



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА  
катедра „Електроенергетика“



---

РАЗРАБОТЕНИ ТЕМИ ЗА ДЪРЖАВЕН ИЗПИТ  
ЗА ОБРАЗОВАТЕЛНО-КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН

„БАКАЛАВЪР“

СПЕЦИАЛНОСТ „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

РАЗДЕЛ III

**“Моделиране и къси съединения в електроенергийните системи”**

Съставил:

доц. д-р инж. Ю. Рангелов

Версия 02.2019 г.

Темите за държавен изпит в Раздел IV са съставени изцяло върху материали и учебници, разработени под ръководството на проф. д-р инж. мат. Крум Герасимов. Съставителят се е постарал да обнови и допълни съдържанието на помагалото, както и да подготви тестовите въпроси, свързани с темите в раздела.

## СЪДЪРЖАНИЕ

ТЕМА 1. Симетрична координатна система (1,2,0) .....	3
1.1. Трансформационни матрици .....	3
1.2. Преобразуване на режимните и схемни параметри от фазни координати А,В,С в 1,2,0 и обратно.....	3
1.3. Израз за трифазната пълна мощност в 1,2,0.....	4
1.4. Област на приложение на 1,2,0. ....	4
ТЕМА 2. Привеждане в относителни единици (Система на относителните единици).....	5
2.1. Определения.....	5
2.2. Избор на базисни величини .....	6
2.3. Изрази за привеждане в относителни единици на режимните и схемни параметри на ЕЕС.....	6
2.4. Предимства и недостатъци на системата относителни единици. ....	8
ТЕМА 3. Характерни параметри на разпространението на електромагнитния процес в еднородна линия при входно синусоидално напрежение. Формули за тяхното изчисляване и пояснения за участващите величини .....	9
ТЕМА 4. Стационарен режим на единичен електропровод със синусоидално входно напрежение .....	11
4.1. Уравнение в симетрични координати на връзките между токовете и напреженията в началото и края на електропровода.....	11
4.2. Представяне на уравненията със заместващи схеми в симетрични координати .....	11
ТЕМА 5. Съставяне на заместващи схеми на трансформатори в симетрични координати .	13
5.1. Т-образни заместващи схеми на двунамотъчен силов трансформатор със свързване $Y_0/d-11$ и заземяване на звездния център през $Z_{NB}$ с използване на идеален трансформатор .....	13
5.2. Изрази за изчисляване на параметрите на заместващите схеми.....	15
ТЕМА 6. Уравнение на електромеханичното движение на синхронен агрегат. Форми на записване на уравнението в именувани и относителни единици .....	16
ТЕМА 7. Общи сведения за късите съединения (к.с.) в ЕЕС. Съставки и характерни величини на тока на к.с. Мощност на к.с. ....	18
7.1. Общи сведения.....	18
7.2. Съставки и характерни величини на тока на к.с. (т.к.с.). ....	18
ТЕМА 8. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми на ЕЕС за изчисляване на режимите на к.с. в разпределителните мрежи.....	21

ТЕМА 9. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми за изчисляване на режимите на к.с. в преносните мрежи високо напрежение и в уредбите на генераторно напрежение .....	24
ТЕМА 10. Изчисляване на характерните величини на трифазно к.с. на шините на трансформатор захранван от шини с „твърдо“ напрежение. Диапазон на изменение на характерните величини за системните и мрежовите трансформатори .....	27
ТЕМА 11. Изчисляване на характерните величини на тока на трифазно к.с. на шините на генератор. Диапазон на характерните величини на тока на к.с. при генератори с и без АРВ .....	29
ТЕМА 12. Изчисляване на характерните величини на тока на режима на трифазно к.с. в разпределителни мрежи. Нива на мощността на к.с. ....	33
ТЕМА 13. Изчисляване на характерните величини на режима на трифазно к.с. в уредби за генераторно напрежение и в преносните мрежи за високо напрежение. Диапазони на мощността на к.с. за различните нива на напрежението .....	36
ТЕМА 14. Изчисляване на несиметрични къси съединения в ЕЕС чрез правилото за еквивалентност на правата последователност. Комплексни заместващи схеми. Векторни диаграми на тока и напрежението в мястото на к.с. ....	39
ТЕМА 15. Съотношение между режимните параметри за режимите на различните видове къси съединения. Диапазони, регулиране на съотношенията, разпределение на симетричните съставлящи на напреженията .....	42
ТЕМА 16. Изчисляване на ефективните стойности на режимните параметри на земно съединение в мрежи с различно заземяване на звездния център.....	45
ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА .....	48

## ТЕМА 1. Симетрична координатна система (1,2,0)

### 1.1. Трансформационни матрици

Характерно за преобразуването от  $A, B, C$  в  $1, 2, 0$  е, че се използва една и съща трансформационна матрица за токовете и напреженията, т.е.

$$\mathbf{T}_I = \mathbf{T}_U = \mathbf{S} \quad (1.1)$$

Подбора на елементите на  $\mathbf{S}$  е направен съобразно изискването за диагонализиране на матрицата на възловите проводимости (съпротивления) за елементи със схемна параметрична симетрия. Съобразно това  $\mathbf{S}$  е със следната структура от безразмерни коефициенти:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1.2)$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

където 
$$a = 1 \cdot e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Тъй като елементите на  $\mathbf{S}$  са константи, то при прехода от  $A, B, C$  в  $1, 2, 0$  не се променя структурата на системите алгебрични и диференциални уравнения в математичното описание на ЕЕС.

### 1.2. Преобразуване на режимните и схемни параметри от фазни координати $A, B, C$ в $1, 2, 0$ и обратно

Системата  $1, 2, 0$  намира основно приложение при описания, съставяни с комплексите на токовете и напреженията. Тогава преобразуването от  $A, B, C$  и обратно се извършва със съотношенията

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}; \quad \mathbf{U}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}; \quad \mathbf{I} = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{I}_S; \quad \mathbf{U} = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{U}_S, \quad (1.4)$$

където 
$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_S = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_S = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Матрицата на съпротивленията в симетричните координати се изчислява от матрицата  $\mathbf{Z}$  в  $A, B, C$  чрез израза

$$\mathbf{Z}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{S}^{-1}. \quad (1.6)$$

Елементите на матрицата  $\mathbf{Z}$  са собствените и взаимните съпротивления на фазите и в общия случай са ненулеви, т.е.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{AA} & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} \\ \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{BC} \\ \dot{Z}_{CA} & \dot{Z}_{CB} & \dot{Z}_{CC} \end{bmatrix}$$

Съобразно (1.6) при схемна симетрия, а именно  $\dot{Z}_{AA} = \dot{Z}_{BB} = \dot{Z}_{CC} = \dot{Z}$  и  $\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{AC} = \dot{Z}_{BA} = \dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_{CA} = \dot{Z}_{CB} = \dot{Z}_M$ , матрицата  $\mathbf{Z}_S$  се получава диагонална, т.е.

$$\mathbf{Z}_S = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_0 \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

където

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z} - \dot{Z}_M \\ \dot{Z}_0 = \dot{Z} + 2 \cdot \dot{Z}_M \end{cases}. \quad (1.7a)$$

Това позволява трифазния елемент с електрически и магнитни връзки между фазите да се разглежда формално в системата 1,2,0, като съставен от три несвързани помежду си електрически вериги.

Освен (1.6) за преобразуване на схемните параметри важат и още следните съотношения:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{Z}_S \cdot \mathbf{S} \\ \mathbf{Y}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{S}^{-1}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_S \cdot \mathbf{S} \end{cases} \quad (1.8)$$

### 1.3. Израз за трифазната пълна мощност в 1,2,0.

В системата 1,2,0 трифазната мощност, се изчислява чрез израза

$$\dot{S} = 3 \cdot \dot{U}_1 \cdot \hat{I}_1 + 3 \cdot \dot{U}_2 \cdot \hat{I}_2 + 3 \cdot \dot{U}_0 \cdot \hat{I}_0 \quad (1.9)$$

### 1.4. Област на приложение на 1,2,0.

Системата 1,2,0 намира основно приложение при, чийто елементи са със схемна симетрия. Възможно е това преобразуване да се приложи и върху моментните стойности на трифазните токове и напрежения. В резултат се получават също симетрични съставящи, които за разлика от разглежданите по-горе е прието да се наричат *пространствени симетрични съставящи*. Необходимо е да се знае, че *пространствените симетрични съставящи* и *симетричните съставящи* на една и съща трифазна система се различават съществено.

## ТЕМА 2. Привеждане в относителни единици (Система на относителните единици)

### 2.1. Определения

„Привеждането“ е линейно преобразуване на координатите със следните свойства:

- матриците на преобразуването на тока  $\Pi_I$  и на напрежението  $\Pi_U$  са диагонални, неизродени и затова не създават линейни комбинации от „старите“ координати. Реално се постига само мащабиране на „старите“ координати;

- елементите на  $\Pi_I$  и  $\Pi_U$  са безразмерни комплексни числа и удовлетворяват условието  $\Pi_I^{-1} = \hat{\Pi}_U$ , поради което преобразуването е инвариантно по отношение на измерителните единици и мощността.

Следователно валидни са следните съотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathring{\mathbf{I}} = \Pi_I \cdot \mathbf{I} = (\hat{\Pi}_U)^{-1} \cdot \mathbf{I}; \quad \mathbf{I} = \Pi_I^{-1} \cdot \mathring{\mathbf{I}} = \hat{\Pi}_U \cdot \mathring{\mathbf{I}}; \\ \mathring{\mathbf{U}} = \Pi_U \cdot \mathbf{U}; \quad \mathbf{U} = \Pi_U^{-1} \cdot \mathring{\mathbf{U}}; \\ \mathring{\mathbf{S}} = \mathbf{U} \cdot \mathring{\mathbf{I}} = \Pi_U^{-1} \cdot \mathring{\mathbf{U}} \cdot \Pi_U \cdot \mathring{\mathbf{I}} = \mathring{\mathbf{U}} \cdot \mathring{\mathbf{I}}. \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathring{\mathbf{Z}} = \Pi_U \cdot \mathbf{Z} \cdot \hat{\Pi}_U \\ \mathring{\mathbf{Y}} = (\hat{\Pi}_U)^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \Pi_U^{-1} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

където със знака „о“ над буквеното означение се отбелязват приведените параметри.

Необходимо е да се отбележи, че (2.1) и (2.2) са приложими за коя да е координатна система, т.е. под  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{Y}$  в случая не трябва да се разбира, че са параметри само в системата  $ABC$ , те могат да са в коя да е друга система.

Вижда се, че всички преобразувания могат да се направят на базата само на матрицата  $\Pi_U$ . В практиката много често за елементи на  $\Pi_U$  се избират комплексните коефициенти на трансформацията на напрежението на трансформаторите, свързващи различни нива на напрежението в ЕЕС. По този начин параметрите на цялата ЕЕС се привеждат към едно ниво на напрежение, с което се създават известни удобства при числените анализи, поради отстраняването на рязкото изменение на напрежението и тока при преминаване през трансформаторите.

Привеждането в относителни единици е преобразуване. Матриците  $\Pi_I$  и  $\Pi_U$  са диагонални като елементите им са размерни реални числа. Следователно преобразуването не е инвариантно по отношение на измерителните единици.

Числените стойности на елементите на  $\Pi_I$  и  $\Pi_U$  се избират произволно (без нула), но дименсиите им са в съответствие с измервателните единици на привежданите величини така, че приведените величини се получават безразмерни. В такъв случай се казва, че приведените величини са измерени в “системата на относителните единици”.

Физическите величини се определят качествено чрез съответната им измервателна единица (дименсия - A, V, W и пр.) и количествено – чрез числото пред дименсията. В такъв случай е прието да се казва, че величината е измерена в именувани единици (и.е.). Например  $I=10\text{ A}$  означава електрически ток, представен с 10 и.е. – A (ампери). Измерването в именувани единици (и.е.) означава да се определи, колко пъти измерваната величина е по-голяма от определена базисна величина, приета за измервателна единица в системата на измервателните единици (например СИ). Ако в качеството на базисна величина (измервателна единица) се приеме величина, чиято големина е произволна се счита, че измерената величина е в относителни единици (о.е.), т.е.

$$A_{*(\bar{b})} = \frac{A}{A_{\bar{b}}}, \text{ о.е. от } A_{\bar{b}} \quad (2.3)$$

$$A_{\%} = A_{*(\bar{b})} \cdot 100 = 100 \cdot \frac{A}{A_{\bar{b}}}, \% \text{ от } A_{\bar{b}} \quad (2.3a)$$

Звездичката (\*) показва, че величината  $A$  е изразена в о.е., и индексът ( $\bar{b}$ ) - че тя е отнесена към приетата базисна величина  $A_{\bar{b}}$ . Трябва да се обърне внимание върху следните два факта: 1) величините  $A$  и  $A_{\bar{b}}$  са с една и съща дименсия; 2) величината в о.е.  $A_{*(\bar{b})}$  е безмислена, ако не е посочена базисната ѝ величина  $A_{\bar{b}}$ .

Обратно, ако е дадено  $A_{*(\bar{b})}$  при  $A_{\bar{b}}$  (и.е.)

$$A = A_{*(\bar{b})} \cdot A_{\bar{b}}, \text{ и.е.;} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{A\%}{100} \cdot A_{\bar{b}}, \text{ и.е.} \quad (2.4a)$$

## 2.2. Избор на базисни величини

Когато  $A_{\bar{b}} = A_n$ , т.е. за базисна величина е избрана номиналната стойност на параметъра  $A$  на даден елемент от ЕЕС, то вместо индекс ( $\bar{b}$ ) се пише индекс ( $n$ ), а величината е в о.е. при номинални базисни условия за този елемент.

$$A_{*(n)} = \frac{A}{A_n} \quad (2.5)$$

## 2.3. Изрази за привеждане в относителни единици на режимните и схемни параметри на ЕЕС

В общия случай изборът на базисния ток  $I_{\bar{b}}$  и базисното напрежение  $U_{\bar{b}}$  може да се направи независимо един от друг и без ограничения. В практическите изчисления обаче се

взимат предвид някои числени удобства, като работа с цели или нормализирани числа и др., така че изборът да е целесъобразен за конкретния случай.

С избраните  $I_{\bar{o}}$  и  $U_{\bar{o}}$  се изчисляват базисните величини на останалите електрически параметри. В трифазната електрическа верига базисните величини съответно за линейното напрежение  $U_{\bar{o}}$  (kV или V), за фазния ток  $I_{\bar{o}}$  (kA или A) за фазното съпротивление  $Z_{\bar{o}}$  ( $\Omega$  или  $m\Omega$ ) и за трифазната мощност  $S_{\bar{o}}$  (MVA или kVA) са свързани помежду си чрез съответните съотношения:

$$S_{\bar{o}} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}}; \quad (2.6)$$

$$Z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}}. \quad (2.7)$$

Поради това само две от тях могат да се избират произволно. Освен  $I_{\bar{o}}$  и  $U_{\bar{o}}$ , често пъти произволно се избират  $S_{\bar{o}}$  и  $U_{\bar{o}}$ .

В о.е. се изразяват и други електрически и неелектрически величини. Например, за единица ъглова скорост се приема синхронната  $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НОМ}}$ , т.е.  $\omega_{\bar{o}} = \omega_s$ . Тогава произволна ъглова скорост  $\omega$ , rad/s в о.е. ще бъде

$$\omega_{*(\bar{o})} = \frac{\omega}{\omega_{\bar{o}}}. \quad (2.8)$$

Със синхронна ъглова скорост се измерва и базисното време  $t_{\bar{o}} = \frac{1}{\omega_{\bar{o}}}$ , s. При приета  $\omega_{\bar{o}}$  могат да се определят и базисните единици за:

- индуктивности

$$L_{\bar{o}} = \frac{Z_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{o}} \cdot \omega_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}} \cdot \omega_{\bar{o}}}, \text{ H}; \quad (2.9)$$

- за потокосцепления

$$\psi_{\bar{o}} = L_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}} = \frac{Z_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}} \cdot I_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot \omega_{\bar{o}}}, \text{ Wb}; \quad (2.10)$$

- капацитети

$$C_{\bar{o}} = \frac{1}{\omega_{\bar{o}} \cdot Z_{\bar{o}}} = \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2 \cdot \omega_{\bar{o}}}, \text{ F}. \quad (2.11)$$

Трябва да се подчертае, че в о.е. се представят и комплексите на електрическите параметри (2.12).

$$\dot{S}_{*(\bar{o})} = \frac{\dot{S}}{S_{\bar{o}}} = \frac{S^{|\varphi|}}{S_{\bar{o}}} = \frac{P}{S_{\bar{o}}} + j \cdot \frac{Q}{S_{\bar{o}}} = P_{*(\bar{o})} + j \cdot Q_{*(\bar{o})}. \quad (2.12)$$



## 2.4. Предимства и недостатъци на системата относителни единици.

Предимствата на системата от о.е., се заключават основно в:

- приблизително изравняване на някои каталожни данни на елементите на ЕЕС, които в и.е. силно се различават. Това подпомага тяхното запомняне;

- опростяване на някои формули, включващи цифрови коефициенти. Например, за трифазната мощност е валидно  $\dot{S}_{*(\bar{o})} = \dot{U}_{*(\bar{o})} \cdot \hat{I}_{*(\bar{o})}$ , т.е. без коефициента  $\sqrt{3}$  (или 3 при израза за мощността за фазно напрежение);

- числено изравняване на разноименни физични величини. Например, фазното и линейно напрежение в о.е. са числено равни. Действително

$$U_{\phi,*(\bar{o})} = \frac{U_{\phi}}{U_{\phi,\bar{o}}} = \frac{U/\sqrt{3}}{U_{\bar{o}}/\sqrt{3}} = \frac{U}{U_{\bar{o}}} = U_{*(\bar{o})}, \quad (2.13)$$

където  $U_{\phi,\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3}}$  е фазното базисно напрежение. Също така фазната и трифазната мощност в о.е. са числено равни.

Изразът за изчисляване на съпротивлението  $Z$  в о.е. може да се запише във вида

$$\dot{Z}_{*(\bar{o})} = \frac{\dot{Z}}{Z_{\bar{o}}} = \frac{\dot{Z} \cdot I_{\bar{o}}}{(U_{\bar{o}}/\sqrt{3})} = \frac{\Delta U_z}{U_{\phi,\bar{o}}} = \Delta U_{z*(\bar{o})}, \text{ о.е.}, \quad (2.14)$$

откъдето следва, че всяко съпротивление в о.е. е числено равно на пада на напрежението в това съпротивление, измерено в относителни единици при  $U_{\phi,\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3}}$ , когато през него протича ток равен на  $I_{\bar{o}}$ . Обратно, всеки пад върху даден елемент в о.е. е числено равен на съпротивлението в о.е. на този елемент, ако протичащия през него ток е приет за базисен.

Недостатъци на системата о.е. са:

- лишаването на физическите величини от дименсия, която изразява качествената им страна. Това може да създаде затруднения при оценяване на явленията;

- възникването на допълнителна изчислителна работа, която се свежда до първоначално привеждане на величините в о.е. при зададени базисни величини и в края на изчислението – до прилагане на обратното преобразуване (2.4), т.е. определените в резултат на изчислението величини в о.е. окончателно се намират в и.е.

Поради предимствата на системата о.е. и простотата на преобразуването тези допълнителни изчисления са оправдани в инженерната практика.

### ТЕМА 3. Характерни параметри на разпространението на електромагнитния процес в еднородна линия при входно синусоидално напрежение. Формули за тяхното изчисляване и пояснения за участващите величини

При входно синусоидално напрежение с кръгова честота  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  характерните параметри са:

- константата на разпространение  $\dot{\gamma} = \alpha + j \cdot \beta$ , където  $\alpha$  е константа на затихването, а  $\beta$  - константа на фазата.
- вълново съпротивление  $\dot{Z}_B$ ;
- фазова скорост (скорост на разпространение на вълните)  $v$ ;
- дължина на вълната  $\lambda$ ;

Процесите в трифазния електропровод се описват с разпространението на три типа, падащи и отразени вълни, съответно за правата, обратната и нулевата последователност, а характерните им параметри се изчисляват както следва:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\gamma}_1 = \sqrt{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Y}_1} = \sqrt{(R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) \cdot (G_1 + j \cdot \omega \cdot C_1)} = \alpha_1 + j \cdot \beta_1; \\ \dot{\gamma}_2 = \dot{\gamma}_1; \\ \dot{\gamma}_0 = \sqrt{\dot{Z}_0 \cdot \dot{Y}_0} = \alpha_0 + j \cdot \beta_0. \end{array} \right. , \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_{B,1} = \sqrt{\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Y}_1}}; \quad \dot{Z}_{B,2} = \dot{Z}_{B,1}; \\ \dot{Z}_{B,0} = \sqrt{\frac{\dot{Z}_0}{\dot{Y}_0}}; \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = \frac{\omega}{\beta_1}; \\ v_2 = v_1; \\ v_0 = \frac{\omega}{\beta_0}; \end{array} \right. \quad (3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{v_1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_1}; \\ \lambda_2 = \lambda_1; \\ \lambda_0 = \frac{v_0}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_0} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

където:  $-\dot{Z}_1, \dot{Z}_0$  - съпротивление на електропровода за единица дължина за права и нулева последователност,  $\Omega/\text{km}$ ;  $-\dot{Y}_1, \dot{Y}_0$  - напречна проводимост на електропровода за единица дължина за права и нулева последователност,  $\text{S}/\text{km}$ ;

Като се отчете, че  $\dot{Z}$  се измерва в  $\Omega/\text{km}$  и  $\dot{Y}$  се измерва в  $1/\Omega/\text{km}$ , то следва, че  $\dot{y}$  ще се измерва в  $1/\text{km} + j \cdot \text{rad}/\text{km}$ , а  $\dot{Z}_B$  - в  $\Omega$ ,  $v$  - в  $\text{km}/\text{s}$  и  $\lambda$  - в  $\text{km}$ .

При линии без загуби ( $R = 0$  и  $G = 0$ ),

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\gamma}_S = j \cdot \beta_S = j \cdot \omega \cdot \sqrt{L_S \cdot C_S}; \quad Z_{B,S} = \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}; \\ v_S = \frac{1}{\sqrt{L_S \cdot C_S}}; \quad \lambda_S = \frac{1}{f \cdot \sqrt{L_S \cdot C_S}}; \quad S = 1, 2, 0 \end{array} \right. \quad (3.5)$$

където

$\dot{\gamma}_S, \beta_S, v_S, \lambda_S$ , – параметри на вълната в симетрични координати;

$Z_{B,S}$  – вълново съпротивление в симетрични координати;

$L_S$  – индуктивност в симетрични координати за единица дължина,  $\text{H}/\text{km}$ ;

$C_S$  – капацитет на в симетрични координати за единица дължина,  $\text{F}/\text{km}$ ;

## ТЕМА 4. Стационарен режим на единичен електропровод със синусоидално входно напрежение

Известно е, че в стационарен режим със синусоидално входно напрежение в еднородната линия, напрежението и тока имат вълнообразно (синусоидално) изменение във времето и пространството (по протежение на линията). Вълните имат променлива амплитуда в различни точки на линията. Напрежението и токът в дадена точка  $x$  и в даден момент  $t(u(x,t), i(x,t))$  се определят чрез наслагване на правата (падащата) вълна на напрежението и тока и на обратната (отразената) вълна на напрежението и тока.

### 4.1. Уравнение в симетрични координати на връзките между токовете и напреженията в началото и края на електропровода.

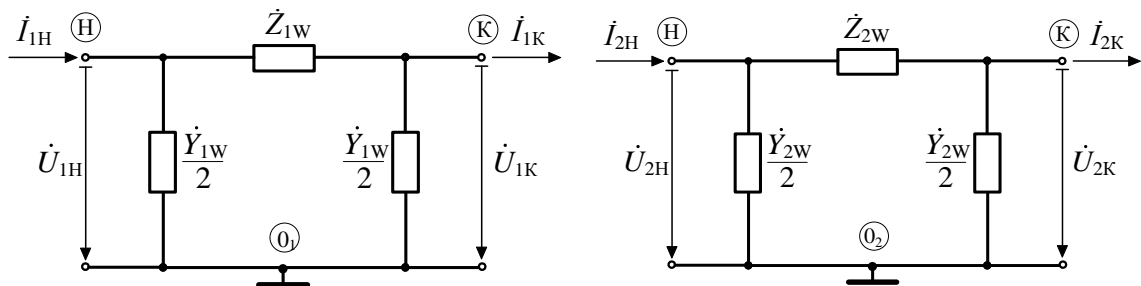
Връзката на симетричните съставлящи на напрежението ( $U_{S,H}$ ) и тока ( $I_{S,H}$ ) в началото от същите в края на електропровода ( $U_{S,K}, I_{S,K}$ ) е

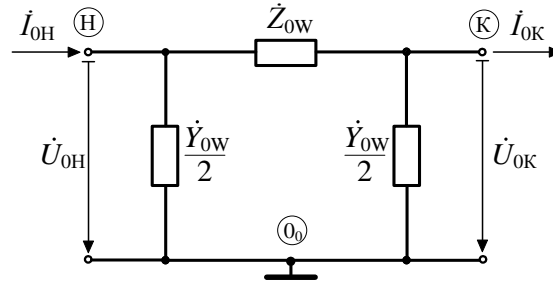
$$\begin{cases} \dot{U}_{S,H} = \dot{U}_{S,K} \cdot ch(\dot{\gamma}_S \cdot l) + \dot{I}_{S,K} \cdot \dot{Z}_{B,S} \cdot sh(\dot{\gamma}_S \cdot l); \\ \dot{I}_{S,H} = \frac{\dot{U}_{S,K}}{\dot{Z}_{B,S}} \cdot sh(\dot{\gamma}_S \cdot l) + \dot{I}_{S,K} \cdot ch(\dot{\gamma}_S \cdot l); \\ s = 1, 2, 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

$\dot{\gamma}_S$  - константата на разпространение на вълната в симетрични координати,  $1/\text{km} + j \cdot \text{rad}/\text{km}$   
 $l$  - дължина на електропровода, km;  $\dot{Z}_{B,S}$  - вълново съпротивление,  $\Omega$ .

### 4.2. Представяне на уравненията със заместващи схеми в симетрични координати

Уравнения (4.1) могат да се представят със следните П-образни заместващи схеми за права, обратна и нулева последователност:





Фиг. 5.1. Заместващи схеми в симетрични координати на електропровод с дължина  $L \leq 300$  km и синусоидални входни напрежения

Параметрите на заместващите схеми на електропровода се изчисляват по следните изрази:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{1W} &= \dot{Z}_1 \cdot l; & \dot{Y}_{1W} &= \dot{Y}_1 \cdot l; \\ \dot{Z}_{2W} &= \dot{Z}_2 \cdot l; & \dot{Y}_{2W} &= \dot{Y}_2 \cdot l; \\ \dot{Z}_{0W} &= \dot{Z}_0 \cdot l; & \dot{Y}_{0W} &= \dot{Y}_0 \cdot l. \end{aligned}$$

където:

$\dot{Z}_{1W}, \dot{Z}_{2W}, \dot{Z}_{0W}$  - пълно съпротивление на електропровода за права, обратна и нулева последователност,  $\Omega$ ;

$\dot{Y}_{1W}, \dot{Y}_{2W}, \dot{Y}_{0W}$  - проводимост на електропровода за права, обратна и нулева последователност, S;

$l$  – дължина на електропровода, km;

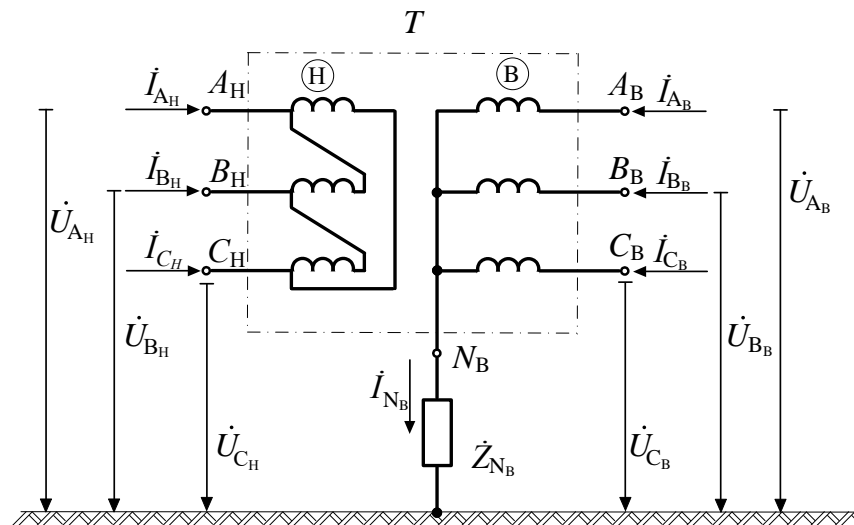
$\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$  - съпротивление на електропровода за единица дължина за права, обратна и нулева последователност,  $\Omega/\text{km}$ ;

$\dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_0$  - проводимост на електропровода за единица дължина за права, обратна и нулева последователност, S/km.

## ТЕМА 5. Съставяне на заместващи схеми на трансформатори в симетрични координати

### 5.1. Т-образни заместващи схеми на двунамотъчен силов трансформатор със свързване $Y_0/d-11$ и заземяване на звездния център през $Z_{NB}$ с използване на идеален трансформатор

Принципната схема на трансформатор  $Y_0/d-11$  и приетите положителни посоки на токовете и напреженията са показани на фиг. 5.1.



Фиг. 5.1. Принципна схема на трансформатор  $Y_0/d-11$  и приетите положителни посоки на токовете и напреженията

За да се симетрират матричните коефициенти в описанието на трансформатора, трябва привеждането на симетричните съставящи на високата страна да се извърши с различни коефициенти на привеждане, както следва:

$$\text{за правата последователност } \dot{K}_{U_1} = \dot{K}_T;$$

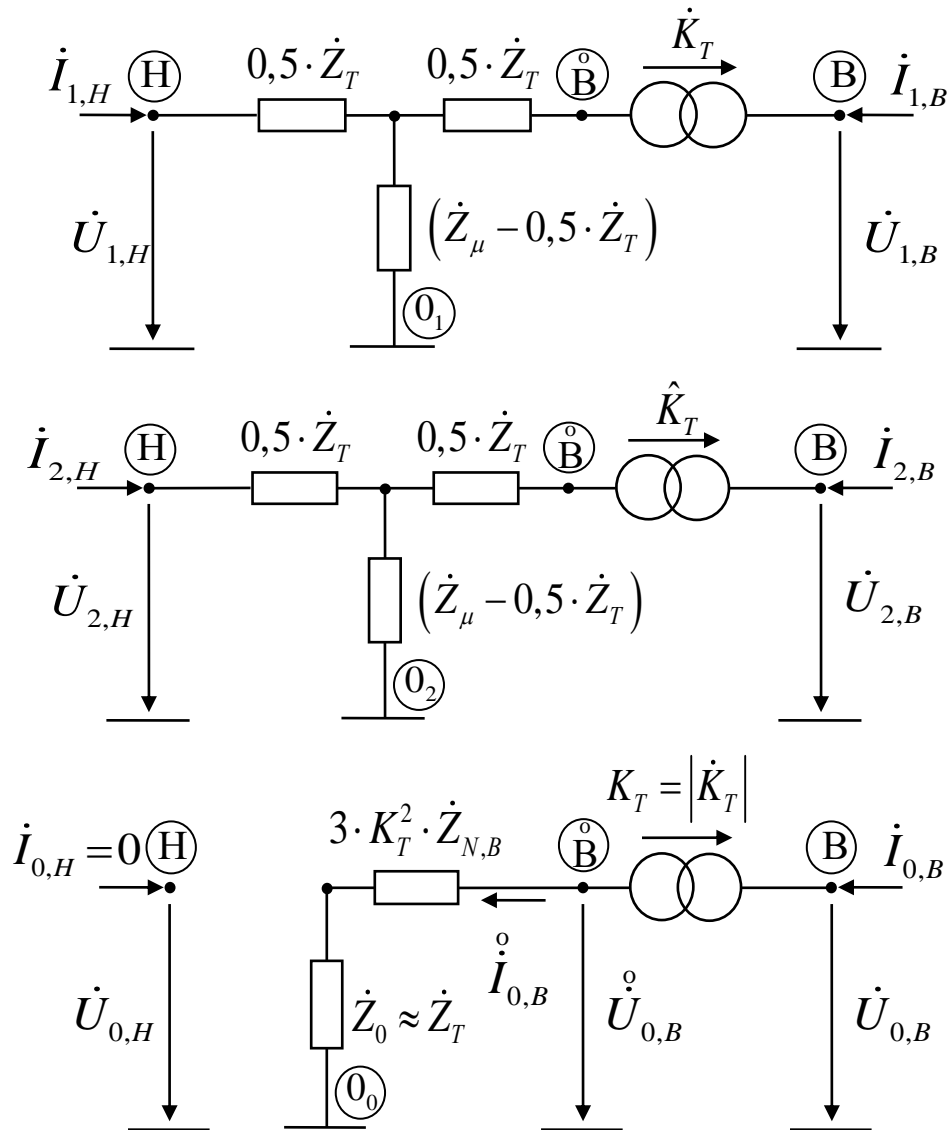
$$\text{за обратната последователност } \dot{K}_{U_2} = \hat{K}_T;$$

$$\text{за нулевата последователност } K_{U_0} = |\dot{K}_T|.$$

След привеждането на матриците на съпротивленията в симетрични координати  $Z_{1,T}$ ,  $Z_{2,T}$ ,  $Z_{0,T}$  с горните коефициенти става възможно построяването на съответстващите им заместващи схеми, показани на фиг. 5.2.

Видно е, че заместващите схеми за правата и обратната последователност не зависят от начина на свързване на намотките и начина на третиране на звездните центрове. Техните схемни параметри са равни. Различават се само коефициентите на трансформация, като в схемата на обратната последователност се използва спрегнатия комплексен коефициент.

Естествено различни са режимните параметри. Не така стои въпросът при схемата на нулевата последователност. Нейната конфигурация и схемните ѝ параметри зависят съществено от начина на свързване на намотките и третирането на звездните центрове. При използване на намотки, свързани в зиг-заг, триъгълник или звезда с изолиран звезден център, веригите на токовете за нулева последователност се прекъсват в такива трансформатори.



Фиг. 5.2. Заместващи схеми на трансформатор  $Y_0/d-11$  със заземен звезден център през  $\dot{Z}_{N,B}$

За съставянето на заместващите схеми на трифазни двунамотъчни трансформатори е достатъчно да се изчислят  $\dot{Z}_T = R_T + jX_T$ ;  $\dot{Y}_T = G_T - jB_T$ ;  $\dot{Z}_\mu = \frac{1}{\dot{Y}_T}$ ;  $\dot{K}_T$ .

За изчисляването на тези параметри се използват каталожни данни.

## 5.2. Изрази за изчисляване на параметрите на заместващите схеми.

Заместващите схеми се построяват към нерегулируемата страна с цел намаляване на грешката за случаите на коефициенти на трансформация, различни от номиналния, при който са проведени опитите на празен ход и късо съединение. За изчисляването на параметрите на заместващите схеми, построени към ниската страна се използват следните формули:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\dot{Z}_T| = \frac{u_K \%}{100} \cdot \frac{U_{ном,Н}^2}{S_{ном}}, \Omega; \quad R_T = \Delta P_K \cdot \left( \frac{U_{ном,Н}}{S_{ном}} \right)^2, \Omega; \quad X_T = \sqrt{|\dot{Z}_T|^2 - R_T^2}, \Omega; \\ G_T = \frac{\Delta P_{пх}}{U_{ном,Н}^2}, S; \quad B_T = \frac{\Delta Q_{пх}}{U_{ном,Н}^2} \approx \frac{I_{пх} \%}{100} \cdot \frac{S_{ном}}{U_{ном,Н}^2}, S; \\ \dot{Z}_T = R_T + jX_T, \Omega; \quad \dot{Y}_T = G_T - jB_T, S; \quad \dot{Z}_\mu = \frac{1}{\dot{Y}_T}, \Omega; \\ \dot{K}_T = \frac{U_{ном,Н} \angle -11.30^\circ}{U_{откл,В}}; \quad U_{откл,В} = U_{ном,В} \cdot \left( 1 + \frac{s \cdot n_{раб}}{100} \right), V, \end{array} \right.$$

$S_{ном}$  – трифазна пълна мощност, VA;

$U_{ном,Н}$  – линейно номинално напрежение на ниската страна, V;

$U_{ном,В}$  – линейно номинално напрежение на високата страна, V;

$s$  – стъпка на регулирането на напрежението в проценти от номиналното, %;

$n_{раб}$  – номер на работното регулировъчно отклонение, (с отчитане на знака плюс или минус);

$\Delta P_{пх}$  – трифазни загуби на активна мощност от опита на празен ход с номинално напрежение, W;

$I_{пх} \%$  – ток на празен ход с номинално напрежение в проценти от номиналния ток, %;

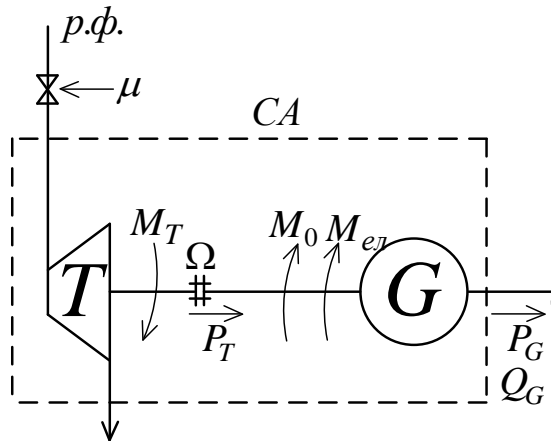
$\Delta P_K$  – трифазни загуби на активна мощност от опита на късо съединение с номинален ток, W;

$u_K \%$  – напрежение на опита на късо съединение в проценти от номиналното, %.



## ТЕМА 6. Уравнение на електромеханичното движение на синхронен агрегат. Форми на записване на уравнението в именувани и относителни единици

Освен електромагнитен процес в генератора, е налице и процес на въртливо механично движение на ротора му. Последният е твърдо свързан с ротора на турбината. Ето защо когато се описва механично движение, генераторът и турбината се третират като едно цяло, наречено синхронен агрегат (СА).



Фиг. 4.1. Принципна схема на СА с действащите моменти на вала му

На вала на синхронния агрегат действат следните моменти:

Момент на турбината  $M_T$ , който е двигателен, в общия случай може да бъде някаква функция на скоростта и времето;

Момент на електромагнитните сили  $M_{ел}$  (електромагнитен момент), обусловен от взаимодействието на токовете в намотките и магнитното поле във въздушната междина на генератора. Този момент е съпротивителен в генераторен режим на СА.

Момент на механичните сили  $M_0$ , имащи характер на триене (триене в лагерите, на ротора в охлаждащата среда и т.н.), който се нарича момент на празен ход. В реалността към този момент трябва да се отнесе съставящата, съответстваща на загубите в магнитопровода на генератора. Моментът  $M_0$  е съпротивителен (спирачен) и може да се приеме за постоянен, ако скоростта на ротора се изменя в неголеми граници. Тъй като  $M_T$  и  $M_0$  имат механичен произход, то в последващо изложение тяхната разлика ще отбелязваме с индекс „*мех*“, т.е.  $M_{мех} = M_T - M_0$ . Небалансираният момент между двигателния и спирачния момент се уравнисява с динамичния момент. Следователно търсеното уравнение на механичното въртливо движение на СА се получава от баланса на моментите, т.е.:

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = M_{мех} - M_{ел}, \quad (6.1)$$

където

$J$  – масов инерционен момент на въртящия се ротор на СА,  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ ;

$\Omega$  – кръгова механична скорост на въртене на ротора на агрегата,  $\text{rad/s}$ .

В (6.1) моментите  $M$  се измерват в  $\text{N} \cdot \text{m}$ .

След съответни преобразувания (6.1) се преобразува във вида

$$\frac{T_{j,ном} \cdot M_{ном}}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{мех} - M_{ел} \quad (6.2)$$

където:

$T_{j,ном}$  - инерционна времеконстанта на въртящия се ротор на СА, изчислена при  $S_{\bar{\sigma}} = S_{ном}$ , в s;

$\omega_s$  - синхронна електрическа скорост, в  $\text{rad/s}$  (314) или ел. град./сек. (18000);

$\theta$  – ъгъл между синхронно въртяща се реперна ос със скорост  $\omega_s$  и напречната ос  $q$  на генератора, в  $\text{rad}$ , ако  $\omega_s$  в  $\text{rad/s}$  или в градуси, ако  $\omega_s$  в ел. град.

$M_{ном}$  – номинален момент на СА, изчислен с  $S_{ном}$  и  $\omega_s$ , в  $\text{N} \cdot \text{m}$

Израз (6.2) е запис на уравнението на електромеханичното движение в именувани единици. Уравнение (6.2) може да се преобразува в о.е., като се раздели на  $M_{ном}$ .

$$\frac{T_{j,ном}}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{мех^{*(н)}} - M_{ел^{*(н)}} \quad (6.3)$$

За отбелязване е, че в (6.3) само моментите са в о.е., а останалите величини са в именувани единици, както за (6.2). Уравнение (6.3) може да се запише и при  $M_{\bar{\sigma}}$  различно от  $M_{ном}$ . Трябва да се подчертае, че в този случай **задължително** се преизчислява и инерционната времеконстанта чрез израза

$$T_{j,\bar{\sigma}} = T_{j,ном} \cdot \frac{S_{ном}}{S_{\bar{\sigma}}}; \quad S_{\bar{\sigma}} = M_{\bar{\sigma}} \cdot \omega_s \quad (6.4)$$

Тогава уравнението на електромеханичното движение добива вида:

$$\frac{T_{j,\bar{\sigma}}}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{мех^{*(\bar{\sigma})}} - M_{ел^{*(\bar{\sigma})}} \quad (4.5)$$

При малки отклонения на кръговата скорост на агрегата, вместо моментите  $M_{*(\bar{\sigma})}$  могат да се използват съответните им мощности  $P_{*(\bar{\sigma})}$ , тъй като

$$P_{*(\bar{\sigma})} = \omega_{*(\bar{\sigma})} \cdot M_{*(\bar{\sigma})} \approx M_{*(\bar{\sigma})} \cdot \quad (4.6)$$

## ТЕМА 7. Общи сведения за късите съединения (к.с.) в ЕЕС. Съставки и характерни величини на тока на к.с. Мощност на к.с.

### 7.1. Общи сведения.

В зависимост от големината на преходното съпротивление в мястото на късото съединение ( $R_{\text{пр}}$ ) биват: -метални к.с. при  $R_{\text{пр}} \approx 0$ ; -к.с. през електрическа дъга ( $R_{\text{пр}} = R_{\text{д}}$ ). В зависимост от броя на участващите в к.с. фази к.с. биват: - трифазно ( $K^{(3)}$ ); - двуфазно ( $K^{(2)}$ ); - еднофазно ( $K^{(1)}$ ); - двуфазно и към земя ( $K^{(1,1)}$ ).

Електрическата верига от източника на е.д.н. до мястото на к.с. се нарича късосъединена верига. Електрическата отдалеченост на к.с. от генераторите се измерва със съпротивлението на късосъединената верига  $Z_K$ .

Характерно за режима на к.с. е значително понижаване на напрежението в мястото на к.с. и в елементите с малка електроотдалеченост от к.с. (например при трифазно к.с.  $U_K^{(3)} = 0$ ), и повишаване на тока в късосъединените вериги. Повишеният ток води до повишаване на термичното и динамично натоварване на тоководите на елементите. Пониженото напрежение води до понижаване на енергообмена между генераторите и потребителите и смущава тяхната работа. Последствията от тези процеси зависят от мястото и продължителността на к.с. При к.с. с голяма електроотдалеченост (в разпределителните мрежи) последствията са местни, а при малка електроотдалеченост - са от значение за цялата ЕЕС, като може да се стигне и до нарушаване на синхронната паралелна работа на генераторите. За отбелязване е, че неуравновесените магнитни потоци при несиметричните к.с. могат да индуцират напрежения в съоръжения, които не са елементи на ЕЕС със съответни последствия.

### 7.2. Съставки и характерни величини на тока на к.с. (т.к.с.).

Токът в късосъединената верига ( $i_K$ ) може да се разложи на периодична ( $i_{\text{п}}$ ) и аperiodична ( $i_a$ ) съставяща. При трифазно к.с. захранвано от идеален източник на е.д.н. (източник с безкрайна мощност, наричан още шини с „твърдо“ напрежение) периодичната съставяща е една. Тя е с честотата на източника и е с постоянна амплитуда. Ако източника е реален генератор, периодичните съставящи са две - с основна честота  $i_{\text{п}}$  и с удвоена честота  $i_{\text{п},2\omega}$ . Двете съставящи са с променящи се амплитуди, като  $i_{\text{п},2\omega}$  затихва до нула. А при несиметричните къси съединения възниква пълен спектър от хармоници на  $i_{\text{п}}$ . В инженерните методики хармоничните съставящи не се отчитат. Аperiodичната съставяща затихва до нула по експонента с времеконстантата на късосъединената верига ( $T_a$ ). Началните стойности на  $i_a$  ( $i_a(0)$ ) са различни в трите фази и зависят от момента на възникване на к.с.

Най-голямата моментна стойност на  $i_K$  се нарича ударен ток ( $i_y$ ). Той е различен в трите фази и възниква в различни моменти от стадия на к.с. Извежда се следното

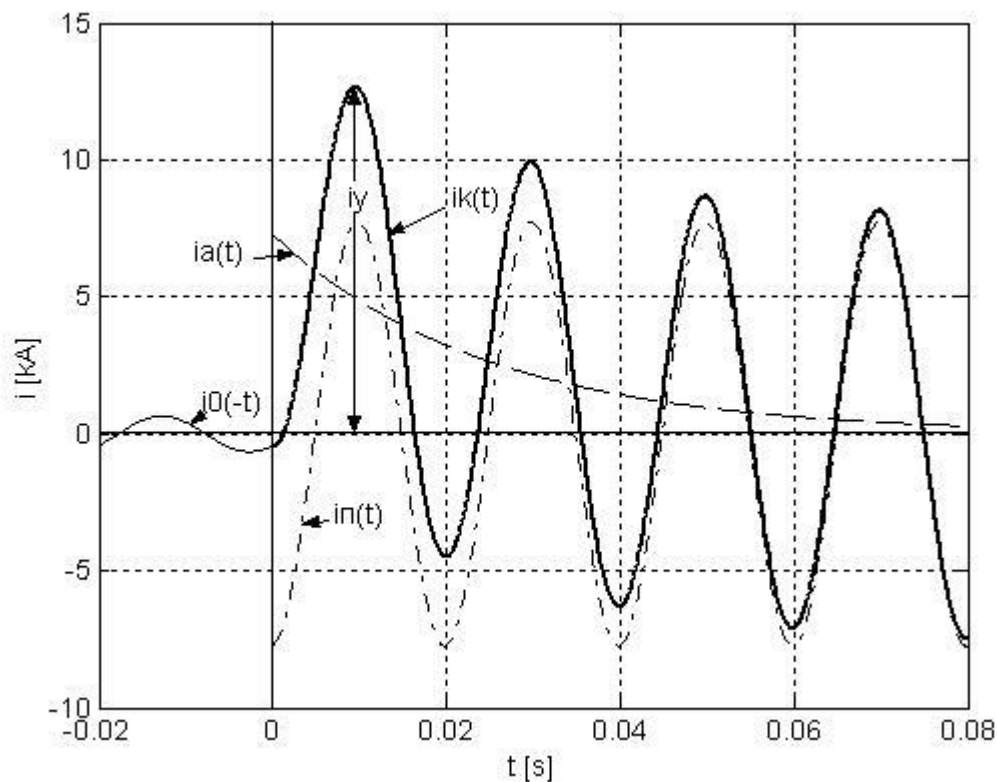
изчислително условие, при което се получава най-голям  $i_y$  - веригата да е на празен ход и момент на възникване на к.с., при който  $i_a(0) = -i_{II,max}$ . Тогава  $i_K$  в изчислителната фаза, при захранване от шини „твърдо“ напрежение ще се определи чрез израза

$$i_K(t) = i_{II,max} \cdot \left( e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega \cdot t) \right) \quad (7.1)$$

Ударният ток се определя по израза

$$i_y = K_y \cdot i_{II,max} = \left( 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) \cdot i_{II,max} \quad (7.2)$$

Коефициентът  $K_y$  се нарича ударен коефициент на късосъединената верига и е в границите  $1 < K_y < 2$ . На фиг. 7.1. е показано графичното изменение на  $i_K$  и съставлящите му.



Фиг. 6.1. Изменение на т.к.с. и съставлящите му във времето

Ефективната стойност на т.к.с. ( $i_K$ ) се определя чрез израза  $I_K(t) = \sqrt{I_{II}^2(t) + I_a^2(t)}$ , където  $I_{II}(t) = \frac{i_{II,max}(t)}{\sqrt{2}}$  е ефективната стойност на периодичния ток, а  $I_a(t) = i_a(t)$  - на аperiодичния.

$I_K(t=0,01)$  се нарича ефективна стойност на ударния ток т.е.  $I_y = I_{K(t=0,01)}$ . Трябва да се знае, че  $I_y \neq \frac{i_y}{\sqrt{2}}$ .

Мощността на к.с. е изчислителна величина определена по един от следните изрази

$$S_K^{(n)}(t) = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном},K} \cdot I_K^{(n)}(t) \quad (6.3)$$

$$S_{II,K}^{(n)}(t) = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном},K} \cdot I_{II}^{(n)}(t) \quad (6.4)$$

където  $U_{\text{ном},K}$  и  $U_{\text{ср.ном},K}$  са съответно номиналното и средно номиналното напрежение на мрежата с к.с.

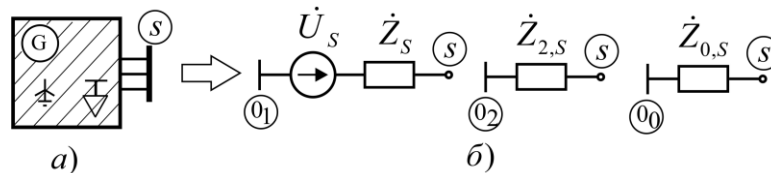
Изразът (6.3) се прилага при оценка на комутационната способност на апаратите, а (6.4) за характеризирание на обобщената система.

## ТЕМА 8. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми на ЕЕС за изчисляване на режимите на к.с. в разпределителните мрежи

Заместващата схема на ЕЕС се съставя чрез заместващите схеми на съставните ъ елементи. Обикновено последните са известни за симетричните координати, т.е. за права, обратна и нулева последователност. При трифазно к.с. се използва схемата на правата последователност, при несиметричните и останалите две.

Характерно за разпределителните мрежи за средно напрежение (СН) и ниско напрежение (НН) е: - голяма електрическа отдалеченост от генераторите; - съизмеримост на активните и индуктивните съпротивления на елементите; - обикновено едностранно захранени чрез понижаващи трансформатори. Тези особености се отчитат при съставяне на заместващата схема за режима на к.с. В тази схема захранващата система се представя обобщено към шините за високо напрежение на понижаващата подстанция, а преносните елементи на разпределителната мрежа (трансформатори и електропроводи) се представят само с надлъжно включените им импеданси в заместващите им схеми (напречно включените проводимости на  $\dot{Y}_T$  и  $\dot{Y}_W$  не се отчитат).

Точното обобщаване на захранващата система може да се получи чрез прилагане на теоремата на Тевенен върху подробните ъ заместващи схеми. В инженерната практика се прилага приблизителен подход. Системата се обобщава със заместващите схеми показани на фиг. 8.1.



Фиг. 8.1. Принципна (а) и заместващи схеми в симетрични координати (б) на система  $S$

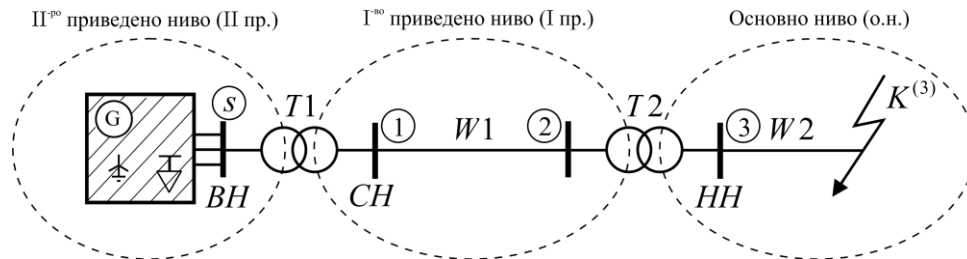
В схемата на правата последователност - с източник на напрежение, а в обратната и нулевата - със съответни съпротивления. Изходни данни за изчисляване на параметрите на заместващата схема на система  $S$  са мощностите на трифазно и еднофазно к.с.  $S_{П,К}^{(3)}$ ,  $S_{П,К}^{(1)}$  и средното номинално напрежение на шините  $U_{ср.ном,S}$ . Използват се изразите

$$U_S \approx \frac{U_{ср.ном,S}}{\sqrt{3}}; \quad X_S = \frac{U_{ср.ном,S}^2}{S_{П,К}^{(3)}}; \quad X_{2,S} \approx X_S; \quad X_{0,S} = \frac{3 \cdot U_{ср.ном,S}^2}{S_{П,К}^{(1)}} - 2 \cdot X_S \quad (8.1)$$

Еквивалентна заместваща схема се нарича електрическа схема само с галванични връзки т.е. с едно ниво на напрежението. При описания по-горе начин на построяване на заместващите схеми за к.с. в разпределителните мрежи в зависимост от мястото на к.с., се получават, две или три нива на напрежението (ВН, СН и НН). За да се построи еквивалентната заместваща схема, заместващата схема трябва да се приведе към едно от

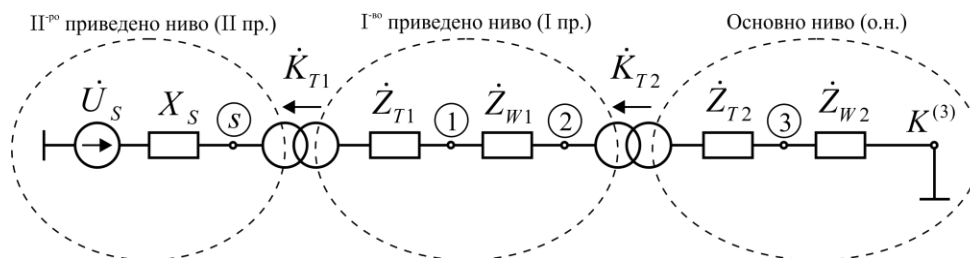
напряженията. Прието е това напрежение да се нарича основно, а останалите приведени. Обикновено за основно се избира напрежението с мястото на к.с.

Прилага се точно и приблизително привеждане, а параметрите се изчисляват в именувани и относителни единици. За илюстрация се разглежда примерната разпределителна мрежа от фиг. 8.2 с трифазно к.с. в ниското напрежение (НН) и очертани нива на напряженията.



Фиг. 8.2. Примерна разпределителна мрежа с очертани нива на напрежение

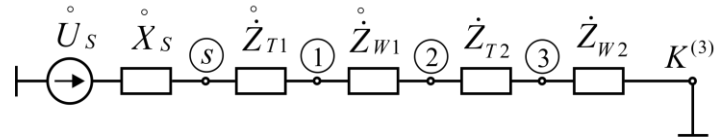
Заместващата схема на правата последователност със съответните нива на напрежението е показана на фиг. 8.3.



Фиг. 8.3. Заместваща схема с очертани нива на напрежение

Точното привеждане в именувани единици включва следните етапи:

- избор на основно ниво. Изборът е без ограничение. В примера за основно ниво е избрано НН;
- изчисляват се коефициентите за привежданите нива  $\dot{K}_{i,PP}$ , като произведение на коефициентите на трансформация на трансформаторите ( $\dot{K}_{T,j}$ ), през които се преминава, вървейки от основното към привежданото ниво, ако  $\dot{K}_{T,j}$  са изчислени в същата посока, в противен случай се използва  $1/\dot{K}_{T,j}$ . В примера  $-\dot{K}_{I,PP} = \dot{K}_{T2}$ ;  $\dot{K}_{T1} \dot{K}_{II,PP} = \dot{K}_{T2} \cdot \dot{K}_{T1}$ .
- построява се еквивалентната заместваща схема и се изчисляват параметрите на привежданите нива. Конфигурацията на еквивалентната схема съответства на заместващата с тази разлика, че са премахнати идеалните трансформатори и са отразени приведените параметри. Параметрите на основното ниво не се променят (виж фиг. 8.4).



Фиг. 8.4. Еквивалентна заместваща схема

Приведените параметри се отбелязват с (o) и се изчисляват по правилата за трансформация с  $\dot{K}_{i,PP}$ . В примера:

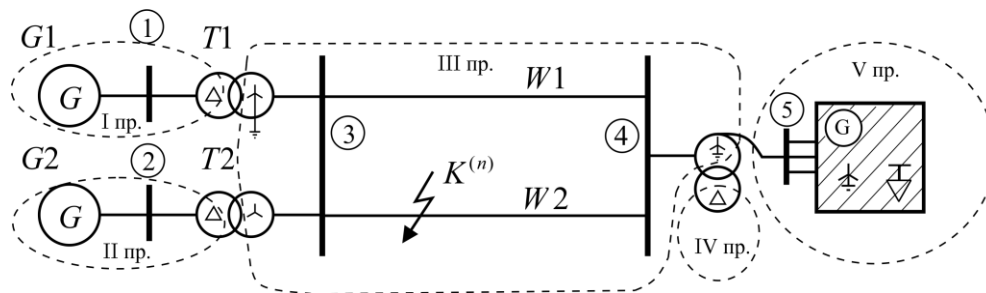
$$\dot{U}_S = \dot{K}_{II,PP} \cdot \dot{U}_S; \quad \dot{X}_S = |\dot{K}_{II,PP}|^2 \cdot X_S; \quad \dot{Z}_{T1} = |\dot{K}_{I,PP}|^2 \cdot \dot{Z}_{T1}; \quad \dot{Z}_{W1} = |\dot{K}_{I,PP}|^2 \cdot \dot{Z}_{W1}.$$



## ТЕМА 9. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми за изчисляване на режимите на к.с. в преносните мрежи високо напрежение и в уредбите на генераторно напрежение

Характерно за к.с. в преносните мрежи и в уредбите на генераторно напрежение е малката отдалеченост от определен брой генератори. Тези генератори в схемата на правата последователност не могат да се представят с постоянни параметри, тъй като те се променят в стадия на к.с. Затова тази схема се строи за определен момент, най-често за  $t = 0$  и  $t = \infty$ . Електрически отдалечените от к.с. генератори се представят обобщено по начина описан в Тема №8. За електрически отдалечени се считат генераторите отстоящи поне през две трансформации от к.с.

Индуктивното съпротивление ( $X$ ) на силовите елементи в тези мрежи е по-голямо от активното им съпротивление ( $R$ ). Когато заместващата схема се строи с цел да се определи ефективната стойност на периодичната съставяща ( $I_{II}$ ), елементите в схемата се отразяват само с  $X$ , ако  $X \geq 3R$ . В такива случаи най-често еквивалентната схема се строи чрез приблизително привеждане в относителни единици (о.е.) (за точното привеждане вж. Тема №8). За илюстрация се разглежда примерната ЕЕС от фиг. 9.1 с несиметрично к.с. в средата на електропровод W2. На същата фигура са очертани нивата на напреженията.



Фиг. 9.1. Примерната ЕЕС с несиметрично к.с. в средата на електропровод W2

Построяването на еквивалентните схеми чрез приблизително привеждане в о.е. включва следните етапи:

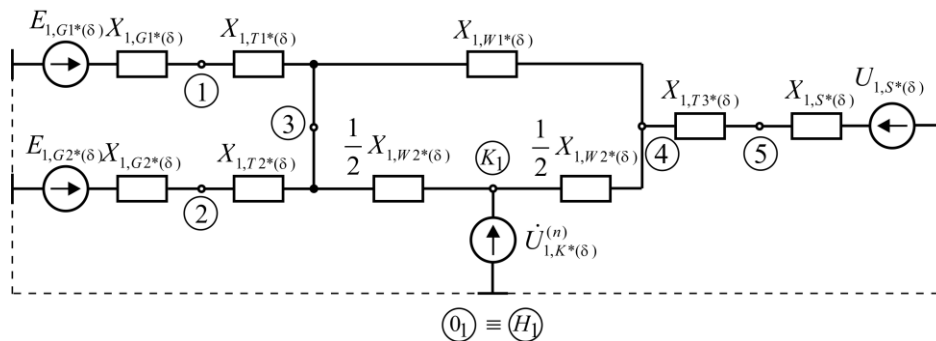
Избор на базисна мощност  $S_{\sigma}$ . Изборът на  $S_{\sigma}$  е без ограничение. Препоръчва се от гледна точка на изчислителни удобства  $S_{\sigma}$  да е близка или равна на номиналната мощност на най-мощния елемент в изследваната ЕЕС и да е кратна на 10. Изборът на  $S_{\sigma}$  е валиден за всички нива на напрежението;

Определят се базисните напрежения на нивото и се изчисляват базисните им токове. При приблизителното привеждане  $U_{\sigma,i} = U_{ср.ном,i}$  и  $I_{\sigma,i} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ном,i}}$ . (В примера има пет нива на напрежението, т.е.  $i = I, \dots, V$ ).

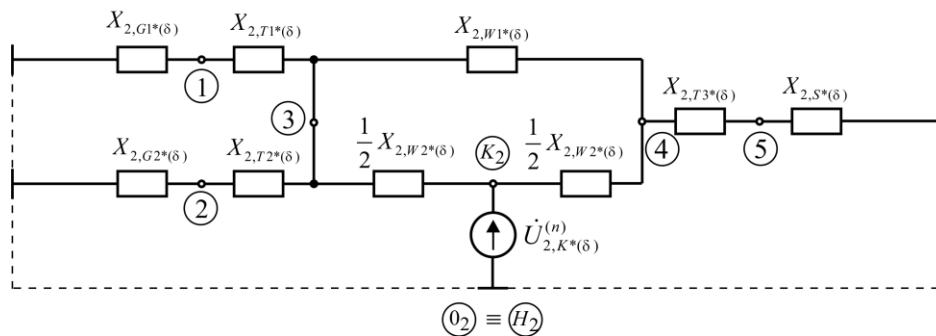
Построяват се директно еквивалентните схеми и се изчисляват параметрите им в о.е., което се отбелязва с индекс „\*(б)“. Използват се следните изрази:

- за G -  $E_{G,*(\delta)} = E_{G,*(H)}$ ;  $X_{G,*(\delta)} = X_{G,*(H)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном,G}}$ ;
- за T -  $X_{T,*(\delta)} \approx \frac{u_K \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном,T}}$ ;
- за W -  $X_{W,*(\delta)} = X_W \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср.ном,W}^2}$ .

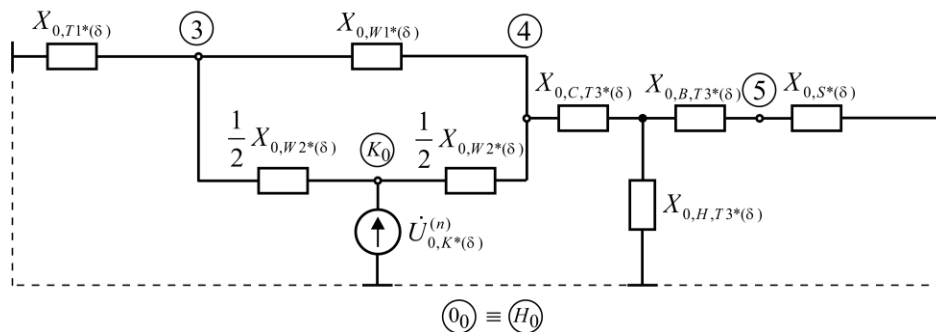
На фиг. 9.2, фиг. 9.3 и фиг. 9.4 са показани еквивалентни заместващи схеми на примерната ЕЕС, съответно за правата, обратната и нулевата последователност.



Фиг. 9.2. Еквивалентна заместваща схема за правата последователност



Фиг. 9.3. Еквивалентна заместваща схема за обратната последователност



Фиг. 9.4. Еквивалентна заместваща схема за нулевата последователност

Характерни точки в схемата са начало ( $H_i$ ,  $i=1,2,0$ ) и край ( $K_i$ ). Началото съвпада с нулевата шина на схемата, а края с мястото на к.с. Между  $H_i$  и  $K_i$  се включват

компенсиращите източници на е.д.н.,  $U_{i,K}^{(n)}$ , с които се отразява елемента предизвикващ к.с.

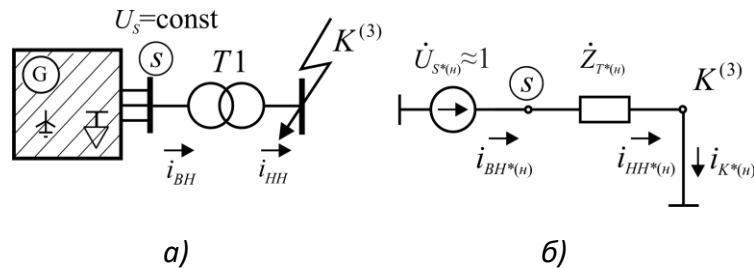
При метално трифазно к.с.  $U_{i,K}^{(n)} = 0$  и ток тече само в схемата на правата последователност.

При несиметричните к.с.  $U_{i,K}^{(n)}$  са търсени величини.

За отбелязване е, че схемата на обратната последователност се отличава от схемата на правата последователност само със схемите на източниците. Схемата на нулевата последователност в общия случай се различава не само по параметри, но и по конфигурация от останалите схеми. В повечето случаи означенията на заместващите схеми се опростяват, например, когато съпротивленията на правата и нулевата последователност са равни (електропроводи, трансформатори) индексът за принадлежност (1,2) към дадена последователност се изпуска. Също така, когато предварително се знае с какви единици се работи (относителни, именувани, база на привеждане) не се изписват индексите, например за относителни единици (\* $\bar{b}$ ).

## ТЕМА 10. Изчисляване на характерните величини на трифазно к.с. на шините на трансформатор захранван от шини с „твърдо“ напрежение. Диапазон на изменение на характерните величини за системните и мрежовите трансформатори

Разглежда се понижаващ двунамотъчен трансформатор с к.с. на ниското напрежение показан на фиг. 10.1а, захранен от шини с „твърдо“ напрежение.



Фиг. 10.1. Принципна и еквивалентна заместваща схема на трансформатор захранващ к.с.

Точното изчисляване на режима на к.с. показва, че в намотките на трансформатора възникват две свободни съставлящи на тока, затихващи по експоненти със силно различаващи се времеконстанти и начални стойности. Бавната съставляща е със значително по-малка начална стойност. Това е основание в инженерните методики на изчисление тази съставляща да не се отчита. Като се отчете, че тази съставляща е свързана с изменението на намагнитващия ток на трансформатора следва, че нейното неотчитане означава в заместващата схема на трансформатора да не се отчита напречно включената проводимост  $Y_T$  (респективно  $Z_\mu$ ). Тогава заместващата схема добива опростения вид показан на фиг. 10.1б. Еквивалентната схема е построена в относителни единици при номинални базисни условия, т.е.  $S_\sigma = S_{\text{ном},T}$ ;  $U_{\sigma,H} = U_{\text{ном},H}$ ;  $U_{\sigma,B} = U_{\text{ном},B}$ ;  $I_{\sigma,H} = I_{\text{ном},H}$ ;  $I_{\sigma,B} = I_{\text{ном},B}$ . Използват се изразите –

$$\begin{cases} |\dot{Z}_{T^{*(n)}}| = \frac{u_K \%}{100}; & R_{T^{*(n)}} = \frac{\Delta P_K}{S_{\text{ном},T}}; \\ X_{T^{*(n)}} = \sqrt{|\dot{Z}_{T^{*(n)}}|^2 - R_{T^{*(n)}}^2}; & \dot{Z}_{T^{*(n)}} = R_{T^{*(n)}} + jX_{T^{*(n)}}. \end{cases} \quad (10.1)$$

Изхождайки от заместващата схема следва, че за характерните величини ( $I_{II}$ ,  $i_{II,\text{max}}$ ,  $i_y$ ) на тока на к.с. се получава (вж. Тема № 7)

$$\begin{cases} I_{II^{*(n)}} = \frac{1}{|\dot{Z}_{T^{*(n)}}|} = \frac{100}{u_K \%}; & i_{II,\text{max}^{*(n)}} = \sqrt{2} \cdot I_{II^{*(n)}}; \\ i_{y^{*(n)}} = \sqrt{2} \cdot I_{II^{*(n)}} \cdot K_y, \end{cases} \quad (10.2)$$

където  $K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$ , а  $T_a = \frac{X_{T^*(H)}}{314 \cdot R_{T^*(H)}}$ .

Ако в (10.2) се отчетат характерните напрежение на к.с. и ударен коефициент за системните и мрежови трансформатори се получават диапазони за характерните величини на тока на трифазно к.с., както е показано в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Характерни величини на тока на к.с.

Вид на машината / Величина, о.е.	$I_{II^*(H)}$	$i_{II,max^*(H)}$	$i_{y^*(H)}$
за системни тр-ри, $u_K \% = 10 \div 12\%$ и $K_y = 1,7 \div 1,9$	8,3÷10	11,75÷14,1	22÷25
за мрежови тр-ри, $u_K \% = 4 \div 6\%$ и $K_y = 1,2 \div 1,3$	16,7÷25	23,5÷35,2	30÷46

Получените стойности са максималните възможни и трябва да се разглеждат като горни граници на характерните величини на тока при трифазни к.с. в ел. мрежата, захранвана от даден трансформатор.

Както се вижда от фиг. 10.1 в относителни единици токовете в изводите на трансформатора за ВН, за НН и в мястото на к.с. са числено равни. За да се определят тези токове в именувани единици, т.е. действителните токове е достатъчно те да бъдат умножени по съответните базисни токове. В случая - по номиналните токове, т.е.:

$$\begin{cases} I_{II,B} = I_{II^*(H)} \cdot I_{ном,B}, \text{ kA} \\ I_{II,H} = I_{II^*(H)} \cdot I_{ном,H}, \text{ kA} \end{cases} \quad (10.3)$$

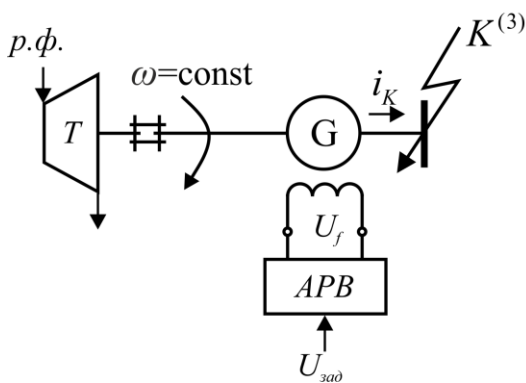
По аналогичен начин се провеждат изчисленията и при тринамотъчните трансформатори, достатъчно е в (10.1) да се използва  $u_K$  и  $\Delta P_K$  за намотките участващи в к.с.

## ТЕМА 11. Изчисляване на характерните величини на тока на трифазно к.с. на шините на генератор. Диапазон на характерните величини на тока на к.с. при генератори с и без APB

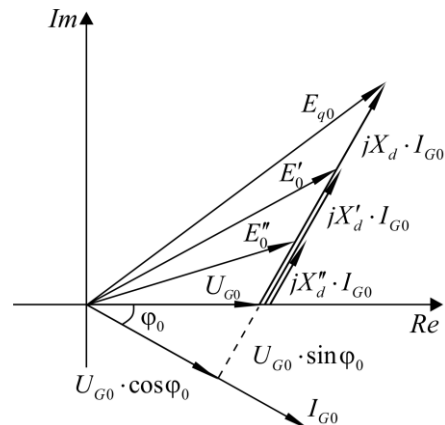
Разглежда се синхронен генератор, на изводите на който възниква метално трифазно к.с. (фиг. 11.1). Приема се, че генераторът се върти със синхронна скорост в целия стадий на к.с. Разграничават се два режима на к.с.

- режим с изключена система на APB, т.е. без APB;
- режим с APB.

В първия режим  $U_f = U_{f,0} = \text{const}$ , а във втория  $U_f = \text{var}$  от системата на APB за форсиране на възбудането.



Фиг. 11.1. Принципна схема



Фиг. 11.2. Опростена векторна диаграма

Токът във фазните изводи на генератора  $i_K$  има три съставлящи: - периодична с основна честота  $i_{II}$ ; - периодична с удвоена честота  $i_{II,2\omega}$ ; - апериодична  $i_a$ . В инженерните методики на изписване на  $i_K$ , съставлящата  $i_{II,2\omega}$  не се отчита (вж. Тема №7). Най-често практически интерес представлява познаването на изменението на ефективната стойност на периодичната съставляща  $I_{II}(t)$  и на ударния ток  $i_y$ . Ако генератора е без APB,  $I_{II}(t)$  се определя с израза

$$I_{II}(t) = (I'' - I') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I' - I_\infty) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_\infty \quad (11.1)$$

където  $T_d''$  и  $T_d'$  са съответно свръхпреходната и преходната времеконстанти на генератора. Те са каталожни данни за режима на к.с. на шините;  $I'', I', I_\infty$  - съответно свръхпреходен, преходен и установен ток, които се определят чрез изразите

$$I'' = \frac{E_0''}{X_d''}; \quad I' = \frac{E_0'}{X_d'}; \quad I_\infty = \frac{E_{q,0}}{X_d} \quad (11.2)$$

в тях  $X_d'', X_d', X_d$  са свръхпреходен, преходен и синхронен реактанси по надлъжната ос  $d$  на генератора. Те са каталожни данни;  $E_0'', E_0', E_{q,0}$  - свръхпреходното, преходното и установеното е.д.н. на генератора за изходния установен режим преди възникване на к.с.

За определянето на тези е.д.н. се изхожда от опростената векторна диаграма на генератора (фиг. 11.2), за което са валидни съотношенията:

$$\begin{cases} E_0'' = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d'' \cdot I_{G,0})^2} \\ E_0' = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d' \cdot I_{G,0})^2} \\ E_{q,0} = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d \cdot I_{G,0})^2} \end{cases} \quad (11.3)$$

В режима с АРВ, следствие форсирането на възбуддането се постига известно компенсиране на затихването на  $i_{II}$ , което се отразява с добавка в (11.1), т.е.

$$I_{II,APB}(t) = (I'' - I') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I' - I_\infty) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_\infty + (I_{II,\infty} - I_\infty) \cdot F(t) \quad (11.4)$$

където  $I_{II,\infty}$  е установения ток при пределно възбуддане, т.е.

$$I_{II,\infty} = \frac{E_{q,II}}{X_d} \quad (11.5)$$

$F(t)$  - функция, която отчита времеконстантите на възбудителната система  $T_e$  и на генератора  $T_d'$  и се изменя във времето от 0 до 1.

За илюстрация на фиг. 11.3 е показано примерно изменение на  $I_{II}(t)$  при генератор с и без АРВ.

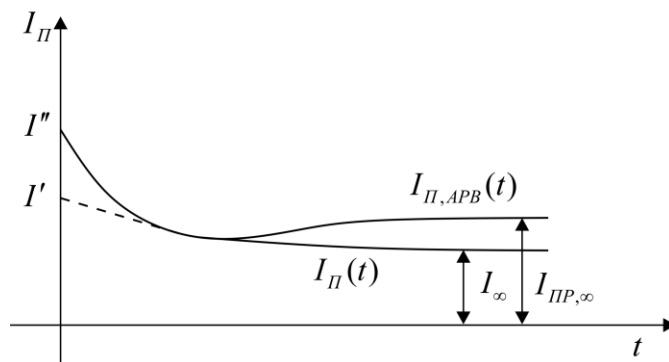
Ударният ток за случая на възникване на к.с. при изчислителното условие (вж. Тема №7) се изчислява

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot K_y; \quad K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \quad (11.6)$$

където  $T_a$  е времеконстанта на затихване на  $i_a$  и е част от каталожните данни за к.с. на шините на генератора.

За установяване на диапазона на ефективната стойност на периодичната съставляща на тока при метално трифазно к.с. на шините за типовите генератори в ЕЕС се разглеждат двата гранични изходни установени режима: - празен ход и номинално натоварване, и двете състояния на регулирането на възбуддането: - без и с АРВ. Реактансите  $X_d''$  и  $X_d'$ ,

които са необходими за изчисляването на  $I''$  и  $I_\infty$  зависят от типа и мощността на генератора.



Фиг. 11.3. Примерно изменение на  $I_\Pi(t)$  при генератор с и без АРВ

В табл. 11.1 са представени диапазони на параметрите на турбо- и хидрогенератори, като е.д.н. на генераторите за изходния установен режим преди възникване на к.с. са пресметнати по (11.3)

Таблица 11.1. Изходни, гранични режими

	$X''_{d^{*(H)}}$	$X_{d^{*(H)}}$	Празен ход	Номинално натоварване
Турбогенератори (ТГ)	0,125 ÷ 0,25	1,65 ÷ 2,45	$I_{G0^{*(H)}} = 0$ $U_{G0^{*(H)}} = 0$ $E''_{0^{*(H)}} = 1$ $E_{q0^{*(H)}} = 1$	$I_{G0^{*(H)}} = 1$ $U_{G0^{*(H)}} = 1$ $\cos \varphi_0 \approx 0,8$ $E''_{0^{*(H)}} = 1,08 \div 1,17$ $E_{q0^{*(H)}} = 2,4 \div 3,2$
Хидрогенератори (ХГ)	0,14 ÷ 0,25	0,9 ÷ 1,4	$I_{G0^{*(H)}} = 0$ $U_{G0^{*(H)}} = 0$ $E''_{0^{*(H)}} = 1$ $E_{q0^{*(H)}} = 1$	$I_{G0^{*(H)}} = 1$ $U_{G0^{*(H)}} = 1$ $\cos \varphi_0 \approx 0,8$ $E''_{0^{*(H)}} = 1,09 \div 1,17$ $E_{q0^{*(H)}} = 1,7 \div 2,2$

На база описаните в табл. 11.1 параметри лесно могат да се изчислят  $I''$  и  $I_\infty$  чрез (11.2). Резултатите от пресмятането са представени в табл. 11.2. Както беше изяснено АРВ не влияе на  $I''$ , но изменя съществено  $I_\infty$ , независимо от изходния установен режим, тъй като при к.с. на шините на генератора се достига до пределното възбуждане. Съвременните АРВ осигуряват  $U_{f,гр} = 5 \cdot U_{f,нх}$ .

За отбелязване е, че при ТГ по-малките стойности на тока на к.с. се отнасят за машините с големи мощности (например с 1000 MW).

Таблица 11.2. Гранични стойности на токовете при к.с.



	Изключено АРВ				Включено АРВ	
	Празен ход		Номинално натоварване			
	$I_{*(H)}''$	$I_{\infty,*(H)}$	$I_{*(H)}''$	$I_{\infty,*(H)}$	$I_{\infty,*(H)}$	$E_{q,np*(H)}$
Турбогенератори (ТГ)	8 ÷ 4	0,6 ÷ 0,41	8,6 ÷ 4,7	1,5 ÷ 1,3	3,0 ÷ 2,6	4,8 ÷ 6,4
Хидрогенератори (ХГ)	7,1 ÷ 4	1,1 ÷ 0,71	7,8 ÷ 4,7	1,9 ÷ 1,6	3,8 ÷ 3,2	3,4 ÷ 4,4

Ако късото съединение е възникнало на определено „електрическо“ разстояние, характеризиращо се с  $X_{вн}$  могат се направят следните разсъждения. Ясно е, че ако  $X_{вн} = 0$ , т.е. к.с. е на шините на генератора, то  $U_f$  ще достигне  $U_{f,пр}$ , без да може да възстанови напрежението на шините на генератора -  $U_G = 0$  за целия стадий на к.с.

Ако се увеличава  $X_{вн}$ , може да се достигне до една така наречена критична стойност на  $X_{вн} = X_{кр}$ , при което  $U_f$  достига  $U_{f,пр}$  и напрежението на шините в установен режим също достига до номиналната си стойност, т.е.  $U_G = U_{ном}$ .

Ако  $X_{вн} > X_{кр}$ , то ще се достига до  $U_G = U_{ном}$  при  $U_f < U_{f,пр}$ . Тези факти трябва да се отчитат при съставяне на заместващите схеми за изчисляване на тока в различните стадии на разглежданото метално трифазно к.с.

Напрежението  $U_f$  не се изменя със скок. Това означава, че в началния стадий на к.с., АРВ не влияе на процесите в генератора. Те ще протичат така, както при генератори без АРВ. Тогава, за определянето на  $I''$  и  $I'$  ще се използват аналогични схеми, както тези за генератори без АРВ.

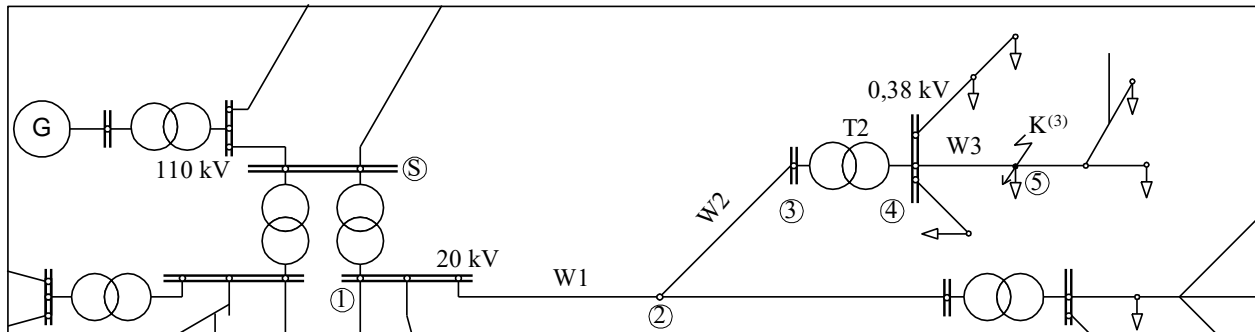
## ТЕМА 12. Изчисляване на характерните величини на тока на режима на трифазно к.с. в разпределителни мрежи. Нива на мощността на к.с.

Редът за изчисляване на режима на трифазно к.с. включва следните етапи:

1. Съставяне на изчислителна принципна схема на мрежата за конкретното място на к.с.;
2. Съставяне на еквивалентната заместваща схема на мрежата, конфигурирана в т.1;
3. Определяне на параметрите на късосъединената верига  $Z_K = R_K + j \cdot X_K$ ,  $T_a$  и  $K_y$ ;
4. Изчисляване на характерните величини на тока на к.с. -  $I_{II}$ ,  $i_y$ ,  $I_y$ ,  $i_a(t)$ ,  $I_K(t)$ .

За изясняване на реда на изчислението се разглежда примерна ЕЕС, част от принципна схема, на която е показана на фиг. 12.1.

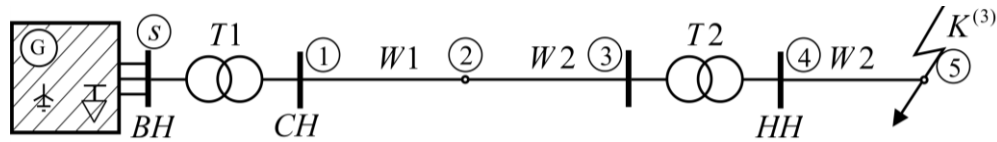
При изпълнение на т. 1 от реда, т.е. при съставянето на изчислителната схема, се отчитат особеностите на разпределителните мрежи.



Фиг. 12.1. Част от принципна схема на примерна ЕЕС

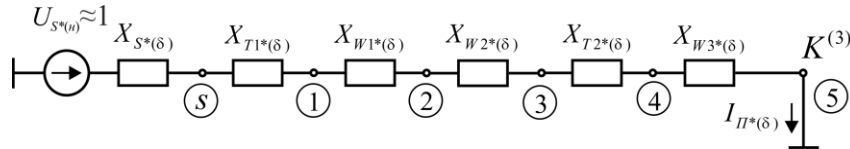
Характерно за разпределителните мрежи за средно и ниско напрежение е голямата им електрическа отдалеченост от генераторите и едностранното им захранване. Те се захранват от понижаващи трансформатори. Както беше изяснено в Тема №7 електрическата система, захранваща тези трансформатори, се обобщава към високото им напрежение чрез източник на напрежение с постоянни параметри. В примера обобщаването трябва да се направи към шините за ВН на понижаващия трансформатор Т1, т.е. към възел S.

Друга особеност на разпределителните мрежи е, че те са отворени. Това позволява лесно да се определят силовите елементи, които ще участват в късосъединената верига, тръгвайки от мястото на к.с. и достигайки до захранващата система. В примера това са елементите W3, T2, W2, W1 и T1. Както е изяснено в Тема №8, елементите на мрежата, които не са включени в късосъединената верига, и товарите не се отчитат при съставяне на заместващата схема. От изложеното следва, че за примера на изчислителната принципна схема при трифазно к.с. във възел 5 ще бъде от вида показан на фиг. 12.2.



Фиг. 12.2. Изчислителна принципна схема за к.с. във възел 5

При изпълнението на точка 2 се използва един от методите за съставяне на еквивалентна схема, изложени в Теми № 8 и 9. За примера ще приемем, че схемата е съставена в относителни единици чрез приблизително привеждане. В такъв случай еквивалентната схема ще бъде от вида показан на фиг. 12.3.



Фиг. 12.3. Еквивалентна заместваща схема

Очевидно е, че за съпротивлението на късосъединената верига е валиден израз

$$\dot{Z}_{K^{*(\delta)}} = R_K + jX_K = jX_{S^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{T1^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W1^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W2^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{T2^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W3^{*(\delta)}} \quad (12.1)$$

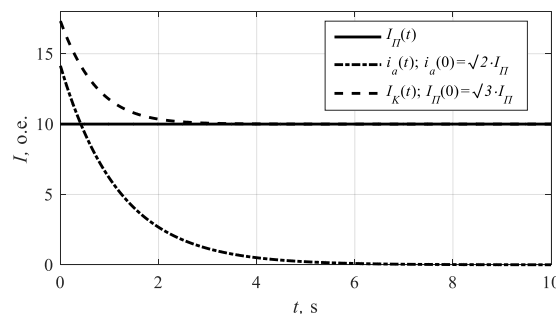
от където

$$T_a = \frac{X_K}{314 \cdot R_K}, \text{ s}; \quad K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \quad (12.2)$$

Характерните величини на тока на к.с. се изчисляват чрез изразите

$$\begin{cases} I_{\Pi^{*(\delta)}} = \frac{U_{S^{*(\delta)}}}{|Z_{K^{*(\delta)}}|}; & I_{\Pi} = I_{\Pi^{*(\delta)}} \cdot I_{6,K}; \\ i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi} \cdot K_y; & I_y = I_{\Pi} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2}; \\ i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi} \cdot e^{\frac{-t}{T_a}}; & I_K(t) = I_{\Pi} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot e^{\frac{-2t}{T_a}}} \end{cases} \quad (12.3)$$

За илюстрация на фиг. 12.4 е показано изменението във времето на  $I_{\Pi}$ ,  $i_a$  и  $I_K$ .



Фиг. 12.4. Изменение на характерни т.к.с. във времето

Максималното ниво на мощността на к.с. в мрежата се определя от номиналната мощност на захранващия я трансформатор чрез израза

$$S_{П,К}^{(3)} = \frac{100}{u_K \%} \cdot S_{ном,Т} \quad (12.4)$$

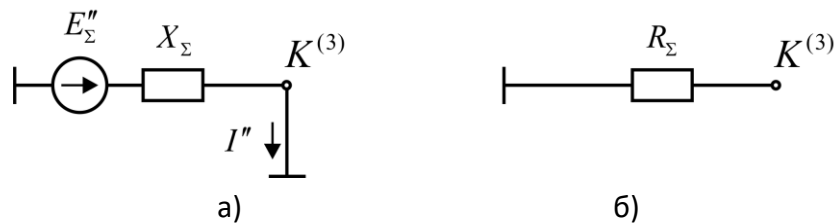
В примера от фиг. 12.2 мрежата е с две нива: - за СН - 20 kV и за НН - 0,38 kV.  $S_{П,К}^{(3)}$  за 0,38 kV се определя от  $S_{ном,Т2}$ , а за 20 kV – от  $S_{ном,Т1}$ . Ако  $S_{ном,Т1} = 25$  MVA и  $u_K \% = 10,5\%$  мощността на к.с. на ниво 20 kV ще е 238 MVA. За разпределителната мрежа – НН при трансформатор с  $S_{ном,Т2} = 1$  MVA и  $u_K \% = 6\%$  мощността на к.с. ще е 16,7 MVA

С развитието на електроенергийната система, токовете на к.с. през прекъсвачите (респективно мощността на к.с.) могат да нарастват спрямо проектните им стойности. За да не се налага подмяна на прекъсвачите, се въвежда нормиране на максималната мощност на к.с. Например в България за разпределителните мрежи за 10 kV и 20 kV, мощността на к.с. се ограничава до 500 MVA. Това се постига чрез подходящи мероприятия, като разделяне на захранващата мрежа, избор на трансформатор и реактор и др.

### ТЕМА 13. Изчисляване на характерните величини на режима на трифазно к.с. в уредби за генераторно напрежение и в преносните мрежи за високо напрежение. Диапазони на мощността на к.с. за различните нива на напрежението

Най-често в практическите изчисления на режима на к.с. в мрежите за високо напрежение се определят  $I''$  и  $i_y$ . Редът за изчисляване на тези величини на тока на трифазно к.с. включва следните етапи:

1. Съставяне на изчислителна принципна схема на ЕЕС за конкретното място на к.с.;
2. Съставяне на две еквивалентни схеми на конфигурираната ЕЕС. Едната е схема на правата последователност с отчетени само индуктивните съпротивления на елементите (вж. Тема №9), а другата е пасивна схема с отчетени само активните съпротивления за правата последователност;
3. Съставените еквивалентни заместващи схеми, еквивалентно се преобразуват спрямо мястото на к.с. до схеми от вида показан на фиг. 13.1.;

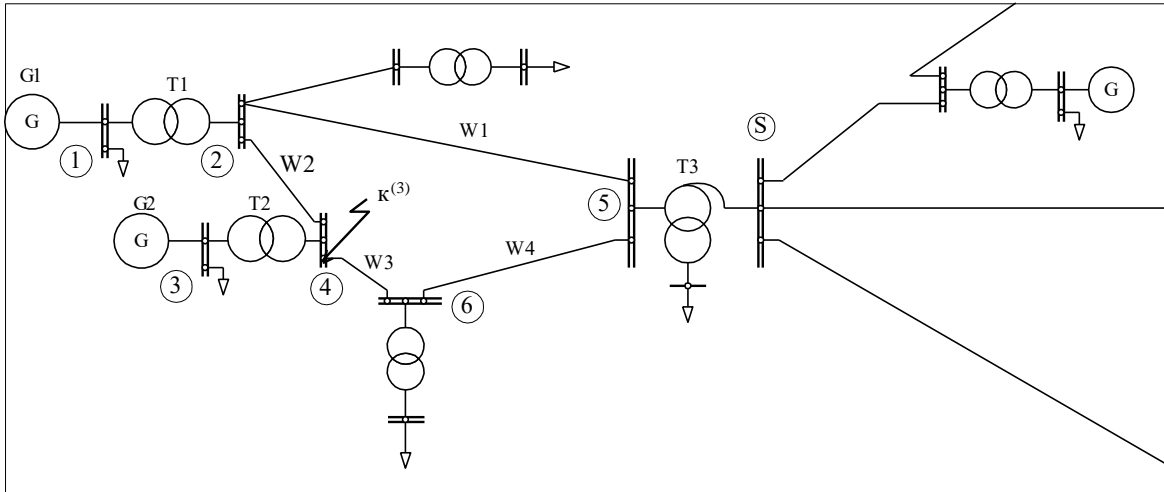


Фиг. 13.1. Еквивалентни заместващи схеми

4. Определят се  $I''$  и  $i_y$  чрез изразите

$$\begin{cases} I'' = \frac{E''_{\Sigma}}{X_{\Sigma}}; & i_y = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot K_y; \\ K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a,e}}}; & T_{a,e} = \frac{X_{\Sigma}}{314 \cdot R_{\Sigma}}, \text{ s}; \end{cases} \quad (13.1)$$

За изясняване на реда на изчислението се разглежда примерна ЕЕС, част от принципната схема, на която е показана на фиг. 13.2.

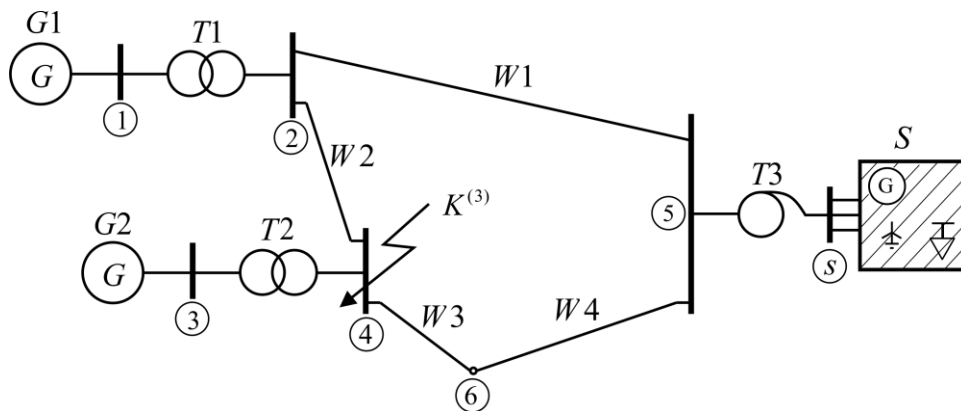


Фиг. 13.2. Част от принципна схема на примерна ЕЕС

При съставяне на изчислителната принципна схема се отчита следното:

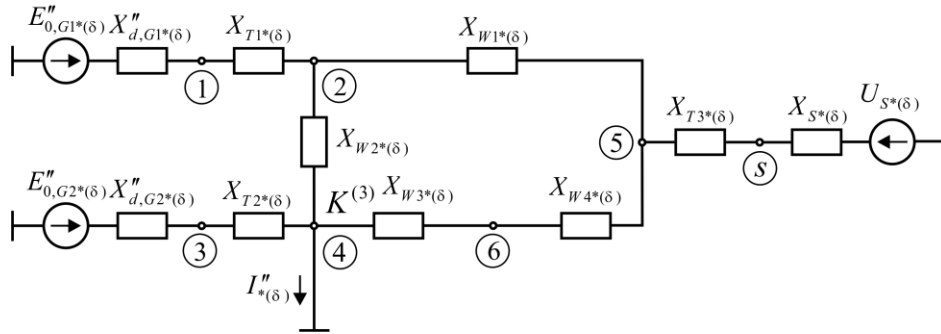
- електрически отдалечените от мястото на к.с. генератори се отчитат обобщено. На практика това са генераторите отстоящи през две трансформации от к.с. В примера това са генераторите в частта на ЕЕС свързани с шини високо напрежение на Т3. Следователно тази част от ЕЕС ще се представи обобщено с един източник на напрежение свързан във възел S (вж. Тема №8);
- товарите и преносните елементи, които ги захранват, ако последните не са включени в късосъединена верига, не се включват в изчислителната схема.

От изложеното следва, че за примера изчислителната принципна схема на ЕЕС при к.с. във възел 4 ще бъде от вида показан на фиг. 13.3.

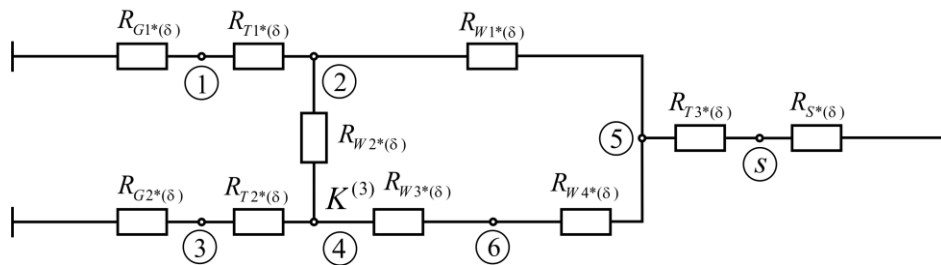


Фиг. 13.3. Изчислителна принципна схема за к.с. във възел 4

Използва се един от методите за съставяне на еквивалентни схеми, изложени в Теми №8 и 9. За примера ще приемем, че схемите се съставят в относителни единици. Според методиката тези схеми за примерната ЕЕС от фиг. 13.3. ще бъдат от вида (фиг. 13.4 и фиг. 13.5):



Фиг. 13.4. Еквивалентна заместваща схема – права посл., само  $X$



Фиг. 13.5. Еквивалентна заместваща схема – пасивна схема, само  $R$

Схемите от фиг. 13.4. и фиг. 13.5. се преобразуват до схеми от вида на фиг. 13.1 чрез еквивалентни преобразования. Следва изчисляване чрез (13.1). Изчислените токове се привеждат в действителни размерности чрез умножаване с базисния ток на нивото с к.с. Чрез изчисления  $I''$  се определя и мощността на к.с., т.е. -  $S''_{П,К}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I'' \cdot U_{ср.ном,К}$ .

Нивата на  $S''_{П,К}^{(3)}$  в мрежите за високо напрежение варират в широки граници в зависимост от мястото на к.с. Максималните стойности на мощностите на к.с.  $S''_{П,К}^{(3)}$  за ЕЕС на Република България са от порядъка на тези показани в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Номинално напрежение	Мощност на к.с. $S''_{П,К}^{(3)}$
110 kV	3000 MVA
220 kV	3500 MVA
400 kV	4000 MVA

## ТЕМА 14. Изчисляване на несиметрични къси съединения в ЕЕС чрез правилото за еквивалентност на правата последователност. Комплексни заместващи схеми. Векторни диаграми на тока и напрежението в мястото на к.с.

Чрез правилото за еквивалентност на тока за правата последователност изчисляването на несиметричните к.с. се свежда до изчисляване на трифазно к.с. във фиктивна точка, електрически отдалечена от действителното място на несиметричното к.с. със съпротивление на симетриращия шунт  $\Delta X_n$ . Последният зависи от еквивалентните съпротивления за обратна и нулева последователност спрямо мястото на к.с. и за различните къси съединения се определя чрез изразите

$$\begin{cases} \Delta X^{(2)} = X_{2,\Sigma}; & \Delta X^{(1)} = X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}; \\ \Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}}. \end{cases} \quad (14.1)$$

От казаното следва, че за тока и напрежението на правата последователност са валидни изразите

$$\begin{cases} \dot{I}_{A_1,K}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{1,\Sigma}}{j(X_{1,\Sigma} + \Delta X^{(n)})}; \\ \dot{U}_{A_1,K}^{(n)} = j\Delta X^{(n)} \cdot \dot{I}_{A_1,K}^{(n)} \end{cases} \quad (14.2)$$

Симетричните съставлящи на тока и напрежението в мястото на к.с. за обратната и нулевата последователност са изразими чрез тези за правата, както следва:

- двуфазно късо съединение

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A_2,K}^{(2)} &= -\dot{I}_{A_1,K}^{(2)}; & \dot{U}_{A_2,K}^{(2)} &= \dot{U}_{A_1,K}^{(2)}; \\ \dot{I}_{A_0,K}^{(2)} &= 0; & \dot{U}_{A_0,K}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \quad (14.3a)$$

- еднофазно късо съединение

$$\dot{I}_{A_2,K}^{(1)} = \dot{I}_{A_1,K}^{(1)} = \dot{I}_{A_0,K}^{(1)}; \quad \dot{U}_{A_1,K}^{(1)} = -(\dot{U}_{A_2,K}^{(1)} + \dot{U}_{A_0,K}^{(1)}). \quad (14.3b)$$

- двуфазно късо съединение и земя

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A_2,K}^{(1,1)} &= \frac{-X_{0,\Sigma}}{X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}} \cdot \dot{I}_{A_1,K}^{(1,1)}; & \dot{U}_{A_1,K}^{(1,1)} &= \dot{U}_{A_2,K}^{(1,1)} = \dot{U}_{A_0,K}^{(1,1)}; \\ \dot{I}_{A_0,K}^{(1,1)} &= \frac{-X_{2,\Sigma}}{X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}} \cdot \dot{I}_{A_1,K}^{(1,1)}. \end{aligned} \quad (14.3b)$$

Трябва да се помни, че този важен факт, който се нарича **правило за еквивалентност на правата последователност**, е валиден само за основния хармоник на периодичната съставляща на тока на несиметричните к.с.



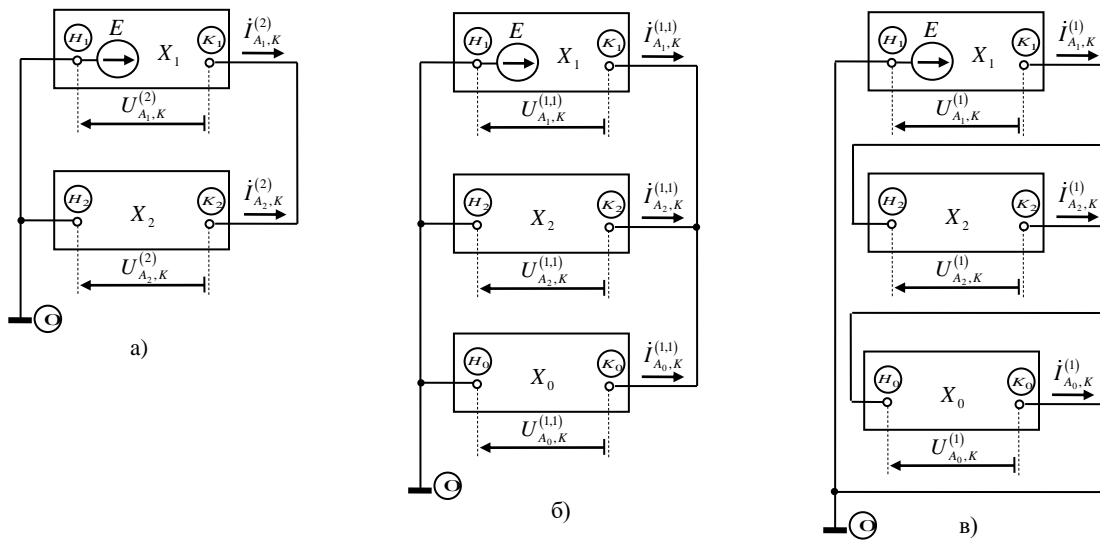
Чрез изчислените симетрични съставлящи се определят и фазните величини. За големината на тока в повредените фази в мястото на к.с. е валиден обобщения израз:

$$\left| \dot{I}_K^{(n)} \right| = m^{(n)} \cdot \left| \dot{I}_{A_1, K}^{(n)} \right| \quad (14.4)$$

където

$$m^{(2)} = \sqrt{3}; \quad m^{(1)} = 3; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{(X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma})^2}}.$$

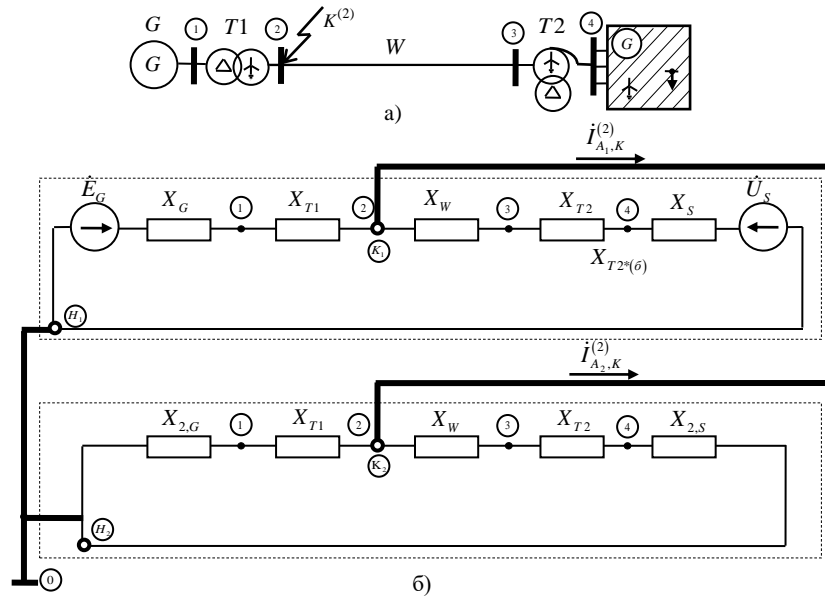
Когато се търсят токовете в елементите на системата е уместно да се използват така наречената **комплексна заместваща схема**. Това е схема, която обединява схемите на симетричните координати по начин, съответстващ на съотношенията на симетричните съставки на токовете и напреженията в мястото на к.с.. Например, при двуфазното к.с. са валидни  $\dot{U}_{A_1, K}^{(2)} = \dot{U}_{A_2, K}^{(2)}$  и  $\dot{I}_{A_1, K}^{(2)} = -\dot{I}_{A_2, K}^{(2)}$ . Това означава, че двете схеми могат да бъдат свързани в паралел чрез началата и краищата си. На фиг. 14.1 схематично са показани комплексните заместващи схеми за трите вида несиметрични к.с., а на фиг. 14.2 – за конкретна ЕЕС при двуфазно к.с. във възел 2.



Фиг. 14.1. Схематично представяне на комплексните заместващи схеми:  
а) при двуфазно к.с.; б) при двуфазно със земя; в) при еднофазно к.с.

Комплексните заместващи схеми позволяват едновременно да се изчислят симетричните съставлящи на напреженията и токовете за всички елементи на схемата. За целта, може да се приложи метода на възловите напрежения при базисен възел - нулевата шина 0 и обща номерация на цялата схема. Веднага обаче трябва да се отбележи, че при еднофазно к.с. (вж. фиг. 14.1в) напреженията във възлите на схемите на обратната и нулевата последователност ще се изчислят спрямо нулевата шина 0 и няма да са равни на търсените симетрични съставлящи. Следва от тях да се извадят напреженията, съответно на  $H_2$  и  $H_0$ , които също са изчислени спрямо 0.

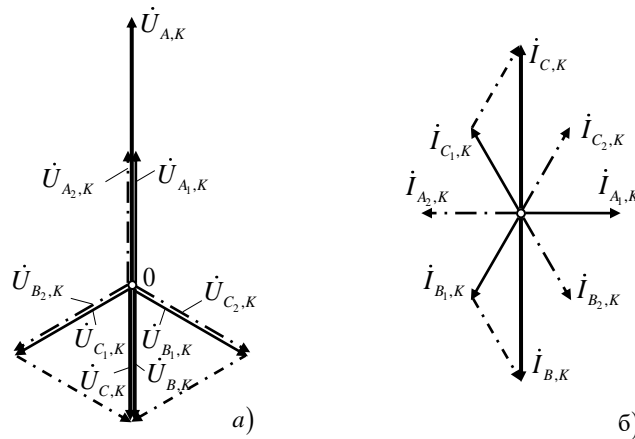
Ясно е, че комплексните схеми увеличават броя на възловите уравнения и затова обикновено се прилагат при използване на компютърни програми.



Фиг. 14.2. Пример за комплексна заместваща схема при двуфазно к.с.:  
 а) принципна схема; б) комплексна заместваща схема

Векторните диаграми на симетричните съставки и фазните величини на тока и напрежението в мястото на к.с. се представят чрез съотношенията (14.3).

На фиг. 14.2 са показани векторните диаграми за двуфазно к.с. на напреженията и токовете за мястото на к.с. в симетрични и фазни координати.



Фиг. 14.2. Векторни диаграми на напрежението и тока при двуфазна повреда

## ТЕМА 15. Съотношение между режимните параметри за режимите на различните видове къси съединения. Диапазони, регулиране на съотношенията, разпределение на симетричните съставлящи на напреженията

Практически интерес представлява отношението на ефективната стойност на периодичната съставляща на тока в повредените фази за мястото на несиметричните к.с. спрямо този на трифазното к.с., ако к.с. възникват в едно и също място на ЕЕС при еднакви изходни условия.

За големината на ефективната стойност на тока в повредените фази за мястото на к.с. е валиден израз (вж. Тема №14)

$$|\dot{I}_K^{(n)}| = m^{(n)} \cdot |\dot{I}_{A,K}^{(n)}|, \quad (15.1)$$

$$\text{където } m^{(2)} = \sqrt{3}; \quad m^{(1)} = 3; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{(X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma})^2}}.$$

Като се отчете, че

$$|\dot{I}_{A,K}^{(n)}| = \frac{E_{1,\Sigma}}{X_{1,\Sigma} + \Delta X^{(n)}} \quad (15.2)$$

$$\text{където } \Delta X^{(3)} = 0; \quad \Delta X^{(2)} = X_{2,\Sigma}; \quad \Delta X^{(1)} = X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}; \quad \Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}}.$$

то за отношението на тока при несиметрични к.с. към този при трифазното к.с. се получава

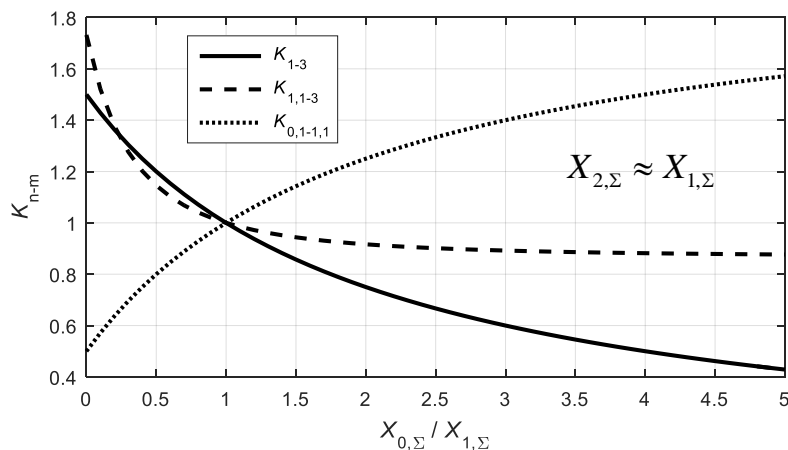
$$\begin{aligned} K_{2-3} &= \frac{|\dot{I}_K^{(2)}|}{|\dot{I}_K^{(3)}|} = \frac{m^{(2)}}{1 + \frac{\Delta X^{(2)}}{X_{1,\Sigma}}} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{X_{2,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}}}; \\ K_{1-3} &= \frac{|\dot{I}_K^{(1)}|}{|\dot{I}_K^{(3)}|} = \frac{m^{(1)}}{1 + \frac{\Delta X^{(1)}}{X_{1,\Sigma}}} = \frac{3}{1 + \frac{X_{2,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}} + \frac{X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}}}; \\ K_{1,1-3} &= \frac{|\dot{I}_K^{(1,1)}|}{|\dot{I}_K^{(3)}|} = \frac{m^{(1,1)}}{1 + \frac{\Delta X^{(1,1)}}{X_{1,\Sigma}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{(X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma})^2}}}{1 + \frac{X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{X_{2,\Sigma} + X_{0,\Sigma}} \cdot \frac{1}{X_{1,\Sigma}}}. \end{aligned} \quad (15.3)$$

Вижда се, че  $K_{n-3}$  зависят от отношенията на сумарните съпротивления на симетричните съставлящи за мястото на к.с.

За електрически близките к.с. определящо за  $X_{1,\Sigma}$  е съпротивлението на генераторите, а за отдалечените к.с. - преносните елементи (трансформатори и електропроводи). Съпротивлението за права последователност на генератора  $X_{1,G}$  се изменя от  $X_d''$  за началния момент на смущението до  $X_d$  за установения режим на к.с. Следователно за к.с. с малка електрическа отдалеченост  $X_{1,\Sigma}$  се изменя в широки граници в стадия на к.с. Независимо от електрическата отдалеченост  $X_{2,\Sigma}$  и  $X_{0,\Sigma}$  остават постоянни в целия стадий на к.с., при това  $X_{2,G} \approx X_d''$ ;  $X_{2,T} = X_{1,T}$ ;  $X_{2,W} = X_{1,W}$ ;  $X_{0,W} > X_{1,W}$ , а  $X_{0,T}$  - зависи от начина на свързване на намотките и заземяването на звездните центрове. Очевидно, че отдалечените к.с.  $K_{n-3}$  практически не се изменя за целия стадий на к.с.

От изложеното следва, че при двуфазно к.с. на шините на генератора, за  $t=0$ ;  $X_{1,\Sigma} \approx X_{2,\Sigma}$  и  $K_{2-3(t=0)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$ ; за  $t=\infty$   $X_{1,\Sigma} \gg X_{2,\Sigma}$  и  $K_{2-3(t \rightarrow \infty)} \rightarrow \sqrt{3}$ . За отдалечените к.с. (к.с. в разпределителните мрежи)  $X_{2,\Sigma} \approx X_{1,\Sigma}$  и  $K_{2-3} = 0,87$ .

Еднофазните к.с. възникват в мрежите с директно заземен звезден център (в мрежи за ВН и НН). В тези мрежи  $X_{2,\Sigma} \approx X_{1,\Sigma}$ . Следователно  $K_{1-3}$  зависи от  $X_{0,\Sigma} / X_{1,\Sigma}$ . Отношението  $X_{0,\Sigma} / X_{1,\Sigma}$  се регулира от изменението на  $X_{0,\Sigma}$  чрез промяна на броя и начина на заземяването на галванично свързаните с мрежата звездни центрове на трансформаторите. При изолирани всички звездни центрове  $X_{0,\Sigma} = \infty$ . От изложеното следва, че при  $X_{2,\Sigma} = X_{1,\Sigma} \Rightarrow 0 < K_{1-3} \leq 1,5$ , както това е показано на фиг. 15.1. За отбелязване е, че при  $X_{1,\Sigma} = X_{2,\Sigma} = X_{0,\Sigma}$ ,  $K_{1-3} = 1$ .



Фиг. 15.1. Съотношение между ефективните стойности на т.к.с в мястото на к.с.

Показаните зависимости на фиг. 15. 1 са валидни само за токовете в мястото на к.с.

Ако в  $K_{1,1-3}$  се положи  $X_{2,\Sigma} \approx X_{1,\Sigma}$  то може да се установи, че при това условие  $K_{1,1-3}$  е функция също на отношението  $X_{0,\Sigma} / X_{1,\Sigma}$ . Тази зависимост също е показана на фиг. 15.1.

За отбелязване е, че  $I_K^{(1,1)}$  е по-малък от  $I_K^{(1)}$  само в диапазона  $0,2 < \frac{X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}} < 1$ . На практика

$X_{0,\Sigma}$  се регулира така, че  $\frac{X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}} > 1$  и  $K_{n-3} < 1$ , т.е. токът на трифазно к.с. в мрежите да е по-

голям от този на несиметричните к.с., тъй като е прието апаратурата да се оразмерява за трифазното к.с.

Практически интерес представлява и сравняването на токовете към земя при еднофазното и двуфазно к.с. със земя. Тъй като  $I_0^{(1)} = 3 \cdot I_{A_0,K}^{(1)}$  и  $I_3^{(1,1)} = 3 \cdot I_{A_0,K}^{(1,1)}$ , то следва, че

$$K_{0,1-1,1} = \frac{I_3^{(1)}}{I_3^{(1,1)}} = \frac{I_{A_0,K}^{(1)}}{I_{A_0,K}^{(1,1)}}$$

от където

$$K_{0,1-1,1} = \frac{X_{1,\Sigma} \cdot X_{2,\Sigma} + X_{1,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma} + X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma} \cdot X_{2,\Sigma} + X_{2,\Sigma}^2 + X_{2,\Sigma} \cdot X_{0,\Sigma}} \quad (15.4)$$

При  $X_{1,\Sigma} = X_{2,\Sigma}$ , (15.4) се преобразува в по-прост вид

$$K_{0,1-1,1} = \frac{1 + (2 \cdot X_{0,\Sigma} / X_{1,\Sigma})}{2 + (X_{0,\Sigma} / X_{1,\Sigma})} \quad (15.5)$$

и за  $0 < \frac{X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}} < \infty$  се получава  $0,5 < K_{0,1-1,1} < 2$

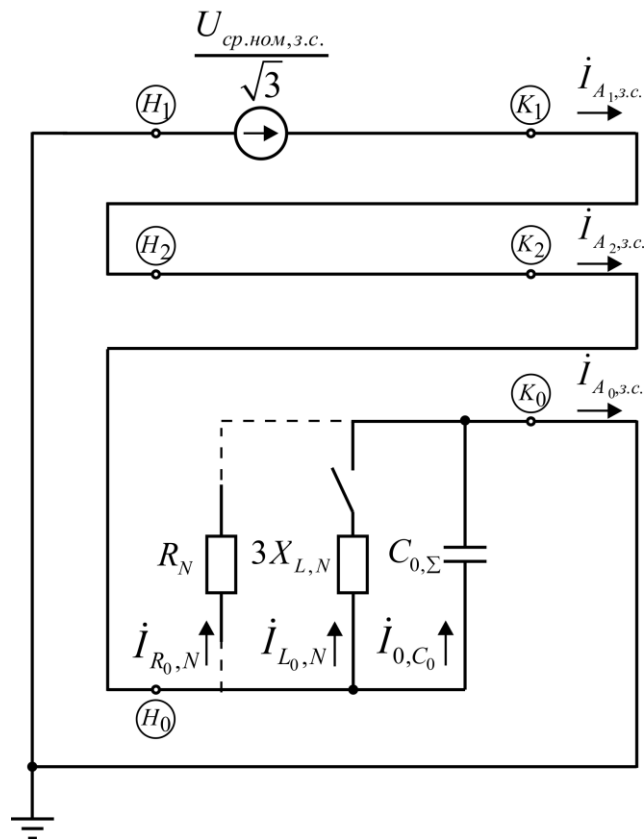
Изменението на  $K_{0,1-1,1}$  във функция на  $\frac{X_{0,\Sigma}}{X_{1,\Sigma}}$  е показана също на фиг.15.1. Вижда се, че при

$X_{0,\Sigma} = X_{1,\Sigma}$  токовете към земя за двата вида к.с. са равни. При  $X_{0,\Sigma} < X_{1,\Sigma}$ , токът към земя при двуфазно к.с. със земя е по-голям от тока при еднофазно к.с., т.е.  $I_3^{(1)} < I_3^{(1,1)}$ , а при  $X_{0,\Sigma} > X_{1,\Sigma}$  следва, че  $I_3^{(1)} > I_3^{(1,1)}$ . Ето защо, еднофазното к.с. се използва като оразмерително за заземителните инсталации.

Практически интерес представлява и разпределението на симетричните съставлящи на напрежението. Най-голяма е несиметрията на трифазната система напрежения в мястото на несиметричното к.с. Напреженията на обратна и нулева последователност са най-големи в мястото на к.с. С отдалечаване от к.с. тези напрежения намаляват, като напрежението на нулевата последователност не преминава през трансформатори, които не са свързани в  $Y_0 / y_0$  и не са заземени от двете страни. Напрежението за правата последователност е най-голямо при генераторите и намалява с отдалечаването от тях.

## ТЕМА 16. Изчисляване на ефективните стойности на режимните параметри на земно съединение в мрежи с различно заземяване на звездния център

Разпределителните мрежи за средно напрежение работят с неефективно заземен звезден център на източниците. Обикновено за мрежите с въздушни електропроводи се прилага резонансно заземяване през компенсирани индуктивности ( $X_{L,N}$ ), а при мрежи с кабелни електропроводи - през резистори ( $R_N$ ). При къси мрежи звездния център може да е изолиран. И при трите начина на третиране на звездния център съединението на една фаза със земя се нарича земно съединение (з.с.). При мрежи с изолиран звезден център тока на з.с. се затваря през капацитета на галванично свързаните тоководи на мрежата спрямо земя, т.е. през капацитета с нулевата последователност  $C_{0,\Sigma}$ , а при заземяване през  $X_{L,N}$  или  $R_N$  - и през заземяването на звездния център. Като се отчитат тези факти и съотношението на тези съпротивления спрямо съпротивленията на елементите на мрежата за права, обратна и нулева последователност, се намира основание за опростяване на комплексната заместваща схема на з.с. до вида показан на фиг. 16.1.



Фиг. 16.1. Комплексната заместваща схема на з.с.

Като се отчете правилото за еквивалентност на тока на правата последователност (вж. Тема №14) следва, че големината на тока в мястото на з.с. е равен на

$$\dot{I}_{з.с.} = 3 \cdot \dot{I}_{A_1, з.с.} = 3 \cdot \dot{I}_{A_0, з.с.} \quad (16.1)$$

При мрежа с изолиран звезден център  $\dot{I}_{A_0, з.с.} = \dot{I}_{0, C_0}$  и следователно –

$$\dot{I}_{з.с.} = \frac{3 \cdot U_{ср.ном} / \sqrt{3}}{-j \cdot X_{C_0, \Sigma}} = j \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot 2\pi f_0 \cdot C_{0, \Sigma} = j \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot 314 \cdot C_{0, \Sigma} \quad (16.1)$$

Както се вижда при направеното опростяване на комплексната схема  $I_{з.с.}$  не зависи от мястото на з.с. в мрежата, а се определя от сумарния капацитет за нулева последователност на галванично свързаната мрежа.

При липса на конкретни данни за  $C_0$  на мрежата може да се използва следната приблизителна формула

$$\dot{I}_{з.с.} = j \cdot \frac{U_{ср.ном} \cdot l_{W, \Sigma}}{N}, \text{ A} \quad (16.2a)$$

където  $U_{ср.ном}$  е в kV,  $l_{W, \Sigma}$  - сумарната дължина на галванично свързаната мрежа в km, а  $N = 350$  за въздушни мрежи и  $N = 10$  за кабелни мрежи.

При мрежа заземена през  $X_{L, N}$  следва, че (вж. фиг. 16.1)

$$\dot{I}_{A_0, з.с.} = \dot{I}_{0, C_0} + \dot{I}_{L_0, N} = j \frac{U_{ср.ном}}{X_{C_0, \Sigma} \cdot \sqrt{3}} - j \frac{U_{ср.ном}}{3 \cdot X_{L, N} \cdot \sqrt{3}} \quad (16.3)$$

$$\dot{I}_{з.с.} = 3 \cdot \dot{I}_{A_0, з.с.} = j \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot \left( \frac{1}{X_{C_0, \Sigma}} - \frac{1}{3X_{L, N}} \right) \quad (16.3a)$$

Очевидно е, че ако  $X_{L, N} = \frac{X_{C_0, \Sigma}}{3}$ , то теоретично  $I_{з.с.} = 0$ , т.е. налице е пълна компенсация на тока в мястото на земното съединение. Реално не настъпва пълна компенсация поради наличието на активна проводимост, която е пренебрегната в опростената схема (фиг. 16.1). На практика стремежът е да се сведе токът на земно съединение до стойност, при която дъгата изгасва самостоятелно.

При мрежа заземена през  $R_N$  следва, че (вж. 16.1)

$$\dot{I}_{A_0, з.с.} = \dot{I}_{0, C_0} + \dot{I}_{R_0, N} = j \cdot \frac{U_{ср.ном}}{X_{C_0, \Sigma} \cdot \sqrt{3}} + \frac{U_{ср.ном}}{3 \cdot R_N \cdot \sqrt{3}} \quad (16.4)$$

$$\dot{I}_{з.с.} = 3 \cdot \dot{I}_{A_0, з.с.} = \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot \left( \frac{j}{X_{C_0, \Sigma}} + \frac{1}{3 \cdot R_N} \right) \quad (16.4a)$$

Вижда се, че при този начин на заземяване на звездния център токът в мястото на з.с. нараства с активната съставяща  $3\dot{I}_{R_0,N}$  определена от големината на  $R_N$ . Тази съставяща протича само в електропроводите със з.с., с което се създават условия за селективно действие на релейната защита.

Обикновено з.с. възниква през електрическа дъга, което при изчисленията се отчита с активното ѝ съпротивление  $R_D$ . Токът на з.с. при отчитане на ел. дъгата за всички разгледани начини на заземяване на звездния център се изчислява с обобщения израз

$$\dot{I}_{з.с.} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.ном}}{\dot{Z}_{з.с.}} \quad (16.5)$$

където

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Z}_{з.с.} = 3 \cdot R_D + \frac{\dot{Z}_N \cdot (-jX_{C_0,\Sigma})}{(\dot{Z}_N - jX_{C_0,\Sigma})} \\ \dot{Z}_N = \infty \text{ - при изолиран звезден център} \\ \dot{Z}_N = j \cdot 3 \cdot X_N \text{ - при заземяване през } X_N \\ \dot{Z}_N = 3 \cdot R_N \text{ - при заземяване през } R_N \end{array} \right. \quad (16.5a)$$



## ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Герасимов Кр., Й. Каменов, Моделиране в електроенергийните системи, Записки на лекции, Авангард Прима, С., 2007 г.
- [2] Герасимов Кр., К. Герасимов. Къси съединения в електроенергийните системи. Технически университет - Варна 2016