвания тороидален ферит;

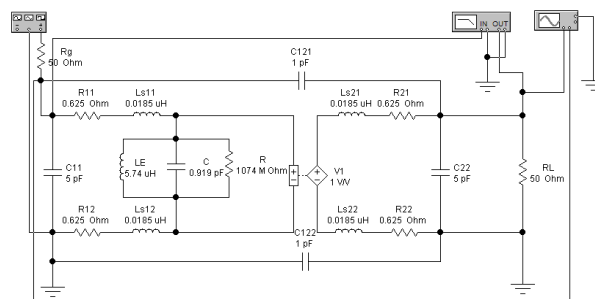
- стойността на паразитния капацитет на първичната или вторичната намотка, съот-

ветно $C11$ или $C22$, не оказват влияние върху широчината на пропусканата честотна лента на ШТПЛ.

Следователно, нискочестотният обхват на ШТПЛ може да се задава чрез стойността на магнитната проницаемост на използвания тороидален ферит μ_r и/или чрез промяна броя на навивките, а горната гранична честота е обратно-пропорционална на стойностите на индуктивността на разсейване и междунавивковия капацитет $C12$.

В. Симулационни изследвания на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61 и зависим източник на напрежение, управляван от напрежение

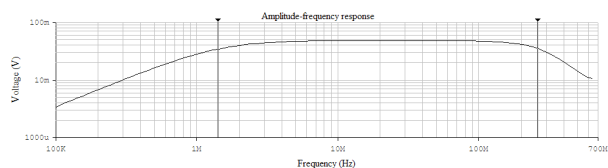
Въз основа на представения пълен модел на ШТПЛ от фиг. 3 с приведени параметри на вторичната страна към първичната на фиг. 8 е представен модел на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61 със зависим източник на напрежение, управляван от напрежение ($V1$) [5]. Чрез задаване на стойността на неговия коефициент на предаване, който примерно приема стойности $0,94\div 1$, може да бъде извършено компенсиране на затихването в пасивната еквивалентна схема.



Фиг. 8. Модел на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61 със зависим източник на напрежение, управляван от напрежение

В еквивалентната схема на ШТПЛ, представена на фиг. 8 моделните параметри са симетрични спрямо зависимия източник и моделират съответно активните съпротивления, индуктивностите и капацитетите на първичната и вторичната страна. Зависимият източник на напрежение $V1$ с коефициент на предаване 1 (при $nz=1:1$) е свързан между разделените стойности на моделните параметри $R1$, $Ls1$ и $R2$, $Ls2$ на две. Подобно моделиране на ШТПЛ е по-близко до неговото реално и конструктивно изпълнение.

Получената АЧХ на модела на ШТПЛ от фиг. 8 е представена на фиг. 9. Той осигурява широчина на пропусканата честотна лента $\Delta f = (260,815 \cdot 10^6 - 1,4 \cdot 10^6) = 259,415$ MHz.



Фиг. 9. АЧХ на модела на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-61 със зависим източник на напрежение, управляван от напрежение

За установяване на влиянието на моделните параметри LE, Ls1 и C12 върху АЧХ са извършени параметрични симулации спрямо стойностите на LE, Ls1 и C12. Получените резултати са аналогични на представените на фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7 за модела на ШТПЛ с идеален трансформатор, от които се установява запазване на стойностите на долната f_b , горната f_h гранична честота и пропусканата честотна лента Δf . Основното различие се получава при нарастване на стойността на моделния параметър Ls1, където в областта на ВЧ (в честотния обхват 380÷400 MHz) възникват резонанси.

Предимството на предложения модел на ШТПЛ със зависим източник на напрежение, управляван от напрежение (фиг. 8) е, че може да се компенсира затихването на сигнала на неговия изход и по този начин да се зададе и осигури неговата висока ефективност и КПД.

В таблица IV и таблица V са представени получените f_b , f_h и Δf съответно при различни стойности на индуктивността на разсейване Ls1/Ls2 и междувивковия капацитет C12.

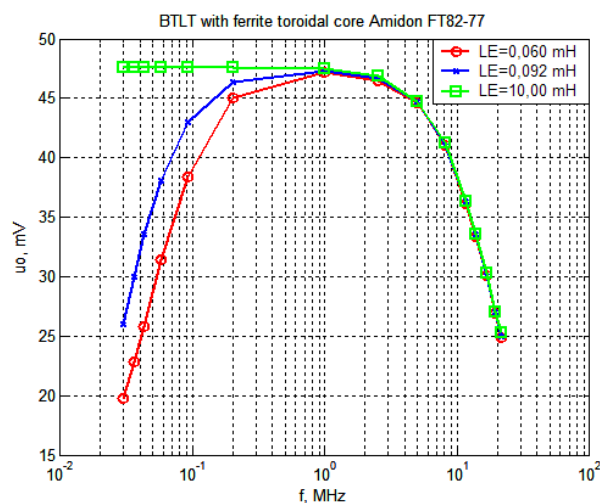
Таблица IV
Качествени показатели на ШТПЛ

nz	ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77			
	Ls1, μ H	f_b , kHz	f_h , MHz	Δf , MHz
1:1	Ls1.3%=0,6	82,60	14,07	13,99
	Ls1%=0,46	83,18	18,46	18,38
	Ls2%=0,92	80,81	9,30	9,22

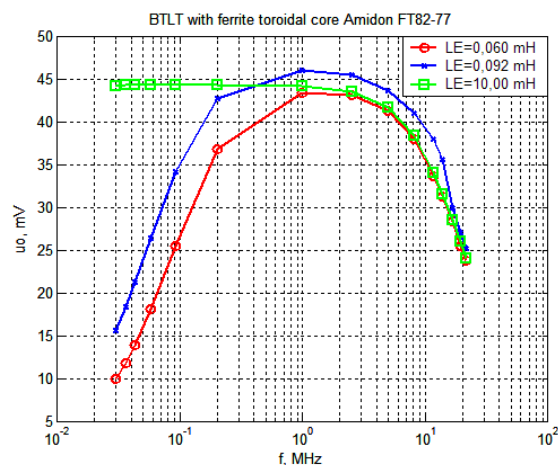
Таблица V
Качествени показатели на ШТПЛ

nz	ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77			
	C12, pF	f_b , kHz	f_h , MHz	Δf , MHz
1:1	C12=1,0	82,60	14,07	13,99
	C12=0,5	82,58	14,14	14,06
	C12=2,0	82,58	14,14	14,06

Влиянието на стойността на моделния параметър LE върху АЧХ е представено в графичен вид на фиг. 10 и фиг. 11 съответно за моделите от фиг. 3 и фиг. 8, а получените качествени показатели – в таблица VI.



Фиг. 10. АЧХ на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77, съответно при LE=0,06 mH, LE=0,09 mH и LE=10 mH (за модела от фиг. 3)



Фиг. 11. АЧХ на ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77, съответно при LE=0,06 mH, LE=0,09 mH и LE=10 mH (за модела от фиг. 8)

Таблица VI
Качествени показатели на ШТПЛ

Модел фиг.	ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77			
	LE, mH	f_b , kHz	f_h , MHz	Δf , MHz
3	LE=0,06	65,660	13,780	13,710
	LE=0,09	42,880	13,700	13,270
	LE=10	0,394	13,750	13,750
8	LE=0,06	125,890	14,130	14,004
	LE=0,09	83,180	14,030	13,200
	LE=10	0,778	13,910	13,909

Влиянието на стойността на коефициента на предаване a на зависимия източник на напрежение, управляван от напрежение от модела на ШТПЛ (фиг. 8), се установява с качествените показатели, представени в таблица VII. Неговата стойност влияе само върху амплитудата на

Таблица VII
Качествени показатели на ШТПЛ

a , V/V	ШТПЛ с ферит Amidon FT82-77			
	u_o , mV	f_b , kHz	f_h , MHz	Δf , MHz
1,00	46,00	82,51	14,22	14,14
1,25	57,52	82,51	14,22	14,14
1,50	69,03	82,51	14,22	14,14
1,75	80,53	82,51	14,22	14,14
2,00	92,04	82,51	14,22	14,14
2,15	98,94	82,51	14,22	14,14

изходното напрежение като в зададения обхват на изменение на a при $n_z=1:1$ стойностите на f_b , f_h и Δf се запазват.

При моделиране на ШТПЛ с коефициенти на трансформация на съпротивлението $n_z \neq 1:1$ е необходимо да се зададе съответният коефициент на транс-формация по напрежение n_U . При $n_z=1:4$ $U_0=2 \cdot U_i$ или $n_U=1:2$,

поради което би следвало да се използва моделът на ШТПЛ със зависим източник на напрежение, управляван от напрежение - фиг. 8 като неговият коефициент на предаване по напрежение в случая е $n_U=2$ (1V/2V). За ШТПЛ с $n_z=4:1$ $n_U=2:1$ и $n_U=0,5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените симулационни резултати доказват точността на представените модели на ШТПЛ и коректността на изчислените стойности на моделните им параметри, които напълно покриват зададения работен честотен обхват на използваните тороидални ферити. Получените стойности дават възможност за извършването на оптимизация на качествените им показатели f_b , f_h и Δf . Това позволява предложените модели да бъдат използвани за моделиране на ШТПЛ при извършването на симулационни изследвания на ШУМ с ШТПЛ, на мощни ширококоловни усилватели, на мостови схеми за сумиране и делене на сигнали, и други устройства, използвани в радио-предавателните системи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Добрев Д., Л. Йорданова. Радиокомуникации, част първа. София, СИЕЛА, 2001.
- [2] Немигенчев И., Б. Карапенов, Моделиране и изследване на ширококоловни трансформатори с предавателни линии, УНИТЕХ, Габрово, 2004, стр. I199-I203.
- [3] Немигенчев И., Б. Карапенов, Моделиране на ширококоловни трансформатори с предавателни линии, УНИТЕХ, Габрово, 2006, стр. I260-I264.
- [4] Тихчев Хр., Радиопредавателни устройства, Техника, София, 1992.
- [5] Karapenev B., Modeling and Study of Broadband Transmission Line Transformers, ICEST, Ohrid, 2010, pp. 157-160.