

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Є.І. Бардик, Р.В. Вожаков, М.П. Болотний

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ  
ПРОЦЕСИ В  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ  
СИСТЕМАХ  
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2023

Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня магістр спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /уклад.: Є.І. Бардик, Р.В. Вожаков, М.П. Болотний / КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 1.5 Мбайт). – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023. – 60 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №8 від 02.06.2023 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 11 від 29.05.2023 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

# ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Укладачі *Бардик Євген Іванович*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри відновлюваних джерел енергії ФЕА  
*Вожаков Роман Вікторович*, асистент кафедри відновлюваних джерел енергії ФЕА  
*Болотний Микола Петрович*, канд. техн. наук, ст.викладач кафедри відновлюваних джерел енергії ФЕА

Відповідальний редактор *Будько В. І.*, докт. техн. наук, доцент, професор, завідувач кафедри відновлюваних джерел енергії ФЕА

Рецензент *Чумак В.В.*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин

В навчальному посібнику подано пропозиції щодо організації самостійної роботи студентів, викладено методичні положення щодо написання та оформлення розрахунково-графічної роботи, розкрито зміст основних елементів та етапів її написання. Рекомендовано здійснювати дослідження та представляти результати за трьома напрямками теоретичним, де викладаються основні теоретичні положення, які характеризують об'єкт та предмет дослідження; аналітичним, де подається характеристика об'єкту та предмету дослідження; розрахунковим, де надаються розрахунки та їх обґрунтування по окремих напрямкам, що включає дисципліна «Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах».

© Є. І. Бардик, Р.В. Вожаков, М.П. Болотний  
©КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023

## З М І С Т

Перелік скорочень .....	4
Вступ .....	5
1. ВИЗНАЧЕННЯ ІДЕАЛЬНОЇ МЕЖІ ПОТУЖНОСТІ ВІДДАЛЕНОЇ СИСТЕМИ .....	6
1.1. Розрахункова схема і заступна схема досліджуваної системи. Векторна діаграма при $X_d = X_q$ .....	6
1.2. Характеристики потужності $P_H = f(\delta)$ , $Q_H = f(\delta)$ . Межа переданої потужності і коефіцієнт запасу по статичній стійкості системи при $X_d = X_q$ .....	11
1.3. Векторна діаграма системи I з явнополюсним генератором ( $X_d \neq X_q$ ) .....	13
1.4. Характеристика $P_H = f(\delta)$ , межа переданої потужності і коефіцієнт запасу по статичній стійкості системи з явнополюсним генератором .....	16
1.5. Приклад побудови векторної діаграми системи I з явнополюсним генератором ( $X_d \neq X_q$ ) .....	19
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ I В ІДЕАЛІЗОВАНИХ УМОВАХ ( $S_{II} = \infty$ , $E' = \text{CONST}$ ) .....	21
2.1. Вихідний режим .....	21
2.2. Аварійний режим .....	24
2.3. Післяаварійний режим .....	32
2.4. Режим роботи системи після дії автоматики повторного включення (АПВ) .....	36
2.5. Приклад дослідження динамічної стійкості системи I в ідеалізованих умовах .....	40
3. ЗАВДАННЯ .....	47
ЛІТЕРАТУРА .....	50
ДОДАТОК1 .....	51
ДОДАТОК2 .....	52

## **Перелік скорочень**

**АПВ** – автоматика повторного включення

**Г** – генератор

**ЕРС** – електрорушійна сила

**КЗ** – коротке замикання

**Л (ЛЕП)** – лінія електропередач

**НЯСМ** – неявнополюсна синхронна машина

**Т** – трансформатор

**ЯСМ** – явнополюсна синхронна машина

## ВСТУП

Розрахунково-графічна робота передбачає виконання розрахунків й аналіз найпоширеніших електромеханічних перехідних процесів, обумовлених збуреннями в електроенергетичних системах.

В навчальний посібник включено рекомендації щодо визначення ідеальної межі потужності, коефіцієнту запасу по статичній стійкості, побудови векторних діаграм і характеристик потужностей віддаленої системи з неявнополюсним та явнополюсним генератором.

Надаються роз'яснення щодо дослідження динамічної стійкості ідеалізованої системи при різних видах КЗ з використанням правила площин та методу послідовних інтервалів. Сформульовані завдання для розрахунково-графічної роботи.

Розрахункові умови для виконання розрахунково-графічної роботи визначені у завданні, а можливі допущення – у вказівках до кожного етапу виконання дослідження динамічної стійкості електроенергетичної системи. Наведено параметри елементів системи, які використовуються при виконанні завдань розрахунково-графічної роботи.

Терміни видачі й виконання завдань на розрахунково-графічну роботу встановлюються відповідно до існуючого робочого навчального плану спеціальності.

При виконанні розрахунково-графічної роботи розрахунки й перетворення електричних схем необхідно вести послідовно й супроводжувати відповідними поясненнями.

Рисунки повинні задовольняти вимоги ДСТУ, позначення й індекси параметрів схем і режимів систем – відповідати загальноприйнятим правилам.

# 1. ВИЗНАЧЕННЯ ІДЕАЛЬНОЇ МЕЖІ ПОТУЖНОСТІ ВІДДАЛЕНОЇ СИСТЕМИ

## 1.1. Розрахункова схема і заступна схема досліджуваної системи.

### Векторна діаграма при $X_d = X_q$

Аналіз статичної і динамічної стійкості в складній багатомашинній електричній системі досить громіздкий. Найбільш ясне і глибоке уявлення про характер процесів, що проходять в системі при малих і великих збуреннях можна одержати, досліджуючи спрощений еквівалент багатомашинної системи, а саме, двомашинну систему. Тому в рамках даної розрахунково-графічної роботи при аналізі статичної і динамічної стійкості розглядається система з двома еквівалентними генераторами, розрахункова схема якої приведена нижче.

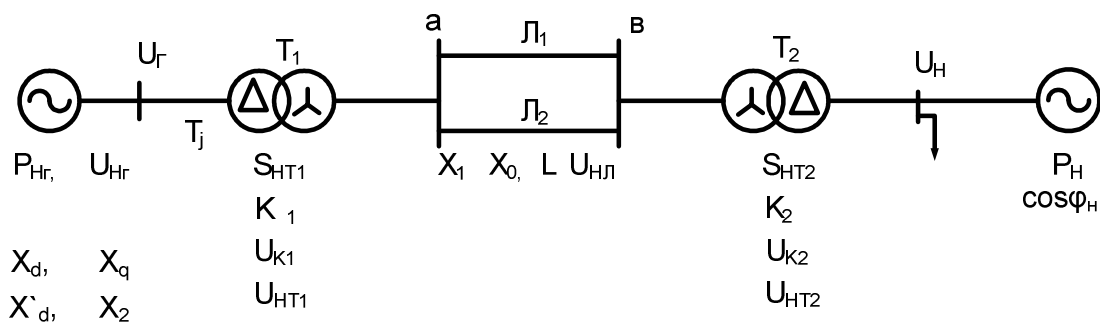


Рис. 1.1. Розрахункова схема системи

Тут:  $P_{нг}$  – активна потужність генератора системи I;  $X_d$ ,  $X_q$  – синхронні індуктивні опори генератора по поздовжній і поперечній осях;  $X'_d$  – перехідний опір генератора по поздовжній осі;  $X_2$  – опір генератора зворотній послідовності;  $T_j$  – механічна стала інерції;  $U_{г}$  – напруга на шинах генератора;  $S_{нт1}$ ,  $S_{нт2}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ , – номінальні повні потужності трансформаторів і коефіцієнти трансформації;  $U_{к1}$ ,  $U_{к2}$  – напруги короткого замикання транс-

трансформаторів;  $L_1, L_2$  – лінії електропередач (ЛЕП);  $L$  – довжина ЛЕП;  $X_1, X_0$  – погонні опори прямої і нульової послідовностей ЛЕП.

Для аналізу стійкості найпростішої системи необхідно представити дану розрахункову схему заступною, під якою варто розуміти електричну схему, що відповідає вихідним даним, у якій усі магнітозв'язані ланцюги заміщені електричними і привести параметри всіх елементів системи до базисних умов.

Оскільки досліджувана система є найпростішою (складається з декількох елементів), при приведенні параметрів елементів до базисних умов доцільно використовувати метод точного приведення у відносних одиницях. Причому, за базисні умови доцільно прийняти умови навантаження:

$$U_B = U_H, \quad S_B = S_H = \frac{P_H}{\cos \varphi_H}, \quad Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi_H$$

Тоді формули для визначення відносних приведених параметрів елементів даної схеми будуть мати вигляд:

Генератор:

$$\begin{aligned} \overline{X_{d^*}} &= X_{d^*} \cdot \frac{S_B}{S_{HG}} \cdot \left(\frac{U_{HG}}{U_B}\right)^2 \cdot (K_1 K_2)^2; \\ \overline{X_{q^*}} &= X_{q^*} \cdot \frac{S_B}{S_{HG}} \cdot \left(\frac{U_{HG}}{U_B}\right)^2 \cdot (K_1 K_2)^2; \\ \overline{X'_{d^*}} &= X'_{d^*} \cdot \frac{S_B}{S_{HG}} \cdot \left(\frac{U_{HG}}{U_B}\right)^2 \cdot (K_1 K_2)^2; \\ \overline{X_{2^*}} &= X_{2^*} \cdot \frac{S_B}{S_{HG}} \cdot \left(\frac{U_{HG}}{U_B}\right)^2 \cdot (K_1 K_2)^2; \\ \overline{T_j} &= T_j \cdot \frac{S_{HG}}{S_B}. \end{aligned} \tag{1.1}$$

Трансформатор Т<sub>1</sub>:

$$\overline{X_{T1*}} = \frac{U_{K1}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HT1}} \cdot \left( \frac{U_{HT1}}{U_B} \right)^2 \cdot (K_1 K_2)^2$$

Трансформатор Т<sub>2</sub>:

$$\overline{X_{T2*}} = \frac{U_{K2}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HT2}} \cdot \left( \frac{U_{HT2}}{U_B} \right)^2. \quad (1.2)$$

ЛЕП:

$$\overline{X_{Л*}} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{НЛ}^2} \cdot K_2^2,$$

де  $S_{HT} = \frac{P_{HT}}{\cos \phi_G}$  – номінальна повна потужність генератора системи;

$S_{HT1}, S_{HT2}$  – номінальна потужність трансформаторів Т<sub>1</sub> і Т<sub>2</sub>;

$U_{HT1}, U_{HT2}$  – номінальні напруги відповідних обмоток трансформаторів;

$K_1, K_2$  – коефіцієнти трансформації, прийняті як відношення напруги ступеню, спрямованого в бік куди перераховуються параметри до напруги ступеню звідки перераховуються параметри;

$U_{НЛ}$  – номінальна напруга ЛЕП.

Аналітичні вирази для активної і реактивної потужностей ( $P_H, Q_H$ ), що посилається еквівалентним генератором системи I до шин системи нескінченної потужності (вузол підключення навантаження), а також генеруючої (внутрішньої) потужності системи I ( $P_E, Q_E$ ) можна одержати з векторної діаграми (рис. 1.4). Така діаграма будується для даної найпростішої еквівалентної

однофазної системи, що заміщає задану трифазну в координатних осях ротора (d, q). Заступна схема досліджуваної системи і відповідна їй еквівалентна представлена на рис. 1.2 і рис. 1.3.

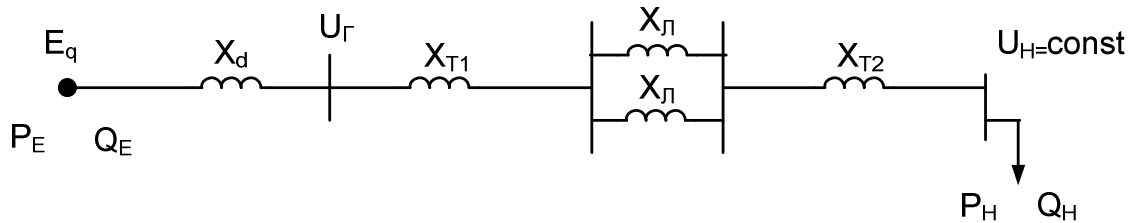


Рис. 1.2. Заступна схема найпростішої системи з НЯСМ

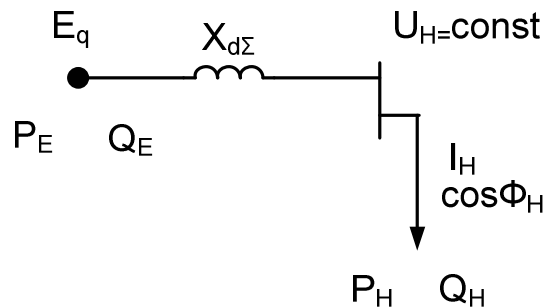


Рис. 1.3. Еквівалентна заступна схема найпростішої системи з НЯСМ

Еквівалентний синхронний опір визначається з виразу:

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{\text{зов}},$$

$$X_{\text{зов}} = X_{T1} + X_{T2} + \frac{X_{\text{Л}}}{2} \quad (1.3)$$

З векторної діаграми (рис. 1.4), побудованої при фактичному навантаженні системи I і для випадку неявнополюсного генератора ( $X_d=X_q$ ,  $\Gamma_3=0$ ), можна визначити синхронну ЕРС генератора:

$$E_q = \sqrt{\left( U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{d\Sigma} \right)^2 + \left( \frac{P_H}{U_H} \cdot X_{d\Sigma} \right)^2} \quad (1.4)$$

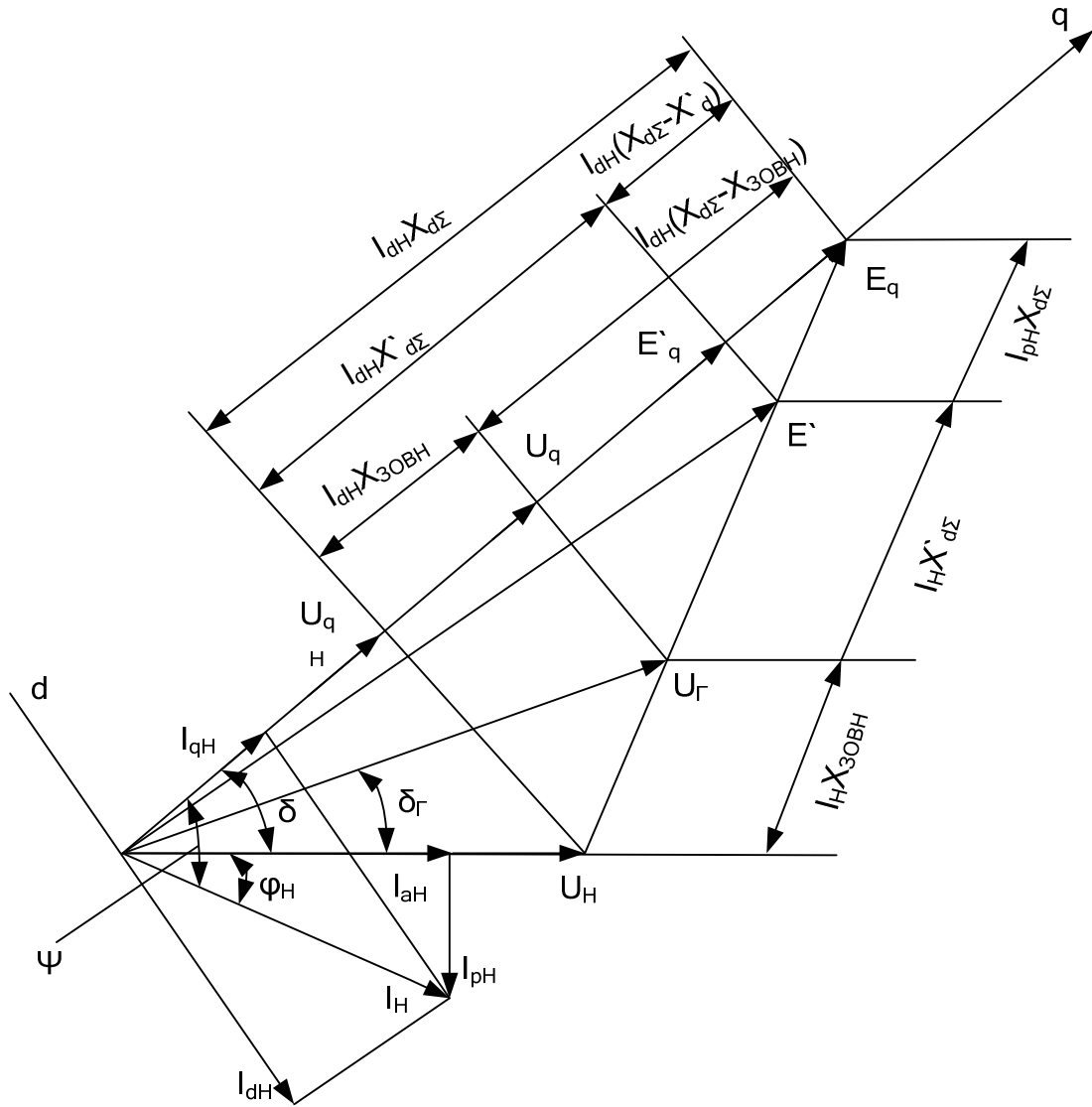


Рис. 1.4. Векторна діаграма найпростішої системи з неявнополюсним генератором

і кут зсуву між вектором напруги шин прийомної системи і синхронної ЕРС  $E_q$ :

$$\delta = \arctg \frac{\frac{P_H}{U_H} \cdot X_{d\Sigma}}{U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{d\Sigma}}, \quad (1.5)$$

а також напругу на шинах генератора  $U_\Gamma$ , перехідну ЕРС  $E'$  і, відповідно, їхні кути зсуву ( $\delta_\Gamma$ ,  $\delta'$ ) відносно вектора напруги  $U_H$ :

$$U_\Gamma = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{306}\right)^2 + \left(\frac{P_H}{U_H} \cdot X_{306}\right)^2}, \quad (1.6)$$

$$\delta_\Gamma = \arctg \frac{\frac{P_H}{U_H} \cdot X_{306}}{U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{306}}, \quad (1.7)$$

$$E' = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X'_{d\Sigma}\right)^2 + \left(\frac{P_H}{U_H} \cdot X'_{d\Sigma}\right)^2}, \quad (1.8)$$

$$\delta' = \arctg \frac{\frac{P_H}{U_H} \cdot X'_{d\Sigma}}{U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X'_{d\Sigma}}. \quad (1.9)$$

## 1.2. Характеристики потужності $P_H = f(\delta)$ , $Q_H = f(\delta)$ . Межа переданої потужності і коефіцієнт запасу по статичній стійкості системи при $X_d = X_q$

З векторної діаграми можна записати вирази для  $P_H$ ,  $Q_H$ ,  $Q_E$ ,  $P_E$  через параметри системи і вихідного режиму:

$$P_H = I_{aH} \cdot U_H, \quad I_{aH} \cdot X_{d\Sigma} = E_q \cdot \sin \delta, \quad (1.10)$$

$$Q_H = I_{pH} \cdot U_H, \quad I_{pH} \cdot X_{d\Sigma} = E_q \cdot \cos \delta - U_H.$$

$$P_E = E_q \cdot I_{qH}, \quad U_H \cdot \sin \delta = I_{qH} \cdot X_{d\Sigma},$$

$$Q_E = E_q \cdot I_{dH}, \quad I_{dH} = \frac{E_q - U_H \cdot \cos \delta}{X_{d\Sigma}}. \quad (1.11)$$

Розв'язавши системи (1.10) і (1.11), одержимо остаточні вирази для  $P_H$ ,  $Q_H$ ,  $P_E$ ,  $Q_E$ :

$$\begin{aligned} P_H &= \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta, & Q_H &= \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \cos \delta - \frac{U_H^2}{X_{d\Sigma}}, \\ P_E &= \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta, & Q_E &= \frac{E_q^2}{X_{d\Sigma}} - \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \cos \delta, \end{aligned} \quad (1.12)$$

де  $I_{aH}$ ,  $I_{pH}$  – активна і реактивна складові струму у вузлі навантаження.

Таким чином, з виразу для активної потужності, що видається генератором системи I  $P_E = P_H = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta$ , можна визначити межу потужності даної найпростішої системи.

При постійності ЕРС  $E_q$  (розглядається нерегульована система I) і напруги  $U_H$ , зміна потужності  $P_H$  визначається лише зміною кута  $\delta$  (рис. 1.5).

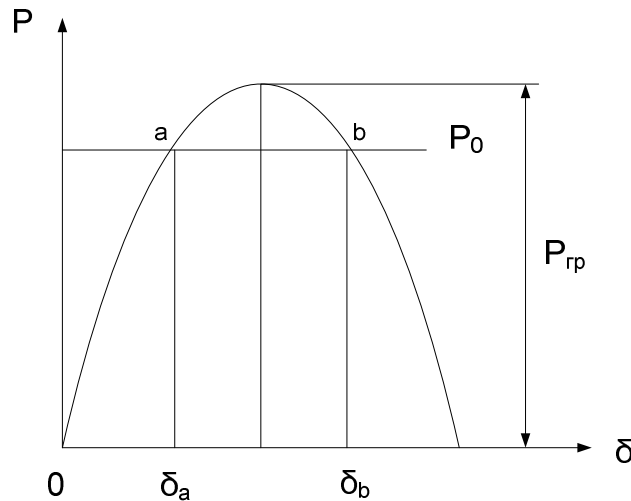


Рис. 1.5. Характеристика потужності найпростішої системи.

За даних умов існує визначений максимум (межа) переданої потужності  $P_{cp} = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}}$ , що досягається при куті  $\delta=90^\circ$ . Причому рівноважний стан

між потужністю турбіни  $P_0$  і генератора  $P$  досягається при  $P < P_{гр}$ , а статично стійкий режим роботи можливий лише при кутах  $\delta < 90$ . Будь-який режим електричної системи повинен мати визначений запас стійкості. Максимальна величина зміни потужності, при якій система ще зберігає стійкість, визначає величину запасу по статичній стійкості електричної системи і характеризується коефіцієнтом запасу по статичній стійкості.

Криві зміни внутрішньої реактивної потужності  $Q_E$  генератора передавальної системи (система I) і реактивної потужності  $Q_H$ , що споживається навантаженням приймальної системи, побудовані по отриманим раніше співвідношенням (1.12) і наведені на рис. 1.6.

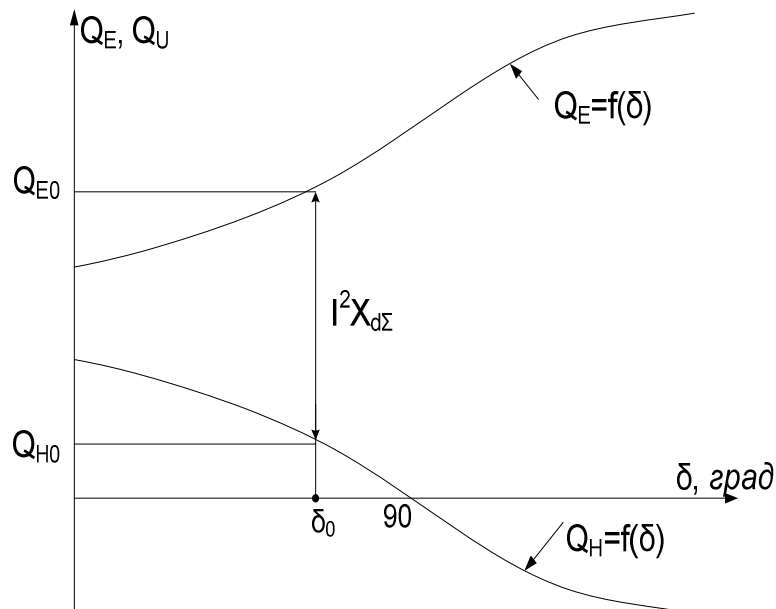


Рис. 1.6. Характеристики реактивної потужності найпростішої системи.

### 1.3. Векторна діаграма системи I з явнополюсним генератором ( $X_d \neq X_q$ )

Як і у випадку системи з неявнополюсним генератором, для побудови векторної діаграми найпростішої електричної системи з явнополюсним гене-

ратором, розглянемо заступну схему найпростішої електричної системи (рис. 1.2) і відповідно еквівалентну заступну схему, що зображена нижче:

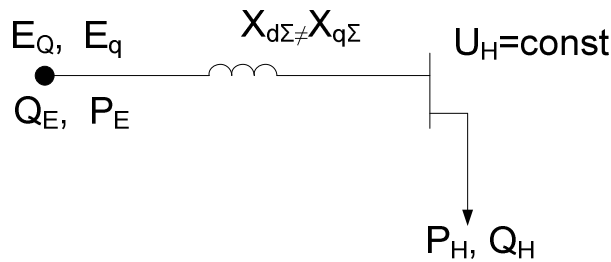


Рис. 1.7. Еквівалентна заступна схема найпростішої системи з ЯСМ

Різні значення опорів генератора по поздовжній і по поперечній осям не дозволяють, як у випадку системи з неявнополюсним генератором, одержати порівняно прості вирази для ЕРС  $E_q$  і потужності  $P_E$  тому, що невідомі напрямки осей  $d$  і  $q$ . В даному випадку систему з явнополюсним генератором заміняють системою з фіктивним неявнополюсним генератором для якого  $X_{d\Sigma} = X_{q\Sigma}$  і чисельно рівні  $X_{q\Sigma}$ . Вважається також, що дійсні і фіктивні генератори несуть однакові активні потужності. Заступна схема при цьому має такий вигляд:

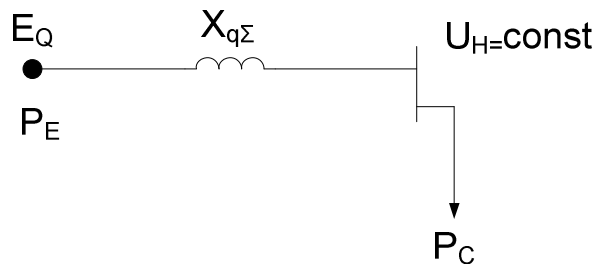


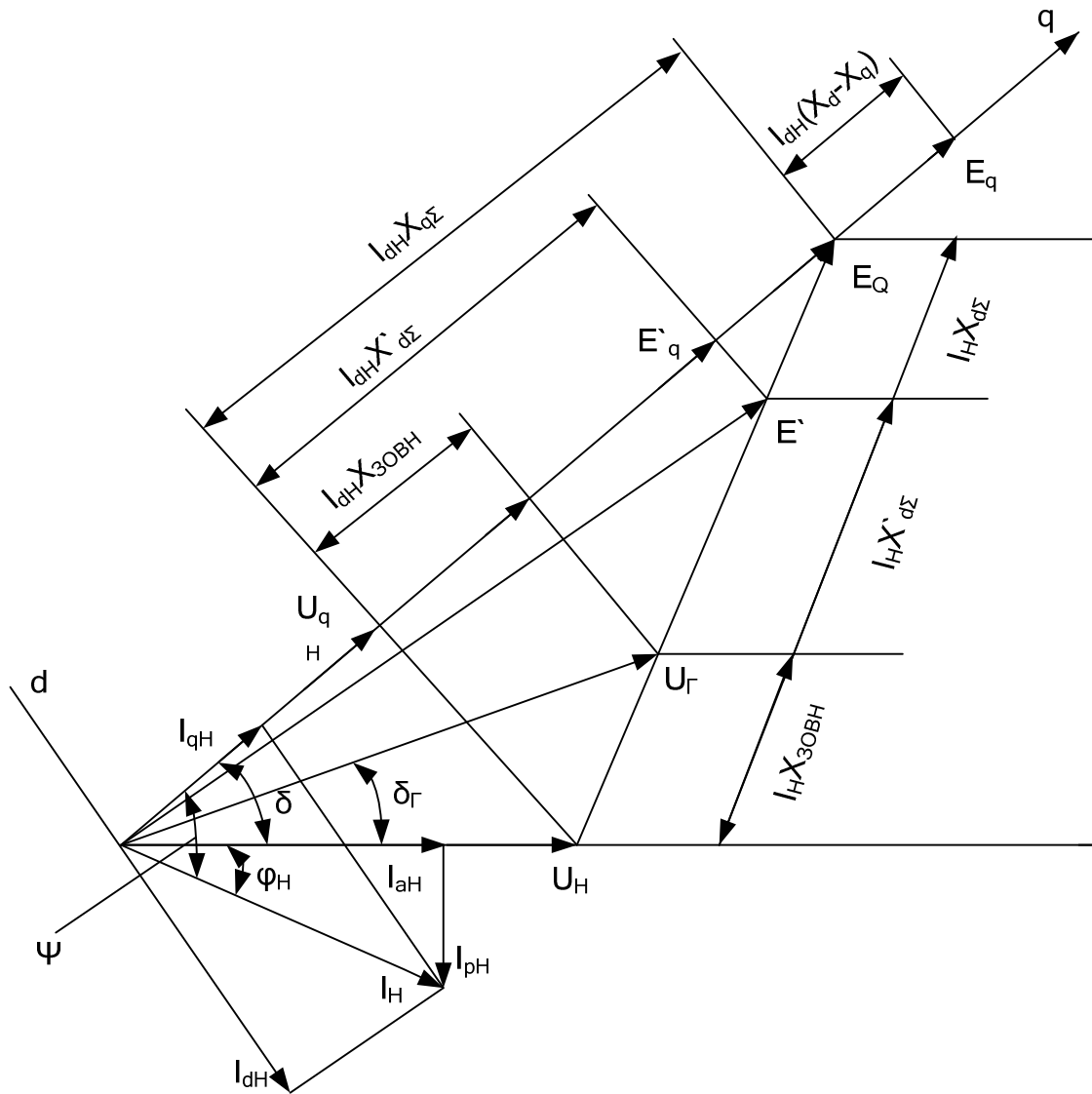
Рис. 1.8. Еквівалентна заступна схема найпростішої системи з ЯСМ

Тут  $E_Q$  – фіктивна ЕРС неявнополюсного генератора;

$$P_H = \frac{E_Q \cdot U_H}{X_{q\Sigma}} \cdot \sin \delta - \text{активна потужність умовної машини.}$$

Додавши до вектора напруги  $U_H$  вектор  $jX_{q\Sigma}I_H$ , одержимо вектор ЕРС  $E_Q$ , напрямок якого збігається з напрямком поперечної осі  $q$ . Побудова  $E_Q$

дозволяє визначити орієнтацію осей  $d$  і  $q$  явнополюсного генератора і відповідно складових усіх величин, що характеризують стан системи з явнополюсним генератором. Остаточний вид векторної діаграми найпростішої електричної системи з явнополюсним генератором представлено на рис. 1.9.



*Рис. 1.9. Векторна діаграма найпростішої системи з явнополюсними генераторами*

**1.4. Характеристика  $P_H=f(\delta)$ , межа переданої потужності і коефіцієнт запасу по статичній стійкості системи з явнополюсним генератором.**

З векторної діаграми можна визначити синхронну ЕРС  $E_Q$  неявнополюсно-го генератора і кут зсуву між вектором напруги шин приймальної системи і синхронної ЕРС:

$$E_Q = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{q\Sigma}\right)^2 + \left(\frac{P_H}{U_H} \cdot X_{q\Sigma}\right)^2},$$

$$\delta = \arctg \frac{\frac{P_H}{U_H} \cdot X_{q\Sigma}}{U_H + \frac{Q_H}{U_H} \cdot X_{q\Sigma}}, \quad E_Q = U_{qH} + I_{dH} \cdot X_{q\Sigma} \quad (1.13)$$

З іншої сторони синхронна ЕРС дійсного явнополюсного генератора:

$$E_q = U_{qH} + I_{dH} \cdot X_{d\Sigma}, \quad I_{dH} = I_H \cdot \sin(\delta + \phi_H). \quad (1.14)$$

З (1.13) і (1.14) можна записати остаточний вираз для  $E_q$ :

$$E_q = E_Q + I_{dH} \cdot (X_d - X_q)$$

Активна внутрішня потужність генератора системи  $I$  дорівнює:

$$P_E = P_C = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{q\Sigma}} \cdot \sin \delta \quad (1.15)$$

Розв'язавши систему рівнянь  $\begin{cases} E_q = E_Q + I_{dH} \cdot (X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}) \\ E_Q = U_H \cdot \cos \delta + I_{dH} \cdot X_{q\Sigma} \end{cases}$

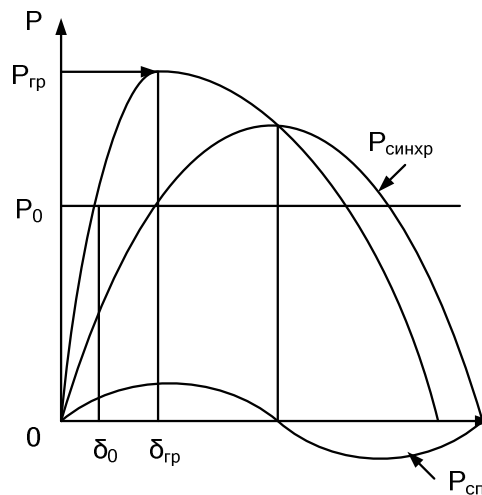
відносно невідомих  $E_Q$  і  $I_d$ , отримаємо аналітичний вираз для  $E_Q$ :

$$E_Q = \frac{U_H \cdot (X_d - X_q)}{X_{d\Sigma}} \cdot \cos \delta + E_q \cdot \frac{X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \quad (1.16)$$

Підставивши з (1.16)  $E_Q$  у (1.15), одержимо формулу для внутрішньої  $P_E$  активної потужності найпростішої системи з явнополюсним генератором:

$$P_E = P_H = \frac{E_Q \cdot U_H}{X_{q\Sigma}} \cdot \sin \delta + \frac{U_H^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \sin 2\delta \quad (1.17)$$

Характеристика потужності системи з явнополюсним генератором (рис. 1.10), що побудована при  $E_q = \text{const}$  і  $U_H = \text{const}$ , складається з двох складових: синхронної синусоїдальної складової  $P_{\text{синх}}$  і складової у вигляді синусоїди подвійної частоти  $P_{\text{сп}}$  (спотворююча потужність).



*Рис. 1.10. Характеристика потужності системи з явнополюсним генератором.*

Як видно з графіка (рис. 1.10), гармоніка подвійної частоти зміщує максимум характеристики потужності і граничний кут  $\delta_{гр}$ , при якому досягається

максимум потужності, виходить меншим  $90^\circ$ . Але амплітуда характеристики потужності  $P_{zp}$  зростає в порівнянні з характеристикою неявнополосного генератора при однакових значеннях  $E_q$  і  $X_d$ .

Для визначення межі переданої потужності системи з явнополосним генератором необхідно знайти  $\delta_{zp}$ , продиференціювавши по куту  $\delta$  і прирівнявши до нуля рівняння для похідної від потужності системи з явнополосним генератором (1.17) по куту  $\delta$ :

$$\frac{dP_E}{d\delta} = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{q\Sigma}} \cdot \cos \delta_{zp} + \frac{U_H^2 \cdot (X_d - X_q)}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \cos 2\delta_{zp} = 0.$$

Враховуючи те, що  $\cos 2\delta_{zp} = \cos^2 \delta_{zp} - \sin^2 \delta_{zp}$  і ввівши позначення:

$$A = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}}, \quad B = \frac{U_H^2 \cdot (X_d - X_q)}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}},$$

одержимо квадратне рівняння для визначення  $\delta_{zp}$ :

$$2 \cdot B \cdot \cos^2 \delta_{zp} + A \cdot \cos \delta_{zp} - B = 0 \quad (1.18)$$

Розв'язавши рівняння (1.18) відносно  $\delta_{zp}$ , і відкинувши корінь з негативним значенням  $\cos \delta_{zp}$ , одержимо:

$$\delta_{zp} = \arccos \left( \frac{-A + \sqrt{A^2 + 8B^2}}{4B} \right), \quad P_{zp} = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta_{zp} + \frac{U_H^2 \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \cdot \sin 2\delta_{zp}.$$

Коефіцієнт запасу по статичній стійкості визначається як і у випадку системи з неявнополосним генератором по формулі:  $K_{cm} = \frac{P_{zp} - P_0}{P_0} \cdot 100\%$ .

### 1.5. Приклад побудови векторної діаграми системи I з явнополюсним генератором ( $X_d \neq X_q$ ).

Нехай маємо найпростішу систему I з явнополюсним генератором (рис. 1.8), параметри якої приведені до базисних умов:  $\cos \varphi_H = 0,95$ ,  $x_q = 1,5$  в.о.,  $x_d = 1,8$  в.о.,  $x'_d = 0,35$  в.о.,  $x_{зовн} = 0,7$  в.о.,  $x_{q\Sigma} = 2,2$  в.о.,  $x'_{d\Sigma} = 1,05$  в.о.

Після вибору прийняттого масштабного коефіцієнта, побудову векторної діаграми починаємо з відомого вектора  $\dot{U}_H$ , довжиною 1 в.о., напрямом, співпадаючим з дійсною віссю (рис. 1.11.а).

Так як, в якості базисних величин, як правило, обирають потужність і напругу навантаження, то струм в системі, приведений до базисних умов  $I_H = 1$  в.о. Будуємо вектор струму під кутом  $\varphi_H = 18^\circ$  до вже побудованого вектора  $\dot{U}_H$  (рис. 1.11.б).

Так як маємо явнополюсний генератор, то необхідно спочатку знайти фіктивну ЕРС  $\dot{E}_Q$ , яка електрично віддалена від  $\dot{U}_H$  на величину втрати напруги на опорі  $x_{q\Sigma}$  генератора:

$$I_H \cdot x_{q\Sigma} = 1 \cdot 2,2 = 2,2 \text{ (в.о.)}$$

Побудуємо вектор  $\dot{E}_Q$ , напрям якого співпадає з поперечною віссю  $q$  синхронного генератора  $\dot{E}_Q = \dot{U}_r + j \cdot \dot{I}_H \cdot x_q$  (рис. 1.11.в). І знаходимо кут між вектором  $\dot{U}_H$  і віссю  $q$   $\delta = 51^\circ$  та величину  $E_Q = 2,69$  в.о.

На тій же осі знаходиться і ЕРС  $\dot{E}_q$ , яку можна знайти за формулою:

$$E_q = E_Q + I_{dH} \cdot (X_d - X_q)$$

Знайдемо проекцію вектора струму  $\dot{I}_H$  на продольну вісь  $d$ :

$$I_{dH} = I_H \cdot \sin(\delta + \varphi_H) = 1 \cdot \sin(51^\circ + 18^\circ) = 0,934$$

Тоді

$$E_q = E_Q + I_{dH} \cdot (X_d - X_q) = 2,69 + 0,93 \cdot (1,8 - 1,5) = 2,97 \text{ (в.о.)}$$

За законом Ома знаходимо  $\dot{U}_\Gamma$  і  $\dot{E}'$ , додавши до  $\dot{U}_H$  падіння напруги на  $x_{зовн}$  і  $x'_{d\Sigma}$ , відповідно (рис. 1.11.г).

$$\dot{U}_\Gamma = \dot{U}_H + j \cdot \dot{I}_H \cdot x_{зовн}$$

$$\dot{E}' = \dot{U}_H + j \cdot \dot{I}_H \cdot x'_{d\Sigma}$$

Падіння напруги на зовнішньому опорі:

$$I_H \cdot x_{зовн} = 1 \cdot 0,7 = 0,7 \text{ (в.о.)}$$

Падіння напруги на сумарному перехідному опорі:

$$I_H \cdot x'_{d\Sigma} = 1 \cdot 1,05 = 1,05 \text{ (в.о.)}$$

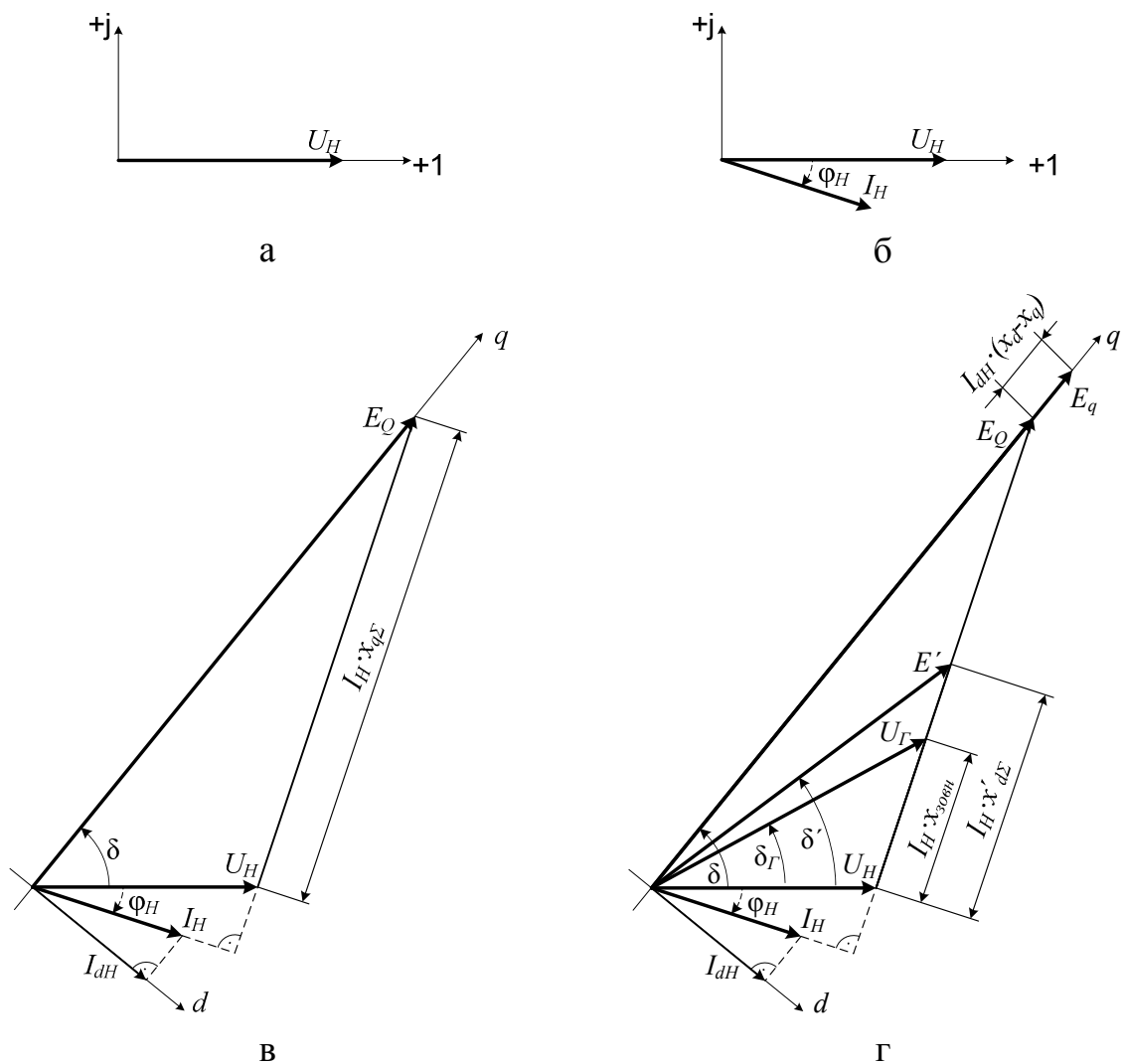


Рис. 1.11. Побудова векторної діаграми системи з явнополюсним генератором.

## 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ І В ІДЕАЛІЗОВАНИХ УМОВАХ ( $S_{II}=\infty$ , $E'=\text{CONST}$ )

### 2.1. Вихідний режим

Метою дослідження динамічної стійкості будь-якої системи є визначення тих аварійних режимів, що можуть при великих збуреннях (раптові стрибки навантаження, відключення генераторів, відключення ліній і трансформаторів, короткого замикання) викликати порушення стійкості. Істотним при аналізі динамічної стійкості є також питання визначення максимальної потужності у вихідному режимі, на який можна загрузити систему, щоб при аварії вона виявилася на межі стійкості.

Для аналізу динамічної стійкості розглянемо найпростішу систему, що працює через трансформатори і дволанцюгову лінію електропередачі на шини нескінченної потужності. Розрахункова схема такої системи представлена на рис. 2.1, а заступна схема системи у вихідному режимі зображена на рис. 2.2.

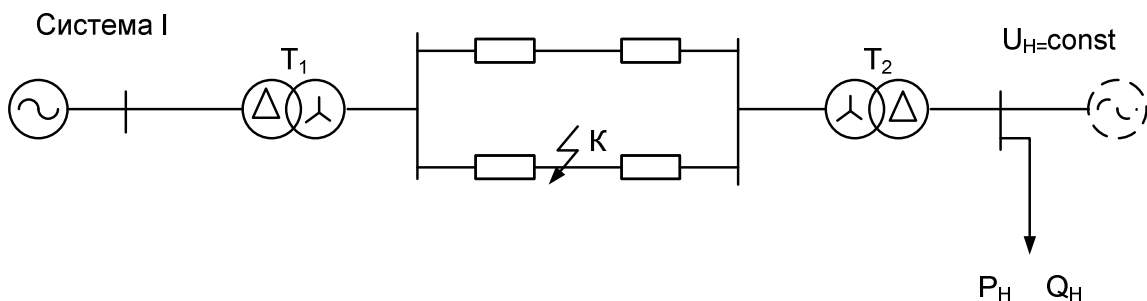


Рис. 2.1. Розрахункова схема системи для аналізу динамічної стійкості.

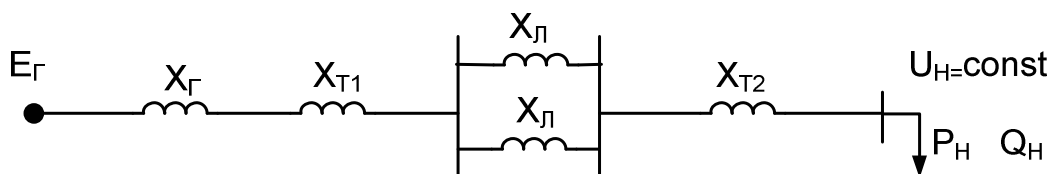


Рис. 2.2. Заступна схема системи у вихідному режимі

До виникнення збурення досліджувана система є симетричною і працює стійко, при цьому дотримується баланс потужності: активної  $P_T = P_G = P_H$  і реактивної  $Q_T = Q_H + \Delta Q_{\Pi}$ . Тут  $P_T, P_G, Q_T, \Delta Q_{\Pi}$  – відповідно активна потужність турбіни і генераторів, реактивна потужність генераторів і втрати реактивної потужності в індуктивних опорах системи.

Електромагнітна потужність найпростішої системи (рис. 1.2) у вихідному режимі дорівнює:

$$P_{вих} = \frac{E_q \cdot U_H}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta \quad (2.1)$$

Однак використання формули (2.1) для аналізу динамічної стійкості складно, тому що синхронна ЕРС  $E_q$ , у момент збурення змінюється стрибком.

Результуюче ж потокозчеплення обмотки збудження генератора й обумовлена ним перехідна ЕРС  $E'$  у момент збурення не міняються і тому її можна використовувати для характеристики стану системи у вихідному режимі й у початковий момент раптового порушення режиму.

Перехідну ЕРС  $E'$  і кут  $\delta_0'$  у вихідному режимі можна одержати використовуючи відомі формули (1.8), ввівши генератор у заступну схему вихідного режиму опором  $X_d'$ :

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{зобн}, \quad X_{зобн} = X_{T1} + X_{T2} + \frac{X_{\Pi}}{2} \quad (2.2)$$

Тут кут  $\delta_0'$  між напругою у вузлі навантаження  $U_H$  і ЕРС  $E'$  надалі будемо позначати  $\delta$ . Еквівалентна заступна схема системи у вихідному режимі представлена на рис. 2.3

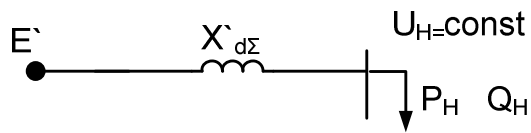


Рис. 2.3. Еквівалентна заступна схема системи у вихідному режимі

З урахуванням прийнятих допущень вираз для електромагнітної потужності у вихідному режимі має вид:

$$P_{вих} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta \quad (2.3)$$

На рис. 2.4 зображений графік змінювання  $P_{вих}$  в залежності від кута  $\delta$ . Межа переданої потужності у вихідному режимі досягається при  $\delta=90$  і дорівнює:

$$P_{гр.вих} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{d\Sigma}}$$

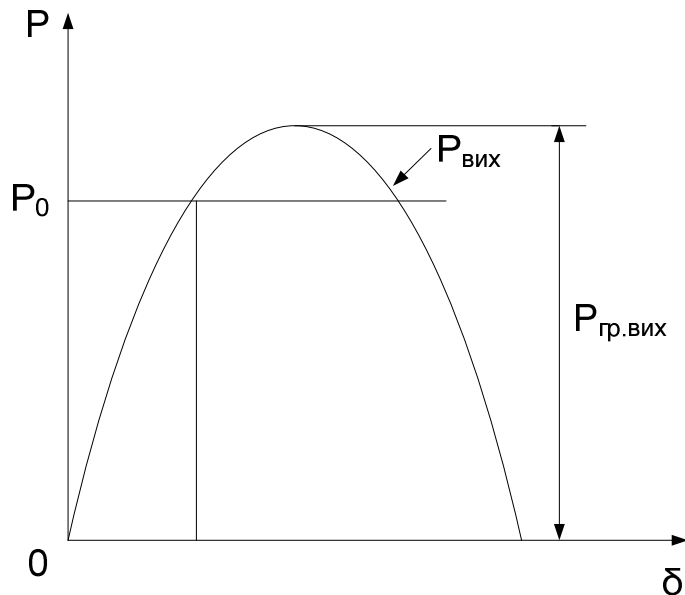


Рис.2.4. Графік зміни  $P_{вих}$  в залежності від кута  $\delta$

## 2.2. Аварійний режим

З усіх видів аварій найбільш небезпечними є коротке замикання, причому найбільш небезпечним у відношенні стійкості є трифазне КЗ. При дослідженні стійкості системи важливо знати змінювання електромагнітної потужності, тому що при допущенні  $P_T = \text{const}$  вона визначає надлишковий момент на валу генератора і, відповідно, характер зміни кута  $\delta$ . При аналізі динамічної стійкості системи при КЗ (у загальному випадку несиметричному), як правило, використовується метод симетричних складових, при якому несиметрична система розглядається у виді сукупності симетричних складових (прямої, зворотної і нульової послідовностей). При розгляді перехідних електромеханічних процесів в умовах несиметричних КЗ у мережі можна вважати, що електромагнітна потужність генераторів визначається практично струмами прямої послідовності, тому що струми нульової послідовності в ланцюзі генератора не циркулюють (при з'єднанні трансформаторів за схемою  $\Delta/Y_0$ ), а струми зворотної послідовності створюють потік, що обертається відносно ротора з подвійною частотою і виникаючий при цьому обертаючий момент подвійної частоти змінюється так, що його середнє значення близьке до нуля, і ротор не встигає реагувати на коливання моменту з подвійною частотою).

Таким чином, для аналізу динамічної стійкості при несиметричному КЗ потрібно скласти заступну схему аварійного режиму системи, з якої можна визначати струми прямої послідовності й електромагнітну потужність генератора.

Заступна схема системи в аварійному режимі (рис. 2.5) для визначення електромагнітної потужності генераторів  $P_{av}$  при несиметричному КЗ відрізняється від заступної схеми системи у вихідному режимі тим, що в місці КЗ (у точці а) включений еквівалентний шунтуючий опір КЗ  $\Delta X$ . Значення цього опору залежить від виду короткого замикання і рівне:

$$\Delta X^{(1)} = X_{2e} + X_{0e} \text{ – для однофазного КЗ}$$

$$\Delta X^{(2)} = X_{2e} \text{ – для двофазного КЗ}$$

$$\Delta X^{(0)} = \frac{X_{2e} \cdot X_{0e}}{X_{2e} + X_{0e}} \text{ – для двофазного КЗ на землю}$$

$$\Delta X^{(3)} = 0 \text{ – для трифазного КЗ}$$

Тут  $X_{0e}$  і  $X_{2e}$  опори заступної системи відповідно струмами нульової і зворотної послідовностей відносно місця КЗ.

Методи визначення опорів  $X_{0e}$  і  $X_{2e}$  відомі з першої частини курсу.

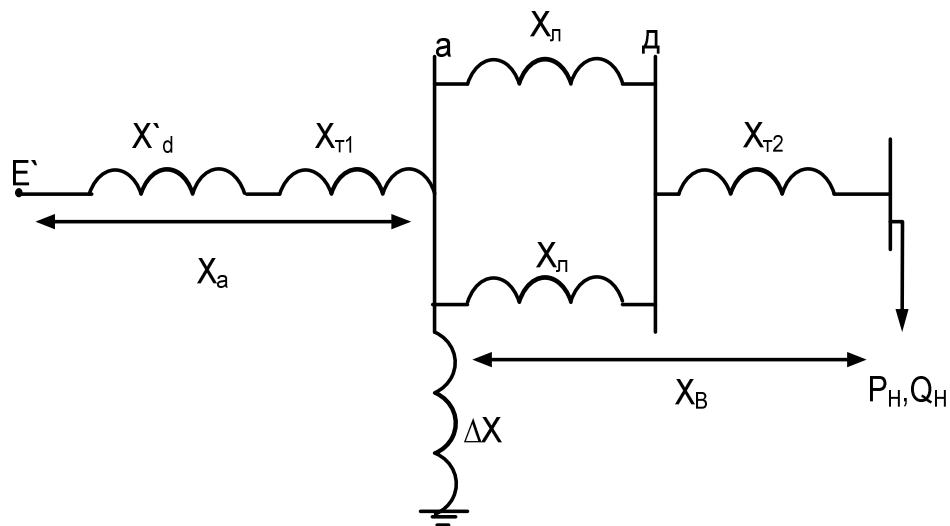


Рис. 2.5. Заступна схема системи в аварійному режимі

При прийнятих у вихідній розрахунковій схемі системи схемах з'єднання обмоток трансформаторів можна скласти заступну схему зворотної (рис. 2.6) і нульової (рис. 2.7) послідовностей системи. Еквівалентні опори відносно місця КЗ визначаються по формулах:

$$X_{2e} = \frac{(X_{2Г} + X_{2Т1}) \left( \frac{1}{2} X_{л} + X_{2Т2} \right)}{X_{2Г} + X_{2Т1} + \frac{1}{2} X_{л} + X_{2Т2}}$$

$$X_{0e} = \frac{X_{0T1} \left( \frac{1}{2} X_{0л} + X_{0T2} \right)}{X_{0T1} + \frac{1}{2} X_{0л} + X_{0T2}}. \quad (2.4)$$

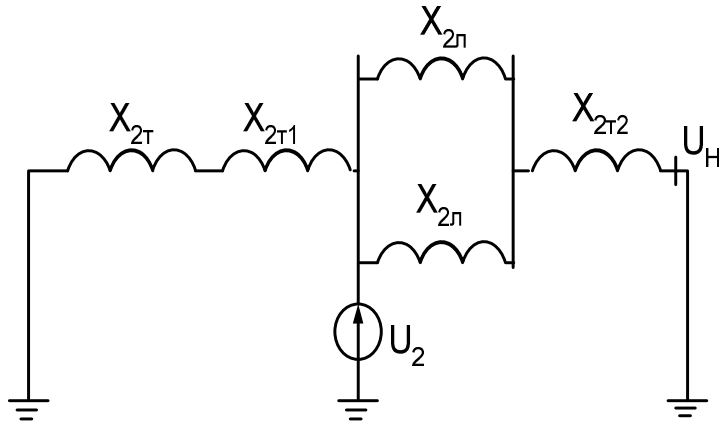


Рис 2.6. Заступна схема зворотної послідовності

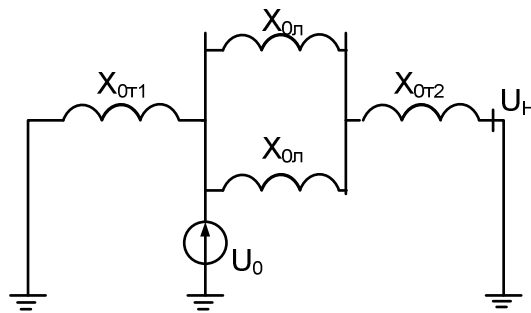


Рис 2.7. Заступна схема нульової послідовності

У заступній схемі системи в аварійному режимі генератор представляється ЕРС  $E'$  за опором  $X'_d$ . Це зв'язано з тим, що в порівнянні з часом протікання перехідного процесу стала часу загасання  $E'$  має значно більше значення.

Приведемо схему (рис.2.5) до трипроменевої зірки з опорами  $X_a$ ,  $X_b$ ,  $\Delta X$  (рис. 2.8).

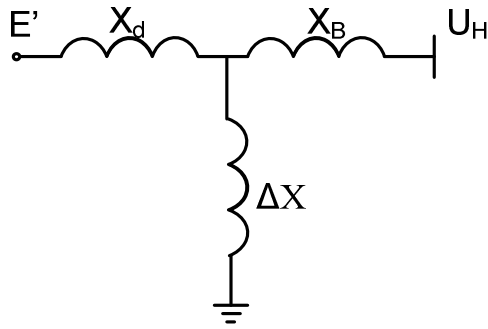


Рис. 2.8. Трипроменева заступна схема

Перетворивши зірку в трикутник, одержимо  $\Pi$ -видну схему зв'язку генераторів системи I із шинами незмінної напруги (рис. 2.9):

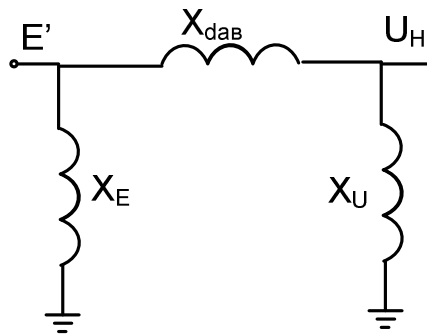


Рис. 2.9.  $\Pi$ -видна заступна схема системи при КЗ

$$X_{dav} = X_a + X_b + \frac{X_a \cdot X_b}{\Delta X} \quad (2.5)$$

Отже, вся активна потужність генераторів системи I направляється до шин нескінченної потужності через опір  $X'_{dav}$ , що є еквівалентним опором системи в аварійному режимі. Вираз для характеристики електромагнітної потужності в аварійному режимі буде мати вигляд:

$$P_{av} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{d.av}} \sin \delta = P_{zp.av} \cdot \sin \delta, \quad (2.6)$$

де межа переданої потужності в аварійному режимі дорівнює

$$P_{гр.ав} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{дав}}$$

Оскільки  $X'_{d\Sigma} < X'_{дав}$ , то  $P_{гр.ав} < P_{гр.вих}$ . Тобто максимум характеристики  $P_{ав}(\delta)$  (рис.2.10.) лежить нижче максимуму характеристики  $P_{вих}(\delta)$ . Це призводить до того, що коли у вихідному стані режим системи визначається точкою "а" на характеристиці  $P_{вих}(\delta)$  (Рис. 2.10), то при КЗ відбувається перехід на аварійну характеристику  $P_{ав}(\delta)$  (точка в) внаслідок того, що кут  $\delta$  миттєво змінитися не може (існує механічна інерція ротора) і потужність, яка віддається генератором зменшується до  $P'_0$ . Потужність турбіни залишається незмінною на всьому часовому проміжку перехідного процесу через значну інерційність регуляторів турбін.

Нерівність потужностей призводить до появи на валу генератора надлишкового моменту, під дією якого ротор починає прискорюватися, що в свою чергу призводить до зростання відносної швидкості векторів  $E'$ . Потужність генератора починає зростати і на характеристиці  $P_{ав}(\delta)$  робоча точка прямує в напрямку точки с. При досягненні точки с надлишковий момент  $\Delta M = \frac{P_0 - P_{ав}}{\omega}$  дорівнює нулю, відносна швидкість ротора тут максимальна і ротор по інерції проходить точку с. Надалі при рості кута  $\delta$  потужність, що віддається генератором, стає більше потужності турбіни і надлишковий момент змінює знак, що призводить до зменшення відносної швидкості векторів  $U_H$  і  $E'$ . Припустимо, що на характеристиці  $P_{ав}(\delta)$  існує така точка d, в якій швидкість обертання векторів ЕРС  $E'$  і напруги  $U_H$  рівна (відносна швидкість дорівнює 0). Отже ріст кута припиняється, досягши свого максимального значення  $\delta_{max}$ . Однак унаслідок нерівності потужностей турбіни і генератора на валу існує надлишковий гальмівний момент під дією якого кут  $\delta$  починає зменшуватися і робоча точка на характеристиці

$P_{ав}(\delta)$  переміщається до точки  $c$  у зворотному напрямку. Пройшовши по інерції точку  $c$ , ротор у своєму відносному русі зупиняється, а потім знову прискорюється. Після ряду коливань з поступово загасаючою амплітудою відносний рух ротора припиниться й установиться новий сталий режим з попереднім значенням потужності генератора  $P_0$  і новим значенням кута  $\delta$ . Система при такому результаті є стійкою в аварійному режимі. Якби в процесі гальмування після проходження точки  $c$  аж до досягнення ротором критичного кута  $\delta_{крав} = \pi - \delta_{ав}$  (точка  $c'$ ) відносна швидкість знизилася до нуля, то після проходження точки  $c'$  надлишковий момент на валу стане прискорюючим і генератор випаде із синхронізму. Така якісна картина динамічного режиму системи при КЗ. Необхідно визначити кількісні характеристики, що дозволяють визначити стійкість системи. При динамічному режимі генератора відбуваються безупинні хитання генератора зі зміною кутової швидкості  $\omega$ . Так як при цьому  $\omega$  змінюється незначно, то з рівняння надлишкового моменту  $\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega} = \frac{\Delta P_0}{\omega_0}$  випливає, що у відносних одиницях, за умови  $\omega_0 = 1$ , надлишковий момент у відносних одиницях дорівнює надлишку потужності. Для одержання критерію стійкості системи в аварійному режимі розглянемо роботу генератора у відносному русі. Елементарна робота дорівнює  $dA = \Delta P \cdot d\delta$  і витрачається на зміну кінетичної енергії ротора. Робота, що виконується в період прискорення, витрачається на збільшення кінетичної енергії ротора і дорівнює:

$$A_{приск} = \int_{\delta_0}^{\delta_{ав}} \Delta P \cdot d\delta = S_{асв}$$

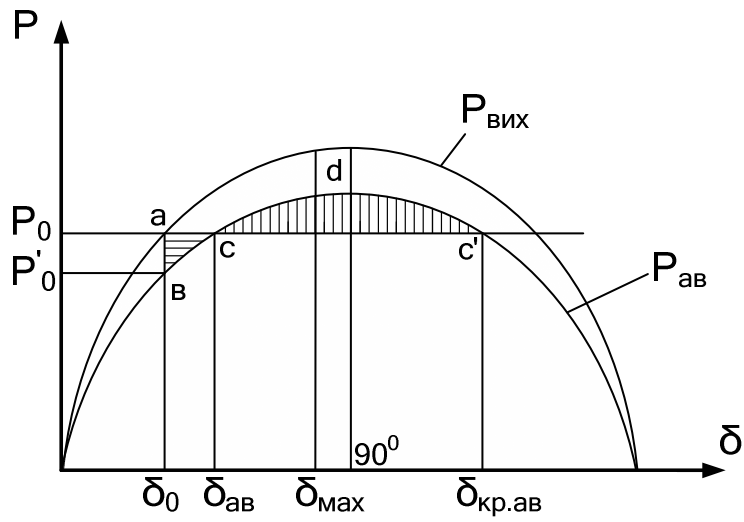


Рис.2.10. Характеристика потужності при КЗ

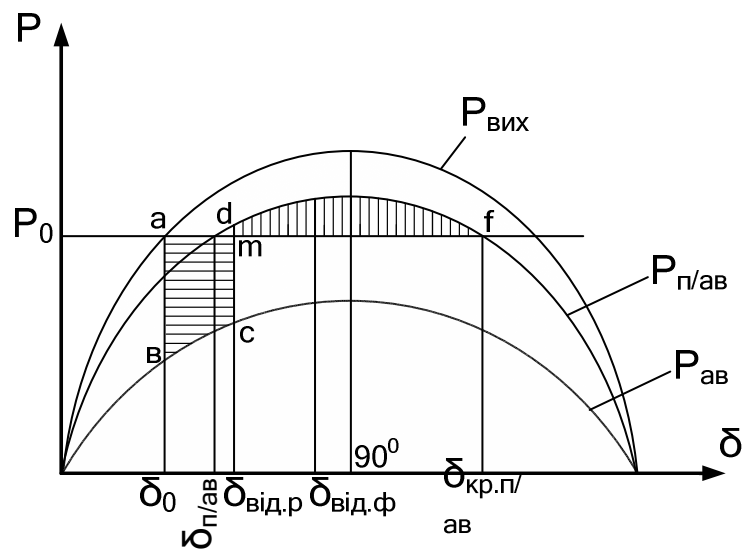


Рис.2.11. Характеристика потужності при відключенні лінії

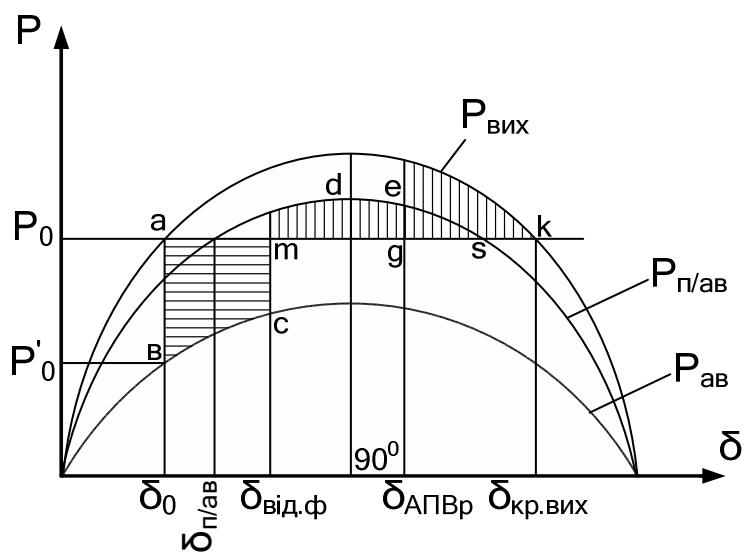


Рис.2.12. Характеристика потужності при АПВ

Максимально можлива робота, що виконується в період гальмування при переміщенні ротора визначається:

$$A_{\text{гальм}} = \int_{\delta_{ав}}^{\pi - \delta_{ав}} \Delta P \cdot d\delta = S_{cdc}, \quad (2.7)$$

де  $S_{acв}$  і  $S_{cdc}$  – відповідно площі площадок розгону і можливого гальмування чисельно рівні роботі, що виконується надлишковим моментом.

Система буде стійкою в аварійному режимі, якщо  $S_{acв} \leq S_{cdc}$  (Рис.2.10).

Або

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{ав}} \Delta P \cdot d\delta - \int_{\delta_{ав}}^{\pi - \delta_{ав}} \Delta P \cdot d\delta \leq 0, \quad \Delta P = P_0 - P_{гр.ав} \cdot \sin \delta \quad (2.8)$$

Інтегруючи рівняння (2.8), можна одержати критерій перевірки стійкості системи в аварійному режимі у виді:

$$\sin \delta_{ав} \cdot \left( \frac{180^\circ - \delta_{ав} - \delta_0}{57.3^\circ} \right) - \cos \delta_{ав} - \cos \delta_0 \leq 0, \quad (2.9)$$

де  $\delta_{ав} = \arcsin \frac{P_0}{P_{гр.ав}}$  – кут площадки гальмування в аварійному режимі.

Слід зазначити, якщо в аварійному режимі  $P_{гр.ав} < P_0$ , то система – явно нестійка і перевірка за умови (2.9) не потрібна.

### 2.3. Післяаварійний режим

Якщо умова (2.9) не дотримується, тобто площадка розгону виявиться більше можливої площадки гальмування і система буде нестійка в аварійному режимі. Дуже часто стійкої роботи системи можна домогтися шляхом швидкого відключення ушкодженого ланцюга ЛЕП. Система при цьому переходить у післяаварійний режим роботи. Заступна схема системи після відключення КЗ має вигляд:

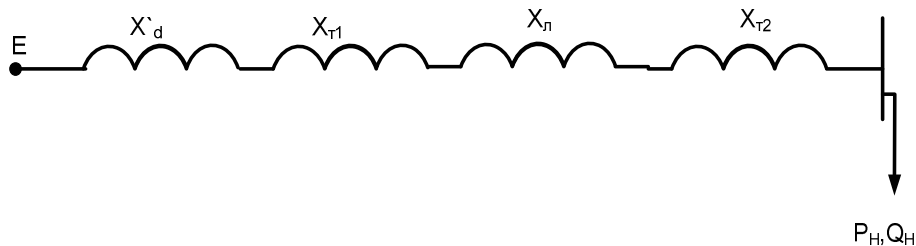


Рис. 2.13. Заступна схема системи в післяаварійному режимі

Еквівалентний опір у післяаварійному режимі роботи системи:

$$X'_{d\Pi/ов} = X'_d + X_{T1} + X_{л} + X_{T2}. \quad (2.10)$$

Рівняння для потужності системи при відключенні ланцюга має вид:

$$P'_{n/ов} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{d\Pi/ов}} \sin \delta. \quad (2.11)$$

Оскільки  $X'_{d\Pi/ов} > X'_{дав}$ , тоді  $P_{гр.n/ав} = \frac{E' U_H}{X'_{dp/ов}} > P_{гр.ав}$ ,

тобто максимум характеристики потужності  $P_{гр.n/ав}$  у післяаварійному режимі більше максимуму характеристики  $P_{гр.ав}$  в аварійному режимі.

Використовуючи правило площин, можна знайти граничний розрахунковий кут відключення  $\delta_{від.p}$ , при якому необхідно зробити відключення ушкодженого ланцюга, щоб збереглася стійкість системи. Цей кут визначається виходячи з умови рівності площадки розгону  $S_{австм}$  і можливої площадки гальмування  $S_{mdf}$

$$S_{mdf} + S_{австм} = \int_{\delta_0}^{\delta_{від.p}} (P_0 - P_{зр./ав} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{від}}^{\pi - \delta_{n/ав}} (P_0 - P_{зр.n/ав} \sin \delta) d\delta = 0 \quad (2.12)$$

Розв'язавши рівняння відносно  $\delta_{від.p}$ , одержимо:

$$\delta_{від} = \arccos \left\{ \frac{1}{P_{зр.n/ав} - P_{зр.ав}} \left[ P_0 \left( \frac{180^\circ - \delta_{n/ав} - \delta_0}{57.3^\circ} \right) - P_{зр.ав} \cos \delta_0 - P_{зр.n/ав} \cos \delta_{n/ав} \right] \right\}, \quad (2.13)$$

де  $\delta_{n/ав}$  – кут початку площадки гальмування в після аварійному режимі, що визначається з виразу:

$$\delta_{n/ав} = \arcsin \frac{P_0}{P_{зр.n/ав}}. \quad (2.14)$$

Знання кута  $\delta_{від.p}$  ще не дозволяє судити про стійкість системи. У реальних системах КЗ відключається через фактичний час відключення  $t_{від.ф}$ , що

складається з часу дії релейного захисту  $t_{pz}$  і повного часу відключення ви-  
микача  $t_{вим}$ :

$$t_{від.ф} = t_{p.z} + t_{вим}. \quad (2.15)$$

Якщо за час  $t_{від.ф}$  фактичний кут відключення  $\delta_{від.ф}$  не перевищив  
розрахунковий кут відключення  $\delta_{від}$ , то система буде стійка в післяаварій-  
ному режимі, у протилежному випадку – нестійка.

Для визначення  $\delta_{від.ф}$  необхідно знайти залежність  $\delta(t)$  проінтегрував-  
ши рівняння руху генератора:

$$\frac{T_j}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P_{2p} \sin \delta \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) нелінійне і його не можна розв'язати аналітично. Дане  
рівняння можна розв'язати методами чисельного інтегрування, зокрема за  
допомогою методу послідовних інтервалів. Застосування даного методу  
для розв'язати рівняння (2.16) достатньо докладно розглядається в лекцій-  
ному курсі. Сутність методу полягає в наступному. Весь проміжок часу  
 $t_{від.ф}$  розбивається на декілька інтервалів часу  $\Delta t$ , кожний з яких характе-  
ризується початковими, кінцевими і середніми значеннями швидкості,  
прискорення і кута. Початкові значення величин у наступних інтервалах  
будуть рівні кінцевим у попередніх. Якщо  $\Delta t$  достатньо мале, то в межах  
кожного інтервалу надлишок потужності  $\Delta P$  і прискорення  $a = \frac{360 f_0 \Delta P}{T_j}$

можна вважати незмінним.

Тут  $f_0$  – частота, Гц;

$T_j$  – механічна стала часу ротора генератора, сек;

$a$  – прискорення ротора генератора, град/с<sup>2</sup>;

$\Delta P$  - надлишкова потужність.

Розрахунок  $\delta(t)$  по методу послідовних інтервалів зручно вести в табличній формі. Алгоритм розрахунку представлений у таблиці 2.1. У ній  $n$ -число інтервалів на які розбивається проміжок часу  $t_{від.ф}$ . Значення величини коефіцієнта  $k = \frac{360f_0\Delta t^2}{T_j}$  для першого інтервалу варто брати в два

рази меншим. Інтервал  $\Delta t$  вибирається як правило рівним 0,01 – 0,025сек.

Таблиця 2.1

№ з/п	Розрахункові формули	Аварійний режим					
		1 $\Delta t$	2 $\Delta t$	3 $\Delta t$	...	...	n $\Delta t$
1	$\delta_{(n-1)}$						
2	$\sin\delta_{(n-1)}$						
3	$P_{пр.ав}$						
4	$P_{пр.ав} \sin\delta_{(n-1)}$						
5	$P_0$						
6	$\Delta P_{(n)}=(5)-(4)$						
7	$k = \frac{360f_0\Delta t^2}{T_j}$						
8	$K \cdot \Delta P_{(n)}$						
9	$\Delta\delta_{(n-1)}$						
10	$\Delta\delta_{(n)}=(8)+(9)$						
11	$\delta_{(n)}=(10)+(1)$						

## 2.4. Режим роботи системи після дії автоматики повторного включення (АПВ)

Якщо після розрахунку фактичного кута відключення  $\delta_{від.ф}$  методом послідовних інтервалів виявиться, що  $\delta_{від.ф} > \delta_{від.р}$ , то система буде нестійкою в післяаварійному режимі, і необхідні додаткові заходи для забезпечення її стійкості. Значна частина КЗ на ЛЕП обумовлена грозовими розрядами і носить непостійний характер, якщо після відключення лінії через визначений проміжок часу рівний часу деіонізації дугового проміжку  $t_{деіон}$  на ЛЕП знову подати напругу, то нормальні умови системи можуть бути відновлені і стійкість збережена. Даний режим ЛЕП реалізується за допомогою автоматики повторного включення (АПВ).

Розглянемо характеристики потужності системи у вихідному  $P_{вих}(\delta)$  аварійному  $P_{ав}(\delta)$  і післяаварійному режимах  $P_{п/ав}(\delta)$ . При фактичному куті відключення  $\delta_{від.ф}$ , визначеному методом послідовних інтервалів для часу  $t_{від.ф}$ , як видно з рис. 2.12., площадка розгону  $S_{авсм}$  виявилася більше можливої площадки гальмування в післяаварійному режимі  $S_{мдел}$  а система нестійкою. Якщо в якийсь момент часу після проходження ротором точки d на ділянці гальмування за допомогою АПВ відновити схему, то після переходу на вихідну характеристику  $P_{вих}(\delta)$  значно збільшується потужність, що віддається генератором, і можлива площадка гальмування, що обмежена кривою "m d e f k".

Використовуючи правило площин можна, знайти розрахунковий кут АПВ  $\delta_{АПВР}$ , при якому необхідно зробити повторне включення, щоб система зберегла стійкість. Запишемо рівняння рівності площадки розгону  $\delta_{авсм}$  і можливих площадок гальмування  $\delta_{мдег}$  і  $\delta_{gefк}$ :

$$\begin{aligned}
S_{авст} = S_{mdeg} + S_{gefk} = & \int_{\delta_0}^{\delta_{від.ф}} (P_0 - P_{зр.ав} \sin \delta) d\delta + \\
+ \int_{\delta_{від.ф}}^{\delta_{АПВР}} (P_0 - P_{зр.n/ав} \sin \delta) d\delta + & \int_{\delta_{АПВР}}^{\pi - \delta_0} (P_0 - P_{зр.вих} \sin \delta) d\delta = 0
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

Розв'язавши дане рівняння відносно кута  $\delta_{АПВР}$ , одержимо:

$$\begin{aligned}
\delta_{АПВР} = \arccos \left\{ \frac{1}{P_{зр.вих} - P_{зр.n/ав}} \left[ P_0 \left( \frac{180^\circ - 2\delta_0}{57.3^\circ} \right) - \right. \right. \\
\left. \left. - \cos \delta_{від.ф} (P_{зр.n/ав} - P_{зр.ав}) - \cos \delta_0 (P_{зр.вих} + P_{зр.ав}) \right] \right\}.
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

Як і у випадку перевірки стійкості системи в післяаварійному режимі, для оцінки її стійкості в режимі після АПВ необхідно враховувати фактичний час повторного включення ушкодженого ланцюга  $t_{АПВФ}$ , що визначає величину фактичного кута, при якому відбувається повторне включення  $\delta_{АПВФ}$ — фактичний час повторного включення можна визначити:

$$t_{АПВФ} = t_{від.ф} + t_{деіон},
\tag{2.19}$$

де  $t_{деіон}$  — час деіонізації дугового проміжку.

Якщо за час  $\delta_{АПВФ}$  фактичний кут, при якому відбувається повторне включення не перевищить відповідний розрахунковий кут  $\delta_{АПВР}$ , то система буде стійка в режимі після АПВ, у противному випадку нестійка. Розрахунок кута  $\delta_{АПВ}$  ведеться методом послідовних інтервалів у табличній формі

(табл.2). Відомою величиною є  $\delta_{від.ф.}$ , що був розрахований раніше при оцінці стійкості системи в післяаварійному режимі.

При розрахунках  $\delta_{АПВФ}$  доводиться визначати приріст кута на граничному інтервалі (інтервал на початку якого відбувається відключення ушкодженого ланцюга). У нашому випадку (табл. 2.2) це (n+1) –й інтервал, де надлишок потужності на початку цього інтервалу (рис. 2.14) миттєво змінюється від деякої величини  $\Delta P'_{(n+1)}$  до  $\Delta P''_{(n+1)}$ .

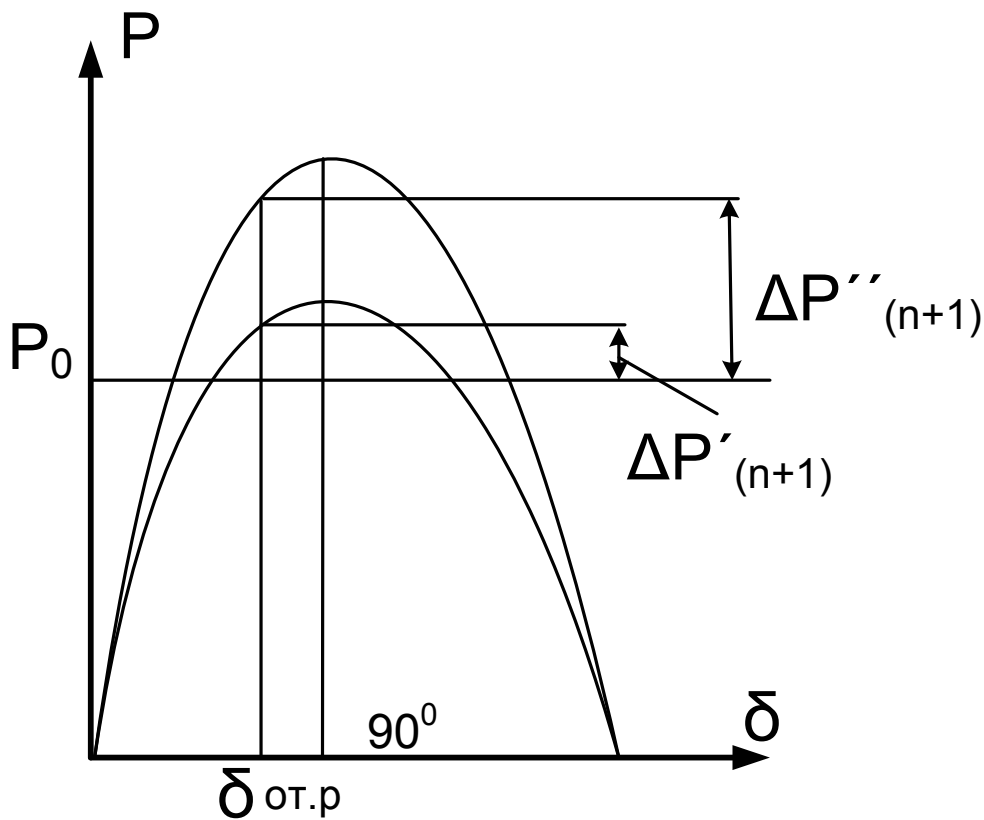


Рис. 2.14. Залежність надлишку потужності при КЗ і його відключенні

Значення надлишку потужності при обчисленні приросту кута на (n+1) інтервалі визначається як середнє з  $\Delta P'_{(n+1)}$  і  $\Delta P''_{(n+1)}$ :

$$\Delta P_{(n+1)} = \frac{\Delta P'_{(n+1)} + \Delta P''_{(n+1)}}{2}$$

Далі після граничного, й аж до **m**-го інтервалу розрахунків проводиться як і при аварійному режимі.

Таблиця 2.2

№ з/п	Розрахункові формули	Аварійний режим					Граничний інтервал	Післяаварійний режим		
		1Δt	2Δt	3Δt	...	n·Δt	(n+1)Δt	(n+2)Δt	...	mΔt
1	$\delta_{(n-1)}$									
2	$\sin\delta_{(n-1)}$									
3	$P_{\text{пр.ав}}$									
4	$P_{\text{пр.ав}} \sin\delta_{(n-1)}$									
5	$P_0$									
6	$\Delta P_{(n)}=(5)-(4)$									
7	$k = \frac{360f_0\Delta t^2}{T_j}$									
8	$K\Delta P_{(n)}$									
9	$\Delta\delta_{(n-1)}$									
10	$\Delta\delta_{(n)}=(8)+(9)$									
11	$\delta_{(n)}=(10)+(1)$									

## 2.5. Приклад дослідження динамічної стійкості системи I в ідеалізованих умовах.

Параметри досліджуваної системи, приведені до базисних умов:

$$x'_d = 0,35 \text{ в.о.}, \quad x_{2\Gamma} = 0,4 \text{ в.о.}, \quad T_j = 8,7 \text{ в.о.}, \quad x_{T1} = 0,12 \text{ в.о.}, \quad x_{T2} = 0,1 \text{ в.о.}, \\ x_L = 0,96 \text{ в.о.}, \quad P_0 = 0,95 \text{ в.о.}, \quad x'_{d\Sigma} = 1,05 \text{ в.о.},$$

З попереднього розрахунку  $E' = 1,66 \text{ в.о.}$ ,  $\delta'_0 = 37^\circ$ . Звертаємо увагу, що в подальших розрахунках кут  $\delta'$  між напругою у вузлі навантаження  $U_H$  і ЕРС  $E'$  надалі будемо позначати  $\delta$ .

Знайдемо межу передаваної потужності у вихідному режимі:

$$P_{гр.вих} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{d\Sigma}} = \frac{1,66 \cdot 1}{1,05} = 1,581 \text{ (в.о.)}$$

В якості аварійного режиму розглянемо двофазне КЗ на землю на одній з ЛЕП.

Знаходимо еквівалентні опори зворотної і нульової послідовностей, приймаючи  $x_{2T1} = x_{0T1} = 0,12 \text{ в.о.}$ ,  $x_{2T2} = x_{0T2} = 0,1 \text{ в.о.}$ ,  $x_{0L} = 3 \cdot x_L = 2,88 \text{ в.о.}$ :

$$X_{2e} = \frac{(X_{2\Gamma} + X_{2T1}) \left( \frac{1}{2} X_L + X_{2T2} \right)}{X_{2\Gamma} + X_{2T1} + \frac{1}{2} X_L + X_{2T2}} = \frac{(0,4 + 0,12) \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot 0,96 + 0,1 \right)}{0,4 + 0,12 + \frac{1}{2} \cdot 0,96 + 0,1} = 0,274 \text{ (в.о.)}$$

$$X_{0e} = \frac{X_{0T1} \left( \frac{1}{2} X_{0L} + X_{0T2} \right)}{X_{0T1} + \frac{1}{2} X_{0L} + X_{0T2}} = \frac{0,12 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot 2,88 + 0,1 \right)}{0,12 + \frac{1}{2} \cdot 2,88 + 0,1} = 0,111 \text{ (в.о.)}$$

Звідки опір шунта:

$$\Delta X^{(0)} = \frac{X_{2e} \cdot X_{0e}}{X_{2e} + X_{0e}} = \frac{0,274 \cdot 0,111}{0,274 + 0,111} = 0,079 \text{ (в.о.)}$$

Інші опори Т-образної схеми заміщення аварійного режиму (рис. 2.8):

$$x_a = x'_d + x_{T1} = 0,35 + 0,12 = 0,47 \text{ (в.о.)}$$

$$x_b = 0,5 \cdot x_{Л} + x_{T2} = 0,5 \cdot 0,96 + 0,1 = 0,58 \text{ (в.о.)}$$

Перейдемо до П-образної схеми (рис. 2.9)

$$X'_{дав} = X_a + X_{\epsilon} + \frac{X_a \cdot X_{\epsilon}}{\Delta X^{(n)}} = 0,47 + 0,58 + \frac{0,47 \cdot 0,58}{0,079} = 3,86 \text{ (в.о.)}$$

Тоді межа переданої потужності в аварійному режимі дорівнює

$$P_{зр.ав} = \frac{E' \cdot U_H}{X'_{дав}} = \frac{1,66 \cdot 1}{3,86} = 0,43 \text{ (в.о.)}$$

Як бачимо  $P_{зр.ав} = 0,43 \text{ в.о.} < P_0 = 0,95 \text{ в.о.}$ , отже система в аварійному режимі нестійка.

Проаналізуємо стійкість системи в післяаварійному режимі при відключенні однієї ЛЕП.

Сумарний опір системи стане рівним:

$$x'_{дн/ав} = x'_d + x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = 0,35 + 0,12 + 0,96 + 0,1 = 1,53 \text{ (в.о.)}$$

А межа переданої потужності в післяаварійному режимі

$$P_{зр.п/ав} = \frac{E' \cdot U_H}{x'_{дн/ав}} = \frac{1,66 \cdot 1}{1,53} = 1,085 \text{ (в.о.)}$$

Визначимо кут початку площадки гальмування в післяаварійному режимі

$$\delta_{п/ав} = \arcsin \frac{P_0}{P_{зр.п/ав}} = \arcsin \frac{0,95}{1,085} = 61^\circ$$

Розрахунковий кут відключення, при якому забезпечується рівність площадок розгону і гальмування:

$$\begin{aligned} \delta_{від.р} &= \arccos \left\{ \frac{1}{P_{зр.п/ав} - P_{зр.ав}} \left[ P_0 \left( \frac{180^\circ - \delta_{п/ав} - \delta_0}{57,3^\circ} \right) - P_{зр.ав} \cos \delta_0 - P_{зр.п/ав} \cos \delta_{п/ав} \right] \right\} = \\ &= \arccos \left\{ \frac{1}{1,085 - 0,43} \left[ 0,95 \left( \frac{180^\circ - 61^\circ - 37^\circ}{57,3^\circ} \right) - 0,43 \cos 37^\circ - 1,085 \cos 61^\circ \right] \right\} = 42^\circ \end{aligned}$$

Прийнявши час дії релейного захисту  $t_{P3} = 0,01$  с і повний час вимкнення вимикача  $t_{вим} = 0,1$  с, визначимо фактичний час відключення  $t_{від.ф} = t_{P3} + t_{вим} = 0,01 + 0,1 = 0,11$  (с)

Знайдемо фактичний кут відключення по методу послідовних інтервалів. Для цього задаємося інтервалом  $\Delta t = 0,01$  с.

$$\text{Визначаємо коефіцієнт } k = \frac{360 f_0 \Delta t^2}{T_j} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,01^2}{8,7} = 0,207.$$

Розрахунок ведемо в табличній формі, причому для першого інтервалу значення коефіцієнту  $k$  приймаємо вдвічі меншим.

	t, с	0,01	0,02	0,03	...	0,09	0,1	0,11
1	$\delta_{n-1}$	37,000	37,072	37,286		41,549	42,748	44,083
2	$\sin(\delta_{n-1})$	0,602	0,603	0,606		0,663	0,679	0,696
3	$P_{гр.ав}$	0,43	0,43	0,43		0,43	0,43	0,43
4	$P_{гр.ав} \cdot \sin(\delta_{n-1})$	0,259	0,259	0,260		0,285	0,292	0,299
5	$P_0$	0,95	0,95	0,95		0,95	0,95	0,95
6	$\Delta P_{(n)} = (5) - (4)$	0,691	0,691	0,690		0,665	0,658	0,651
7	$k$	0,1035	0,207	0,207		0,207	0,207	0,207
8	$k \cdot \Delta P_{(n)}$	0,072	0,143	0,143		0,138	0,136	0,135
9	$\Delta \delta_{n-1}$	0,000	0,072	0,215		1,061	1,199	1,335
10	$\Delta \delta_n = (8) + (9)$	0,072	0,215	0,357		1,199	1,335	1,470
11	$\delta_n = (10) + (1)$	37,072	37,286	37,643		42,748	44,083	45,552

Отже, так як  $\delta_{від.ф} = 45,552^\circ > \delta_{від.р} = 42^\circ$ , система буде нестійка в післяварійному режимі і для забезпечення стійкості необхідні додаткові заходи.

Заштрихуємо рівні площадки розгону і гальмування, які обмежені траєкторією руху робочої точки від точки  $a_{вих}$  (точки стійкої рівноваги вихідного режиму) до точки  $b_{н/ав}$  (точки нестійкої рівноваги післяварійного режиму) і потужністю турбіни  $P_0 = 0,95$  в.о. (рис. 2.15). Якщо робоча точка нижче характеристики турбіни, то генератор буде розганятися під дією

надлишкового моменту. Якщо вище, – то гальмуватися. Для розглянутого прикладу траєкторія руху робочої точки буде наступною: 1) робоча точка

переходить з вихідної характеристики на аварійну, зберігаючи початковий кут  $\delta_0 = 37^\circ$ ; 2) під дією надлишкового прискорюючого моменту кут  $\delta$  зростатиме і робоча точка рухатиметься по аварійній характеристиці праворуч; 3) для забезпечення рівних площадок розгону і гальмування при досягненні  $\delta_{від.р} = 42^\circ$  робоча точка має перейти на післяаварійну характеристику; 4) після переходу на післяаварійну характеристику робоча точка буде нижче характеристики турбіни, тому продовжуватиме діяти надлишковий прискорюючий момент, і кут  $\delta$  також буде зростати; 5) коли ж робоча точка стане вище, ніж  $P_0$  (пройде точку стійкої рівноваги післяаварійного режиму  $a_{n/ав}$ ), на ротор буде діяти гальмівний момент, проте по інерції робоча точка продовжуватиме рухатися по післяаварійній характеристиці в напрямку зростання кута  $\delta$ , оскільки ротор під час розгону накопив певну кількість енергії обертання; 5) кут  $\delta$  припинить своє зростання коли надлишковий гальмівний момент компенсує всю накопичену при розгоні енергію, в нашому випадку це станеться в точці  $b_{n/ав}$  (оскільки  $\delta_{від.р}$  граничний кут при якому забезпечується стійкість системи).

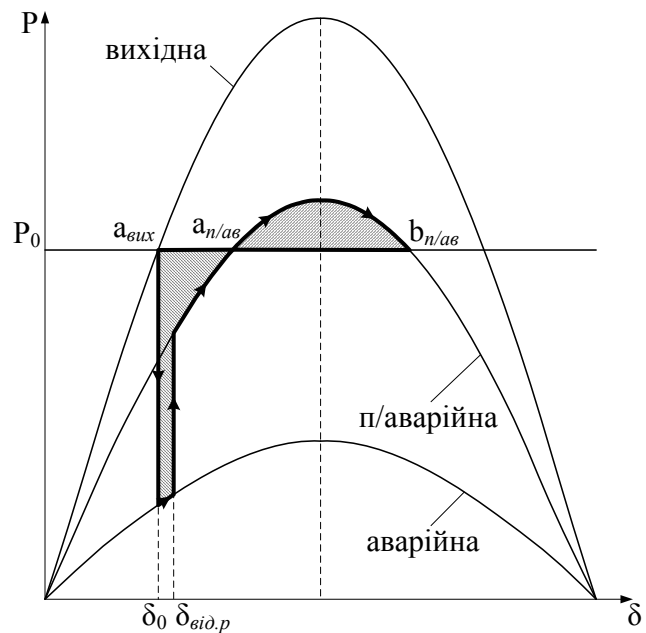


Рис. 2.15. Рівні площадки розгону і гальмування при відключенні КЗ

Дослідимо систему на стійкість після спрацювання АПВ і повернення на вихідну характеристику потужності.

Розрахунковий кут спрацювання АПВ, який забезпечує рівність площадок розгону і гальмування і відповідає граничному режиму:

$$\begin{aligned} \delta_{АПВр} &= \arccos \left\{ \frac{1}{P_{зр.вих} - P_{зр.п/ав}} \left[ P_0 \left( \frac{180^\circ - 2\delta_0}{57.3^\circ} \right) - \cos \delta_{від.ф} (P_{зр.п/ав} - P_{зр.ав}) - \cos \delta_0 (P_{зр.вих} + P_{зр.ав}) \right] \right\} = \\ &= \arccos \left\{ \frac{1}{1,581 - 1,085} \left[ 0,95 \left( \frac{180^\circ - 2 \cdot 37^\circ}{57.3^\circ} \right) - \cos 45,552^\circ (1,085 - 0,43) - \cos 37^\circ (1,581 + 0,43) \right] \right\} = \\ &= 128,3^\circ \end{aligned}$$

Задаємося фактичним часом повторного включення, приймаючи час деіонізації середовища  $t_{деіон} = 0,24$  с

$$t_{АПВф} = t_{від.ф} + t_{деіон} = 0,11 + 0,24 = 0,35 \text{ (с)}$$

Розрахунок ведемо в табличній формі, пам'ятаючи, що для граничного інтервалу:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{(P_0 - P_{зр.ав} \sin \delta_{зр}) + (P_0 - P_{зр.п/ав} \sin \delta_{зр})}{2} = \\ &= \frac{(0,95 - 0,43 \cdot \sin 45,552^\circ) + (0,95 - 1,085 \cdot \sin 45,552^\circ)}{2} = 0,409 \end{aligned}$$

	t, с	0,12	0,13	0,14	...	0,33	0,34	0,35
1	$\delta_{n-1}$	45,552	47,106	48,693		80,072	81,593	83,089
2	$\sin(\delta_{n-1})$	0,714	0,733	0,751		0,985	0,989	0,993
3	$P_{гр.п/ав}$	1,085	1,085	1,085		1,085	1,085	1,085
4	$P_{гр.п/ав} \cdot \sin(\delta_{n-1})$	0,775	0,795	0,815		1,069	1,073	1,077
5	$P_0$	0,95	0,95	0,95		0,95	0,95	0,95
6	$\Delta P_{(n)} = (5) - (4)$	0,409	0,155	0,135		-0,119	-0,123	-0,127
7	$k$	0,207	0,207	0,207		0,207	0,207	0,207
8	$k \cdot \Delta P_{(n)}$	0,085	0,032	0,028		-0,025	-0,026	-0,026
9	$\Delta \delta_{n-1}$	1,470	1,554	1,586		1,546	1,521	1,496
10	$\Delta \delta_n = (8) + (9)$	1,554	1,586	1,614		1,521	1,496	1,469
11	$\delta_n = (10) + (1)$	47,106	48,693	50,307		81,593	83,089	84,559

Оскільки  $\delta_{АПВф} = 84,559^\circ < \delta_{АПВр} = 128,3^\circ$ , то система буде стійка після спрацювання АПВ

Заштрихуємо рівні площадки розгону і гальмування, які обмежені траєкторією руху робочої точки від точки  $a_{вих}$  (точки стійкої рівноваги вихідного режиму) до точки  $b_{вих}$  (точки нестійкої рівноваги вихідного режиму) і потужністю турбіни  $P_0 = 0,95$  в.о. (рис. 2.16). Якщо робоча точка нижче характеристики турбіни, то генератор буде розганятися під дією надлишкового моменту. Якщо вище, – то гальмуватися. Для розглянутого прикладу траєкторія руху робочої точки буде наступною: 1) робоча точка переходить з вихідної характеристики на аварійну, зберігаючи початковий кут  $\delta_0 = 37^\circ$ ; 2) під дією надлишкового прискорюючого кут  $\delta$  зростатиме і робоча точка рухатиметься по аварійній характеристиці праворуч; 3) при досягненні  $\delta_{від.ф} = 45,552^\circ$  (через 0,11 с) КЗ відключається і робоча точка перейде на післяаварійну характеристику; 4) після переходу на післяаварійну характеристику робоча точка буде нижче характеристики турбіни, тому продовжуватиме діяти надлишковий прискорюючий момент, і кут  $\delta$  також буде зростати; 5) коли ж робоча точка стане вище, ніж  $P_0$  (пройде точку стійкої рівноваги післяаварійного режиму  $a_{n/ав}$ ), на ротор буде діяти гальмівний момент, проте по інерції робоча точка продовжуватиме рухатися по післяаварійній характеристиці в напрямку зростання кута  $\delta$ , оскільки ротор під час розгону накопичив певну кількість енергії обертання; б) оскільки перехід на післяаварійну характеристику при куті  $\delta_{від.ф} = 45,552^\circ$  не забезпечує компенсації всієї накопиченої при розгоні енергії під час гальмування, то пройшовши точку нестійкої рівноваги післяаварійного режиму  $b_{n/ав}$  ротор знову почне прискорюватись, накопичуючи енергію; 7) для забезпечення рівних площадок розгону і гальмування

при досягненні  $\delta_{АПВр} = 128,3^\circ$  робоча точка має перейти на вихідну характеристику; 8) по вихідній характеристиці робоча точка буде продовжувати свій рух в напрямку зростання кута  $\delta$ , поки в точці  $b_{вих}$  не компенсується вся накопичена при розгоні енергія (оскільки  $\delta_{АПВр}$  граничний кут при якому забезпечується стійкість системи).

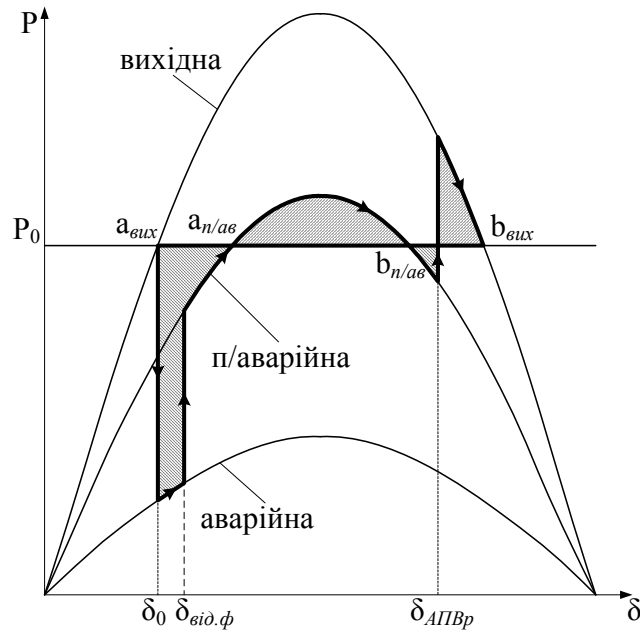


Рис. 2.15. Рівні площадки розгону і гальмування після дії АПВ

### 3. ЗАВДАННЯ

У роботі необхідно:

1. Визначити межу потужності системи I, знайти коефіцієнт запасу по статичній стійкості, побудувати векторну діаграму і характеристики  $P_H = f(\delta)$ ,

$Q_H = f(\delta)$ ,  $Q_E = f(\delta)$  для двох випадків:

а)  $X_d = X_q$  ;

б)  $X_d \neq X_q$  .

2. Дослідити динамічну стійкість системи I в ідеалізованих умовах ( $S_{II} = \infty, E' = const$ ) при всіх видах КЗ.

На підставі аналітичних розрахунків зробити висновок про стійкість системи в аварійному режимі. Якщо система нестійка в аварійному режимі, визначити кут і розрахунковий час відключення і зробити висновок про стійкість системи в післяаварійному режимі .

Якщо система нестійка і в після аварійному режимі, визначити кут і розрахунковий час АПВ і зробити висновок про стійкість системи в режимі після АПВ.

Для заданих видів КЗ побудувати характеристики потужності системи I у вихідному, аварійному і післяаварійному режимах, визначити графічно значення кутів відключення й АПВ, порівняти дані аналітичного і графічного розрахунків, показати рівні площі розгонів і гальмування в різних режимах.

Параметри схем вибираються по варіантах , згідно таблиці 3.1

Таблиця 3.1

N	Система 1								Трансформатор 1		
	P, МВт	U, КВ	cos $\varphi$ , о.е.	X <sub>d</sub> , о.е.	X <sub>q</sub> , о.е.	X'd, о.е.	X2, о.е.	Tj, с	S, МВА	Uк%	Ктр
1	220	6,3	0,87	1,5	1,2	0,32	0,3	7,1	230	10,5	6,3/121
2	260	6,3	0,88	1,5	1,3	0,36	0,32	7,2	270	10,6	6,3/121
3	280	6,3	0,85	1,5	1,3	0,33	0,3	7,3	300	10,7	6,3/130
4	300	6,3	0,84	1,4	1,2	0,28	0,3	7,4	320	10,8	6,3/126
5	360	10,5	0,88	1,8	1,6	0,36	0,34	7,5	400	10,8	10,5/242
6	400	10,5	0,85	1,4	1,2	0,37	0,33	7,5	440	10,9	10,5/242
7	460	10,5	0,89	1,6	1,4	0,32	0,28	7,4	550	10,9	10,5/242
8	500	10,5	0,81	1,5	1,3	0,33	0,26	7,3	560	11,0	10,5/242
9	560	10,5	0,81	1,6	1,4	0,43	0,3	7,2	630	11,0	10,5/363
10	600	10,5	0,82	1,5	1,3	0,35	0,31	7,1	630	11,1	10,5/363
11	660	10,5	0,83	1,7	1,5	0,35	0,32	7,8	700	11,1	10,5/363
12	700	10,5	0,86	1,8	1,6	0,36	0,29	7,7	750	11,2	10,5/363
13	750	10,5	0,88	1,9	1,7	0,33	0,34	7,6	800	11,3	10,5/363
14	800	13,8	0,9	1,4	1,2	0,36	0,35	7,8	850	11,4	13,8/363
15	900	13,8	0,92	1	0,8	0,4	0,35	7,9	950	11,5	13,8/363
16	950	13,8	0,9	1,5	1,3	0,45	0,28	8,0	1000	11,5	13,8/363
17	1000	13,8	0,88	1,7	1,5	0,32	0,37	7,9	1100	11,6	13,8/363
18	1050	13,8	0,91	1,8	1,6	0,35	0,31	7,8	1150	11,7	13,8/363
19	1100	15,8	0,92	2	1,8	0,46	0,29	7,7	1200	11,7	15,8/550
20	1150	15,8	0,9	1,9	1,7	0,48	0,32	7,6	1250	11,8	15,8/550
21	1200	15,8	0,85	1,6	1,4	0,42	0,28	7,5	1350	11,8	15,8/550
22	1250	20,0	0,92	2	1,8	0,45	0,27	8,0	1400	11,9	20,0/550
23	1300	20,0	0,90	2	1,8	0,48	0,36	8,1	1500	11,9	20,0/550
24	1350	20,0	0,87	1,95	1,75	0,50	0,34	8,2	1550	12,0	20,0/550
25	1400	20,0	0,88	2,1	1,9	0,52	0,3	8,3	1600	12,0	20,0/550
26	1250	15,8	0,85	1,6	1,4	0,42	0,28	7,5	1350	11,8	15,8/550
27	1270	20,0	0,92	2	1,8	0,45	0,27	8,0	1400	11,9	20,0/550
28	1290	20,0	0,9	2	1,8	0,48	0,36	8,1	1500	11,9	20,0/550
29	1380	20,0	0,87	1,95	1,75	0,50	0,34	8,2	1550	12,0	20,0/550
30	1450	20,0	0,88	2,1	1,9	0,52	0,3	8,3	1600	12,0	20,0/550

Продовження табл. 3.1

N	Трансформатор 2				Линия		Нагрузка		
	S, МВА	Uк%	Ктр	сх	L, км	X, Ом/км	U, кВ	P, МВт	cosφ
1	230	10,5	110/10,5	ZZ/T	150	0,4	10,5	200	0,95
2	270	10,6	110/10,5	ZZ/T	150	0,4	10,5	220	0,94
3	300	10,7	110/10,5	ZZ/T	166	0,4	10,5	260	0,93
4	320	10,8	110/10,5	ZZ/T	170	0,4	10,5	280	0,94
5	400	10,8	220/35	ZZ/T	190	0,4	35,0	300	0,95
6	440	10,9	220/35	ZZ/T	190	0,4	35,0	360	0,96
7	550	10,9	220/35	ZZ/T	195	0,4	35,0	400	0,95
8	560	11,0	220/35	ZZ/T	180	0,4	35,0	460	0,94
9	630	11,0	330/35	ZZ/T	220	0,4	35,0	500	0,93
10	630	11,1	330/35	ZZ/T	300	0,35	35,0	560	0,94
11	700	11,1	330/35	ZZ/T	310	0,35	35,0	600	0,95
12	750	11,2	330/35	ZZ/T	375	0,35	35,0	660	0,96
13	800	11,3	330/35	ZZ/Z	395	0,35	35,0	700	0,95
14	850	11,4	330/35	ZZ/T	360	0,35	35,0	750	0,94
15	950	11,5	330/35	ZZ/Z	350	0,35	35,0	800	0,95
16	1000	11,5	330/35	ZZ/Z	360	0,35	35,0	900	0,96
17	1100	11,6	330/35	ZZ/Z	350	0,35	35,0	950	0,95
18	1150	11,7	330/110	ZZ/T	350	0,35	35,0	1000	0,94
19	1200	11,7	500/110	ZZ/ZZ	450	0,32	110	1050	0,95
20	1250	11,8	500/110	ZZ/ZZ	380	0,32	110	1100	0,96
21	1350	11,8	500/110	ZZ/ZZ	490	0,32	110	1150	0,93
22	1400	11,9	500/110	ZZ/ZZ	450	0,32	110	1200	0,94
23	1500	11,9	500/110	ZZ/ZZ	370	0,32	110	1250	0,95
24	1550	12,0	500/110	ZZ/ZZ	460	0,32	110	1300	0,94
25	1600	12,0	500/110	ZZ/ZZ	450	0,32	110	1350	0,93
26	1350	11,8	500/110	ZZ/ZZ	490	0,32	110	1150	0,93
27	1400	11,9	500/110	ZZ/ZZ	450	0,32	110	1200	0,94
28	1500	11,9	500/110	ZZ/ZZ	370	0,32	110	1250	0,95
29	1550	12,0	500/110	ZZ/ZZ	460	0,32	110	1300	0,94
30	1600	12,0	500/110	ZZ/ZZ	450	0,32	110	1350	0,93

Где, ZZ – зірка с заземленою нейтраллю

T – трикутник

Z – зірка с ізольованою нейтраллю

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник В.П. Математичні моделі і методи аналізу режимів електроенергетичних систем. – К., 2005. – 608 с., іл.
2. СОУ-Н МЕВ 40.1–00100227 -68:2012. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. Настанова. – К.:Міністерство палива та енергетики України, 2012.–29 с.
3. Перехідні процеси в енергетиці : [Навчальний посібник] / В.В. Козирський, О.В. Гай. – К. : ЦП «Компринт», 2016. – 489 с.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред.Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.
5. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Перехідні електромеханічні процеси в електричних системах” / Є.І. Бардик , В.П. Яновський, Бондаренко В.І. – К.:НТУУ КПІ, 2003. – 41с.
6. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання: Навч. Посібник. – Х.: Факт, 2005. – 176с.

Зразок оформлення титульного аркуша курсової роботи  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра відновлюваних джерел енергії**

**КУРСОВА РОБОТА**

з дисципліни

«Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах»

Виконав: студент(ка) \_ курсу \_\_\_ групи

прізвище, ім'я, по батькові

Перевірив: (науковий ступінь, посада)

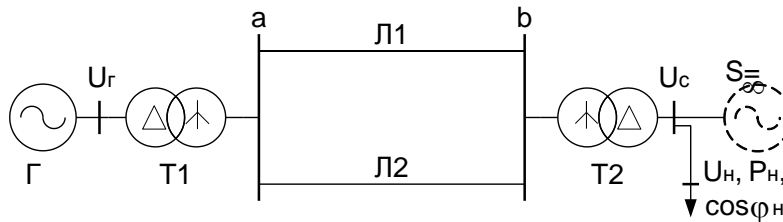
прізвище, ім'я, по батькові

Київ – 20\_\_

Зразок оформлення аркуша бланку завдання курсової роботи  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра відновлюваних джерел енергії**

**ЗАВДАННЯ**  
**НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ**  
з дисципліни «Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах»  
Студент(ка) \_\_\_\_\_ Група \_\_\_\_\_ варіант \_\_\_\_\_

**ВИХІДНІ ДАНІ**



Варіант № \_\_\_\_\_

1. Генератор:  $P_{ном. Г} = \text{_____ МВт}$ ,  $U_{ном. Г} = \text{_____ кВ}$ ,  $\cos\varphi_{ном. Г} = \text{_____}$ ,  $X_d = \text{_____ в.о.}$ ,  $X_q = \text{_____ в.о.}$ ,  $X'_d = \text{_____ в.о.}$ ,  $X_2 = \text{_____ в.о.}$ ,  $T_j = \text{_____ сек}$
2. Трансформатор Т1:  $S_{ном. Т1} = \text{_____ МВА}$ ,  $U_{К1} = \text{_____ \%}$ ,  $U_{НН1} = \text{_____ кВ}$ ,  $U_{ВН1} = \text{_____ кВ}$ .
3. Трансформатор Т2:  $S_{ном. Т2} = \text{_____ МВА}$ ,  $U_{К2} = \text{_____ \%}$ ,  $U_{НН2} = \text{_____ кВ}$ ,  $U_{ВН2} = \text{_____ кВ}$ .
4. Лінія:  $L = \text{_____ км}$ ,  $X_0 = \text{_____ Ом/км}$ .
5. Навантаження:  $U_H = \text{_____ кВ}$ ,  $P_H = \text{_____ МВт}$ ,  $\cos\varphi_H = \text{_____}$ .

**ВИКОНАТИ**

1. Визначити межу потужності системи I, знайти коефіцієнт запасу по статичній стійкості, побудувати векторну діаграму і характеристики  $P_H = f(\delta)$ ,  $Q_H = f(\delta)$ ,  $Q_E = f(\delta)$  при ідеалізованих умовах  $X_d = X_q$  і з урахуванням  $X_d \neq X_q$ .

2. Дослідити динамічну стійкість системи I в ідеалізованих умовах  $S_2 = \infty$ ,  $E' = \text{const}$  при КЗ. Вид КЗ визначає викладач.

3. На підставі аналітичних розрахунків зробити висновок про стійкість системи в аварійному режимі. Якщо система нестійка в аварійному режимі, визначити кут і розрахунковий час відключення і зробити висновок про стійкість системи в післяаварійному режимі. Якщо система нестійка в післяаварійному режимі, визначити кут і розрахунковий час АПВ і зробити висновок про стійкість системи в режимі після АПВ.

4. Побудувати характеристики потужності системи I у вихідному, аварійному і післяаварійному режимах, визначити графічно значення кутів відключення й АПВ, порівняти дані аналітичного і графічного розрахунків, показати рівні площі розгонів і гальмування в різних режимах.

Термін видачі завдання «\_\_»\_\_\_\_ 20 р. Термін здачі роботи «\_\_»\_\_\_\_ 20 р.  
Керівник

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

### *Загальні положення*

Розрахунково-графічну роботу (РГР) студенти оформляють як пояснювальну записку з доданням необхідних схем і графіків. РГР повинна містити:

- титульний аркуш;
- завдання на РГР;
- зміст;
- вступ;
- основну частину;
- висновки;
- список використаної літератури;
- додатки (за необхідності).

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми, розкривається її значення, зазначаються мета і завдання РГР, об'єкт і предмет дослідження, вказуються методи, що використовуються в роботі.

При оформленні даної складової вказується її назва «ВСТУП». Оптимальний обсяг вступу – 1-2 сторінки.

*Зміст пояснювальної записки.* Пояснювальна записка включає в себе: завдання, текстову частину з необхідними схемами та графіками і висновки по роботі, а також список використаної літератури та зміст.

Розділи пояснювальної записки нумерують арабськими цифрами з крапкою, а підрозділи – в межах кожного розділу. До змісту, зазвичай, потрібно включати всі заголовки рукопису, за винятком підзаголовків, розташованих у підбір з текстом. Усі заголовки у змісті починаються з прописної літери. Останнє

слово кожного заголовка з'єднують крапками з відповідним номером сторінки у правому стовпчику змісту. Нище наведено приклад оформлення змісту.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Завдання на РГР.....	6
1. Побудова заступної схеми досліджуваної системи .....	7
1.1. Приведення параметрів схеми до базисних умов.....	7
1.2. Визначити межу потужності системи .....	12
Висновки до розділу 1 .....	17
Перелік скорочень.....	18
Список рекомендованої літератури .....	19

Найменування розділів повинні бути короткими. Їх пишуть прописними літерами посередині рядка. Крапку в кінці заголовка не ставлять. У висновках по роботі приводять основні якісні та кількісні результати проведених досліджень і дають їх оцінку.

*Основна частина.* Виклад матеріалу РГР має чітко відповідати структурі встановленій в методичних рекомендаціях. Завдання кожного з розділів РГР носить наскрізний характер, тому студент має давати відповіді на поставлені запитання в тій послідовності, в якій вони викладені в методичних вказівках. При виконанні РГР необхідно зробити висновки щодо отриманих результатів. Одержані цифрові розрахунки потрібно узагальнити, проаналізувати і на їх основі зробити висновки пізнавального або практичного характеру.

У висновках необхідно підбити підсумки досліджень, проведених у РГР, акцентувати увагу на пропозиціях щодо заходів запобігання порушення стійкості електроенергетичної системи. Оптимальний обсяг висновків – 2 сторінки.

*Список використаної літератури* складають в алфавітному порядку. Кожне літературне джерело повинен містити прізвище та ініціали автора (авторів),

місто, видавництво, рік видання і загальну кількість сторінок та бути оформлене згідно стандарту.

*Додатки* складаються з громіздких таблиць допоміжного характеру, діаграм, схем, фінансової документації та нумеруються у тій послідовності, в якій на них надаються посилання у тексті.

Зміст (заголовки) повинен мати покажчик сторінок. Його розміщують на початку пояснювальної записки. Пояснювальну записку підписує студент і вказує дату виконання роботи.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ РГР**

РГР повинна бути виконана і оформлена з дотриманням усіх технічних вимог до наукових робіт. Текст роботи має бути виконаний за допомогою комп'ютерної техніки на одному боці аркуша білого паперу формату А4 (210x297 мм) або написаний чітким розбірливим почерком (без виправлень).

За машинописного способу виконання курсову роботу друкують через півтора інтервалу, шрифт – Times New Roman, розмір шрифту – 14 pt. Текст слід друкувати, додержуючись таких розмірів полів: верхнє і нижнє – 20 мм, лівє – 30 мм, правє – 1,5 мм.

Під час виконання курсової роботи необхідно дотримуватись рівномірної щільності, контрастності та чіткості зображення протягом усієї роботи. Всі лінії, літери, цифри і знаки повинні бути однаково чорними впродовж усього тексту РГР.

Структурні елементи «ЗМІСТ», «ВСТУП», «ВИСНОВКИ», «СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ», «ДОДАТКИ» не нумерують, а їх назви правлять за заголовки структурних елементів.

Заголовки структурних елементів роботи і заголовки розділів слід розташовувати по середині рядка і друкувати великими літерами без крапки в кінці, не підкреслюючи.

Заголовки підрозділів слід починати з абзацного відступу і друкувати маленькими літерами, крім першої великої, не підкреслюючи, без крапки в кінці.

Абзацний відступ повинен бути однаковим впродовж усього тексту звіту і дорівнювати п'яти знакам. Якщо заголовок складається з двох і більше речень, їх розділяють крапкою. Перенесення слів у заголовку не допускається.

Відстань між заголовком і подальшим чи попереднім текстом має бути два рядки.

Не допускається розміщувати назву розділу, підрозділу, а також пункту й підпункту в нижній частині сторінки, якщо після неї розміщено тільки один рядок тексту.

Сторінки РГР слід нумерувати арабськими цифрами, додержуючись наскрізної нумерації впродовж усього тексту. Номер сторінки проставляють у правому верхньому куті сторінки без крапки в кінці.

Титульний аркуш включають до загальної нумерації сторінок роботи, але номер сторінки не проставляють. Ілюстрації та таблиці, розміщені на окремих сторінках, включають до загальної нумерації сторінок роботи.

Розділи, підрозділи РГР слід нумерувати арабськими цифрами.

Розділи роботи повинні мати порядкову нумерацію в межах викладення суті роботи і позначатися арабськими цифрами без крапки, наприклад, 1, 2, і т.д.

Підрозділи повинні мати порядкову нумерацію в межах кожного розділу.

Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, відокремлених крапкою. Після номера підрозділу крапку не ставлять, наприклад, 1.1, 1.2 і т.д.

Ілюстрації (рисунки, графіки, схеми, діаграми) слід розміщувати у РГР безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. На всі ілюстрації мають бути посилання у роботі.

Ілюстрації повинні мати назву, яку розміщують під ілюстрацією. За необхідності під ілюстрацією розміщують пояснювальні дані (підрисунковий текст).

Ілюстрація позначається словом «Рисунок \_\_», яке разом з назвою ілюстрації розміщують після пояснювальних даних, наприклад, «Рис. 1.1 – Заступна схема».

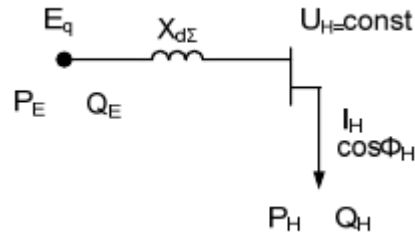


Рисунок 1.1 – Заступна схема

Ілюстрації слід нумерувати арабськими цифрами порядковою нумерацією в межах розділу. Номер ілюстрації складається з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, відокремлених крапкою, наприклад, рис. 3.2 – другий рисунок третього розділу. Цифровий матеріал, як правило, оформлюють у вигляді таблиць.

Таблицю необхідно розташовувати безпосередньо після тексту, в якому вона згадується вперше (наприклад, табл. 2.1), або на наступній сторінці. На всі таблиці мають бути посилання в тексті роботи. Назва таблиці складається зі слова «Таблиця», її порядкового номера та безпосередньо назви, яка стисло відбиває зміст наведених у ній даних. Повну назву таблиці вказують один раз над таблицею по центру. У випадку переносу частини таблиці на наступну сторінку, над нею з абзацного відступу пишуть: «Продовження табл. X», де X – номер таблиці. Наприклад: Таблиця 2.1 – Отримані результати дослідження динамічної стійкості системи.

Таблиці нумеруються арабськими цифрами за порядком в межах розділу, за винятком таблиць, що наводяться у додатках. Номер таблиці складається з номера розділу і порядкового номера таблиці, відокремлених крапкою, наприклад, таблиця 2.1 – перша таблиця другого розділу.

Заголовки та дані таблиці можуть бути виконані через один інтервал, шрифт – Times New Roman, розмір шрифту – 14 pt.

Заголовки граф таблиці починають з великої літери, а підзаголовки – з малої, якщо вони складають одне речення з заголовком.

Підзаголовки, що мають самостійне значення, пишуть з великої літери. В кінці заголовків і підзаголовків таблиць крапки не ставлять. Заголовки і підзаголовки граф указують в однині.

Переліки, за потреби, можуть бути наведені всередині підрозділів. Перед переліком ставлять двокрапку.

Перед кожною позицією переліку слід ставити малу літеру української абетки з дужкою, або, не нумеруючи, – дефіс (перший рівень деталізації).

Для подальшої деталізації переліку слід використовувати арабські цифри з дужкою (другий рівень деталізації).

Переліки першого рівня деталізації друкують малими літерами з абзацного відступу, другого рівня – з відступом щодо місця розташування переліків першого рівня.

Формули та рівняння розташовують безпосередньо після тексту, в якому вони згадуються, посередині сторінки.

Вище і нижче кожної формули або рівняння повинно бути залишено не менше одного вільного рядка.

Формули і рівняння у роботі (за винятком формул і рівнянь, наведених у додатках) слід нумерувати порядковою нумерацією в межах розділу.

Умовні літерні позначення фізичних величин і умовні графічні позначення дають відповідно до стандартів. Вони повинні мати одиницю виміру. Наприклад:  $T_j = 7,1\text{с}$ . Номер формули або рівняння складається з номера розділу і порядкового номера формули або рівняння, відокремлених крапкою, наприклад, формула (1.3) – третя формула першого розділу.

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{K1}^{(n)} \quad (1.3)$$

Номер формули або рівняння зазначають на рівні формули або рівняння в дужках у крайньому правому положенні на рядку.

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів, що входять до формули чи рівняння, слід наводити безпосередньо під формулою у тій послідовності, в якій вони наведені у формулі чи рівнянні.

Пояснення значення кожного символу та числового коефіцієнта слід давати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають з абзацу словом «де» без двокрапки.

Переносити формули чи рівняння на наступний рядок допускається тільки на знаках виконуваних операцій, повторюючи знак операції на початку наступного рядка. Коли переносять формули чи рівняння на знаку операції множення, застосовують знак «х».

Формули, що йдуть одна за одною й не розділені текстом, відокремлюють комою.

Посилання в тексті роботи на джерела слід зазначати порядковим номером за переліком посилань, виділеним двома квадратними дужками, наприклад, «... у роботах [1-7] ...».

При посиланнях на розділи, підрозділи, ілюстрації, таблиці, формули, рівняння, додатки зазначають їх номери.

При посиланнях слід писати: «... у розділі 2 ...», «... (рис. 1.3) ...» або «... на рисунку 1.3 ...», «... (табл. 3.2) ...» або «... у таблиці 3.2 ...», «...за формулою (3.1) ...», «... у формулах (1.3)-(1.5) ...», «... у додатку Б ...» або «... (додаток Б) ...».

Додатки слід сформулювати як продовження РГР на його наступних сторінках, розташовуючи додатки в порядку появи посилань на них у тексті.

Якщо додатки оформлюють на наступних сторінках роботи, кожний такий додаток повинен починатися з нової сторінки. Додаток повинен мати заголовок, надрукований вгорі малими літерами з першої великої симетрично відносно тексту сторінки. Посередині рядка над заголовком малими літерами з першої

великої повинно бути надруковано слово «Додаток \_\_» і велика літера, що позначає додаток.

Додатки слід позначати послідовно великими літерами української абетки, за винятком літер Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ъ, наприклад, додаток А, додаток Б і т.д.

Додатки повинні мати спільну з рештою роботи наскрізну нумерацію сторінок.

Ілюстрації, таблиці, формули та рівняння, що є у тексті додатків, слід нумерувати в межах кожного додатка, наприклад, рисунок Г.3 – третій рисунок додатка Г; таблиця А.2 – друга таблиця додатка А; формула (А.1) – перша формула додатка А.

Якщо в додатку одна ілюстрація, одна таблиця, одна формула, одне рівняння, їх нумерують, наприклад, рисунок А.1, таблиця А.1, формула В.1 відповідно до правил оформлення, зазначених вище.

Список літератури слід розміщувати одним із таких способів: у порядку появи посилань у тексті чи в алфавітному порядку прізвищ перших авторів або заголовків, у хронологічному порядку.

При оформленні списку літератури слід дотримуватися бібліографічних вимог.