

Упражнение № 7

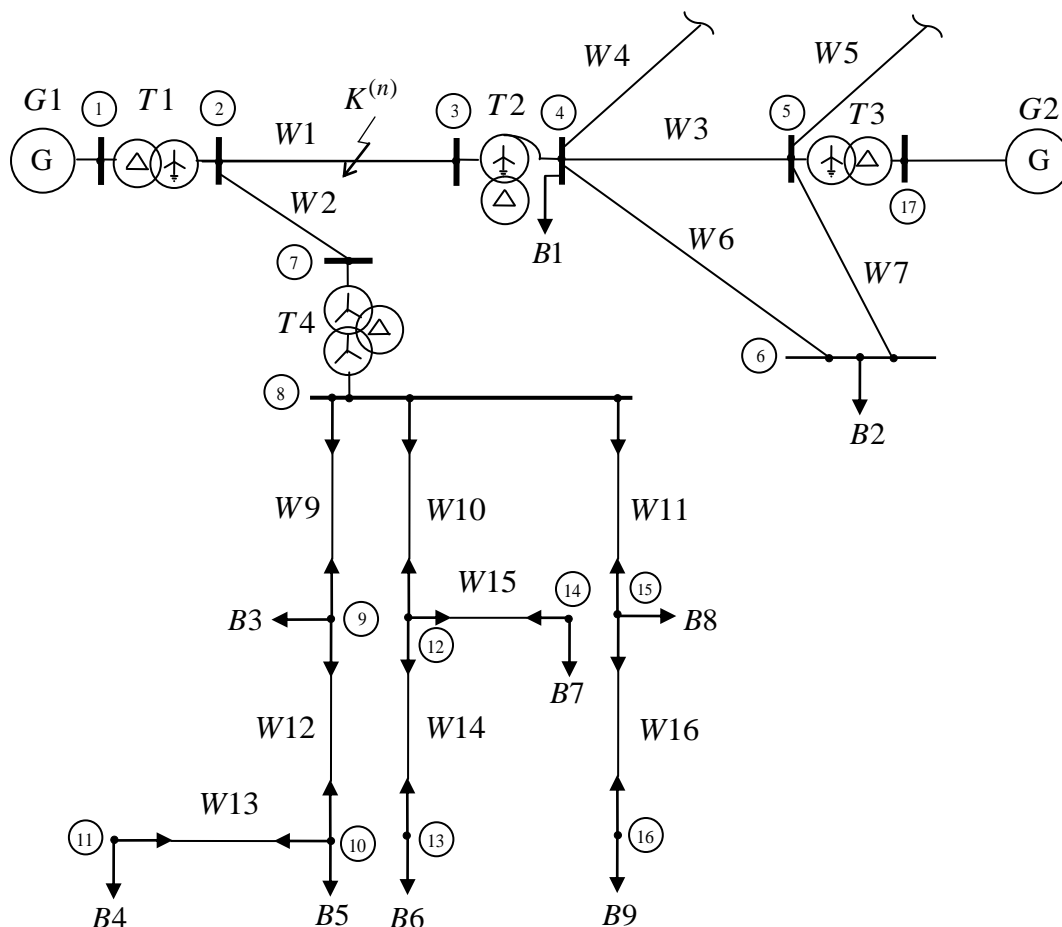
ТЕМА: ИЗЧИСЛВЯВАНЕ НА ЕФЕКТИВНАТА СТОЙНОСТ НА ПЕРИОДИЧНИЯ ТОК ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИ КЪСИ СЪЕДИНЕНИЯ

Задача: На отстояние L_K възел 2 върху електропровод $W1$ в ЕЕС от фиг.7.1 е възникнало несиметрично к.с.: 1) еднофазно; 2) двуфазно; 3) двуфазно със земя. Необходимо е да се изчислят за началния момент на к.с. ефективните стойности на периодичните съставки на токовете в трите фази в мястото на к.с., в изводите за високо напрежение на $T1$ и в заземлението на неутралата му. Резултатите да се представят в експоненциална форма на записване на комплексните числа и да се нанесат върху триполюсната принципна схема.

Параметрите на елементите на ЕЕС за съответните варианти са дадени в табл.3.1÷табл.3.7. (в края на текста на упражнението). Отстоянието на к.с. L_K от възел 2 върху $W1$ е индивидуално за всеки студент и се изчислява чрез израза: $L_K = \frac{K_K \cdot K_N}{100} \cdot L_{W1}$, km, където K_N – номерът на студента в

съответната му група, а $K_K = \begin{cases} 10, & \text{ако } K_N \leq 10 \\ 1, & \text{ако } K_N > 10 \end{cases}$.

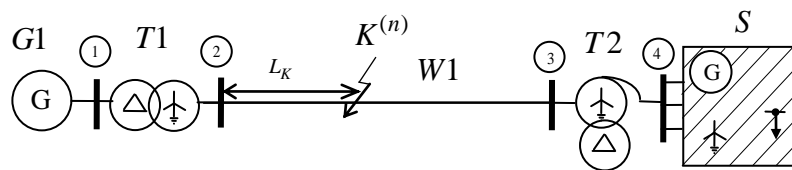
За индуктивните съпротивления на електропроводите за нулева последователност да се приемат $X_{0,W} \approx 3,5X_W$.



Фиг.7.1

Методични указания.

- 1. Съставяне на принципна изчислителна схема (вж. задача 2 от упражнение № 3)



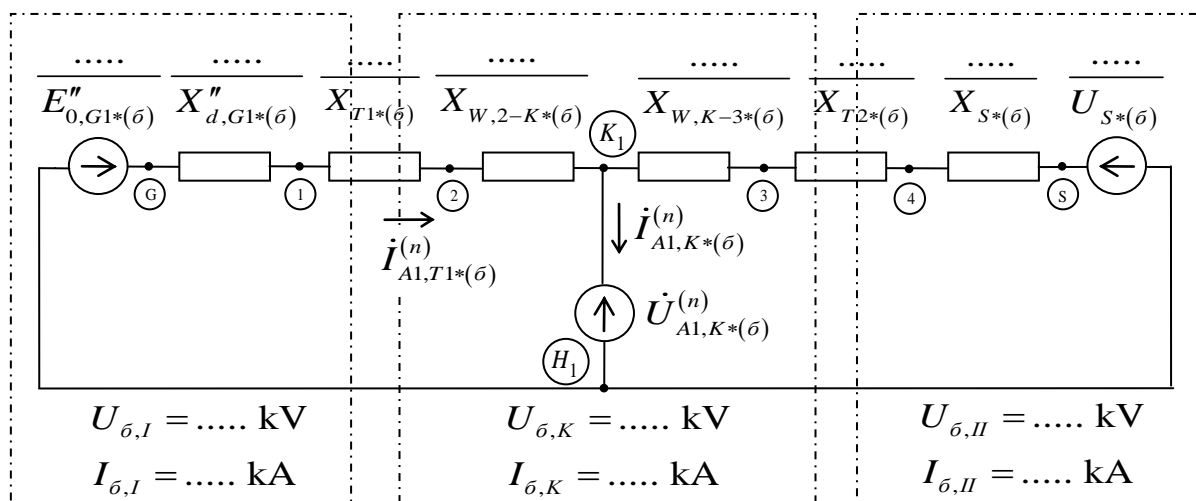
Фиг.7.2.

- 2. Съставяне на еквивалентна заместваща схема (е.з.с.)

За несиметрични неуравновесени к.с. е необходимо да се съставят три еквивалентни заместващи схеми – за правата, обратната и нулевата последователност. Двухазното к.с. е уравновесено и за него не се съставя схема на нулевата последователност.

- 2.1. Е.з.с. за правата последователност

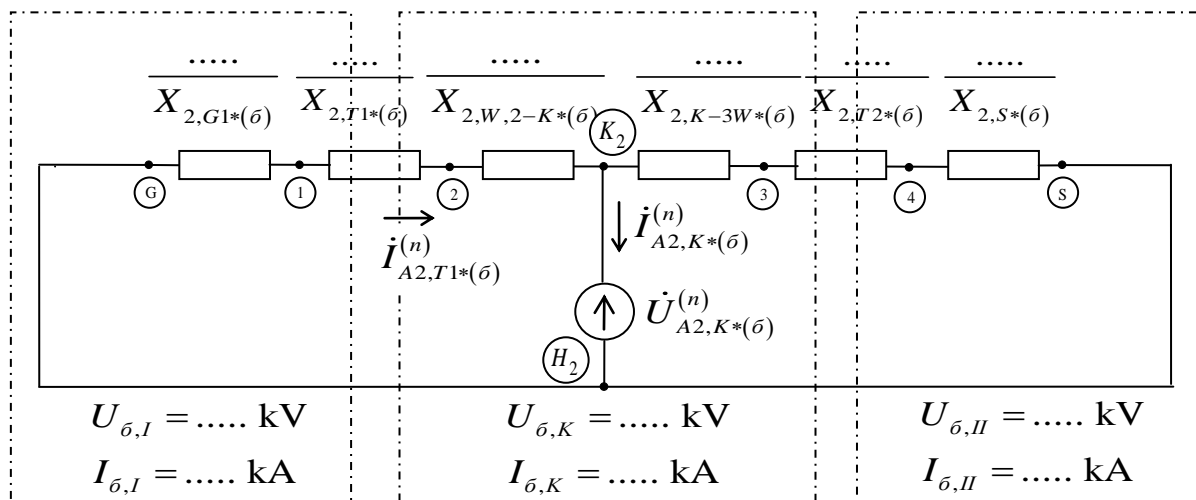
Схемата на правата последователност е аналогична на тази при трифазното к.с. с тази разлика, че възела с к.с. се отбелязва с K_1 и се нарича край на схемата. Той не се свързва директно с нулевата шина, а се свързва през комплексния източник на права последователност $\dot{U}_{A1,K^*(\sigma)}^{(n)}$. Нулевата шина в тази схема се отбелязва с H_1 и се нарича начало на схемата за права последователност. Схемата е показана на фиг.7.3. На нея са нанесени и търсените токове.



Фиг.7.3.

- 2.2. Е.з.с. за обратната последователност

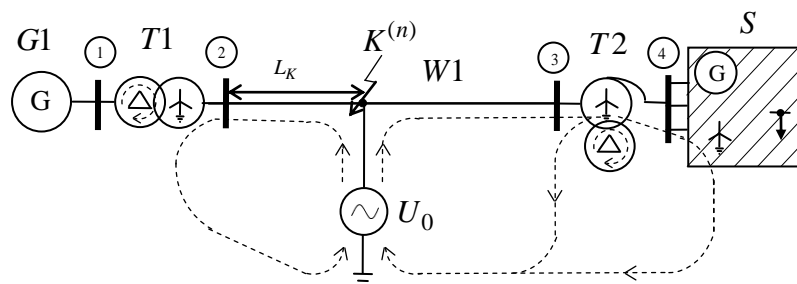
Е.з.с. за обратната последователност по конфигурацията съответства на е.з.с. за права последователност. Разликата е в стойностите на параметрите. Е.д.н. на източниците са нулеви. Единствен източник в схемата е компенсация $\dot{U}_{A2,K^*(\sigma)}^{(n)}$ свързан между края K_2 и началото H_2 на схемата. Съпротивленията за обратна последователност на статичните елементи (трансформатор, електропровод, реактор) са равни на съпротивленията за права последователност, т.е. $X_{2,T} = X_T$; $X_{2,W} = X_W$; $X_{2,LR} = X_{LR}$. За динамичните елементи (генератори, двигатели) съпротивленията за обратна последователност се различават от тези за правата. В задачата X_2 на $G1$ се използват каталожните данни от табл.7.1. За обобщената система S може да се приеме $X_{2,S} \approx X_S$. За разглеждането място на несиметрични к.с., еквивалентната схема за обратна последователност е показана на фиг.7.4.



Фиг.7.4.

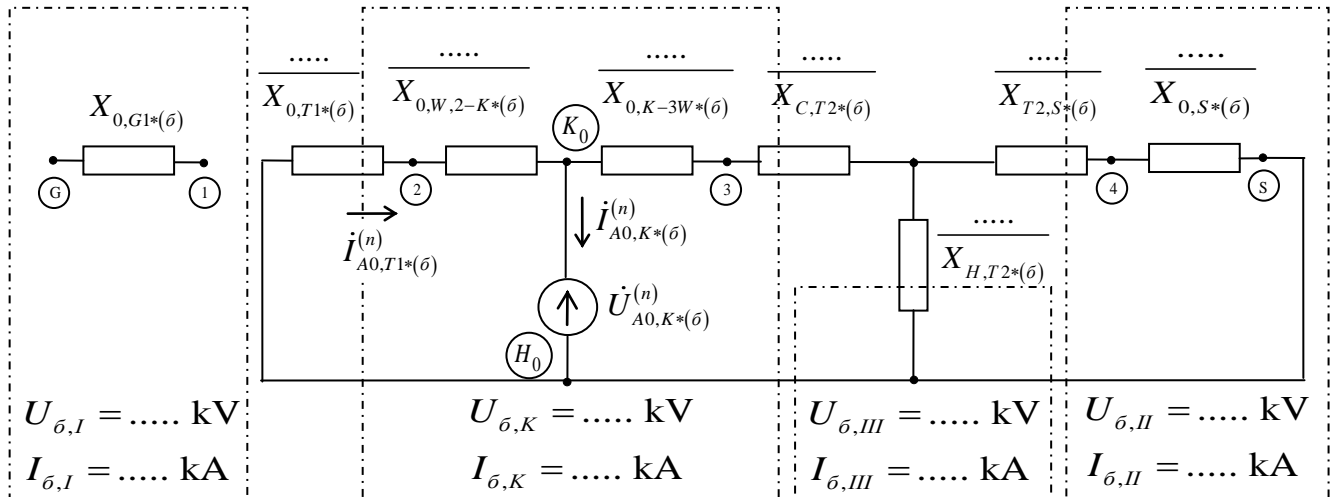
□ 2.3. Е.з.с. за нулевата последователност

Е.з.с. за нулевата последователност в общия случай се различава по параметри и конфигурация от останалите две е.з.с. Схемата включва само елементите, през които може да протече ток с нулева последователност. Това лесно се установява, ако в изчислителната принципна схема се включи еднофазен източник на напрежение между мястото на к.с. и земя, както това е показано на фиг.7.5.



Фиг.7.5. Установяване на елементите, през които протича ток с нулева последователност

Вижда се, че ток с нулева последователност няма да протича само в генератора $G1$, защото той е присъединен към намотката на $T1$, свързана в триъгълник. За отбелязване е обаче, че ток ще се затвори вътре в намотките, свързана в триъгълник, на трансформаторите $T1$ и $T2$. Затова в е.з.с. $T2$ ще се представи с пълната заместваща схема, т.е. с три съпротивления, защото е тринамотъчен (за разлика от схемите на права и обратна последователност, в които се представя с едно съпротивление). Съобразявайки горното за е.з.с. за нулева последователност се получава схемата от фиг.7.6.



Фиг.7.6.

Параметрите на схемата се изчисляват чрез съотношенията:

$$X_{0,T1*(\bar{\sigma})} = X_{T1*(\bar{\sigma})} ;$$

$$X_{0,W*(\bar{\sigma})} \approx 3.5 X_{W*(\bar{\sigma})} ;$$

$$X_{C,T2*(\bar{\sigma})} = \frac{u_{k,C} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном,T2}} ;$$

$$X_{B,T2*(\bar{\sigma})} = \frac{u_{k,B} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном,T2}} ;$$

$$X_{H,T2*(\bar{\sigma})} = \frac{u_{k,H} \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном,T2}} ;$$

$$u_{k,H} \% = 0,5 (u_{k,B-H} \% + u_{k,C-H} \% - u_{k,B-C} \%)$$

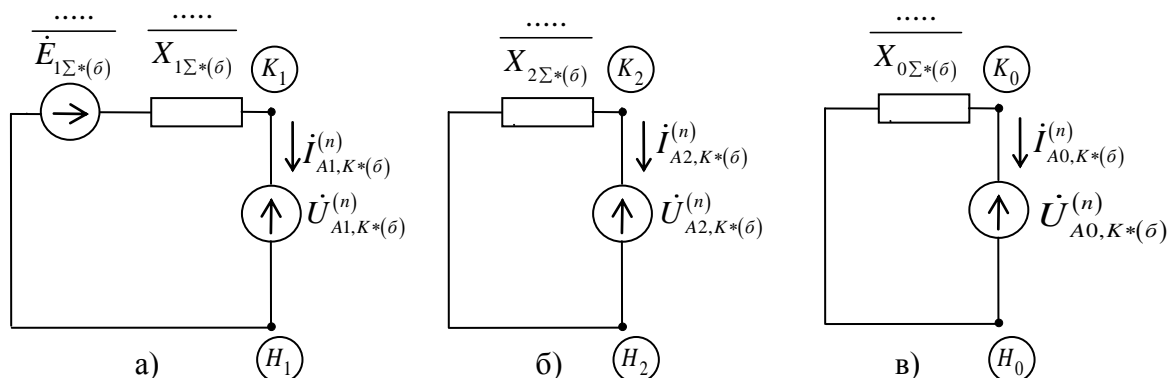
$$u_{k,C} \% = 0,5 (u_{k,B-C} \% + u_{k,C-H} \% - u_{k,B-H} \%)$$

$$u_{k,B} \% = 0,5 (u_{k,B-C} \% + u_{k,B-H} \% - u_{k,C-H} \%)$$

$$X_{0,S*(\bar{\sigma})} = 3 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_k^{(1)}} - 2 \cdot X_{S*(\bar{\sigma})} ;$$

□ 3. Еквивалентно преобразуване на схемите спрямо мястото на к.с.

Чрез последователно еквивалентно преобразуване (трансфигуриране) изходните е.з.с. се свеждат до едноконтурните схеми от фиг.7.7.



Фиг.7.7.

□ 4. Изчисляване на симетриращите шунтове

Използват се известните изрази:

$$\Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(1)} = X_{2,\Sigma*(\bar{\sigma})} + X_{0,\Sigma*(\bar{\sigma})}, \quad \text{о.е.};$$

$$\Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(2)} = X_{2,\Sigma*(\bar{\sigma})}, \quad \text{о.е.};$$

$$\Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(1,1)} = \frac{X_{2,\Sigma*(\bar{\sigma})} \cdot X_{0,\Sigma*(\bar{\sigma})}}{X_{2,\Sigma*(\bar{\sigma})} + X_{0,\Sigma*(\bar{\sigma})}}, \quad \text{о.е.}$$

□ 5. Изчисляване на симетричните съставки на тока в мястото на к.с.

□ 5.1. За еднофазно к.с.

$$\dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma*(\bar{\sigma})}}{j(X_{1\Sigma*(\bar{\sigma})} + \Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(1)})}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(1)} = \dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1)}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(1)} = \dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1)}, \quad \text{о.е.}$$

□ 5.2. За двуфазно к.с.

$$\dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(2)} = \frac{E_{1\Sigma*(\bar{\sigma})}}{j(X_{1\Sigma*(\bar{\sigma})} + \Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(2)})}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(2)} = -\dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(2)}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(2)} = 0, \quad \text{о.е.}$$

□ 5.3. За двуфазно к.с. със земя

$$\dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1,1)} = \frac{E_{1\Sigma*(\bar{\sigma})}}{j(X_{1\Sigma*(\bar{\sigma})} + \Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(1,1)})}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(1,1)} = \frac{-X_{0,\Sigma*(\bar{\sigma})}}{X_{2\Sigma*(\bar{\sigma})} + X_{0\Sigma*(\bar{\sigma})}} \cdot \dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1,1)}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{i}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(1,1)} = \frac{-X_{2,\Sigma*(\bar{\sigma})}}{X_{2\Sigma*(\bar{\sigma})} + X_{0\Sigma*(\bar{\sigma})}} \cdot \dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(1,1)}, \quad \text{о.е.}$$

□ 6. Изчисляване на симетричните съставки на напрежението в мястото на к.с.

Използват се известните изрази, независимо от вида на к.с. (т.е. $n=1;2;1,1$)

$$\dot{U}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(n)} = j\Delta X_{*(\bar{\sigma})}^{(n)} \cdot \dot{i}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{U}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(n)} = -jX_{2\Sigma*(\bar{\sigma})} \cdot \dot{i}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}, \quad \text{о.е.};$$

$$\dot{U}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(n)} = -jX_{0\Sigma*(\bar{\sigma})} \cdot \dot{i}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}, \quad \text{о.е.}$$

□ 7. Изчисляване на симетричните съставки на тока в извода за високо напрежение на T1:

От изходните е.з.с. (фиг.7.3, фиг.7.4 и фиг.7.6) е видно, че независимо от вида на к.с., симетричните съставки на тока в изводите за високо напрежение (индекс „В“) на T1 ще се изчисляват чрез изразите:

$$\text{от фиг.7.3} \rightarrow \dot{I}_{A1,T1,B}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{0,G1*(\bar{\sigma})}'' - \dot{U}_{A1,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}}{j(X_{d,G1*(\bar{\sigma})}'' + X_{T1*(\bar{\sigma})} + X_{W,2-K*(\bar{\sigma})})} \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA};$$

$$\text{от фиг.7.4} \rightarrow \dot{I}_{A2,T1,B}^{(n)} = \frac{-\dot{U}_{A2,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}}{j(X_{2,G1*(\bar{\sigma})} + X_{2,T1*(\bar{\sigma})} + X_{2,W,2-K*(\bar{\sigma})})} \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA};$$

$$\text{от фиг.7.6} \rightarrow \dot{I}_{A0,T1,B}^{(n)} = \frac{-\dot{U}_{A0,K*(\bar{\sigma})}^{(n)}}{j(X_{0,T1*(\bar{\sigma})} + X_{0,W,2-K*(\bar{\sigma})})} \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA}$$

□ 8. Изчисляване на търсените фазни токове

Фазните токове се изчисляват чрез обратната S-трансформация¹ и изчислените симетрични съставки на токовете.

□ 8.1 В мястото на к.с.

$$\dot{i}_{A,K}^{(n)} = (\dot{I}_{A1,K}^{(n)} + \dot{I}_{A2,K}^{(n)} + \dot{I}_{A0,K}^{(n)}) \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA};$$

$$\dot{i}_{B,K}^{(n)} = (a^2 \cdot \dot{I}_{A1,K}^{(n)} + a \cdot \dot{I}_{A2,K}^{(n)} + \dot{I}_{A0,K}^{(n)}) \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA};$$

$$\dot{i}_{C,K}^{(n)} = (a \cdot \dot{I}_{A1,K}^{(n)} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2,K}^{(n)} + \dot{I}_{A0,K}^{(n)}) \cdot I_{\bar{\sigma},K}, \quad \text{kA}$$

$$\text{където } a = 1^{\angle 120^\circ} = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = 1^{\angle 240^\circ} = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

При еднофазно к.с. токът към земя е равен на тока в повредената фаза, т.е. $\dot{I}_{\text{земя}}^{(1)} = \dot{I}_{A,K}^{(1)}$, а при двуфазно к.с. към земя – сума от токовете на повредените фази, т.е. $\dot{I}_{\text{земя}}^{(1,1)} = \dot{I}_{B,K}^{(1,1)} + \dot{I}_{C,K}^{(1,1)}$.

□ 8.2. В изводите на високо напрежение на трансформатор T1

$$\dot{i}_{A,T1,B}^{(n)} = \dot{I}_{A1,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{A2,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{A0,T1,B}^{(n)}, \quad \text{kA};$$

$$\dot{i}_{B,T1,B}^{(n)} = a^2 \cdot \dot{I}_{A1,T1,B}^{(n)} + a \cdot \dot{I}_{A2,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{A0,T1,B}^{(n)}, \quad \text{kA};$$

$$\dot{i}_{C,T1,B}^{(n)} = a \cdot \dot{I}_{A1,T1,B}^{(n)} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{A0,T1,B}^{(n)}, \quad \text{kA}$$

□ 8.3. В заземяващия токовод на звездния център на намотката за високо напрежение на T1

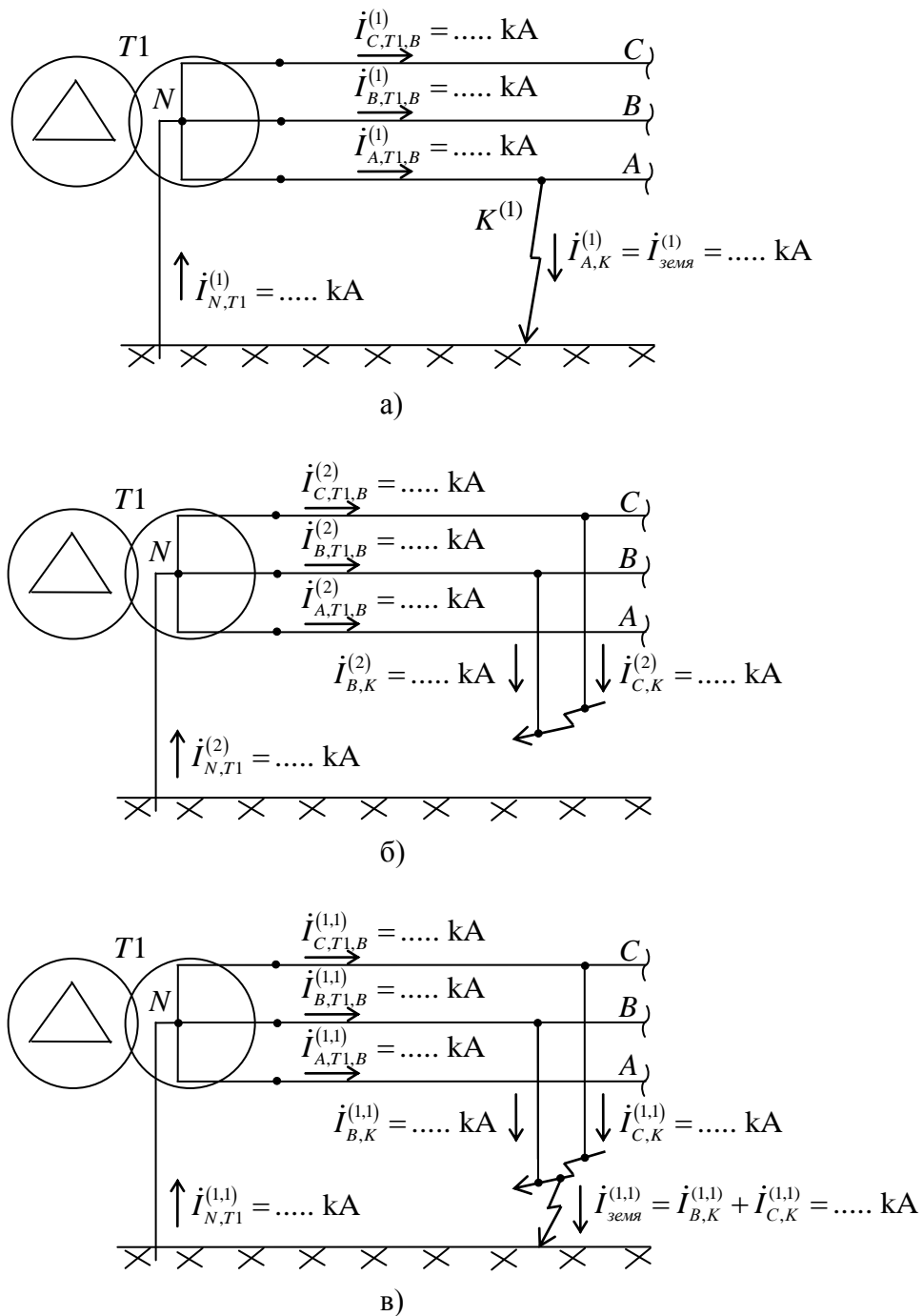
$$\dot{i}_{N,T1}^{(n)} = \dot{I}_{A,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{B,T1,B}^{(n)} + \dot{I}_{C,T1,B}^{(n)}, \quad \text{kA}$$

□ 9. Нанасяне на резултата върху триполюсната схема

Начертава се триполюсна схема на намотката за високо напрежение на T1 и частта на W1 от T1 до мястото на к.с. Отразява се конкретния вид к.с. и се нанасят изчислените токове, записани в

¹ Виж раздел 1.2. от „Моделиране в ЕЕС – Записки на лекции.“

експоненциална форма. За случая на еднофазно к.с. тази схема е показана на фиг.7.8а), за двуфазно к.с. – на фиг.7.8б) и за двуфазно к.с. със земя – на фиг.7.8в).



Фиг.7.8.

**Данни за ЕЕС:**

табл.3.1 – параметри на G1 и G2

Вариант	$P_{ном}$	$U_{ном}$	$\cos \varphi_{ном}$	$x_{d^*(H)}$	$x'_{d^*(H)}$	$x''_{d^*(H)}$	$x_{2^*(H)}$	$R_{a^*(H)}$	T_{d0}	T_d''
	MW	kV	–	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	s	s
1	63	6,3	0,8	1,6	0,27	0,2	0,24	0,003	5,4	0,12
2	100	10,5	0,8	1,72	0,24	0,183	0,23	0,0025	6,2	0,18
3	165	15,75	0,85	1,78	0,3	0,21	0,26	0,0028	7,1	0,13

Изходен режим на генераторите преди смущението – номинален.

табл.3.2 – параметри на T1 и T3

Вариант	$S_{ном}$	$U_{ном,B}$	$U_{ном,H}$	u_k	ΔP_k	Свързване
	MVA	kV	kV	%	kW	–
1	125	121	6,3	10,5	320	Y ₀ d-1
2	125	121	10,5	10,5	320	Y ₀ d-11
3	200	121	15,75	11,0	570	Y ₀ d-9

табл.3.3 – параметри на T2

Вариант	$S_{ном}$	$U_{ном,B}$	$U_{ном,C}$	$U_{ном,H}$	$u_{k,BC}$	$u_{k,BH}$	$u_{k,CH}$	ΔP_k	Свързване
	MVA	kV	kV	kV	%	%	%	kW	–
1	125	230	115	35	11	35	22	255	Y ₀ y ₀ d-0/5
2	125	230	115	35	11	31	19	290	Y ₀ y ₀ d-0/5
3	200	230	115	35	10,5	32	20	430	Y ₀ y ₀ d-0/5

табл.3.4 – параметри на T4

Вариант	$S_{ном}$	$U_{ном,B}$	$U_{ном,H}$	u_k	ΔP_k	Свързване
	MVA	kV	kV	%	kW	–
1	16	110	21	10,5	45	Y ₀ d-5
2	25	110	21	10,5	65	Y ₀ d-9
3	40	110	21	10,5	82	Y ₀ d-3

табл.3.5 – параметри на въздушните електропроводи

№	Фазови проводници								Мълниезащитно въже				
	L_w	марка	S	d_ϕ	R_ϕ	D_{cp}	h_{cp}	S_{cp}	марка	R_v	X_g	$D_{вcp}$	h_v
	km	–	mm ²	mm	Ω/km	m	m	m	–	Ω/km	Ω/km	m	m
W1	25	АСО	400	27,2	0,08	5,2	10,5	22	С50	3,3	0,8	4	15
W2	28	АСО	400	27,2	0,08	5,2	10,5	22	С50	3,3	0,8	4	15
W3	42	АС	240	21,5	0,13	5,2	10,5	22	С50	3,3	0,8	4	15

табл.3.6 – параметри на кабелните електропроводи

№	L_w	марка	$C_{раб}$
	km	–	μF/km
W9	2,2	АСБ-150	0,51
W10	4,1	АСБ-150	0,51
W11	1,8	АСБ-150	0,51
W12	1,2	АСБ-150	0,51
W13	3,8	АСБ-120	0,46
W14	5,2	АСБ-120	0,46
W15	7,1	АСБ-95	0,42
W16	8,4	АСБ-95	0,42

табл.3.7 – мощности на к.с. във възел 4

Вариант	$S_K^{(3)}$	$S_K^{(1)}$
	MVA	MVA
1	1500	1000
2	1700	1500
3	1800	1500