

література



Навчально-методична

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
ім. Івана Пулюя
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни «Автоматизований електропривод»
для студентів за напрямом підготовки
6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»

Тернопіль
2016

УДК 62-83
ББК 32.96-04

Укладач:

Курко А. М., канд. техн. наук, доцент

Рецензент

Решетник В. Я., канд. техн. наук, доцент

Розглянуто та схвалено на методичному семінарі кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, протокол № 1 від 29 серпня 2016 р.

Рекомендовано до друку методичною комісією факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, протокол № 1 від 29 серпня 2016 р.

Відповідальний за випуск *Курко А. М.*, канд. техн. наук, доцент,

ВСТУП

Типові розрахунки електричних машин в поєднанні з відповідною тематикою лабораторних робіт дозволяють порівнювати результати теоретичного аналізу та моделювання для глибшого розуміння процесів, що протікають в автоматизованих електроприводах.

Дані методичні вказівки передбачають опанування методикою розв'язування типових задач з дисципліни. Тексти розв'язків задач з відповідними коментарями необхідно проаналізувати в комплексі з відповідною тематикою теоретичного матеріалу (викладеного на дистанційному курсі) та повторити відповідно до даних вказаного варіанту. Розв'язки задач доцільно виконувати в Excel або MathCAD. Це дозволяє без зайвих дій змінювати табличні параметри, що уточнюються чи вибираються в ході розв'язку.

Дані для розв'язку задач і необхідна інформація подана у вигляді таблиць (додатки) та викладено окремими файлами (Excel і MathCAD) на дистанційному курсі.

Номери варіантів визначаються номером в журнальному списку академ. групи (підгрупи), або вказуються викладачем.

Результати розв'язків оформляються у вигляді протокольних звітів обсягом 1 – 2 сторінки формату А4.

Терміни надсилання інструктору результатів для перевірки вказані в календарному плані.

Завдання 1.

Вибрати ВД і визначити його передаточну функцію, якщо момент статичного навантаження $M_{CT} = 2500 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент інерції навантаження $J_H = 5000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; необхідна швидкість навантаження $\Omega_H = 0,16 \text{ рад/с}$; необхідне прискорення навантаження $\varepsilon_H = 0,34 \text{ рад/с}$.

Розв'язок

1. Приймаємо орієнтовно к.к.д редуктора $\eta = 0,9$.
2. Необхідна потужність згідно (2.59)

$$P_{\text{необ}} = 2 \cdot 10^{-3} (M_{CT} + J_H \varepsilon_H) \Omega_H = 2 \cdot 10^{-3} (2500 + 5000 \cdot 0,34) 0,16 = 1,34 \text{ кВт}$$

За одержаною потужністю з додатку А4 вибираємо двигун

МИ-41. Технічні дані ВД: $P_{НОМ} = 1,6 \text{ кВт}$; $n_{НОМ} = 2500 \text{ хв}^{-1}$;
 $M_{НОМ} = 6,25 \text{ Нм}$; $J_D = 408 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $U_{НОМ} = 110 \text{ В}$; $I_{Я} = 19,2 \text{ А}$;
 $R_{Я} = 0,147 \text{ Ом}$

3. Оптимальне передаточне число згідно (2.58)

$$i_O = \sqrt{\frac{M_{CT} + J_H \varepsilon_H}{J_D \varepsilon_H}} = \sqrt{\frac{2500 + 5000 \cdot 0,34}{408 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34}} = 550$$

4. Виконуємо перевірку вибраного двигуна на відповідність вимогам по швидкості і моменту згідно (2.60):

- 1) визначаємо номінальну кутову швидкість ВД і порівнюємо її з приведеною швидкістю навантаження:

$$\Omega_{НОМ} \frac{\pi n_{НОМ}}{30} = \frac{3,14 \cdot 2500}{30} = 235 \text{ рад/с};$$

$$\Omega_H i_O = 0,16 \cdot 550 = 88 \text{ рад/с}.$$

Оскільки $\Omega_{НОМ} > \Omega_H i_O$, то по швидкості вибраний двигун проходить.

2) знайдемо значення необхідного моменту обертання у відповідності з виразом (2.57) і порівнюємо його з номінальним значенням моменту двигуна:

$$M_{\text{необ}} = \frac{M_{CT}}{\eta i_O} + \left(\frac{J_H}{i_O} + J_D i_O \right) \varepsilon_H = \frac{2500}{0,9 \cdot 550} + \left(\frac{5000}{550} + 408 \cdot 10^{-4} \cdot 550 \right) \cdot 0,34 = 15,55 \text{ Нм}$$

Перевірка двигуна на перевантаження

$$\frac{M_{\text{необ}}}{M_{НОМ}} = \frac{15,55}{6,25} = 2,49 > 2$$

показує, що двигун непридатний по потужності, оскільки не виконується умова (2.61).

5. Вибираємо потужніший двигун МІ-42:

$$P_{НОМ} = 3,2 \text{ кВт}; \quad n_{НОМ} = 2500 \text{ хв}^{-1}; \quad M_{НОМ} = 12,5 \text{ Нм}; \quad J_D = 662 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$U_{НОМ} = 110 \text{ В}; \quad I_{Я} = 36,3 \text{ А}; \quad R_{Я} = 0,192 \text{ Ом}.$$

6. Оптимальне передаточне число згідно (2.58)

$$i_O = \sqrt{\frac{2500 + 5000 \cdot 0,34}{662 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34}} = 431$$

7. Перевірка по швидкості:

$$\Omega_{НОМ} \frac{\pi n_{НОМ}}{30} = \frac{3,14 \cdot 2500}{30} = 235 \text{ рад/с};$$

$$\Omega_H i_O = 0,16 \cdot 431 = 69 \text{ рад/с}.$$

Оскільки $\Omega_{НОМ} > \Omega_H i_O$, то по швидкості вибраний двигун проходить.

8. Перевірка двигуна на перевантаження

$$M_{\text{необ}} = \frac{M_{CT}}{i_O} + \left(\frac{J_H}{i_O} + J_D i_O \right) \varepsilon_H = \frac{2500}{0,9 \cdot 431} + \left(\frac{5000}{431} + 662 \cdot 10^{-4} \cdot 431 \right) \cdot 0,34 = 20,05 \text{ Нм}$$

Відношення $\frac{M_{\text{необ}}}{M_{CT}} = \frac{20,05}{12,5} = 1,64 < 2$ **показує, що двигун задовольняє**

умову (2.61).

Приведений до осі двигуна момент статичного навантаження

$$\frac{M_{CT}}{\eta i_O} = \frac{2500}{0,9 \cdot 431} = 6,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Порівняння його з $M_{НОМ}$ ($6,45 < 12,5$) говорить про виконання для двигуна умови (2.62).

Робимо висновок, що двигун МІ-42 вибрано правильно, оскільки він задовольняє умови забезпечення необхідних швидкостей і прискорення.

9. Визначення передаточної функції двигуна МІ-42, використовуючи його технічні дані і вираз (2.41).

Коефіцієнт противоЕРС визначаємо за формулою (2.20) при номінальних значеннях параметрів:

$$c_e = \frac{U_{НОМ} - I_{Я} R_{Я}}{\Omega_{НОМ}} = \frac{110 - 36,6 \cdot 0,192}{235} = 0,44 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}$$

Коефіцієнт моменту згідно (2.18)

$$c_M = \frac{M_{НОМ}}{I_{Я}} = \frac{12,5}{36,3} = 0,344 \text{ Нм} / \text{А}.$$

Повний момент інерції навантаження за формулою (2.13)

$$J' = J_D + \frac{J_H}{i_O^2} = 662 \cdot 10^{-4} + \frac{5000}{431^2} = 930 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Механічна постійна часу у відповідності з (2.35)

$$T_M = \frac{J' J_{Я}}{c_e c_M} = \frac{930 \cdot 10^{-4} \cdot 0,192}{0,44 \cdot 0,344} = 0,118 \text{ с}.$$

Коефіцієнт передачі двигуна по швидкості на основі (2.25)

$$k_D = \frac{1}{c_e} = \frac{1}{0,44} = 2,27 \text{ рад} / \text{В} \cdot \text{с}.$$

В результаті передаточна функція двигуна

$$W(p) = \frac{k_D}{p(T_M p + 1)} = \frac{2,27}{p(0,118 p + 1)}.$$

Завдання 2.

Вибрати ВД і визначити його передаточну функцію, за наступними технічними умовами $M_{CT} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент інерції навантаження $J_H = 23 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; необхідна швидкість навантаження $\Omega_H = 0,11 \text{ рад/с}$; необхідне прискорення навантаження $\varepsilon_H = 0,4 \text{ рад/с}$; к.к.д. $\eta = 0,8$.

Розв'язок

1. Необхідна потужність згідно (2.59)

$$P_{\text{необ}} = 2 \cdot (M_{CT} + J_H \varepsilon_H) \Omega_H = 2(1 + 23 \cdot 0,4) 0,11 = 2,184 \text{ Вт}.$$

За одержаною потужністю з додатку А2 вибираємо двигун ДИД-3ТА. Технічні дані ВД: $P_{\text{НОМ}} = 3 \text{ Вт}$; $n_{\text{НОМ}} = 5800 \text{ хв}^{-1}$;

$$M_{\text{НОМ}} = 56 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad J_D = 24 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad U_{\text{НОМ}} = 30 \text{ В};$$

$$M_{\text{ПНОМ}} = 160 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м};$$

2. Оптимальне передаточне число згідно (2.58)

$$i_O = \sqrt{\frac{M_{CT} + J_H \varepsilon_H}{J_D \varepsilon_H}} = \sqrt{\frac{1 + 23 \cdot 0,4}{24 \cdot 10^{-8} \cdot 0,4}} = 10302$$

3. Виконуємо перевірку вибраного двигуна на відповідність вимогам по швидкості:

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 5800}{30} = 607 \text{ рад/с}.$$

Приведена до осі двигуна швидкість навантаження

$$\Omega_H i_O = 0,11 \cdot 10302 = 1032 \text{ рад/с},$$

оскільки $\Omega_{\text{НОМ}} = 607 < \Omega_H i_O = 1032$, то вибраний двигун не забезпечує необхідну кутову швидкість.

4. Змінюємо передаточне число редуктора згідно (2.64)

$$i = \frac{\Omega_{\text{НОМ}}}{\Omega_H} = \frac{607}{0,11} = 5520.$$

5. Перевіримо двигун на виконання умови (2.61) по моменту

$$M_{\text{необ}} = \frac{M_{CT}}{\eta i_O} + \left(\frac{J_H}{i_O} + J_D i_O \right) \varepsilon_H$$

$$M_{\text{необ}} = \frac{1}{0,8 \cdot 5520} + \left(\frac{23}{5520} + 24 \cdot 10^{-8} \cdot 5520 \right) \cdot 0,4 = 24,16 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Умова (2.61) виконується, оскільки

$$\frac{M_{необ}}{M_{НОМ}} = \frac{24,16 \cdot 10^{-4}}{56 \cdot 10^{-4}} = 0,458 < 2$$

Приведений до осі двигуна момент навантаження

$$\frac{M_{СТ}}{\eta i_O} = \frac{1}{5520 \cdot 0,8} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Умова (2.62) виконується, оскільки $2,3 \cdot 10^{-4} < 56 \cdot 10^{-4}$.

Робимо висновок, що двигун ДИД-ЗТА вибрано правильно.

6. Визначимо передаточну функцію ВД, використовуючи його технічні дані і вираз передаточної функції (2.50).

Коефіцієнт передачі по моменту на основі (2.44)

$$c_{МП} = \frac{M_{П\ НОМ}}{U_{НОМ}} = \frac{160 \cdot 10^{-4}}{30} = 5,34 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{В}$$

Коефіцієнт демпфірування по (2.47)

$$F = 30 \frac{M_{П\ НОМ} - M_{НОМ}}{\pi n_{НОМ}} = \frac{30 \cdot (160 \cdot 10^{-4} - 56 \cdot 10^{-4})}{3,14 \cdot 5800} = 172 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$$

Коефіцієнт передачі двигуна по швидкості у відповідності з (2.48)

$$k_D = \frac{c_{МП}}{F} = \frac{5,34 \cdot 10^{-4}}{172 \cdot 10^{-7}} = 31 \text{ рад} / \text{В} \cdot \text{с}$$

Повний момент інерції навантаження згідно (2.13)

$$J' = J_D + \frac{J_H}{i_O^2} = 24 \cdot 10^{-8} + \frac{23}{5520^2} = 9,9 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Механічна постійна двигуна на підставі (2.51)

$$T_M = \frac{J'}{F} = \frac{9,9 \cdot 10^{-7}}{172 \cdot 10^{-7}} = 0,057 \text{ с}$$

В результаті розрахунку одержимо передаточну функцію двигуна ДИД-ЗТА

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{U(p)} = \frac{k_D}{p(T_M p + 1)} = \frac{31}{p(0,057 + 1)}$$

Завдання 3.

Підібрати пару сельсинів для приводу, статична похибка якого не повинна перевищувати $18'$. Розрахувати точність передачі кута і чутливість вимірювальної схеми.

Розв'язок

1. Вважаючи, що $\delta_{BP\partial\partial\partial}$ складає 30% заданої похибки приводу, знаходимо $\delta_{BP\partial\partial\partial} = 18 \cdot 0,3 = 5,4'$.

2. З додатку А6 вибираємо пару сельсинів типу БС-3 третього класу точності, похибка слідування яких складає $30'$, $U_{\max} = 5 \text{ В}$, $f = 400 \text{ Гц}$.

3. Оскільки похибка сельсинів перевищує допустиму, вибираємо двоканальну систему з механічним редуктором. Передаточне відношення редуктора згідно (3.13)

$$i_p = \frac{\delta_{ГВ}}{\delta_{BP\partial\partial\partial}} = \frac{30}{5,4} = 5,5.$$

4. Похибку перетворення кута визначення згідно (3.11), вважаючи $\delta_p(i_p) = 1,5'$, $\delta_3 = 1,5'$:

$$\delta_{ГВ} = \frac{\delta_{ГВ}}{i_p} + \delta_p(i_p) + \delta_3 = \frac{30}{10} + 1,5 + 0,5 = 5'.$$

Передаточне відношення редуктора розраховане правильно, оскільки похибка перетворення кута не перевищує допустиму похибку, що дорівнює $5,4'$.

5. Коефіцієнт перетворення (чутливість) для каналу ГВ згідно (3.4)

$$k\delta_{ГВ} = 5 \frac{\text{В}}{\text{рад}}, \text{ або } k\delta_{ГВ} = 0,087 \frac{\text{В}}{1^\circ}$$

6. Чутливість по каналу ТВ з врахуванням редуктора приладу

$$k\delta_{ТВ} = k\delta_{ГВ}i_p = 5 \cdot 10 = 50 \frac{\text{В}}{\text{рад}}, \text{ або } k\delta_{ТВ} = 0,87 \frac{\text{В}}{1^\circ}$$

Завдання 4.

Розрахувати схему перемикання управління каналів ТВ і ГВ при вихідній напрузі точного сельсина-трансформатора, що дорівнює 0,75 В, для системи з двох швидкісним сельсинним зв'язком при $i_p = 30$. В якості задавального вибрано сельсин типу $СБ-20-1ВД$ ($U_{II} = 110$ В, $U_{max} = 25$ В), в якості приймального – типу $СБ-32-1ВП$ ($U_{II} = 110$ В, $U_{max} = 21$ В), $R_C = 360$ Ом; оптимальний опір навантаження $R_C = 3$ кОм).

Розв'язок

1. Знайдемо кут перемикання приводу. Якщо за умовою задачі $U_{ТВ} = 0,75$ В, то згідно (4.3) $U_{max} \sin \delta_{II} = 0,75$ В.

Звідси $21 \sin \delta_{II} = 0,75$; $\delta_{II} = 2^\circ$. При такому куті перемикання згідно (4.1) сельсини можуть бути вибрані першого класу точності з похибкою $\delta_I = 10'$, оскільки $\delta_{II} = 2^\circ > 2\delta_I = 20'$.

2. Визначимо по (4.3) напругу ГВ при куті розузгодження $\delta = \frac{180}{i_p} - \delta_{II}$:

$$U_{ГВ} = U_{max} \sin\left(\frac{180}{30} - 2\right) = 21 \sin 4^\circ = 1,46 \text{ В}$$

Умова (4.2) виконана, оскільки $\frac{U_{ГВ}}{U_{ТВ}} = \frac{1,46}{0,75} = 1,94 > 1,5$.

3. Для забезпечення обмеження вибираємо діоди $D-226$ ($U_0 = 1$ В, $I_{ГП} = 0,3$ А) і по характеристиці визначаємо опір

$$R_D = \frac{dU}{dI} = \frac{0,25}{100 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \text{ Ом}$$

4. Опір резистора R_1 по виразу (4.7)

$$R_1 = R_D \frac{U_{max}}{U_0} - 1 = 2,5 \left(\frac{21}{1} - 1 \right) = 50 \text{ Ом}$$

По стандарту вибираємо $R_1 = 51$ Ом.

5. Опір резисторів R_2 , R_3 приймаємо рівними опорів нормального навантаження: $R_2 = R_3 = 3 \text{ кОм}$.

Співвідношення $R_2 > R_1 \gg R_D$ витримане, оскільки $300 > 51 \gg 2,5$.

6. Перевіримо вибраний діод по струму:

$$I_{\max \text{ ТВ}} = \frac{U_{\max}}{R_1 + R_D + R_C} = \frac{21}{51 + 2,5 + 360} = 0,05 \text{ А};$$

$$I_{\max \text{ ГВ}} = \frac{U_{\max}}{R_3 + R_C} = \frac{21}{3000 + 360} = 0,006 \text{ А}.$$

Діоди вибрані правильно, оскільки максимальний струм в ланцюгах ГВ і ТВ не перевищує допустиме значення $I_{\text{ГР}}$ прямого струму діода: $0,05 < 0,3$; $0,006 < 0,3$.

Завдання 5.

Вибрати тип ЕМП з приводним двигуном змінного струму для роботи з ВД типу МИ-11 ($U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ В}$, $I_{\text{НОМ}} = 1,53 \text{ А}$, $I_{\text{П}} = 11 \text{ мА}$, $P_{\text{НОМ}} = 0,12 \text{ кВт}$)

Розв'язок

З додатку А5 вибираємо ЕМУ – 3А ($P_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ кВт}$; $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ В}$; $I_{\text{НОМ}} = 1,82 \text{ А}$; $I_{\text{П}} = 11 \text{ мА}$; $R_{\text{П}} = 344 \text{ Ом}$; $T_A = 0,043 \text{ с}$.)

ЕМП вибраний правильно, оскільки виконані вимоги забезпечення параметрів двигуна (6.10).

$$U_{\text{НОМ ЕМП}} = U_{\text{НОМ-Д}}$$

$$\frac{I_{\text{НОМ ЕМП}}}{I_{\text{НОМ-Д}}} = \frac{1,82}{1,53} = 1,18 > 1$$

Визначаємо коефіцієнт підсилення ЕМП по напрузі

$$k = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{П}} R_{\text{П}}} = \frac{110}{0,011 \cdot 3440} = 2,9$$

Передавальна функція ЕМП згідно (6.8)

$$W(p) = \frac{k}{(T_{\Pi}p+1)(T_a p+1)} = \frac{2,9}{(0,43p+1)(0,03p+1)}$$

Завдання 6.

Визначити коефіцієнт підсилення, необхідний для забезпечення швидкісної похибки $\delta_{ШВ} = 30''$ при $\Omega_0 = 5 \text{ рад}/\text{с}$ і моментною похибкою $\delta_M = 1,5'$ при $M_H = 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, якщо задано: чутливість ВР $k_{\delta} = 100 \text{ В}/\text{рад}$; $i = 70$; двигун постійного струму типу ДПМ-32 ($J_D = 0,43 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $c_e = 1,62 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{рад}$; $c_M = 1,56 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{А}$; $R_a = 0,19 \text{ Ом}$).

Розв'язок

Визначаємо коефіцієнт демпфірування. Згідно (2.23)

$$F = \frac{c_e \cdot c_M}{R_a} = \frac{1,62 \cdot 1,55}{0,19} = 13,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}$$

Добротність СП при заданій моментній похибці згідно (2.13, а)

$$\mu = \frac{\mu_H}{\delta_M F i^2} = \frac{10000 \cdot 60}{1,5 \cdot 0,017 \cdot 13,3 \cdot 70^2} = 361 \text{ с}^{-1}$$

Коефіцієнт k_{Π} підсилювача згідно (12.12)

$$k_{\Pi} = \frac{\mu}{k_{\delta} k_p k_D} = \frac{361 \cdot 1,62 \cdot 70}{100} = 409$$

Добротність СП при заданій швидкісній похибці згідно (2.13, б)

$$\mu = \frac{\Omega_0}{\delta_{ШВ}} = \frac{5 \cdot 60 \cdot 60}{30} = 600 \text{ с}^{-1}$$

Звідси коефіцієнт підсилення підсилювача

$$k_{\Pi} = \frac{\mu}{k_{\delta} k_p k_D} = \frac{600 \cdot 1,62 \cdot 70}{100} = 680$$

З двох знайдених коефіцієнтів вибираємо найбільший $k_{\Pi} = 680$.

Завдання 7.

Побудувати ЛАФЧХ для розімкнутого приводу, передавальна функція якого має вигляд

$$W(p) = \frac{150}{p(0,13p+1)(0,005p+1)(0,001p+1)}$$

Розв'язок

Підставивши $p = j\omega$, одержимо

$$W(p) = \frac{150}{j\omega(0,13j\omega+1)(0,005j\omega+1)(0,001j\omega+1)}$$

Для побудови ЛАФЧХ визначимо значення спряжуваних частот $\omega_1 = 1/T_M = 75 \text{ рад/с}$, $\omega_2 = 1/T_M = 220 \text{ рад/с}$, $\omega_3 = 1/T_{II} = 1000 \text{ рад/с}$ і відмітимо їх на осі частот (рис.12.6).

На частоті $\omega = 1 \text{ рад/с}$ відкладемо значення $20 \lg \mu$, що дорівнює $20 \lg 150 = 43,5 \text{ дБ}$. Через одержану точку А проведемо низькочастотну асимптоту АМ ЛАЧХ інтегрувальної ланки з нахилом $-20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ до перетину з вертикаллю, що проведена через першу частоту спряження $\omega_1 = 75 \text{ рад/с}$. В точці М ЛАЧХ зазнає зламу вниз на $20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, що визначається аперіодичною ланкою з постійною часу T_M . Результуюча ЛАЧХ з нахилом $-40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ піде до перетину в точці N з вертикаллю, що проведена через другу частоту спряження $\omega_2 = 200 \text{ рад/с}$. Починаючи з точки N, ЛАЧХ системи має нахил $-60 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, оскільки на цій частоті додатковий нахил дає аперіодична ланка з постійною T_a . Починаючи з частоти $\omega_3 = 1000 \text{ рад/с}$, результуюча ЛАЧХ зазнає додаткового злому вниз від вступу в точці K аперіодичної ланки з постійною T_{II} і визначається сумарним нахилом $-80 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$.

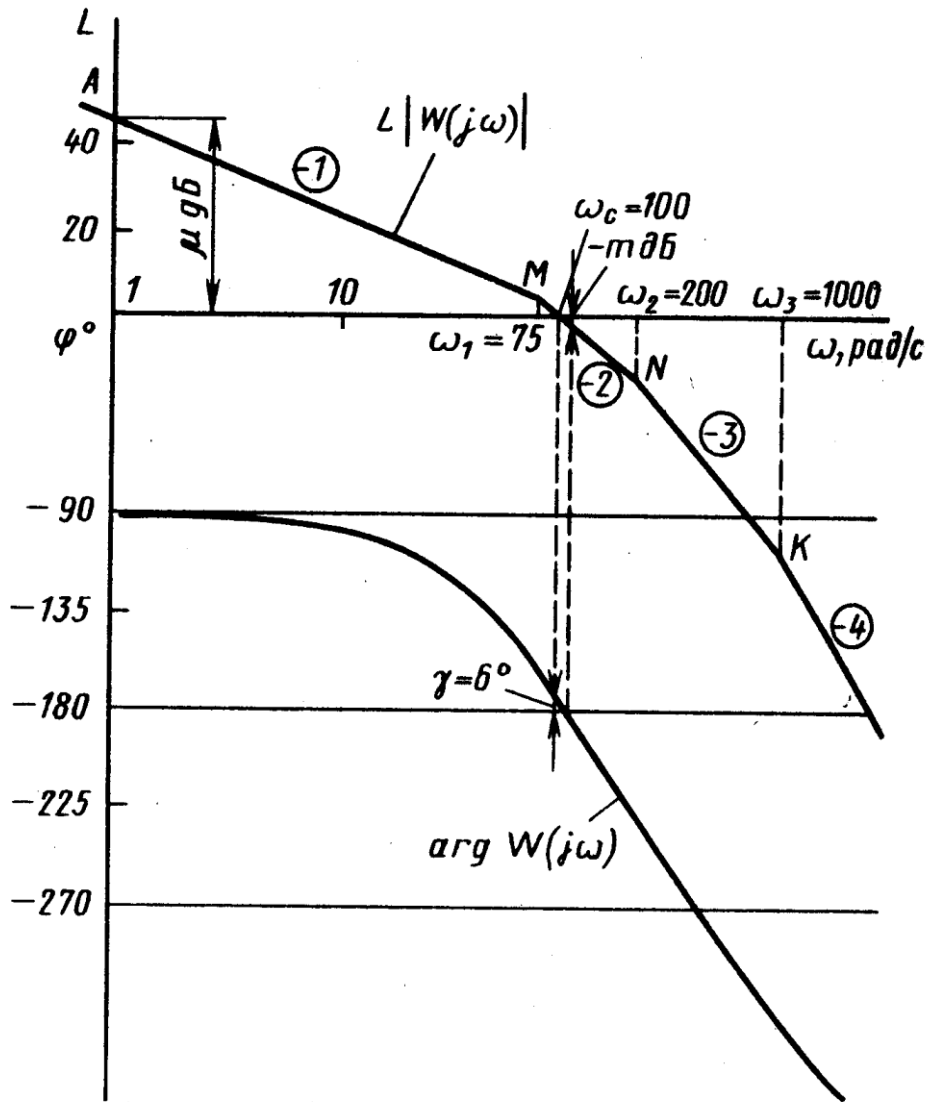


Рис. 12.7 ЛАФЧХ розімкнутого СП

Для побудови ЛФЧХ скористаємося рівнянням

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - a \operatorname{arctg} 0,013\omega - a \operatorname{arctg} 0,005\omega - a \operatorname{arctg} 0,001\omega.$$

Таким чином, при заданих параметрах привод має запас стійкості по фазі $\gamma = 6^\circ$, а по амплітуді $m = -0 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$ (див. рис. 12.7) і, як наслідок, не володіє достатньою стійкістю. Тому його ЛАФЧХ необхідно скоректувати шляхом введення КЗ.

Завдання 8.

Побудувати БЛАФЧХ для розімкнутого приводу, передавальна функція якого має вигляд

$$W(p) = \frac{150}{p(0,13p+1)(0,005p+1)(0,001p+1)}$$

при умові, що привод повинен забезпечувати наступні показники: динамічну усталену похибку $\delta_Y = 8'$ при постійній швидкості $\Omega = 10 \text{ град}/\text{с}$. та прискоренні $\varepsilon = 14 \text{ град}/\text{с}^2$, максимальне перерегулювання $\sigma = 38\%$, час регулювання $t_p \Omega = 0,74 \text{ с}$.

Розв'язок

ЛАЧХ вихідної характеристики (див. рис. 12.7) перетинає вісь з нахилом $-40 \frac{\partial B}{\partial \text{дек}}$, і привод володіє недостатнім запасом стійкості.

Перевіримо умову виконання вимоги по точності, визначивши добротність СП по швидкості та прискоренню. Вважатимемо, що встановлена похибка приводу згідно (12.8)

$$\delta = \frac{1}{D_\Omega} \Omega_0 + \frac{1}{D_\varepsilon} \varepsilon_0.$$

Вважаючи похибки по швидкості і по прискоренню $\delta_\Omega = \delta_\varepsilon = 4'$, визначимо значення добротностей

$$D_\Omega = \frac{\Omega_0}{\delta_\Omega} = \frac{10 \cdot 60}{4} = 150 \text{ с}^{-1}; \quad D_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{\delta_\varepsilon} = \frac{14 \cdot 60}{4} = 210 \text{ с}^{-1}.$$

Зауважимо, що в заданій передаточній функції $W(p) = \frac{150}{p(0,13p+1)(0,005p+1)(0,001p+1)}$ коефіцієнт підсилення по швидкості μ також дорівнює 150 с^{-1} .

У відповідності з передавальною функцією будемо ЛАЧХ частини, що не міняється, у виді ломаної $AD'E'F'$,

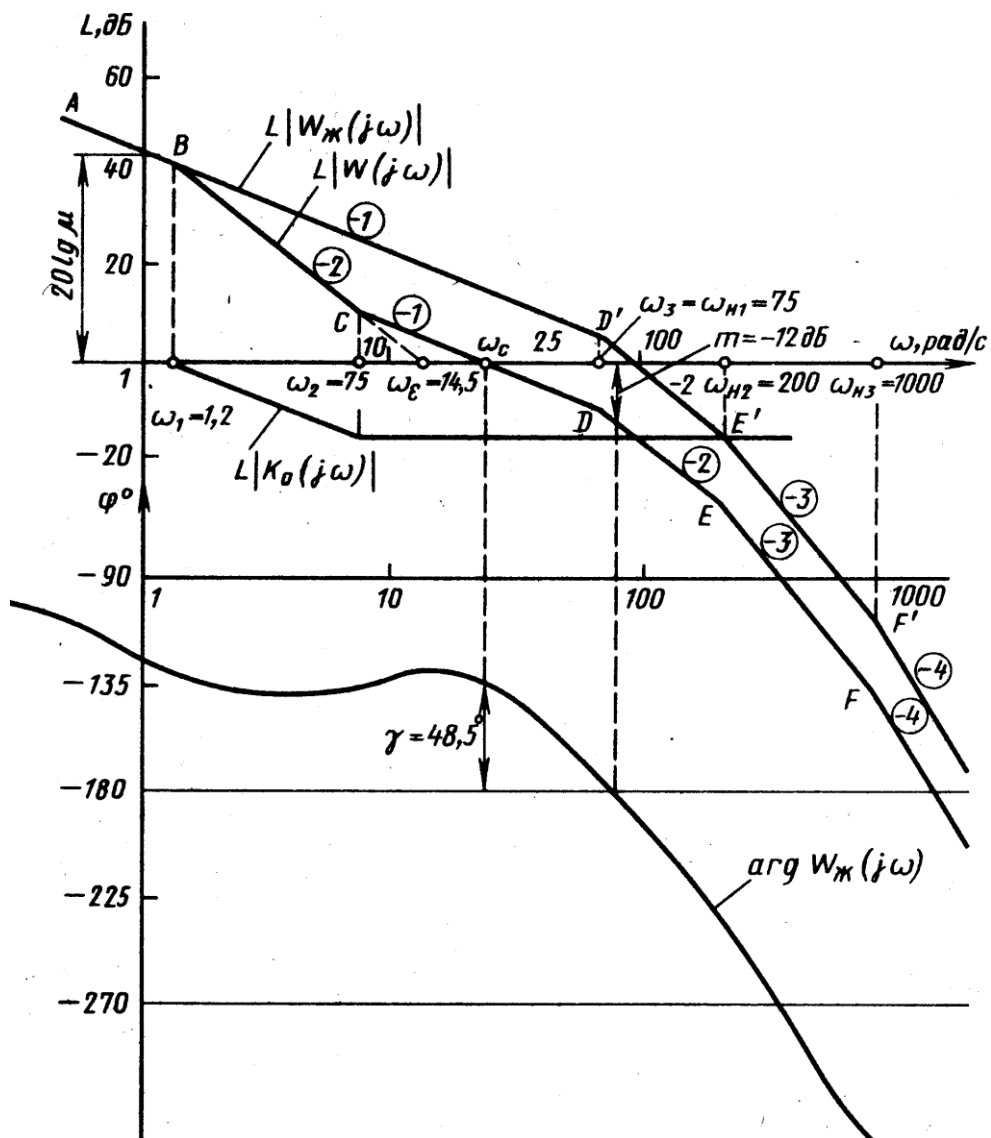


Рис. 12.11 БЛАФЧХ розімкнутого СП

зображеної на рис. 12.11.

Корекцію приводу проведемо, використовуючи найзастосованішу ЖЛАЧХ-2, для реалізації якої складні КП не потрібні.

Для її побудови визначимо частоту зрізу ω_c з допомогою номограми Солодовникові (див. рис. 12.6). По заданому значенню перерегулювання $\sigma = 38\%$ знаходимо $P_{\max} = 1,38$, коефіцієнт $b = 5,8$ і відповідний їх час перехідного процесу (12.14): $t_p = 5,8\pi/\omega_c$. Прирівнюючи знайдене значення до заданого $t_p = 0,74$ с, знаходимо

$$\omega_c = 25 \text{ рад}/\text{с}.$$

Через одержану частоту зрізу $\omega_c = 25 \text{ рад}/\text{с}$ проводимо середньочастотну асимптоту в виді відрізка прямої з нахилом $-20 \text{ дБ}/\text{дек}$.

Для спряження одержаної асимптоти з ЛАЧХ визначаємо з (12.7) та (12.18) значення частоти ω_ε :

$$\omega_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon} = \sqrt{210} = 14,5 \text{ рад}/\text{с}$$

З одержаної точки $\omega_\varepsilon = 14,5 \text{ рад}/\text{с}$ проводимо пряму з нахилом $-40 \text{ дБ}/\text{дек}$ до перетину в точці C з середньочастотною асимптотою, що визначає частоту $\omega_2 = 7,5 \text{ рад}/\text{с}$, і далі продовжуємо до перетину в точці B з низькочастотною асимптотою, що визначає частоту $\omega_1 = 1,2 \text{ рад}/\text{с}$.

З врахуванням рекомендацій (12.16) знаходимо тривалість середньочастотної асимптоти, обмеживши її частотою $\omega_3 = 10\omega_2 = 75 \text{ рад}/\text{с}$.

Високочастотну асимптоту БЛАЧХ проводимо з точки D , що відповідає частоті $\omega_3 = 75 \text{ рад}/\text{с}$, паралельно до високочастотної асимптоти ЛАЧХ незмінної частини.

Таким чином БЛАЧХ приводу побудована за умови найменшого спотворення ЛАЧХ незмінної частини, оскільки низькочастотні асимптоти співпадають, а зломи асимптот високочастотної БЛАЧХ визначаються частотами зломів і нахилами асимптот незмінної частини.

Фазову характеристику скоректованого приводу розраховуємо у відповідності з (12.21) та $W(p)$ по формулі

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{1,2} + \operatorname{arctg} \frac{\omega}{7,5} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{75} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{200} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{1000}$$

і позначаємо на графіку $\arg W_B(j\omega)$.

Як витікає з побудови, скоректований привод володіє досить задовільними запасами стійкості:

Завдання 9.

Побудувати БЛАФЧХ для розімкнутого приводу з передавальною функцією

$$W(p) = \frac{\mu}{p(0,8p+1)(0,6p+1)(0,11p+1)},$$

забезпечивши з похибкою, не більшою за δ , заданий закон руху вихідного валу: максимальна швидкість слідкування $\Omega_H = 1 \text{ град}/\text{с}$; максимальне прискорення $\varepsilon_H = 0,1 \text{ град}/\text{с}^2$.

Розв'язок

Для забезпечення необхідних показників якості приводу, що включає інтегрувальну і три аперіодичні ланки, необхідно достатньо складні КП (зворотні зв'язки), тому будемо будувати БЛАФЧХ з використанням обернених характеристик.

$$W^{-1}(p) = \frac{p(0,8p+1)(0,6p+1)(0,11p+1)}{\mu}.$$

Будуємо (рис. 12.12) обернену ЛАЧХ незмінної частини при коефіцієнті підсилення $\mu = 1 \text{ с}^{-1}$ – ламана $A'L'K'E'F$.

Визначаємо параметри гармонічного впливу $\beta(t) = \beta_0 \sin \omega_p t$: робоча частота згідно (2.7)

$\omega_p = \varepsilon_H / \Omega_H = 0,1 \text{ рад}/\text{с}$; амплітуда згідно (2.5)

$$\beta_0 = \Omega_H / \omega_p = 1/0,1 = 10^\circ.$$

Модуль частотної характеристики на робочій частоті

$$W^{-1}(j\omega_p) = \frac{\delta_\Gamma}{\beta_0} = \frac{6}{60 \cdot 10} = 0,01.$$

Нанесемо координати робочої точки A_p на графік:

$$\omega_p = 0,1 \text{ рад/с}; \quad L|W^{-1}(j\omega_p)| = 20 \lg 0,01 = -40 \text{ дБ}.$$

Для побудови БЛАЧХ вибираємо обернену типову ЛАЧХ-2 (див. рис. 12.9, б) із міркування забезпечення заданої точності та простоти реалізації характеристики.

Проводимо спряжувальну асимптоту MC у вигляді відрізка прямої з нахилом $+40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ через робочу точку A_p до перетину з нижньою зоною -8 дБ в точці C , що відповідає частоті $\omega_p = 0,62 \text{ рад/с}$.

Побудову середньо частотної асимптоти БЛАЧХ починаємо з нанесення зон $+10 \text{ дБ}$ і $+18 \text{ дБ}$. З точки C проводимо середньо частотну асимптоту CD з нахилом $+20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ до перетину з межею зони, що визначає частоту $\omega_3 = 5,2 \text{ рад/с}$. Частоту $\omega_4 = 8,5 \text{ рад/с}$ знайдемо, провівши асимптоту спряження DE з нахилом $+40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ до перетину з зоною в $+18 \text{ дБ}$. З одержаної точки E проводимо асимптоту EF з нахилом $+80 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, закінчуючи побудову типової характеристики у виді ламаної $MCDEF$. Для спряження ЛАЧХ незмінної частини і ЛАЧХ-2 характеристику $L \left| \frac{W^{-1}(j\omega)}{\mu} \right|$ переміщуємо вниз до тих пір, поки вона не співпаде з БЛАЧХ в точці E , що відповідає

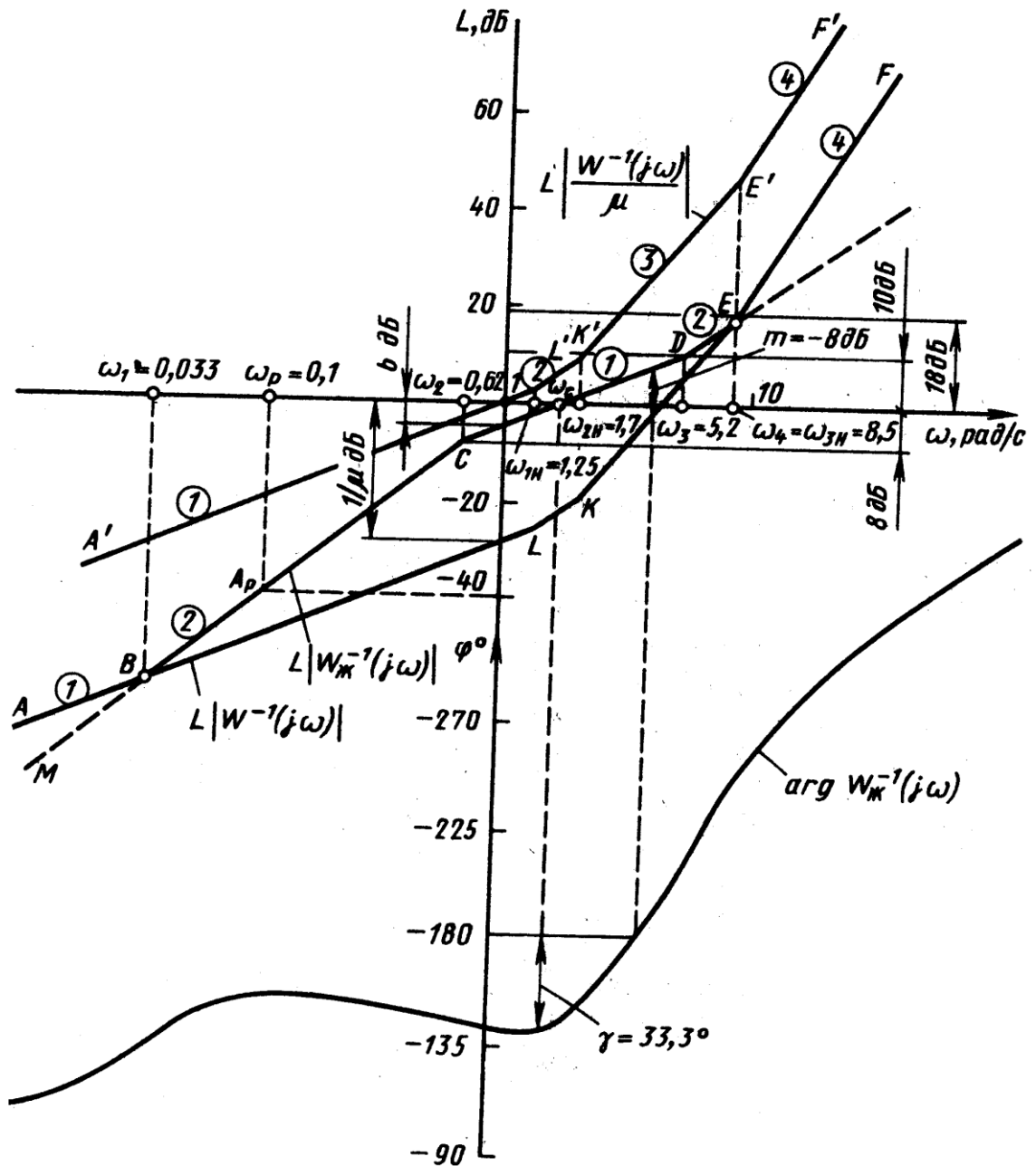


Рис. 12.12 БЛАФЧХ.

частоті $\omega_4 = 8,5 \text{ рад/с}$. Спряження в цій точці дозволяє одержати максимальне співпадання частот обох характеристик. Для забезпечення необхідної точності перетин низькочастотних асимптот повинен здійснитися лівіше робочої точки. Як бачимо з графіка, умова виконана, оскільки $\omega_1 = 0,33 \text{ рад/с}$ менша за $\omega_p = 0,1 \text{ рад/с}$. За високочастотну асимптоту приймаємо характеристику вихідного приводу – пряму EF .

З допомогою побудованої характеристики незмінної частини знайдемо необхідний коефіцієнт підсилення приводу, що чисельно дорівнює ординаті ЛАЧХ на частоті $\omega = 1 \text{ рад/с}$:
 $20\lg(1/\mu) = -29 \text{ дБ}$; $\lg(1/\mu) = -1,45 \text{ дБ}$; $\mu = 28,2 \text{ с}^{-1}$.

В результаті побудови одержали БЛАЧХ скоректованого приводу у вигляді ламаної $ABCDEF$.

Запас стійкості по фазі та амплітуді визначаємо після побудови фазової характеристики $\arg W^{-1}(j\omega)$ за рівнянням

$$\varphi = +\frac{\pi}{2} + a \operatorname{arctg} \frac{\omega}{0,0033} - a \operatorname{arctg} \frac{\omega}{0,62} + a \operatorname{arctg} \frac{\omega}{5,2} + 2a \operatorname{arctg} \frac{\omega}{8,5}.$$

Скоректований привод володіє запасами $m = -8 \text{ дБ}$,
 $\gamma = 33,3^\circ$.

Завдання 10.

Розрахувати при $R_H = 100 \text{ кОм}$ параметри КП, що застосовується для послідовної корекції СП, розглянутого на рис. 12.11.

Розв'язок

Шляхом співставлення характеристик $L|W_B(j\omega)|$ та $L|W(j\omega)|$ знаходимо характеристику послідовного КП $L|K_0(j\omega)|$. Вид ЛАЧХ КП дозволяє визначити передаточну функцію коректувального контуру №4 з таблиці 7.1.:

$$K_0(p) = \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)},$$

і необхідні співвідношення для визначення номіналів RC -елементів

$$T_1 = (R_1 + R_2)C; \quad T_2 = R_2 C.$$

визначаємо з побудови.

Вказані в співвідношеннях постійні часу контуру

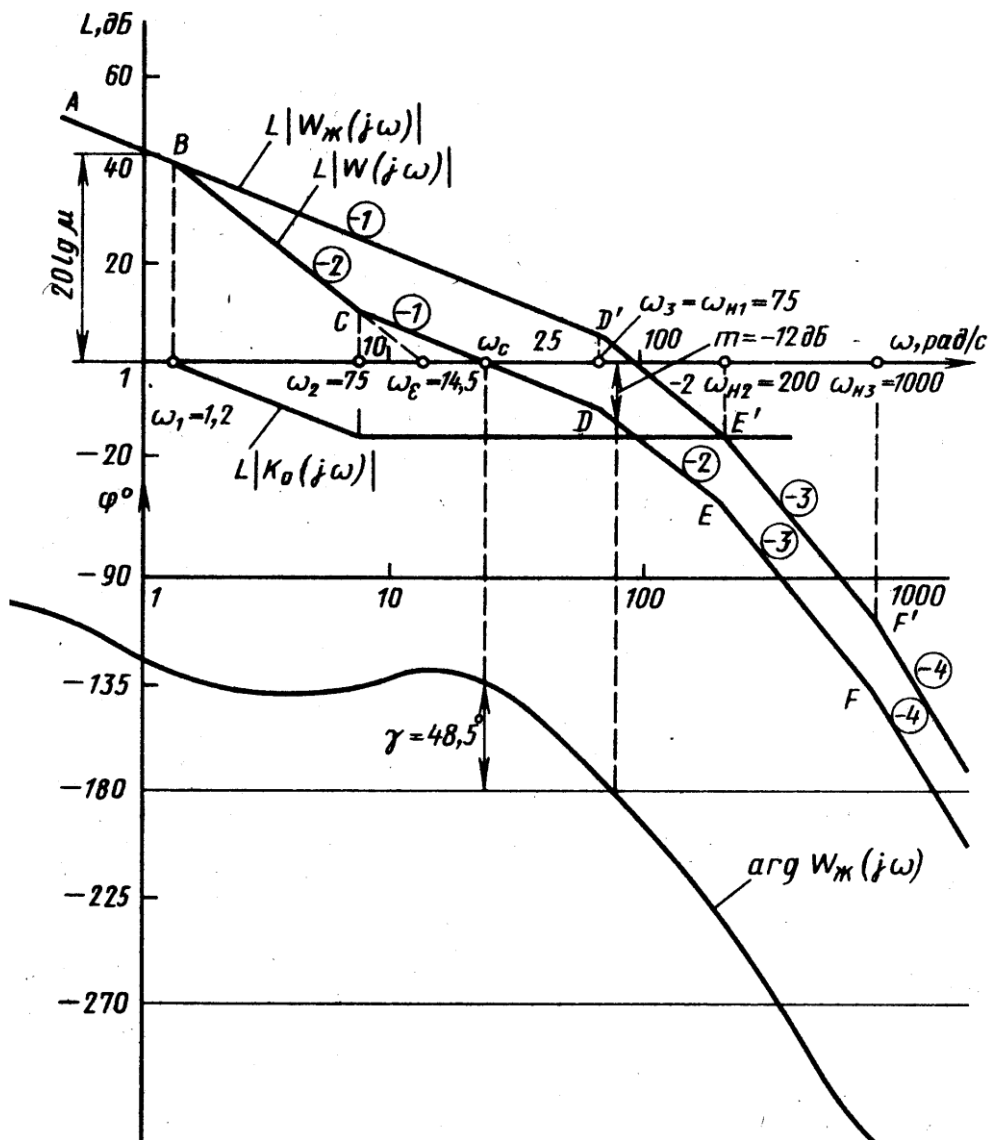


Рис. 12.11 БЛАФЧХ розімкнутого СП

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} = \frac{1}{1,2} = 0,83 \text{ c}; \quad T_2 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{7,5} = 0,13 \text{ c}$$

Прирівнюючи одержані групи виразів відповідно для T_1 і T_2 , знаходимо два рівняння з трьома невідомими R_1 , R_2 , C . Задаючись значенням $R_2 = 1,3 \text{ кОм}$ з умови $R_2 \ll R_H$, визначимо значення R_1 , і C :

$$C = \frac{T_2}{R_2} = \frac{0,13}{1,3 \cdot 10^3} = 0,1 \text{ мкФ}; \quad R_1 = \frac{T_1}{C} - R_2 = \frac{0,83}{0,1 \cdot 10^{-3}} - 1,3 = 7 \text{ кОм}.$$

Приймаємо $R_1 = 7,5 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,3 \text{ кОм}$; $C = 0,1 \text{ мкФ}$.

Завдання 11.

Синтезувати СП, ЛАЧХ котрого для забезпечення заданої точності повинна пройти через робочу точку з координатами $\omega_p = 1 \text{ рад/с}$, $20 \lg |W^{-1}(j\omega)| = -40 \text{ дБ}$. Власний оператор незмінної частини СП має вигляд $A(p) = (p+1)(0,02p+1)$. Вихідними даними для синтезу є коефіцієнт передачі ВД $k_d = 1 \text{ рад/В}\cdot\text{с}$; передаточне число силового редуктора $i = 600$; чутливість вимірювача розузгодження $k_\delta = 40 \text{ В/рад}$; крутизна характеристики тахогенератора, призначеного для корекції, що має ціну обороту 1° , $k_{\text{ТГ}} = 0,1 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$.

Розв'язок

Знаючи положення робочої точки A_p (рис. 12.15), будуємо обернену ЛАЧХ другого типу – ламана $MCDGK$

Далі будуємо обернену ЛАЧХ $L|W^{-1}(j\omega)|$ – ламана $A'N'E'F'$ – незмінної частини приводу при коефіцієнті підсилення $\mu = 1 \text{ с}^{-1}$ і переносимо її вниз до співпадання по напрямку асимптот $N'E'$ і CD , що мають однакові нахили. Одержана характеристика $ANEF$ відповідає оберненій передавальній функції незмінної частини СП $pA(p)/\mu$. Коефіцієнт підсилення по швидкості μ визначаємо із побудови: $1/\mu = -48 \text{ дБ}$ або в натуральному масштабі $\mu = 250 \text{ с}^{-1}$. Необхідний для його одержання коефіцієнт підсилення підсилювача знаходимо з виразу (12.12):

$$k_{\Pi} = \frac{\mu}{k_\delta k_d k_p} = \frac{250 \cdot 60}{40 \cdot 1,03} = 364.$$

Формуючи БЛАЧХ приводу, збільшимо частоту спряження до значення $\omega_{2H} = 50 \text{ рад/с}$ для найменшого

спотворення ЛАЧХ незмінної частини. Це призведе до деякого погіршення фільтруючих властивостей приводу, але значно спростить вибір КП. В результаті БЛАЧХ приводу визначиться ламаною $ABCDEF$.

Для знаходження характеристики 33 продовжуємо асимптоти BC і CD в область низьких і високих частот – ламана MC . Відповідна їй передаточна функція має вид

$$Z(p) = bp^2 \frac{1}{T_2 p + 1},$$

де b і T_2 визначаємо з побудови;

$$20 \lg b = -32 \text{ дБ}; \quad b = 0,0025 \text{ с}^2; \quad T_2 = 1/\omega_2 = 1/4 = 0,25 \text{ с}$$

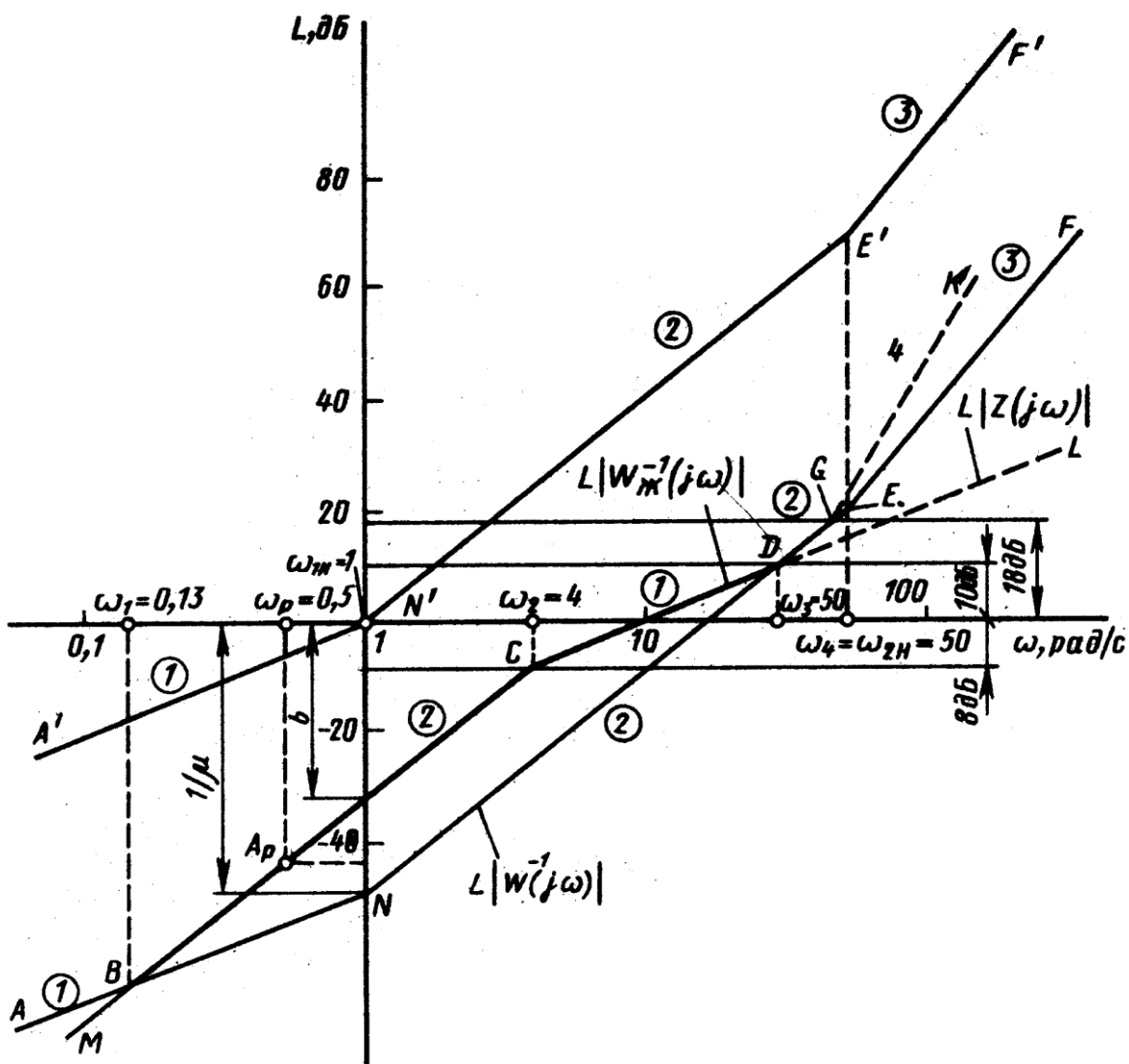


Рис. 12.15 БЛАФЧХ

Визначимо стійкість внутрішнього контуру шляхом

обчислення за (12.26) запасу по фазі в точці перетину на частоті $\omega_3 = 30 \text{ рад/с}$:

$$\gamma_{BK} = \pi - \left[\arg |W^{-1}(j\omega_3)| - \arg Z(j\omega_3) \right]$$

$$\gamma_{BK} = 180^\circ - \left[90^\circ + \operatorname{arctg} \frac{\omega_3}{\omega_{1H}} + \operatorname{arctg} \frac{\omega_3}{\omega_{2H}} - 180^\circ + \operatorname{arctg} \frac{\omega_3}{\omega_2} \right] = 72^\circ$$

Одержаний запас по фазі забезпечує надійну стійкість внутрішнього контуру в замкнутому стані.

Переходимо до вибору коректувальних засобів. Одержана передавальна функція $Z(p)$ ланцюга ЗЗ досить проста, і її можна реалізувати з допомогою одного тахогенератора з додатковим коригувальним контуром. Скористаємося співвідношенням (12.31), враховуючи, що

$$bp^2 \frac{1}{T_2 p + 1} = \frac{\nu}{\mu} p K(p),$$

або

$$\frac{b\mu}{T_2} \frac{T_2 p}{T_2 p + 1} = \frac{\nu}{\mu} K(p)$$

Прирівнюючи числові і операторні частини одержаного виразу, знайдемо коефіцієнт ν і передаточну функцію $K(p)$:

$$\frac{b}{T_2} = \frac{\nu}{\mu};$$

$$K = \frac{T_2 p}{T_2 p + 1}.$$

Обчислимо коефіцієнт ЗЗ по швидкості з допомогою одержаного співвідношення:

$$\nu = \frac{b\mu}{T_2} = \frac{0,0025 \cdot 250}{0,25} = 2,5.$$

З іншого боку, згідно (7.29) $\nu = k_{\Gamma} k_{\Gamma\Gamma} k_D$. Звідси необхідна крутизна характеристики тахогенератора

$$k_{\text{ТГ}} = \frac{\nu}{k_{\text{П}}k_{\text{Д}}} = \frac{2,5}{364 \cdot 1,03} = 0,0066 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

Оскільки крутизна тахогенератора $k_{\text{ТГ}} = 0,1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}$, то в ланцюг його сигналу необхідно ввести дільник з коефіцієнтом $k_{\text{ДЛ}} = 0,0066 : 0,1 = 0,066$. За одержаною передавальною функцією $K(p)$ з допомогою табл. 7.1 вибираємо схему контуру і вираз постійної часу $T_2 = RC$. Задаючись ємністю $C = 5 \text{ мФ}$, визначаємо

$$R = \frac{T_2}{C} = \frac{0,25}{5 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ кОм}.$$

Схема включення тахогенератора з контуром дана на рис. 7.6, в. З врахуванням коефіцієнта дільника

$$R_2 = Rk_{\text{ДЛ}} = 50 \cdot 0,066 = 3 \text{ кОм}; \quad R_1 = 47 \text{ кОм}$$

Таблиця 1.

Вихідні дані для розв'язку завдання 1.

Параметр	Варіанти																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$M_{CT},$ $H \cdot m$	2000	1500	2200	1700	2400	1300	2100	1400	2300	1500	1800	2500	2200	1700	2400	1300	2100	1400	2300	1500
$J_H,$ $кг \cdot м^2$	5300	6300	4000	5200	4800	6500	6000	4300	3600	5800	3400	7000	5500	3000	5000	4300	3200	6000	4500	3800
$\Omega_H,$ c^{-1}	0,16	0,18	0,20	0,14	0,12	0,22	0,24	0,16	0,18	0,20	0,14	0,20	0,14	0,12	0,22	0,24	0,22	0,16	0,18	0,20
$\varepsilon_H,$ c^{-2}	0,35	0,30	0,28	0,32	0,26	0,36	0,4	0,28	0,32	0,26	0,33	0,30	0,28	0,32	0,26	0,36	0,4	0,28	0,32	0,26

Таблиця 2.

Вихідні дані для розв'язку завдання 2.

Параметр	Варіанти																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$M_{CT}, H \cdot m$	1,20	1,40	1,6	1,15	1,25	1,35	0,8	1,15	1,30	0,85	1,45	1,40	1,6	1,15	1,25	1,35	0,8	1,15	1,30	0,85
$J_H, H \cdot m^2$	22,2	18,6	21,0	16,5	21,6	25,0	24,2	23,1	19,40	20,5	21,6	25,0	24,2	23,1	19,40	20,5	18,6	21,0	16,5	21,6
Ω_H, c^{-1}	0,11	0,15	0,08	0,14	0,12	0,18	0,24	0,16	0,18	0,20	0,08	0,14	0,12	0,18	0,24	0,16	0,18	0,20	0,11	0,15
ε_H, c^{-2}	0,45	0,35	0,18	0,22	0,16	0,26	0,30	0,18	0,36	0,20	0,18	0,36	0,14	0,35	0,18	0,22	0,16	0,26	0,30	0,18
η	0,85	0,90	0,80	0,82	0,88	0,92	0,86	0,84	0,85	0,90	0,80	0,82	0,88	0,92	0,86	0,84	0,84	0,90	0,86	0,82

Таблиця 6.

Вихідні дані для розв'язку завдання 6.

Параметр	Варіанти																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\delta_{ШВ}$	25	35	20	30	22	32	28	34	24	25	35	20	30	22	32	28	34	24	20	26
$\Omega_0,$ c^{-1}	8	10	6	9	7	5	8	10	6	9	7	5	6	9	7	5	8	10	6	9
δ_M	1,8	2,0	2,2	2,4	1,6	1,4	1,8	2,0	2,2	2,4	1,6	1,4	2,2	2,4	1,6	1,4	1,8	2,0	2,2	2,4
$M_H,$ $H \cdot m$	12	14	16	18	11	13	15	17	14	16	18	11	13	12	14	16	18	11	14	16
$k_\delta,$ $B/\text{рад}$	80	85	90	95	105	110	115	80	85	90	95	115	110	105	100	95	105	110	115	80

