

**МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра “Системи електричної тяги”**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до курсового та дипломного проектування  
тягового електричного приводу ЕРС**

**для студентів спеціальностей  
7.092202 «Електричний транспорт» та  
7.092201 «Електричні системи та комплекси  
транспортних засобів»**

**Харків 2009**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку  
на засіданні кафедри СЕТ 30 серпня 2007 р., протокол № 1.

Укладачі:  
доц. С.Г. Буряковський,  
старш. викл. М.М. Одегов

Рецензент  
проф. І.К. Колесник

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового та дипломного проектування  
тягового електричного приводу ЕРС

для студентів спеціальностей  
7.092202 «Електричний транспорт» та  
7.092201 «Електричні системи та комплекси  
транспортних засобів»

Відповідальний за випуск Буряковський С.Г.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 25.12.07 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,0. Обл.-вид.арк. 2,25.

Замовлення №                      Тираж 100.                      Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050 , Харків - 50, пл. Фейербаха, 7

## ЗМІСТ

Загальні положення .....	4
Завдання на курсове проектування .....	4
Зміст пояснювальної записки .....	4
Вимоги до оформлення курсового проекту .....	5
Виконання розділів курсового проекту .....	5
1 Вихідні дані .....	5
2 Опис роботи електропривода системи „генератор-двигун” .....	6
3 Вибір генератора та його приводного асинхронного двигуна .....	7
...	
4 Розрахунок та побудова статичних характеристик електропривода .....	10
...	
5 Визначення динамічних параметрів електропривода .....	12
6 Визначення коефіцієнта форсування .....	15
7 Розрахунок опору резисторів у ланці обмотки збудження	16
7.1 Визначення опору розрядного резистора $R_4$ .....	17
7.2 Визначити опір регулювальних резисторів $R_1, R_2, R_3$ .....	
...	
8 Розрахунок динаміки електроприводів постійного струму .....	19
..	19
8.1 Форсоване збудження генератора постійного струму	

8.2 Реостатний запуск двигуна постійного струму незалежного збудження .....	23
8.3 Математична модель системи Г-Д з тиристорним збудником і паралельним коригуванням .....	27
Список літератури .....	32
Додаток А. Завдання на проектування .....	33
Додаток Б. Генератори постійного струму .....	35
Додаток В. Криві намагнічення генераторів .....	36

## **ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Мета курсового проекту – вивчення фізичних явищ у системі генератор-електричний двигун у перехідних режимах, опанування графоаналітичним і аналітичним методами розрахунку перехідних процесів у нелінійній електромеханічній системі електропривода, дослідження впливу параметрів системи на характер перехідних процесів.

## **ЗАВДАННЯ НА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ**

Тема проекту: “Розрахунок та аналіз перехідних процесів у електроприводі системи „генератор-електричний двигун”.

За вихідними даними потрібно виконати:

- 1) вибір генератора та його приводного асинхронного двигуна;
- 2) розрахунок та побудову статичних характеристик

- електропривода, визначення робочих точок на механічній характеристиці намагнічення;
- 3) визначення динамічних параметрів електропривода;
  - 4) розрахунок коефіцієнта форсування збудження генератора;
  - 5) розрахунок величин опору резисторів у колі обмотки збудження генератора;
  - 6) розрахунок перехідних процесів у колі збудження генератора та в колі якоря системи „генератор-електричний двигун” (G – M);
  - 7) аналіз результатів розрахунку.

Крім цього, необхідно пояснити вплив динамічних параметрів електропривода, коефіцієнт форсування, вид статичного моменту опору на характер перехідного процесу.

## **ЗМІСТ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ**

- 1 Титульний аркуш.
- 2 Завдання.
- 2 Відомість проекту.
- 4 Зміст.
- 5 Головна частина.
- 6 Перелік використаних джерел.

Обсяг пояснювальної записки повинен складати 20-25 аркушів.

Головна частина пояснювальної записки включає такі розділи:

- 1) вихідні дані;
- 2) опис роботи електропривода системи „генератор-електричний двигун”;
- 3) вибір генератора та його приводного асинхронного двигуна;
- 4) розрахунок та побудова статичних характеристик електропривода;
- 5) визначення динамічних параметрів електропривода;
- 6) визначення коефіцієнта форсування;
- 7) розрахунок величин опору резисторів у колі обмотки збудження генератора;

- 8) розрахунок перехідних процесів відповідно до завдання викладача;  
9) висновки.

## **ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

Пояснювальну записку слід оформлювати відповідно до [6]  
Графічну частину необхідно виконувати згідно з вимогами [7].

## **ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ**

### **1 Вихідні дані**

Вихідні дані на курсовий проект наведено в додатку А. Вони повідомляються викладачем кожному студенту індивідуально відповідно до номера завдання.

### **2 Опис роботи електропривода системи „генератор-двигун”**

Схема управління та силова частина системи „генератор – двигун” (рисунки 2.1, 2.2) передбачає дві робочі швидкості обертання двигуна  $MI$ : головну (номінальну)  $\omega_n$  та допоміжну, рівну  $0,5\omega_n$ . Управління системою здійснюється за допомогою командоапарата  $S5$ , який має п'ять положень. У положенні 1 двигун  $MI$  працює на головній характеристиці; переведення командоапарата  $S5$  в положення 2 забезпечує обертання двигуна на допоміжній швидкості ( $0,5\omega_n$ ).

У положенні 3 обмотка збудження генератора  $LG1.2$  відключена. У положеннях 4 та 5 двигун  $MI$  обертається в протилежному напрямку (реверс) відповідно зі швидкістю  $0,5\omega_n$

та  $\omega_n$ . При номінальній швидкості обертання електродвигуна  $M1$  в коло збудження генератора  $LG1.2$  вводяться резистори  $R1$  та  $R2$ , а при допоміжній швидкості –  $R1$ ,  $R2$  та  $R3$ . Пуск електродвигуна здійснюється з форсуванням збудження генератора шляхом закорочення на час перехідного процесу резисторів  $R2$  та  $R3$  контактами контактора  $K5$ . Вимкнення форсування виконується за допомогою реле напруги  $K6$  та  $K7$ , підключених на шини генератора  $G1$  та налагоджених на напругу, відповідну значенню вибраної швидкості двигуна. Зупинка електродвигуна відбувається при переміщенні командоапарата в положення 3, при цьому зменшення енергії розсіювання магнітного поля збудження генератора відбувається в контурі "обмотка збудження  $LG1.2$  – розрядний резистор  $R4$ ".

Схема забезпечує захист електропривода від:

- зниження струму збудження двигуна нижче допустимого за допомогою реле переривання поля  $K9$ ;
- перевищення напруги генератора більш допустимого значення – реле  $K8$ ;
- захист за максимальним струмом – реле  $K11$ ;
- нульовий захист (від самопуску після короткочасного зникнення напруги) – реле  $K1$ .

Усі реле захисту діють на реле нульового захисту, яке вимикає обмотку збудження генератора.





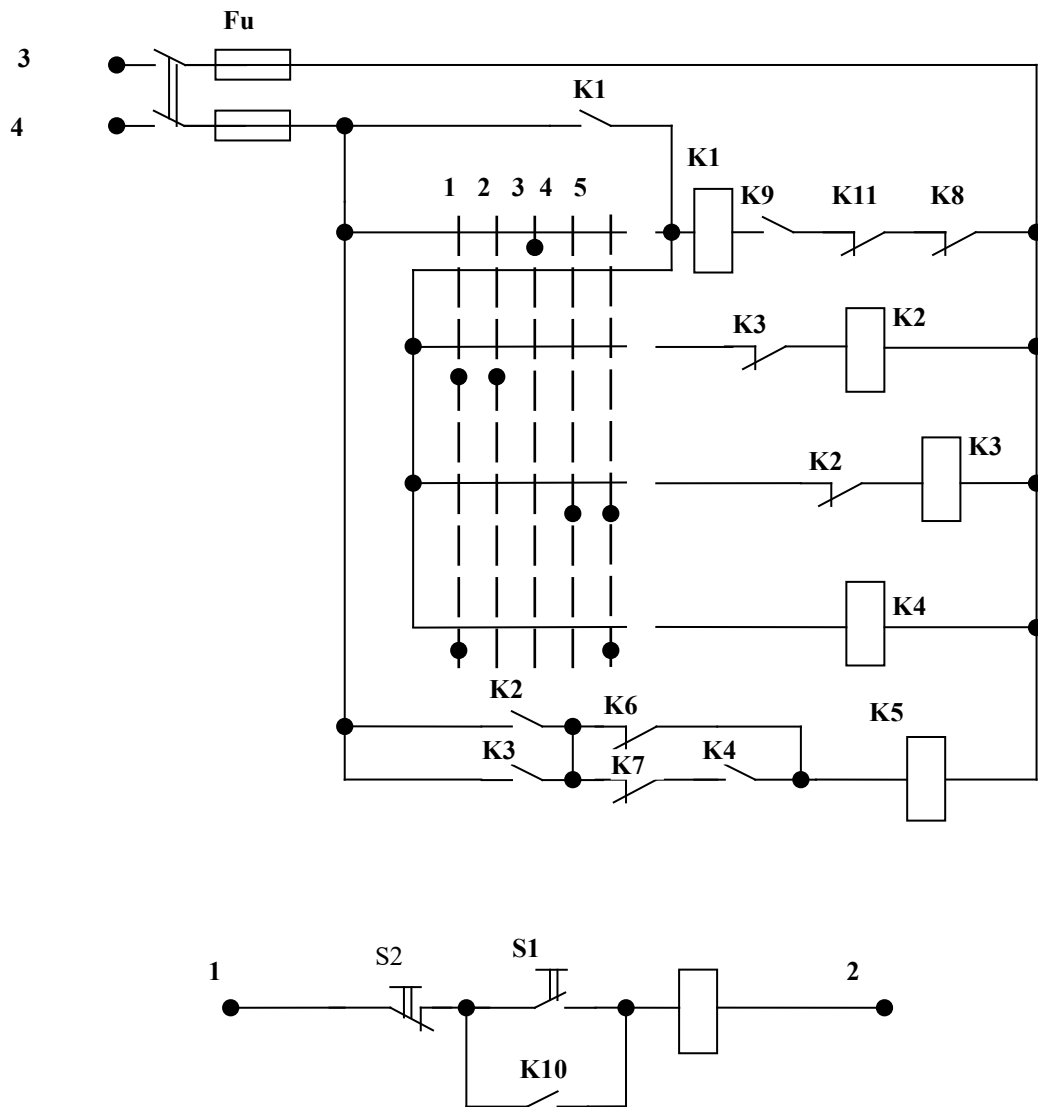


Рисунок 2.2 – Схема управління системи „генератор - двигун”

У даному розділі пояснювальної записки необхідно подати схему електропривода системи „генератор – двигун”, з’ясувати призначення всіх елементів схеми та закономірність їх вибору, розібратись самостійно та описати підготовку схеми до роботи, а також її роботу під час запуску і розгону двигуна до головної та допоміжної швидкості обертання, реверс та зупинку.

### 3 Вибір генератора та його приводного асинхронного двигуна

Вибір генератора виконується за номінальними даними двигуна, при цьому номінальна напруга генератора повинна бути приблизно на 5% більшою номінальної напруга двигуна, а також

$$I_{HG} > I_{HM}, \quad (3.1)$$

де  $I_{HG}$ ,  $I_{HM}$  - номінальний струм відповідно генератора  $G1$  та двигуна  $M1$ , А.

Технічні дані генератора та їх характеристики намагнічування подані в додатку Б.

Необхідно побудувати характеристику намагнічування  $\Phi_G = f(F_G)$ , а також розрахувати та побудувати характеристику холостого ходу генератора  $E_0 = f(I_{3G})$  при номінальній швидкості обертання генератора  $\omega_G = \omega_{HG}$ . ЕРС генератора визначається зі співвідношення

$$E_0 = K_G \cdot \Phi_G \cdot \omega_G, \quad (3.2)$$

де  $K_G$  - конструктивний коефіцієнт;

$\Phi_G$  - потік збудження, Вб;

$\omega_G$  - кутова швидкість обертання генератора, рад/с.

$$K_G = \frac{W_y \cdot \rho}{\pi \cdot a} = \frac{\rho \cdot W}{2\pi \cdot a}, \quad (3.3)$$

де  $W_y$  - число витків обмотки якоря генератора;

$\rho$  - число пар полюсів збудження;

$a$  - число паралельних гілок обмотки якоря.

Струм збудження генератора

$$I_{3G} = \frac{F_G}{W_{03}}, \quad (3.4)$$

де  $F_G$  – сила намагнічення, А;

$W_{03}$  – число витків обмотки збудження генератора.

При виборі приводного асинхронного двигуна необхідно виконати такі умови:

$$P_{HM2} \geq P_{HG1}, \quad (3.5)$$

$$\omega_{HM2} \geq \omega_{HG2}, \quad (3.6)$$

де  $P_{HM2}, P_{HG1}$  – потужності асинхронного двигуна та генератора, Вт;  
 $\omega_{HM2}, \omega_{HG2}$  – номінальні кутові швидкості обертання асинхронного двигуна  $M2$  та генератора  $G1$ , рад/с.

#### 4 Розрахунок та побудова статичних характеристик електропривода

Статичні характеристики (електромеханічна  $\omega = f(I_a)$  та механічна  $\omega = f(M)$ ) розраховуються за відомим співвідношенням для двигуна постійного струму незалежного збудження [1, 2]

$$\omega = \frac{E_G}{K_m \cdot \Phi_{MH}} - \frac{\sum R_{я}}{K_m \cdot \Phi_{MH}} \cdot I_{ЯМ}, \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{E_G}{K_m \cdot \Phi_{HM}} - \frac{\sum R_{я}}{(K_m \cdot \Phi_{HM})} \cdot M_M, \quad (4.2)$$

де  $K_m$  – конструктивний коефіцієнт двигуна  $M1$ ;

$\Phi_{HM}$  – номінальний потік збудження двигуна  $M1$ , Вб;

$\sum R_{я}$  – сумарний опір якірної ланки, Ом.

$$\sum R_{я} = K_m \cdot (R_{ЯG} + R_{dnG} + R_{ЯМ} + R_{dnM} + R_{dp}) + R_{щ}, \quad (4.3)$$

де  $K_m$  – температурний коефіцієнт для врахування збільшення опору при нагріванні,  $K_m = 1,24$ ;

$R_{ЯG}, R_{ЯМ}$  – опір якоря генератора  $G1$  та двигуна  $M1$ , Ом;

$R_{dnM}, R_{dnM}$  – опір додаткових полюсів генератора  $G1$  та двигуна  $M1$ , Ом;

$R_{dp}$  – опір з'єднувальних проводів, Ом;

$R_{щ}$  – опір місця контакту щіток та колектора, Ом.

При визначенні  $R_{dp}$  взяти сумарну довжину проводів  $l=(20\div 30)$  м, для мідного проводу  $\rho = 0,017 \frac{\text{Ом}\cdot\text{м}^2}{\text{м}}$ . Допустима щільність струму  $j = 4\text{А}/\text{мм}^2$

$$R_{dp} = \rho \cdot \frac{l}{s} = \rho \cdot \frac{l \cdot i}{I_{HM}}. \quad (4.4)$$

Опір контакту щіток та колектора

$$R_{щ} = \frac{\sum \Delta U_{щ}}{I_{HM}}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta U_{щ}$  - падіння напруги в контакті щіток, В.

Прийняти  $\Delta U_{щ}$  незмінним та рівним  $\Delta U_{щ} = 0,6 \div 1$  В на один контакт.

Добуток  $(K_M \cdot \Phi_{HM})_M$  визначається за паспортними даними двигуна

$$(K_M \cdot \Phi_{HM})_{MI} = \frac{U_{HM} - I_{HM} \cdot (K_T \cdot (R_{яM} + R_{dнM}) + R_{щ})}{\omega_{HM}}, \quad (4.6)$$

де  $U_{HM}$  – номінальна напруга двигуна  $MI$ , В;

$\omega_{HM}$  – номінальна кутова швидкість двигуна  $MI$ , рад/с.

У курсовому проекті слід розрахувати статичні характеристики, які забезпечують роботу двигуна з номінальною та додатковою швидкостями обертання при навантаженні на його вісь, рівному статичному моменту опору

$$M_0 = K_H \cdot M_H, \quad (4.7)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт навантаження (додаток А);

$M_H$  – номінальний момент, Н·м.

$$M_H = \frac{P_{HM}}{\omega_{HM}}, \quad (4.8)$$

де  $P_{HM}$  – номінальна потужність, Вт.

Для побудови статичної характеристики двигуна достатньо мати дві точки, тому що вона являє собою пряму лінію.

За одну з цих точок вигідно прийняти точку, відповідну ідеальному холостому ходу ( $M_0 = 0$ ). За іншу точку – (при  $M_0 = M$ ) швидкість обертання  $\omega = \omega_{HM}$ , або  $\omega = 0,5\omega_{HM}$ . Для забезпечення потрібної швидкості обертання двигуна ЕРС генератора повинна перевищувати ЕРС двигуна в статичних режимах на величину падіння напруги в опорі якорів:

$$E_G = (K \cdot \Phi_H)_M \cdot \omega + I_{ям} \cdot \Sigma R_я, \quad (4.9)$$

де  $I_{ям}$  - струм двигуна  $MI$ , що визначається навантаженням на його вісь, А.

Необхідно також розрахувати та побудувати природні статичні характеристики  $MI$  незалежного збудження та характеристики  $MI$  в системі „генератор – двигун” при  $M_0 = M_H$ ;  $\omega = \omega_{HM}$ . Графіки статичних характеристик двигуна побудувати в чотирьох квадрантах координатної площини  $[M, \omega]$   $[I_я ; \omega]$  з визначенням робочих точок. Оцінити жорсткість характеристик.

За характеристиками холостого ходу та намагнічення генератора для дійсних значень ЕРС генератора, які забезпечують основну та допоміжну швидкості обертання двигуна, визначити необхідні значення струмів та потоків збудження генератора.

## 5 Визначення динамічних параметрів електропривода

Динамічними називаються параметри, які визначають характер протікання перехідних процесів.

При розрахунках не враховують електромагнітну інерційність якірної ланки, реакцію якоря генератора та двигуна, вплив вихрових струмів. Із врахуванням цих допущень до

динамічних параметрів системи „генератор – двигун” відносяться: електромагнітна стала часу обмотки збудження генератора –  $T_3$  та електромеханічна стала часу електропривода

$$T_M = \frac{J \cdot \sum I \cdot R_{\Sigma}}{(K \cdot \Phi_H)^2 M}, \quad (5.1)$$

де  $J$  - приведений до вала двигуна момент інерції всієї системи,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$J = K_J \cdot J_M, \quad (5.2)$$

де  $K_J$  - коефіцієнт інерції привода;

$J_M$  - момент інерції якоря двигуна  $M_I$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$T_3 = \frac{L_{3G}}{R_{3G}}, \quad (5.3)$$

де  $L_{3G}$  - індуктивність обмотки збудження генератора  $GI$ , Гн;

$R_{3G}$  - активний опір обмотки збудження генератора  $GI$ , Ом.

Індуктивність обмотки збудження являє собою змінну величину й залежить від величини струму збудження. За допомогою характеристики намагнічення  $\Phi_G = f(I_{3G})$  знаходять залежність  $L_{3G} = f(I_{3G})$  за формулою

$$L_{3G} = 2p \cdot w_{03} \left( \frac{d\Phi_G}{dI_{3G}} + \frac{\Phi_{HG}(\sigma_H - 1)}{I_{3HG}} \right), \quad (5.4)$$

де  $\Phi_{HG}$ ,  $I_{3HG}$  - номінальні значення потоку та струму збудження генератора;

$\sigma_H$  - коефіцієнт розсіяння магнітного потоку в номінальному режимі, його звичайно приймають рівним  $1,1 \div 1,2$ .

Результати розрахунків за формулою (5.4) зручно звести в таблицю 5.1. За даними таблиці 5.1 будують залежність  $L_3 = f(I_{3GI})$ .

При знаходженні  $T_3$  за формулою (5.3), як правило,

користуються значенням індуктивності  $L_3 = L_{3cp}$ , котре визначається на робочій ділянці збудження від нуля до значення  $I_3$ , що відповідає роботі двигуна на основній швидкості.

Таблиця 5.1 - Розрахунок індуктивності обмотки збудження

$(\Delta I_{3G})_j =$ $= (I_{3G})_{j+1} -$ $- (I_{3G})_{j-1}$	$(\Delta \Phi_G)_j =$ $= (\Phi_G)_{j+1} -$ $- (\Phi_G)_{j-1}$	$a_j =$ $= \frac{(\Delta \Phi_G)_j}{(\Delta I_{3G})_j}$	$b_i =$ $= \frac{\Phi_{GH}(\sigma_H - 1)}{(I_{3G})_j}$ (const)	$(c) =$ $+ (a)_j +$ $+ (b)_j$	$(c2p$ $w_{03})_j$	$I_{3Gj}$
1 $(\Delta I_{3G1})_1$	$(\Delta \Phi_{G1})_1$				$(L_3)_1$	$(I_{3G1})_1$
2 $(\Delta I_{3G1})_{j+1}$	$(\Delta \Phi_{G1})_{j+1}$				$(L_3)_2$	$(\Delta I_{3G1})_{j+1} +$ $+ I_{3G1j}$
.....	.....	.....			.....	.....
n $(\Delta I_{3G1})_n$	$(\Delta \Phi_{G1})_n$	.....			$(L_3)_n$	..... $(\Delta I_{3G1})_n + I_{3G1n-1}$

Згідно з [2],

$$L_{3cp} = 2 \cdot \rho \cdot \kappa_{нас} \cdot w_{03} \cdot \Phi_H / I_{3GH} , \quad (5.5)$$

де  $\kappa_{нас}$  – коефіцієнт насичення.

$$\kappa_{нас} = \frac{F_H}{F_{лнн}} , \quad (5.6)$$

де  $F_{лнн}$  - намагнічуюча сила, яка створює номінальний потік при відсутності насичення магнітної ланки, А.

Можна застосувати для визначення  $L_3$  графічне інтегрування, яке базується на використанні першої теореми про середнє значення визначеного інтегралу [3]:

$$L_{3cp} = \frac{1}{I_{3G}} \cdot \int_0^{I_{3G}} L_{3G} \cdot dI_{3G} , \quad (5.7)$$

де  $I_{3G}$  – струм збудження генератора при роботі двигуна на основній швидкості, А.

## 6 Визначення коефіцієнта форсування

Для зменшення часу перехідного процесу в системі „генератор – двигун” застосовуються методи форсованої зміни струму збудження. Як правило, форсування збудження реалізується за рахунок збільшення напруги  $U_c$ , яка подається на обмотку збудження генератора на час розгону двигуна до основної швидкості

$$U_c \geq K_\phi U_{3G} \quad (6.1)$$

де  $K_\phi$  - коефіцієнт форсування;

$U_{3G}$  - напруга на обмотці збудження в статичному режимі, В.

$$U_{3G} = I_{3HG} \cdot R_{3G} \quad (6.2)$$

Попереднє значення коефіцієнта форсування визначають з умови, що  $RI$  під час форсування закорочено, максимальний струм якоря  $I_{яmax}$  під час пуску не перевищить допустимого значення  $I_{доп} = (2 \div 2,5) \cdot I_{нд}$ .

Згідно з [4],

$$K_\phi = \frac{I_{доп} - I_c}{I_{кз} \left( \frac{T_M}{I_3} \right)^{T_3 / (T_3 - T_M)}} + \frac{I_c}{I_{кз}} \quad (6.3)$$

де  $I_{кз}$  - струм короткого замикання при ЕРС генератора, що забезпечує номінальну швидкість обертання двигуна, А.

$$I_{кз} = \frac{E_G}{\sum R} \quad (6.4)$$

де  $E_G$  - ЕРС генератора при номінальній швидкості обертання двигуна, В.

$$I_c = K_3 \cdot I_{нд} \quad (6.5)$$



де  $I_c$  - струм статичного навантаження.

Вибираючи  $U_c$ , слід орієнтуватись на стандартну напругу 110, 220, 440 та 660 В з таким розрахунком, щоб забезпечити необхідне форсування. Так як можливість співпадання  $U_c$  зі стандартним рядом напруг малоімовірна, то приймаємо найближче стандартне значення  $U_c$ , але не менше розрахованого. У цьому випадку, щоб зменшити наростання  $I_{3G}$ , а також, відповідно,  $I_{я}$ , послідовно з ланкою обмотки збудження включають додатковий опір  $R_l$ .

## 7 Розрахунок опору резисторів у ланці обмотки збудження

### 7.1 Визначення опору розрядного резистора $R_4$

При визначенні опору розрядного резистора  $R_4$  необхідно виконати дві умови.

**Перша умова:** допустима перенапруга на обмотці живлення генератора в момент його відключення при номінальному струмі не повинна перевищувати десятикратну номінальну напругу збудження, тобто

$$I_{3HG} \cdot R_4 \leq 10 \cdot U_{3H}. \quad (7.1)$$

**Друга умова:** струм якірної ланки не повинен перевищувати допустимого значення за умовами комутації

$$I_{яmax} \leq K I_{нд}, \quad (7.2)$$

де  $K$  - коефіцієнт перевантаження по струму,  $K=2 \div 2,5$ .

Для розрахунку  $R_4$  користуються спрощеними залежностями з [4]

$$I_{яmax} = I_{кз} \cdot \left( \frac{T_M}{T_{30}} \right)^{\frac{T_{30}}{T_{30}-T_M}} + I_c, \quad (7.3)$$

де  $T_{30}$  - стала часу обмотки збудження при її відключенні,

$$T_{30} = \frac{L_3}{(R_{3G} + R_4)}.$$

Із врахуванням умови (7.2) формула (7.3) приводиться до вигляду

$$\frac{K \cdot I_{нд} + I_c}{I_{кз}} = \left( \frac{T_M}{T_{30}} \right)^{\frac{T_{30}}{T_{30} - T_M}} = \left[ (1+n) \frac{T_M}{T_3} \right]^{\frac{1}{1 - (1+n)T_M/T_3}}, \quad (7.4)$$

де  $n = R_4/R_{3G}$ .

Розв'язок трансцендентного рівняння (7.4) може бути знайдений за допомогою обчислювальної техніки з використанням методу дихотомії або графічно; визначивши відношення  $(T_M/T_3)$  для декількох значень  $n$  від 2 до 10, розрахувати праву частину рівняння (7.4).

Побудувати криву залежності правої частини від  $n$ , а потім за кривою знайти значення  $n$ , при якому виконується умова (7.4).

Після визначення  $R_4$  зробити перевірку виконання умови (7.1) і, при необхідності, скоригувати вибране значення.

## 7.2 Визначити опір регулюючих резисторів $R_1, R_2, R_3$

Резистор  $R_1$  при форсованому пуску потрібен для компенсації надлишку напруги мережі

$$U_{над} = U_c - K_\phi \cdot U_3. \quad (7.5)$$

Опір резистора  $R_1$  приблизно можна визначити за формулою

$$R_1 = \frac{U_{над}}{i_{зф}}, \quad (7.6)$$

$$i_{зф} = I_{3G} + I_{R4}, \quad (7.7)$$

де  $i_{зф}$  – струм у колі збудження при форсуванні;

$I_{3G}$  - струм збудження генератора  $G_I$  при форсуванні.

Кінцеве значення  $R_I$  визначають з умови [4]:

$$I_{\text{доп}} \leq I_{\text{max}} = \left| K_{\phi} \cdot I_{\text{кз}} - I_C \right| \cdot \left( \frac{T_M}{T_{3e}} \right)^{\frac{T_{3e}}{T_{3e} - T_M}}, \quad (7.8)$$

де  $T_{3e} = \frac{L_3}{R_e}$ ; (7.9)

$$R_e = R_{3G} + \frac{R_4 \cdot R_1}{R_4 + R_1}. \quad (7.10)$$

Побудувати залежність  $I_{\text{max}} = f(R_I)$  за (7.8) можна, задаючи значення  $R_I$ , близькі до величини  $R_I$ , визначеної за формулою (7.10).

Величина  $R_I$  визначається точкою перетину кривої  $I_{\text{max}} = f(R_I)$  та лінії

$$I_{\text{max}} = I_{\text{доп}}.$$

Резистор  $R_2$  повинен забезпечити отримання кутової швидкості обертання після припинення форсування. Його опір

$$R_2 = \frac{(U_c - I_{3GH} \cdot R_{3G}) \cdot R_4}{I_{3GH} \cdot (R_4 + R_{3G})} - R_1. \quad (7.11)$$

Опір резистора  $R_3$  знаходять з умови отримання половинної швидкості обертання двигуна

$$R_3 = \frac{(U_c - I_3 \cdot R_{3G}) \cdot R_4}{I_{3G}^* \cdot (R_4 + R_{3G})} R_1 - R_2, \quad (7.12)$$

де  $I_{3G}^*$  - струм збудження генератора при повній швидкості обертання, А.

Значення  $I_{3G}^*$  знайти за характеристикою холостого ходу  $E_G = f(I_{3G})$  для ЕРС генератора при половинній швидкості від номінальної:

$$E = (K \cdot \Phi_n) \cdot 0,5\omega_n + I_{\Sigma} \Sigma R_{\Sigma}. \quad (7.13)$$

## 8 Розрахунок динаміки електроприводів постійного струму

### 8.1 Форсоване збудження генератора постійного струму

Розрахувати перехідні процеси режиму форсованого збудження генератора постійного струму з урахуванням індуктивності якірного кола (див. рисунок 8.1).

Наприклад, розв'язуємо поставлену задачу, використовуючи різницеві рівняння на підставі неявного методу Ейлера [5]  $y_{i+1} = y_i + hy'_{i+1}$  з кроком  $h = 0.002$  с для часу інтегрування  $T_{\max} = 2.5$  с.

Задано:

$U_{dH} = 220$  В - номінальне збудження генератора;

$U_H = 460$  В - номінальна напруга якоря генератора;

$K_G = 2.09$  - коефіцієнт підсилення генератора;

$K_\phi = U_d / U_{dH} = 3$  - коефіцієнт форсування;

$R_a = 0.15$  Ом - опір якоря генератора;

$R_H = 4.1$  Ом - опір навантаження;

$T_a = 0.1$  с - стала часу якірного кола;

$R_d = 4.5$  Ом - опір обмотки збудження генератора;

$L_d = 5.5$  Г - індуктивність обмотки збудження генератора;

$R_1 = 9$  Ом - додатковий опір в колі збудження генератора.

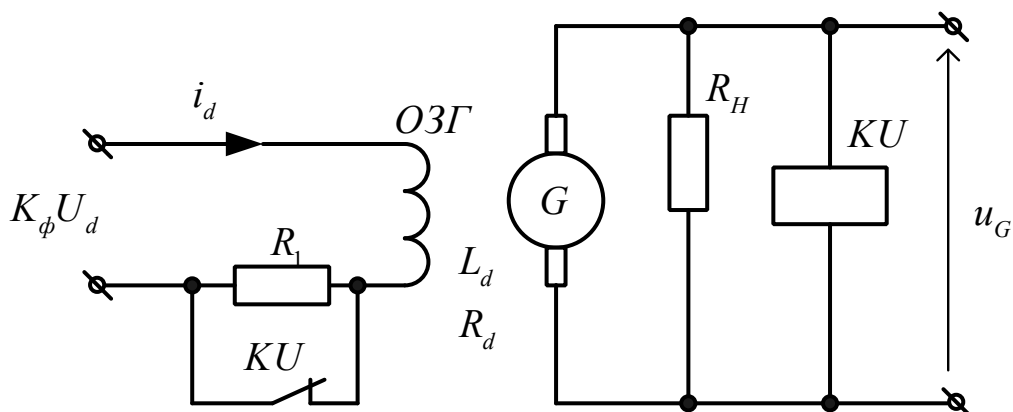


Рисунок 8.1 – Схема форсованого збудження генератора постійного струму

Виведемо різницеві рівняння для струму збудження  $i_d$  та струму якоря  $i_a$  генератора

$$Ty' + y = x \Rightarrow y' = \frac{x - y}{T}, \quad (8.1)$$

підставляючи у формулу числового методу, отримаємо

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{T}(x_{i+1} - y_{i+1}), \quad (8.2)$$

звідки

$$y_{i+1} = \frac{y_i + \frac{h}{T}x_{i+1}}{1 + \frac{h}{T}}. \quad (8.3)$$

Тоді

$$i_{d_{i+1}} = \frac{i_{d_i} + \frac{h}{T_G} \frac{K_\phi U_d}{R_{d\Sigma}}}{1 + \frac{h}{T_G}}; \quad (8.4)$$

$$i_{a_{i+1}} = \frac{i_{a_i} + \frac{h}{T_a} \frac{K_G i_{d_{i+1}} R_d}{R_a + R_H}}{1 + \frac{h}{T_a}}; \quad (8.5)$$

де  $R_{d\Sigma} = R_d$  для режиму форсування і  $R_{d\Sigma} = R_d + R_1$  - після закінчення форсування;

$R_1$  - додатковий опір в колі ОЗГ, вибирають з умови забезпечення номінального струму  $I_{dH} = \frac{K_\phi U_d}{R_1 + R_d}$  ОЗГ після закінчення форсування для напруги  $K_\phi U_d$ .

Номери розрахункових точок

$$N := \frac{T_{\max}}{h} \quad (8.6)$$

$$i := 0..N \quad (8.7)$$

$$t_i := i \cdot h \quad (8.8)$$

$$U_g := i_a \cdot R_i \quad (8.9)$$

Розрахунок виконуємо з використанням MathCAD. Результат розрахунку виконуємо графічно (див. рисунки 8.2, 8.3).

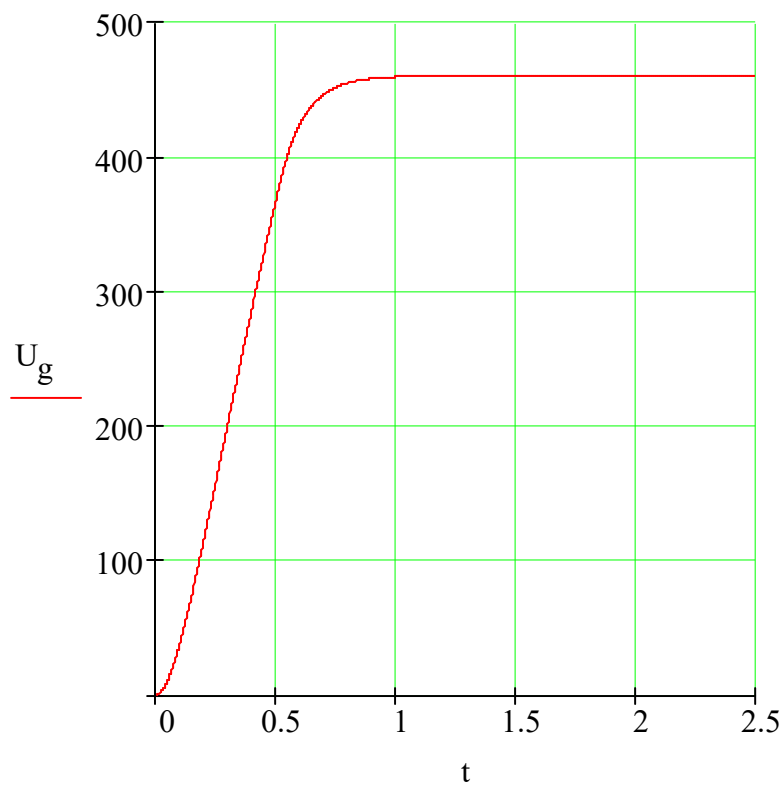


Рисунок 8.2 – Графік залежності напруги збудження генератора

$$\begin{pmatrix} i_{d_{i+1}} \\ i_{a_{i+1}} \end{pmatrix} := \left\{ \begin{array}{l} \text{"Напруга генератора"} \\ U_G \leftarrow K_G \cdot i_{d_1} \cdot R_d - i_{a_1} \cdot R_a \\ \text{"Стала часу обмотки збудження"} \\ R_{d\Sigma} \leftarrow R_d + R_1 \text{ if } U_G \geq U_H \\ R_{d\Sigma} \leftarrow R_d \text{ otherwise} \\ T_d \leftarrow \frac{L_d}{R_{d\Sigma}} \\ \text{"Наступне значення струму збудження"} \\ Id1 \leftarrow \frac{i_{d_1} + \frac{h}{T_d} \cdot \frac{K_\Phi \cdot U_{dH}}{R_{d\Sigma}}}{1 + \frac{h}{T_d}} \\ \text{"Наступне значення струму якоря"} \\ Ia1 \leftarrow \frac{i_{a_1} + \frac{h}{T_a} \cdot \frac{K_G \cdot Id1 R_d}{R_a + R_H}}{1 + \frac{h}{T_a}} \\ \begin{pmatrix} Id1 \\ Ia1 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

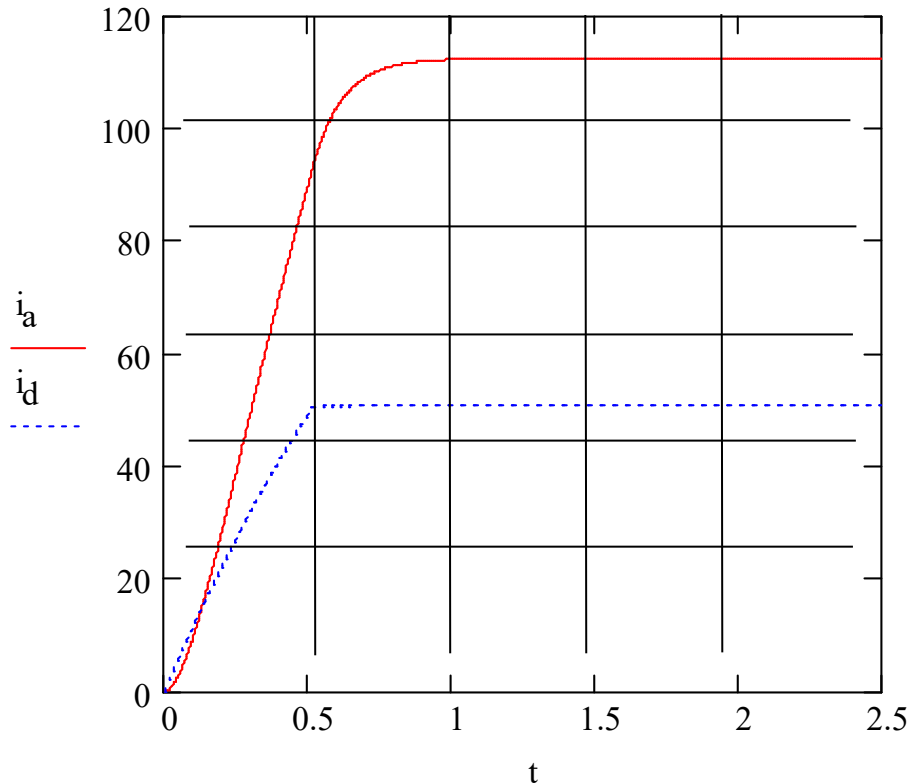


Рисунок 8.3 – Графік залежності струму збудження генератора та струму якорної ланки двигуна

## 8.2 Реостатний запуск двигуна постійного струму незалежного збудження

Виконуємо дослідження перехідних процесів для режиму триступеневого реостатного запуску двигуна постійного струму у функції струму якоря за наведеним прикладом (рисунок 8.4).

Задано:

$P_n = 4.8$  кВт - потужність двигуна;

$U_n = 220$  В - номінальна напруга двигуна;

$I_n = 24.2$  А - номінальний струм якоря;

$R_n = 0.38$  Ом - опір якоря;

$n = 1500$  об/хв - номінальна швидкість обертання.



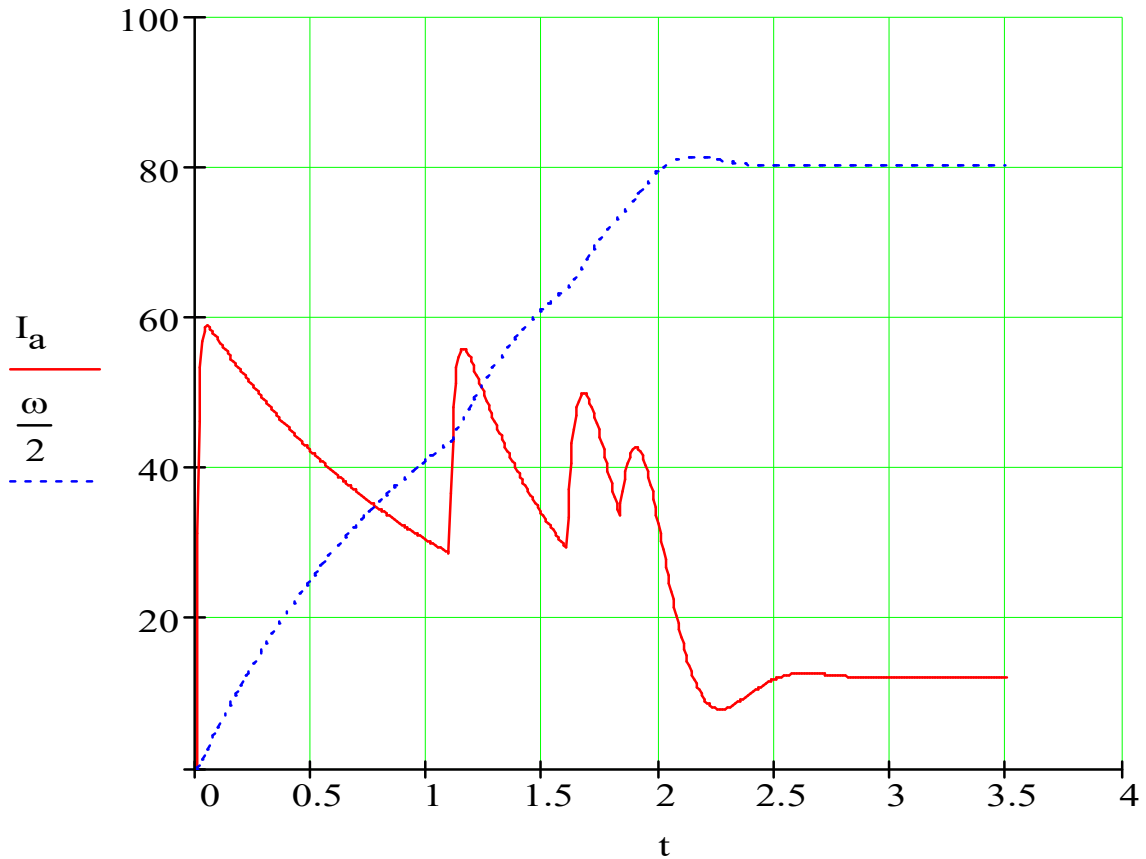


Рисунок 8.4 – Графік залежності струму якірної ланки двигуна та кутової частоти обертання при виконанні реостатного пуску

Для реостатного запуску прийнято:

- максимальний струм  $I_1 = 2.5I_n = 60.5 \text{ A}$ ;
- коефіцієнт  $\lambda = I_1 / I_2 = 2.12$ , де  $I_1, I_2$  - струми перемикачів під час реостатного запуску, які отримують з пускової діаграми; для забезпечення задовільної динаміки приймають  $I_2 \geq (1.1 \dots 1.2)I_c$ ;
- значення пускових опорів (знайдені з використанням пускової діаграми, див. відповідний документ у MathCAD):  
 $R1 = 3.26 \text{ Ом}$  - сумарний додатковий опір першого ступеня;  
 $R2 = 1.33 \text{ Ом}$  - сумарний додатковий опір другого ступеня;  
 $R3 = 0.43 \text{ Ом}$  - сумарний додатковий опір третього ступеня.

Для розв'язування поставленої задачі вдалися до запропонованої в [5] процедури з використанням формули Фельберга 2(3) В з автоматичним вибором кроку інтегрування.

*Розрахункові величини*

Номинальна кутова швидкість, рад/с,

$$\omega_{\text{nom}} := n_{\text{nom}} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (8.10)$$

Стала двигуна

$$C := \frac{U_{\text{nom}} - I_{\text{nom}} \cdot R_a}{\omega_{\text{nom}}} \quad (8.11)$$

*Розрахунок реостатних характеристик*

Кількість пускових ступенів

$$m := 3 \quad j := 1..m \quad (8.12)$$

Максимальний пусковий струм

$$I_1 := 2.5 I_{\text{nom}} \quad (8.13)$$

Сумарний пусковий опір

$$R_m := \frac{U_{\text{nom}}}{I_1} \quad (8.14)$$

Кратність пусковий струмів

$$\lambda := \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_a}} \quad (8.15)$$

Струм, через який перемикаються ступені,

$$I_2 := \frac{I_1}{\lambda} \quad (8.16)$$

Значення опору кожного ступеня

$$r_j := R_a \cdot \lambda^{j-1} \cdot (\lambda - 1) \quad r_0 := 0 \quad (8.17)$$

*Розрахунок перехідного процесу режиму реостатного запуску*

$T_{\max} := 3.5$  кінцевий час розрахунку.

$N := 500$  кількість інтервалів інтегрування.

Швидкості, за яких перемикаються ступені,

$$\omega_{2j} := \frac{U_{\text{nom}} - I_2 \cdot \left( \sum_{k=0}^j r_k + R_a \right)}{C} \quad (8.18)$$

Вектор - функція правих частин системи диференційних рівнянь

$u_0$  - струм якоря;

$u_1$  – швидкість.

$$\text{Diff}(t, y) := \left( \begin{array}{l} R_{a\Sigma} \leftarrow R_a \\ \text{for } j \in 0..m \\ R_{a\Sigma} \leftarrow R_{a\Sigma} + r_j \text{ if } y_1 < \omega 2_j \\ T_a \leftarrow \frac{L_a}{R_{a\Sigma}} \\ \frac{U_{\text{nom}} - C \cdot y_1}{R_{a\Sigma}} - y_0 \\ \frac{\quad}{T_a} \\ \frac{C \cdot y_0 - M_c}{J} \end{array} \right).$$

$$y_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{початкові умови.}$$

Розв'язання системи диференційних рівнянь.

$$\text{Res} := \text{rkfixed}(y_0, 0, T_{\text{max}}, N, \text{Diff}) \quad (8.19)$$

З матриці розв'язку виділяємо необхідні стовпці:

$$t := \text{Res}^{\langle 0 \rangle} \quad I_a := \text{Res}^{\langle 1 \rangle} \quad \omega := \text{Res}^{\langle 2 \rangle}.$$

### **8.3 Математична модель системи Г-Д з тиристорним збудником і паралельним коригуванням**

Моделювання динамічних режимів систем Г-Д з тиристорним збудником і паралельним коригуванням. Виконуємо за наведеним прикладом.

Математична модель системи Г-Д з тиристорним збудником (тиристорним перетворювачем ТП) і паралельним коригуванням (рисунок 8.5) подається системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{du_{mn}}{dt} = \frac{u_{ex}K_{mn} - u_{mn}}{T_{mn}}, \quad (8.20)$$

$$\frac{de_G}{dt} = \frac{u_{mn}K_G - e_G}{T_G}, \quad (8.21)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{(e_G - C\omega)/R_a - i_a}{T_a}, \quad (8.22)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(i_a - I_c)C}{J}, \quad (8.23)$$

де  $u_{ex}$  - вхідна напруга ТП,  $u_{ex} = U_3 - (K_U \cdot U_G + (I_{відс} - i_a) \cdot K_i + \omega \cdot K_\omega)$ ;

$U_3$  - напруга завдання;

$K_U, K_i, K_\omega$ , - коефіцієнти зворотного зв'язку відповідно за напругою генератора, струмом якоря та швидкістю двигуна відповідно;

$u_{mn}$  - вихідна напруга ТП;

$I_{відс}$  - струм відсікання.

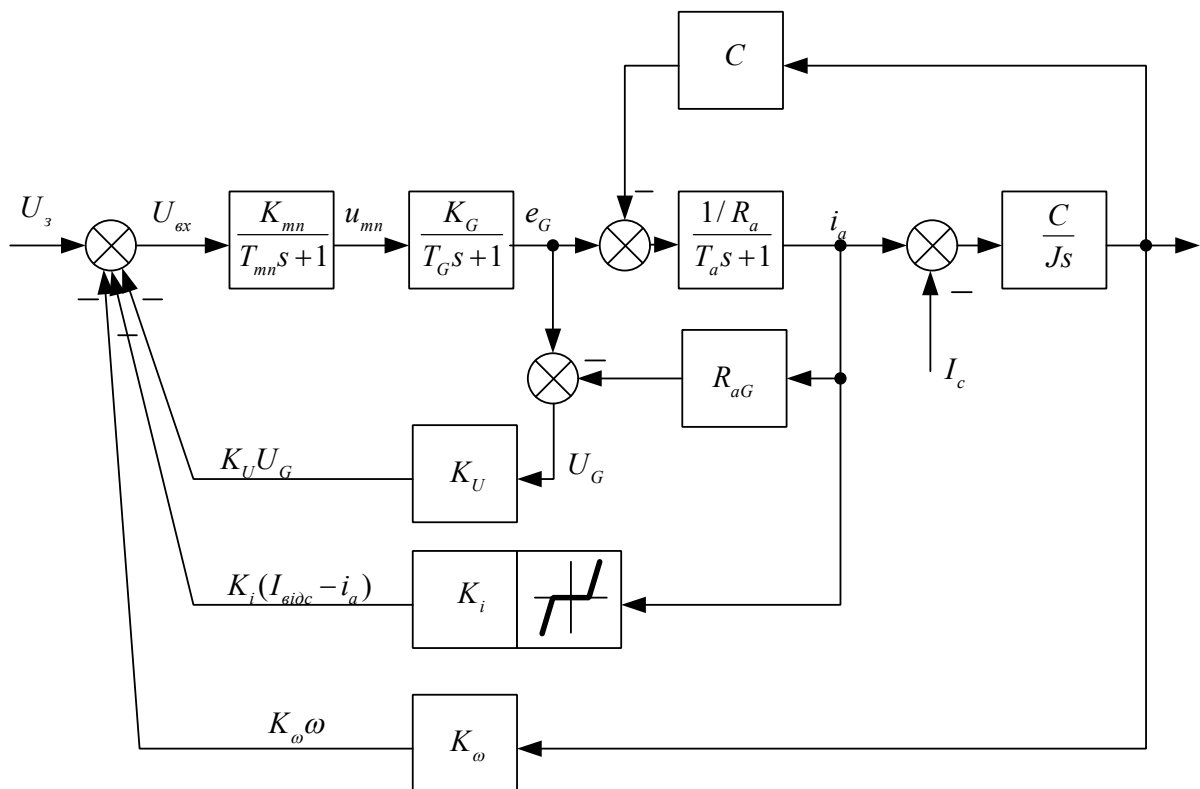


Рисунок 8.5 – Структурна схема системи Г-Д з ТЗ із

## паралельним коригуванням координат

Розрахуємо перехідний процес режим "запуск - реверс - зупинка" у системі Г-Д з паралельними зворотними зв'язками: із затриманим за струмом (струмовим відсіканням) та лінійним за швидкістю.

Задано:

$I_{\text{відс}} = 320$  А - струм якоря, за якого спрацьовує відсікання;

$U_{\text{znom}} = 20$  В - номінальна напруга завдання;

$R_a = 0.34$  Ом - сумарний опір якірного кола системи Г-Д;

$C = 2.34$  В·с<sup>-1</sup> - стала двигуна;

$K_d = 20$  - коефіцієнт підсилення ТП;

$K_G = 21$  - коефіцієнт підсилення генератора;

$K_\omega = 0.05$  - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$K_i = 0.25$  - коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом якоря;

$T_\mu = 0.01$  с - стала часу ТП;

$T_G = 0.7$  с - стала часу ОЗГ;

$T_a = 0.05$  с - електромагнітна стала часу якірного кола;

$M_c = 64.5$  Н·м - статичний момент навантаження привода;

$J = 9.2$  кг·м<sup>2</sup> - сумарний момент інерції привода, зведений до вала двигуна;

$T_{\text{max}} = 20$  с - час розрахунку.

Напруга завдання

$$U_Z(t) := \begin{cases} U_{\text{znom}} & \text{if } t \leq 6 \\ -U_{\text{znom}} & \text{if } 6 < t \leq 14 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.24)$$

$$y_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{початкові умови.}$$

$N := 2000$       кількість точок розрахунку.

Вектор-функція правих частин системи диференціальних рівнянь, що описують модель електропривода зі зворотним зв'язком за швидкістю та струмовим відсіканням:

$y_0$  - напруга ТП;

$y_1$  - напруга генератора;

$y_2$  - струм якоря;

$y_3$  - швидкість.

$$\text{Diff}(t, y) := \begin{bmatrix} K_d \cdot \left( U_Z(t) - K_\omega \cdot y_3 - K_I \cdot \begin{cases} y_2 - I_{\text{lim}} \cdot \frac{y_2}{|y_2|} & \text{if } |y_2| > I_{\text{lim}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} - y_0 \right) \\ \hline T_\mu \\ \frac{(K_G \cdot y_0 - y_1)}{T_G} \\ \frac{y_1 - C \cdot y_3}{R_a} - y_2 \\ \hline T_a \\ \frac{C \cdot y_2 - M_c(t)}{J} \end{bmatrix}.$$

Розв'язуємо систему диференціальних рівнянь

$$\text{Res} := \text{rkfixed}(y_0, \theta, T_{\max}, N, \text{Diff}) \quad (8.25)$$

З матриці виділяємо необхідні стовпці

$$t := \text{Res}^{\langle 0 \rangle} \quad I_a := \text{Res}^{\langle 3 \rangle} \quad \omega := \text{Res}^{\langle 4 \rangle}$$

За результатами розрахунку наводимо графічне зображення кутової швидкості та струму у функції часу (рисунок 8.6).



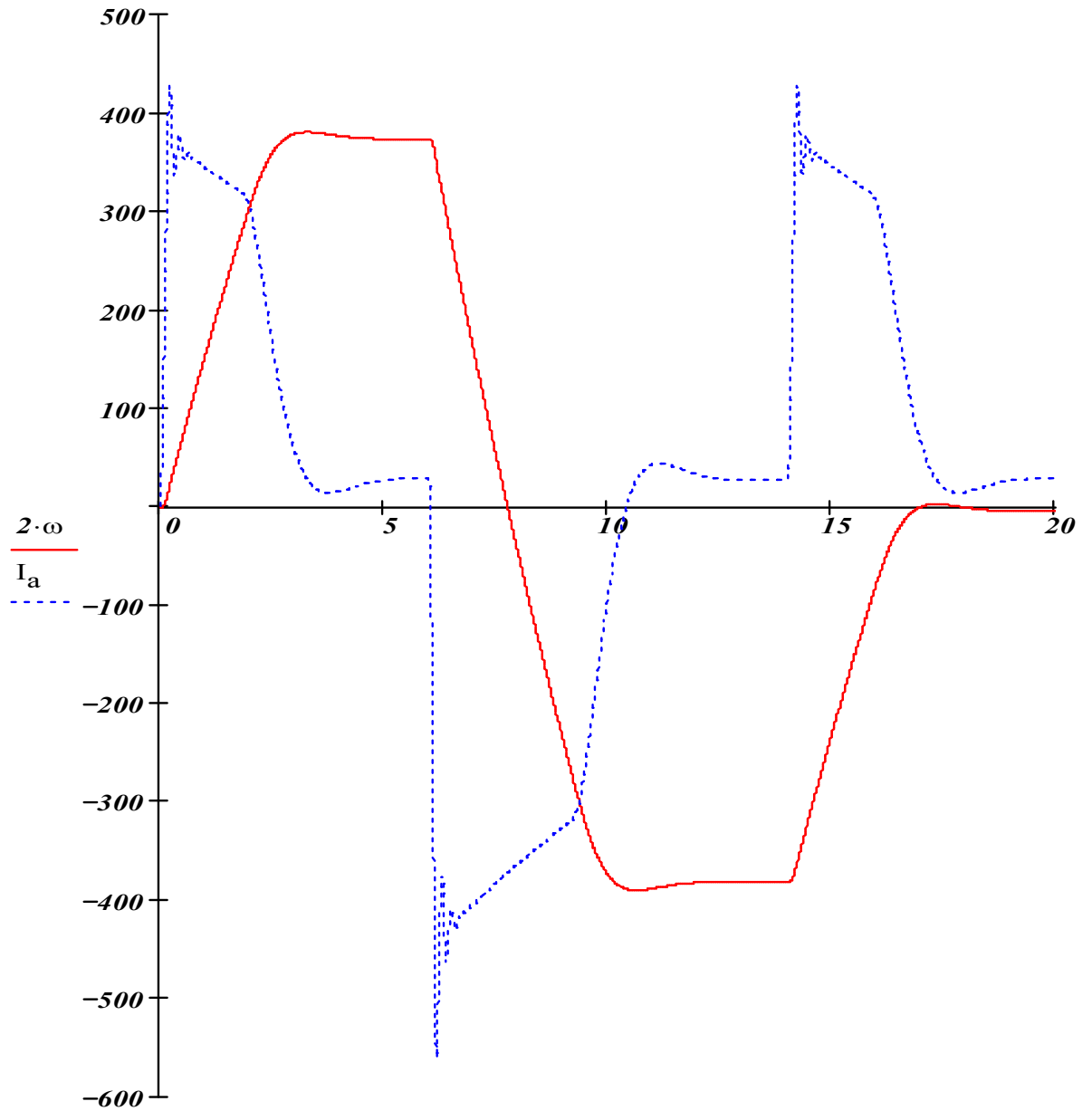


Рисунок 8.6 – Графік залежності кутової швидкості та струму у функції часу

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода.

- М.: Энергия, 1974. – 567 с.
- 2 Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1985. – 560 с.
  - 3 Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
  - 4 Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М. - Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.
  - 5 Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
  - 6 Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення: Навч. посібнику. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – 35 с.
  - 7 Ванін В.В, Блюк А.В., Гнітецька Г.О. Оформлення конструкторської документації. – К.: Каравела, 2003.

















**Додаток А**  
**ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ**

Вариант	Тип двигуна	Вентиляція примусова Режим ПВ = 100%			Вентиляція природна Режим ПВ = 40%			$R_{я}+R_{dn}$	Число			Момент інерції якоря, $J_M$	Коефіцієнт	
		$P_n$	$n_n$	$I_n$	$P_n$	$n_n$	$I_n$		активних провідників, $N$	паралельних віток якоря, $2a$	полюсів, $2p$		Інерції привода, $K_j$	Навантаження привода, $K_3$
100:40		кВт	Об/хв	А	кВт	Об/хв	А	Ом	-	-	-	Кг м <sup>2</sup>	-	-

1	20	Д-12	2,5	1180	14,6	2,4	1230	14	1,63	990	2	4	0,05	1,6	0,8
2	21	Д-21	4,5	1030	26	3,6	1080	20,5	0,95	920	2	4	0,125	1,6	0,8
3	22	Д-22	6,0	1100	33	4,8	1150	26	0,57	696	2	4	0,155	1,6	0,8
4	23	Д-31	8,5	840	44	6,8	880	37	0,42	738	2	4	0,3	2,0	0,8
5	24	Д-32	12,0	770	65	9,5	800	51	0,28	558	2	4	0,425	1,6	1,0
6	25	Д-41	16,0	690	86	13,0	720	69,5	0,17	492	2	4	0,8	1,6	1,0
7	26	Д-806	22,0	650	116	16,0	710	84	0,1085	372	2	4	1,0	1,6	1,0
8	27	Д-808	37,0	575	192	22,0	630	112	0,054	278	2	4	2,0	1,6	1,0
9	28	Д-810	55,0	550	282	29,0	600	148	0,0356	234	2	4	3,625	1,2	0,8
10	29	Д-812	75,0	515	380	38,0	565	192	0,0230	210	2	4	7,00	1,2	0,8
11	30	Д-814	110,0	500	550	55,0	560	280	0,0805	608	2	4	10,25	2,0	0,8
12	31	Д-816	150,0	480	745	70,0	535	350	0,084	504	8	4	16,25	2,0	0,8
13	32	Д-21	5,5	1440	31	4,4	1500	24,5	0,531	690	2	4	0,125	1,2	0,6
14	33	Д-22	8,0	1510	43,5	6,5	1570	34	0,322	522	2	4	0,155	1,2	0,6
15	34	Д-31	12,0	1360	64	9,5	1420	50,5	0,194	492	2	4	0,3	1,2	0,6
16	35	Д-32	18,0	1190	94	13,0	1240	68,0	0,125	372	2	4	0,425	1,2	0,6
17	36	Д-41	24,0	1100	124	17,5	1160	90,5	0,072	310	2	4	0,8	1,6	0,8
18	37	Д-806	32,0	1000	165	21,0	1060	110	0,047	246	2	4	1,0	2,0	0,8
19	38	Д-808	47	800	238	26,0	825	134	0,295	210	2	4	2,0	2,0	0,8

Продовження додатка А

Варіант	Тип двигу- на	Вентиляція примусова Режим ПВ = 100%			$R_a + R_{dn}$	Число		$R_{03}$	Число витків полюса обмотки збуджен- ня, $w_{пар}$	Момент інерції якоря, $J_m$	Коефіцієнт	
		$P_n$	$n_n$	$I_n$		актив- них провід- ників, N	парале- льних віток якоря, $2a$				Інерції приво- да, $K_j$	Наван- таження приво- да, $K_3$
100:40		кВт	Об/хв	А	Ом	-	-	Ом	-	Кг м <sup>2</sup>	-	-

39	П52	8,0	1500	43,5	0,269	496	2	150	1500	0,4	1,6	0,8
40	П61	11,0	1500	59,5	0,187	496	2	133	1800	0,56	2,0	1,0
41	П62	14,0	1500	73,5	0,1275	370	2	116	1600	0,65	1,5	0,7
42	П71	19,0	1500	103	0,1235	396	2	76,8	1250	1,4	1,4	0,9
43	П72	25,0	1500	132	0,0828	324	2	67,0	1100	1,6	1,3	1,0
44	П81	32,0	1500	166	0,075	324	2	95,5	1600	2,7	1,7	1,0
45	П82	42,0	1500	218	0,0462	234	2	40,4	936	3,1	1,2	0,9
46	П91	55,0	1500	287	0,0257	210	2	35,8	870	5,9	1,5	0,8
47	П92	75,0	1500	381	0,0138	162	2	31,8	830	7,0	1,8	1,0
48	П101	100	1500	508	0,0131	304	2	37,8	950	10,3	1,3	0,8
49	П102	125	1500	632	0,079	228	2	32,5	840	12,0	1,5	0,8
50	П111	160	1500	809	0,0638	216	2	28	850	20,4	1,2	0,7
51	П51	6,0	1500	33,2	0,472	682	4	132	1500	0,35	1,8	1,0

Примітка –  $U_n=220В$  ;  $2p = 2$ .

## Додаток Б

### Генератори постійного струму

Тип генератора	$I_H$	$\omega_y$	$R_y$	$\omega_{3П}$	$R_{3П}$	$\omega_{3Н}$	$R_{3Н}$
	А	-	Ом	-	Ом	-	Ом
П42	15,7	513	1	39	0,294	1350	180
П51	21,7	434	0,56	35	0,112	1300	120
П52	28,2	341	0,395	16	0,04	1250	152
П61	39	341	0,25	15	0,04	1500	120
П62	50	248	0,182	14	0,028	1400	120
П71	69,5	297	0,224	6	0,0115	950	43
П72	91,3	210	0,132	5	0,0072	950	50
П81	117	222	0,110	4	0,0048	1350	69,5
П82	152	145	0,0502	3	0,00308	1600	27,2
П91	217	145	0,0355	4	0,00327	1000	44
П92	304	105	0,0209	3	0,00169	1000	48,4
П101	391	93	0,013	3	0,00161	950	37,8
П102	478	138	0,0095	2	0,00105	850	32,9
П111	635	126	0,00655	2	0,00077	850	28
П112	826	100	0,00427	1	0,00045	750	24

У таблиці прийнято такі позначення:

$R_y, \omega_y$  – опір, Ом, та число витків обмотки якоря;

$R_{3П}, \omega_{3П}$  – опір, Ом, та число витків на полюсі обмотки послідовного збудження;

$R_{3Н}, \omega_{3Н}$  - опір, Ом, та число витків на полюсі обмотки незалежного збудження;

$U_H = 230V$ ;  $n_H = 1450$  об/хв;  $2p = 4$ ;  $2a = 2$  для всіх генераторів, крім П111 та П 112, для яких  $2a=4$ .

**Додаток В**  
**Криві намагнічення генераторів**

П42	F, A Ф, Вб	200 0,0012	400 0,00225	600 0,0032	800 0,0040	1000 0,0045	1200 0,0049	1600 0,00545	2000 0,0058
П51	F, A Ф, Вб	400 0,0022	800 0,0039	1200 0,0051	1600 0,0057	2000 0,0062	2400 0,0066	3200 0,0070	4000 0,00725
П52	F, A Ф, Вб	400 0,0029	800 0,0053	1200 0,007	1600 0,0078	2000 0,0083	2400 0,0088	3200 0,00965	3800 0,01
П61	F, A Ф, Вб	400 0,0031	800 0,0052	1200 0,0065	1600 0,0073	2000 0,0079	2400 0,0083	3200 0,0087	4000 0,0089
П62	F, A Ф, Вб	400 0,0035	800 0,0063	1200 0,0083	1600 0,0097	2000 0,0105	2400 0,0110	2800 0,0114	3200 0,0116
П71	F, A Ф, Вб	1000 0,0031	2000 0,0053	3000 0,00687	4000 0,0081	5000 0,0088	6000 0,0094	8000 0,0103	12 000 0,0112
П72	F, A Ф, Вб	1000 0,0035	2000 0,00625	3000 0,0085	4000 0,0103	6000 0,0123	8000 0,0135	10 000 0,0141	14 000 0,0147
П81	F, A Ф, Вб	1000 0,0035	2000 0,0063	3000 0,0085	4000 0,01	6000 0,0121	8000 0,0137	10 000 0,0147	14 000 0,0162
П82	F, A Ф, Вб	1000 0,005	2000 0,0096	3000 0,0112	4000 0,0147	5000 0,0154	6000 0,016	8000 0,0194	10 000 0,020
П91	F, A Ф, Вб	800 0,006	1600 0,0105	2400 0,0147	3200 0,017	4000 0,0185	5600 0,0205	7200 0,0215	-
П92	F, A Ф, Вб	800 0,008	1600 0,015	2400 0,0196	3200 0,0228	4000 0,0245	5600 0,027	7200 0,0285	-
П101	F, A Ф, Вб	800 0,007	1600 0,013	2400 0,0185	3200 0,023	4000 0,0265	5600 0,03	7200 0,032	-
П102	F, A Ф, Вб	800 0,0085	1600 0,0167	2400 0,024	3200 0,0305	4000 0,034	5600 0,0385	7200 0,041	-
П111	F, A Ф, Вб	800 0,0095	1600 0,018	2400 0,0265	3200 0,032	4000 0,036	5600 0,041	7200 0,0435	-
П112	F, A Ф, Вб	1000 0,01	2000 0,022	3000 0,0335	4000 0,041	5000 0,0465	6000 0,05	7000 0,0522	8000 0,0545



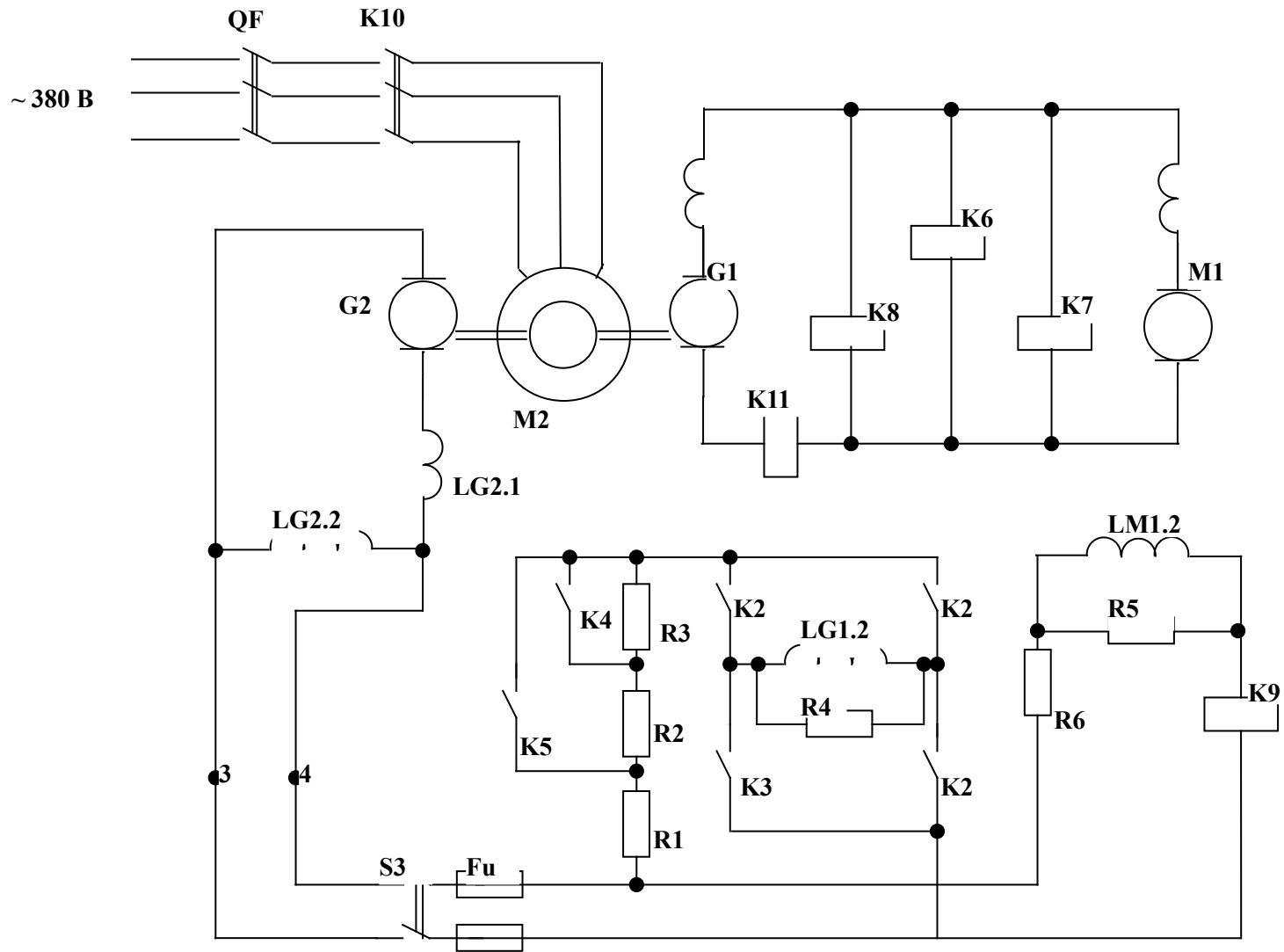


Рисунок 2.1 – Силова частина системи „генератор - двигун”





