


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт  
Кафедра «Промышленная автоматика и робототехника»

Утверждено на заседании кафедры  
«Промышленная автоматика  
и робототехника»  
«17» января 2023 г., протокол № 2

И.о. заведующего кафедрой

 О.А. Ерзин

**методические указания по выполнению самостоятельной работы  
«Силовая электроника, электропривод и электроавтоматика»**

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки

**15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств**

с направленностью (профилем)

**Автоматизация технологических процессов и производств**

Формы обучения: очная, заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 150304-01-23

Тула 2023 год

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ**  
**рабочей программы дисциплины (модуля)**

**Разработчик:**

Ерзин О.А., доцент, канд. техн. наук  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

Целью самостоятельной работы студентов по дисциплине является закрепление теоретических знаний, полученных студентами в процессе лекционных занятий и выполнения практических работ.

В методическом указании приведены примеры и решения конкретных задач по расчету элементов и характеристик электроприводов

Студенты самостоятельно изучают их и могут использовать при решении задач при курсовом и дипломном проектировании

Самостоятельная работа подкрепляет теоретический курс. Задачи и примеры рассматриваются по мере изучения соответствующих разделов курса.

Самостоятельная работа в 7 семестре включает:

№ п/п	Наименование видов самостоятельной работы	Трудоемкость (час.)	Методические материалы
1	Подготовка к лабораторным занятиям	10	Метод пособия
2	Подготовка к текущей аттестации	20	конспект
3	Самостоятельное изучение примеров расчетов электроприводов	126,5	Метод пособия
	Итого	156,5	
	Подготовка к лабораторным и практическим занятиям	-	Метод пособия
	Подготовка к экзамену	100	конспект
	Самостоятельное изучение примеров расчетов электроприводов	102,5	Метод пособия
	Итого	202,5	

Пример 1.

Подъемное устройство ( рис.2.1, б ) поднимает груз массой  $m = 550$  кг. Двухступенчатый редуктор имеет передаточные числа ступеней:

$$i_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 5; \quad i_2 = \frac{\omega_2}{\omega_3} = 6; \quad \text{КПД ступеней } \eta_1 = 0,96 \text{ и } \eta_2 = 0,95.$$

Диаметр барабана  $D_6 = 0,4$  м, а КПД в месте трения его о трос  $\eta_6 = 0,97$ . Угловая

скорость двигателя  $\omega_{дв} = \omega_1 = 105$  рад/с. Подъемное устройство имеет мо-

менты инерции: якоря -  $I_{я} = 0,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , зубчатых колес  $I_{z_1} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$I_{z_2} = 0,50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $I_{z_3} = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $I_{z_4} = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  ; муфты

$I_{M_1} = 0,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $I_{M_2} = 1,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; валов  $I_1 = 0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $I_2 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  
 $I_3 = 0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; барабана  $I_{\sigma} = 7,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Определить линейную скорость  $\mathcal{G}$  груза, мощность  $P$ , момент  $M$  электро-двигателя и общий момент инерции.

Решение:

1. Угловая скорость барабана

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{i_1 \cdot i_2} = \frac{105}{5 \cdot 6} = 3,5 \text{ рад/с.}$$

2. Линейная скорость груза

$$\mathcal{G} = \omega_3 \cdot R_{\sigma} = 3,5 \cdot \frac{0,4}{2} = 0,7 \text{ м/с.}$$

3. Статический момент на валу барабана

$$M_3 = 9,81 \cdot \frac{m \cdot \mathcal{G}}{\omega_3 \cdot \eta_{\sigma}} = 9,81 \cdot \frac{550 \cdot 0,7}{3,5 \cdot 0,97} = 1115 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\text{или} \quad M_3 = 9,81 \cdot \frac{m \cdot D_{\sigma}}{2 \cdot \eta_{\sigma}}.$$

4. Статический момент, приведённый к валу двигателя

$$M = M_3 \cdot \frac{1}{i_1 \cdot i_2} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2} = 1115 \cdot \frac{1}{5 \cdot 6} \cdot \frac{1}{0,96 \cdot 0,95} = 40,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Мощность на валу двигателя

$$P = \omega_{\text{дв}} \cdot M = 105 \cdot 40,7 = 4250 \text{ Вт}.$$

6. Общий момент инерции тел, вращающихся со скоростью двигателя

$$I_{\text{дв}} = I_{\text{я}} + I_{z_1} + I_{\text{м}} + I_1 = 0,4 + 0,1 + 0,06 + 0,04 = 0,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

7. Приведённый момент инерции тел, вращающихся со скоростью

$$I_2 = \frac{I_{z_2} + I_{z_3} + I_2}{i_1^2} = \frac{0,5 + 0,15 + 0,1}{5^2} = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

8. Приведённый момент инерции тел, вращающихся со скоростью

$$I_3 = \frac{I_{z_4} + I_3 + I_{M_2} + I_{\sigma}}{i_1^2 \cdot i_2^2} = \frac{1,2 + 0,2 + 1,1 + 7,4}{5^2 \cdot 6^2} = 0,011 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

9. Приведённый момент инерции поступательно движущегося груза

$$I_{\text{пост}} = \frac{m \cdot \mathcal{G}^2}{\omega_{\text{дв}}^2} = \frac{550 \cdot 0,7^2}{105^2} = 0,024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

10. Общий момент инерции электропривода

$$I_{об} = I_{дв} + I_2 + I_3 + I_{пост} = 0,6 + 0,03 + 0,011 + 0,024 = 0,665 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Пример.2

Рассчитать и построить естественную и искусственную механические характеристики и определить их жесткость для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по следующим справочным данным:

Дано:

$U_{ном} = 110$  В,  $P_{ном} = 4,5$  кВт,  $n_{ном} = 1000$  об/мин,  $n_{max} = 2000$  об/мин,  
 $I_{ном} = 50,5$  А,  $I = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>,  $2p = 4$ ,  $2a = 2$ ,  $W_a = 186$  витков,  
 $R_{дв.х} = R_a + R_{доб.п} = 0,156$  Ом,  $R_{пос.х} = 0,0068$  Ом,  $W_{ш} \text{ (на плюс)} = 800$  витков,  
 $R_{ш..х} = 46$  Ом,  $R^*_{доб} = 0,4$ .

Буква "х" в индексе означает, что сопротивления даны для холодных обмоток (при 20°C).

Решение.

1. Сопротивление обмотки якоря и возбуждения в нагретом состоянии:

$$R_a = K_{нг} \cdot (R_{дв.х} + R_{пос.х}) = 1,32 \cdot (0,156 + 0,0068) = 0,215 \text{ Ом},$$

Схема включения двигателя постоянного тока  
независимого возбуждения

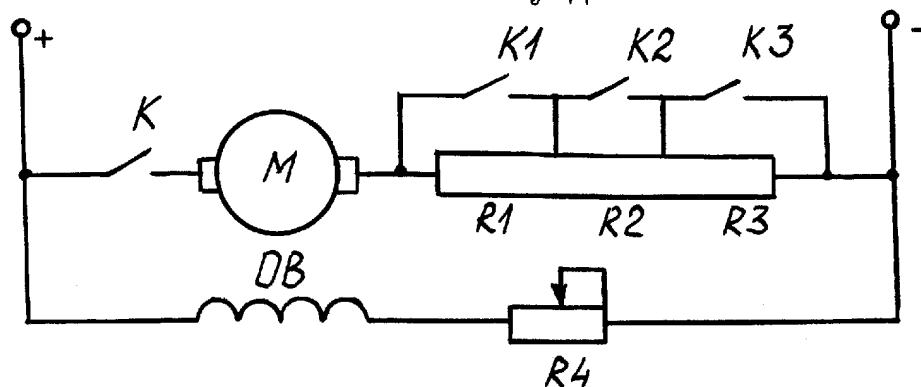


Рис.7.1

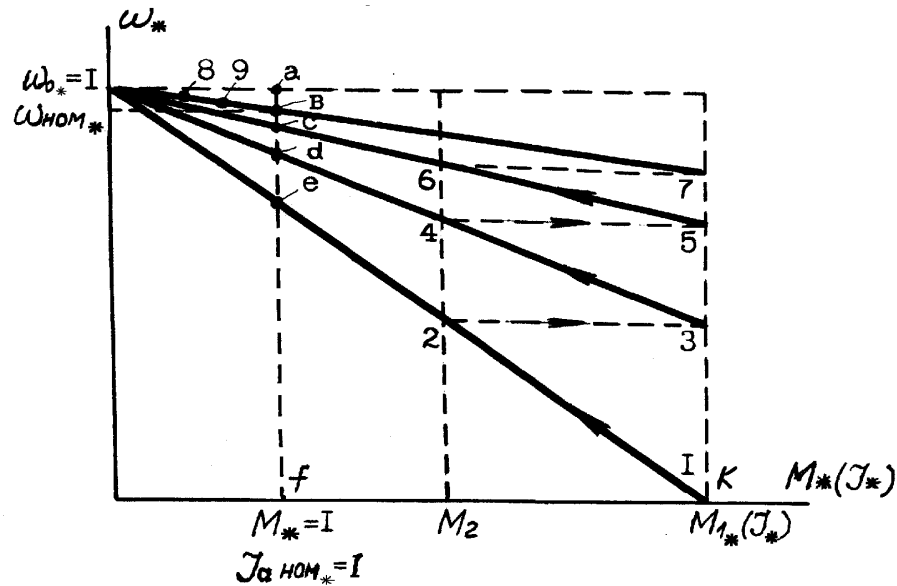


Рис. 7.2.

### ПУСКОВЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

$$R_{ш} = K_{нг} \cdot R_{ш.х} = 1,32 \cdot 46 = 60,7 \text{ Ом},$$

где

$K_{нг}$  - коэффициент нагрева ( $K_{нг}=1,24$  - для машин 1-3 величин;  $K_{нг}=1,32$  - для машин 4-6 величин;  $K_{нг}=1,4$  - для машин 7-11 величин).

2. Ток возбуждения:

$$I_B = \frac{U_{ном}}{R_{ш}} = \frac{110}{60,7} = 1,81 \text{ А}.$$

3. Номинальный ток якоря:

$$I_{a_{ном}} = I_{ном} - I_B = 50,5 - 1,81 = 48,7 \text{ А}$$

4. Номинальная ЭДС якоря:

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{a_{ном}} \cdot R_a = 110 - 48,7 \cdot 0,215 = 99,5 \text{ В}.$$

5. Номинальная угловая скорость:

$$\omega_{ном} = \frac{P_{ном}}{E_{ном}} = \frac{1000}{9,55} = 105 \text{ рад/с}.$$

6. Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{\omega_{ном} \cdot U_{ном}}{E_{ном}} = \frac{105 \cdot 110}{99,5} = 116 \text{ рад/с}.$$

7. Номинальный вращающий момент:

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{4500}{105} = 42,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Определив координаты двух точек, строим естественную механическую характеристику.

9. Номинальное сопротивление двигателя:

$$R_{НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{I_{a_{НОМ}}} = \frac{110}{48,7} = 2,26 \text{ Ом}.$$

10. Добавочное сопротивление:

$$R_{доб} = R_* \cdot R_{НОМ} = 0,4 \cdot 2,26 = 0,905 \text{ Ом}.$$

11. Угловая скорость на искусственной характеристике при номинальном моменте:

$$\begin{aligned} \omega'_{НОМ} &= \frac{\omega_0 \cdot (U_{НОМ} - I_{a_{НОМ}} \cdot (R_a + R_{доб}))}{U_{НОМ}} = \\ &= \frac{116 \cdot (110 - 48,7 \cdot (0,215 + 0,905))}{110} = 58,5 \text{ рад/с} \end{aligned}$$

12. Определив координаты второй точки, строим искусственную механическую характеристику.

13. Коэффициент жёсткости механических характеристик:

$$\begin{aligned} \beta_{ест} &= \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_{НОМ}} = \frac{116}{116 - 105} = 10,5 \\ \beta_{исх} &= \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega'_{НОМ}} = \frac{116}{116 - 58,5} = 1,84 \end{aligned}$$

Если вместо справочных данных имеются каталожные данные  $P_{НОМ}, U_{НОМ}, \eta_{НОМ}, \eta_{НОМ} = 81\%$ , то  $I_{a_{НОМ}}, R_{НОМ}, R_a$  так же можно найти, но с меньшей точностью.

14. Номинальный ток двигателя:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{U_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ}} = \frac{4500}{110 \cdot 0,81} = 50,5 \text{ А}.$$

15. Номинальный ток якоря при  $\frac{I_B}{I_H} = 0,05$  будет:

$$I_{a_{НОМ}} = I_{НОМ} \cdot \left(1 - \frac{I_B}{I_{НОМ}}\right) = 50,5 \cdot (1 - 0,05) = 48 \text{ А}.$$

16. Номинальное сопротивление:

$$R_{НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{110}{48} = 2,29 \text{ Ом.}$$

17. Сопротивление цепи якоря двигателя (в нагретом состоянии):

$$R_a = 0,5 \cdot R_{НОМ} \cdot (1 - \eta_{НОМ}) = 0,5 \cdot 2,29 \cdot (1 - 0,81) = 0,218 \text{ Ом.}$$

Сравнение результатов показывает, что они достаточно близки друг к другу.

Пример 3.

Рассчитать пусковые сопротивления для двигателя (см. пример 1), если  $I_{1*} = 2,2$ , число пусковых ступеней  $z = 3$ .

Решение:

1. Относительное сопротивление цепи якоря:

$$R_{*a} = \frac{R_a}{R_{НОМ}} = \frac{0,218}{2,26} = 0,0965$$

2. Относительный ток переключения:

$$I_{*2} = I_{*1} \cdot \sqrt[z]{R_{*a} \cdot I_{*1}} = 2,2 \cdot \sqrt[3]{0,0965 \cdot 2,2} = 1,32$$

Далее можно решать задачу или аналитическим, или графическим методами.

Аналитический метод.

3. Кратность пусковых токов:

$$\lambda = \frac{I_{*1}}{I_{*2}} = \frac{2,2}{1,32} = 1,67$$

4. Относительные сопротивления ступеней:

$$R_{*1} = \frac{1}{I_{*1}} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda} = \frac{1}{2,2} \cdot \frac{1,67 - 1}{1,67} = 0,182;$$

$$R_{*2} = \frac{R_{*1}}{\lambda} = \frac{0,182}{1,67} = 0,109;$$

$$R_{*3} = \frac{R_{*2}}{\lambda} = \frac{0,109}{1,67} = 0,0655$$

5. Сопротивления ступеней:

$$R_1 = R_{*1} \cdot R_{НОМ} = 0,182 \cdot 2,26 = 0,412 \text{ Ом.}$$

где

$$R_{НОМ} = 2,26 \text{ Ом,}$$

$$R_2 = R_{*2} \cdot R_{НОМ} = 0,109 \cdot 2,26 = 0,246 \text{ Ом,}$$

$$R_3 = R_{*3} \cdot R_{НОМ} = 0,0655 \cdot 2,26 = 0,148 \text{ Ом.}$$

6. Составляем значение тока при полностью введённом сопротивлении в момент пуска и заданного в условии:



$$I_1 = \frac{U_{НОМ}}{R_a + R_1 + R_2 + R_3} = \frac{110}{0,218 + 0,412 + 0,246 + 0,148} = 107 \text{ А};$$

$$I_1 = 2,2 \cdot I_{a_{НОМ}} = 2,2 \cdot 48,7 = 107 \text{ А}.$$

Таким образом, сила тока при пуске с реостатом совпадает с заданным значением.

Графический метод.

7. Для получения пусковой диаграммы в относительных единицах строим сначала естественную характеристику по двум точкам:

- холостого хода:

$$\omega_{0*} = 1; \quad I_{a*} = 0;$$

- номинального режима:

$$\omega_{НОМ*} = \omega_{НОМ} / \omega_0 = 105 / 116 = 0,905; \quad I_{a_{НОМ}*} = 1.$$

Проводим две вертикальные линии из точек:

$$I_{1*} = 2,2 \quad \text{и} \quad I_{2*} = 1,32.$$

Строим ступенчатую кривую, причём точка **7** должна оказаться и на естественной характеристике, и на вертикальной линии, проведённой через точку  $I_{1*} = 2,2$ . Восстановим перпендикуляры **af** из  $I_{НОМ*} = 1$  и **an** из  $\omega_{0*} = 1$ , получим точки **в, с, d, е**.

8. Масштаб сопротивлений:

$$m_R = \frac{R_{НОМ}}{af} = \frac{2,26}{50} = 0,0452 \text{ Ом} / \text{мм}.$$

9. Сопротивления ступеней пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot ed = 0,0452 \cdot 9 = 0,407 \text{ Ом},$$

$$R_2 = m_R \cdot cd = 0,0452 \cdot 5 = 0,226 \text{ Ом},$$

$$R_3 = m_R \cdot bc = 0,0452 \cdot 3 = 0,136 \text{ Ом}.$$

10. Сопоставляя результаты аналитического и графического методов, убеждаемся, что они достаточно близки.

#### Пример 4.

Рассчитать тормозное сопротивление в цепи якоря, при котором двигатель в начале рекуперативного торможения при скорости  $\omega_* = 1,2$  имел бы тормозной момент  $M_T = M_{НОМ} \cdot 0,7$ . Построить механическую характеристику. Используются данные примера.

**Решение.**

1. Скорость в начале торможения:

$$\omega = 1,2 \cdot \omega_0 = 1,2 \cdot 116 = 139 \text{ рад/с}.$$

2. Сила тока якоря в начале торможения:

$$I_a = I_{a_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{M_T}{M_{\text{НОМ}}} = 48,7 \cdot 0,7 = 34,1 \text{ А}.$$

3. ЭДС в начале торможения:

$$E_T = E_{\text{НОМ}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} = 99,5 \cdot \frac{139}{105} = 132 \text{ В}.$$

4. Тормозное сопротивление в холодном состоянии:

$$R_{T.X.} = \left( \frac{E_T - U_{\text{НОМ}}}{I_a} - R_a \right) \cdot \frac{1}{K_H} = \\ = \left( \frac{132 - 110}{34,1} - 0,215 \right) \cdot \frac{1}{1,32} = 0,327 \text{ Ом}.$$

5. Для построения механической характеристики определяем тормозной момент:

$$M_T = 0,7 \cdot M_{\text{НОМ}} = 0,7 \cdot 42,8 = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Строим механическую характеристику по двум точкам с координатами:

$$\omega = 116 \text{ рад/с}, \quad M = 0 \\ \omega = 139 \text{ рад/с}, \quad M_{\text{НОМ}} = -30 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

**Пример 5.**

Рассчитать тормозное сопротивление  $R_T$  в цепи якоря, которое в начале динамического торможения двигателя при скорости  $\omega = 0,9 \cdot \omega_{\text{НОМ}}$  ограничивало бы силу тока якоря до  $I_{a*} = 1,8$ . Построить механическую характеристику.

Использовать данные предыдущего примера.

**Решение.**

1. Скорость в начале торможения:

$$\omega = 0,9 \cdot \omega_{\text{НОМ}} = 0,9 \cdot 105 = 94,5 \text{ рад/с}.$$

2. Сила тока якоря в начале торможения:

$$I_a = 1,8 \cdot I_{a_{\text{НОМ}}} = 1,8 \cdot 48,7 = 87,6 \text{ А}.$$

3. ЭДС в начале торможения:

$$E_T = \omega \cdot \frac{E_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = 0,9 \cdot 99,5 = 89,6 \text{ В}.$$

4. Тормозное сопротивление в холодном состоянии:

$$R_{T.X.} = \left( \frac{E}{I_a} - R_a \right) \cdot \frac{1}{K_H} = \left( \frac{89,6}{87,6} - 0,215 \right) \cdot \frac{1}{1,32} = 0,6140 \text{ Ом}.$$

5. Для построения механической характеристики определяем тормозной момент:

$$M_T = M_{\text{НОМ}} \cdot \frac{I_a}{I_{a\text{НОМ}}} = 1,8 \cdot 42,8 = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Строим механическую характеристику по двум точкам с координатами:

$$\omega = 94,5 \text{ рад/с}, \quad M = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\omega = 0, \quad M_T = 0.$$

### Пример 6

Рассчитать тормозное сопротивление  $R_T$  в цепи якоря, которое обеспечило работу электропривода в режиме противовключения двигателя (см. пример 1) со скоростью  $\omega = 21 \text{ рад/с}$  при  $M_T = 1,5$ . Построить механическую характеристику.

### Решение.

1. Сила тока якоря в режиме:

$$I_a = I_{a\text{НОМ}} \cdot \frac{M_T}{M_{\text{НОМ}}} = 48,7 \cdot 1,5 = 73 \text{ А}.$$

2. ЭДС якоря:

$$E_T = E_{\text{НОМ}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} = 99,5 \cdot \frac{21}{105} = 19,9 \text{ В}.$$

3. Тормозное сопротивление в холодном состоянии:

$$R_{T.X.} = \left( -R_a + \frac{U_{\text{НОМ}} + E_T}{I_a} \right) \cdot \frac{1}{K_H} =$$

$$= \left( \frac{110 + 19,9}{73} - 0,215 \right) \cdot \frac{1}{1,32} = 1,18 \text{ Ом}.$$

4. Для построения механической характеристики определяем тормозной момент:

$$M_T = 1,5 \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,5 \cdot 42,8 = 64,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Строим механическую характеристику по двум точкам с координатами:

$$\omega = 21 \text{ рад/с}, \quad M = 64,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\omega = 139 \text{ рад/с}, \quad M = 0.$$

### Пример 7

Рассчитать и построить естественные и искусственные (при  $R_{\text{доб}^*} = 0,5$ ) механические характеристики электродвигателя типа **Д-31** по следующим дан-

НЫМ:  $U_{НОМ} = 220 В$ ,  $P_{НОМ} = 6,8 кВт$ ,  $n_{НОМ} = 900 об/мин$ ,  $I_{НОМ} = 38,5 А$ ,  
 $R_{ДВ.Х} = 0,42 Ом$ ,  $R_{Пос.Х} = 0,111 Ом$ .

Графическое построение ступеней пускового  
 резистора двигателя постоянного тока  
 последовательного возбуждения

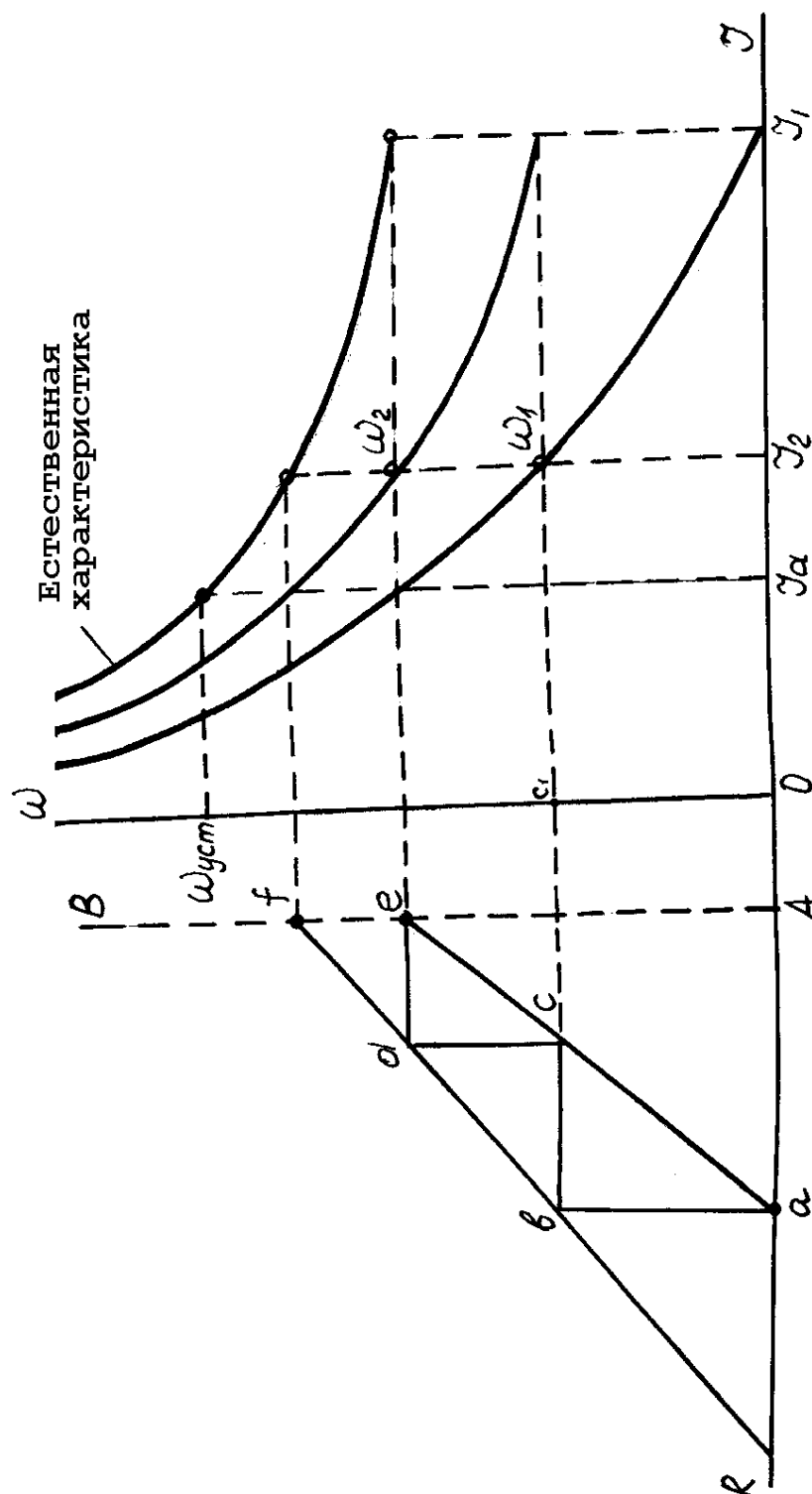


Рис. 9.6.

### Решение.

1. По универсальным характеристикам двигателя мощностью до 10 кВт (рис. 9.4) намечаем точки относительного тока  $I_{a*}$ , находим скорость  $\omega_*$  и момент  $M_*$  и заносим эти данные в таблицу.

2. Номинальный момент:

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{6800}{94,5} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Номинальная скорость:

$$\omega_{НОМ} = 0,105 \cdot \pi \cdot 900 = 94,5 \text{ рад/с}.$$

4. Сила тока, скорость и момент:

$$I = I_{НОМ} \cdot I_* = 38,5 \cdot 0,4 = 15,4 \text{ А и т.д.}$$

$$\omega_e = \omega_{НОМ} \cdot \omega_* = 94,5 \cdot 1,9 = 180 \text{ рад/с и т.д.}$$

$$M = M_{НОМ} \cdot M_* = 72 \cdot 0,27 = 19,5 \text{ Н и т.д.}$$

5. Строим естественные характеристики:

$$\omega_e = f(M); \quad \omega_e = f(I).$$

6. Сопротивление цепи якоря двигателя, нагретого до  $80^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} R_a &= (R_{ДВ.Х} + R_{ПОС.Х}) \cdot [1 + \alpha \cdot (T_\Gamma - T_X)] = \\ &= (0,42 + 0,11) \cdot [1 + 0,004 \cdot (80^0 - 20^0)] = 0,666 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

где

$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления, 1/град.

7. ЭДС якоря при работе двигателя на естественной характеристике:

$$E_{el} = U_{НОМ} - I_{a1} \cdot R_a = 220 - 14,4 \cdot 0,666 = 210 \text{ В и т.д.}$$

8. Номинальное сопротивление:

$$R_{НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} = \frac{220}{38,5} = 5,72 \text{ Ом.}$$

9. ЭДС якоря при работе двигателя на искусственной характеристике:

$$\begin{aligned} E_{НОМ1} &= U_{НОМ} - I_{a1} \cdot [(R_{ДВ.Х} - R_{ПОС.Х}) \cdot 1,24 + 0,5 \cdot R_{НОМ}] = \\ &= 220 - 15,4 \cdot [(0,42 + 0,11) \cdot 1,24 + 0,5 \cdot 5,72] = 165 \text{ В} \end{aligned} \quad \text{и}$$

т.д.

10. Скорость электродвигателя при работе на искусственной характеристике:

$$\omega_{НОМ} = \omega_e \cdot \frac{E_H}{E_E} = 180 \cdot \frac{165}{209} = 141 \text{ рад/с и т.д.}$$

11. Строим искусственные характеристики:

$$\omega_\Pi = f(M); \quad \omega_\Pi = f(I).$$

## РАСЧЁТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Расчёт механических характеристик асинхронного двигателя рассмотрим на примере.

### Пример 8

Определить по каталожным данным параметры асинхронного двигателя и рассчитать его естественную, механическую и искусственную характеристики при  $R_{2\text{доб}} = 0,42 \cdot R_{2\text{ном}}$ . Данные двигателя:  $U_{1\text{л}} = 380\text{В}$ ,  $P_{\text{ном}} = 30\text{кВт}$ ,  $n_{\text{ном}} = 970\text{об/мин}$ ,  $I_{1\text{ном}} = 67\text{А}$ ,  $E_{2\text{к}} = 225\text{В}$ ,  $I_{2\text{ном}} = 72\text{А}$ ,  $M_{\text{к}} = 810\text{Н} \cdot \text{м}$ .

### Решение:

1. Определяем номинальное скольжение:

$$S_{\text{ном}} = \frac{(n_0 - n)}{n_0} = \frac{(1000 - 970)}{1000} = 0,03.$$

2. Номинальное сопротивление цепи ротора при котором  $I_2 = I_{2\text{ном}}$ :

$$R_{2\text{ном}} = \frac{E_{2\text{к}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{ном}}} = \frac{225}{\sqrt{3} \cdot 72} = 1,83\text{Ом}.$$

3. Активное сопротивление фазы ротора:

$$R_2 = S_{\text{ном}} \cdot R_{2\text{ном}} = 0,03 \cdot 1,83 = 0,055\text{Ом}.$$

4. Определяем приведённое сопротивление ротора:

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_2 \cdot K_R = R_2 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot (0,95 \cdot \frac{U_{1\text{л}}}{E_{2\text{к}}})^2 = \\ &= 0,055 \cdot \frac{3}{3} \cdot (0,95 \cdot \frac{380}{225})^2 = 0,141\text{Ом}. \end{aligned}$$

5. Определяем  $\omega_{\text{ном}}$ :

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot P_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 970}{30} = 101,5\text{с}^{-1}.$$

6. Номинальный электромагнитный момент определяем по моменту на валу, приближённо учитывая момент потерь коэффициентом **1,05**:

$$M_{НОМ} = 1,05 \cdot \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = 1,05 \cdot \frac{30 \cdot 10^3}{101,5} = 310 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Приближённо принимаем  $R_1 \approx R_2' = 0,141 \text{ Ом}$ . Соответственно:

$$a = \frac{R_1}{R_2'} = 1.$$

8. Подставив значения  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{НОМ}$ ,  $\mathbf{M}_K$  и  $\mathbf{a}$  в уравнение (11.7), получим:

$$M = \frac{2 \cdot M \cdot (1 + a \cdot S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot a \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 310 \cdot (1 + 1 \cdot S_K)}{\frac{0,03}{S_K} + \frac{S_K}{0,03} + 2 \cdot 1 \cdot S_K} = 310.$$

Из двух корней полученного квадратного уравнения выбираем больший из физических соображений:  $\mathbf{S}_K = \mathbf{0,174}$ .

9. Из выражения критического скольжения (11.5) находим индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\begin{aligned} X_K &= X_1 + X_2' = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{S_K}\right)^2 - R_1^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{0,141}{0,174}\right)^2 - (0,141)^2} = 0,79 \text{ Ом} \end{aligned}$$

10. Определяем расчётное значение  $\mathbf{M}_K$  на естественной характеристике:

$$\begin{aligned} M_K &= \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2})} = \\ &= \frac{3 \cdot (220)^2}{2 \cdot 105 \cdot (0,141 + \sqrt{(0,141)^2 + (0,79)^2})} = 740 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

где

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot P_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ с}^{-1}.$$

Расчетное значение  $\mathbf{M}_K$  получилось меньше каталожного примерно на **8,7%**.

11. Естественная механическая характеристика  $M = f(S)$  имеет вид:

$$M = \frac{2.740 \cdot (1 + 0,174)}{S / 0,174 + 0,174 / S + 0,348}.$$

С помощью данного уравнения и зависимости  $\omega = f(S) - \omega = \omega_0(1 - S)$  строится для фиксированных значений  $S$  расчетная механическая характеристика  $\omega = f(M)$ . Использование в уравнении  $M = f(S)$  каталожного значения  $M_k$  даст характеристику незначительно отличающуюся от расчетной.

12. Для построения реостатной механической характеристики при  $R_{2_{доб}} = 0,42 \cdot R_{2_{ном}} = 0,42 \cdot 1,83 = 0,77 \text{ Ом}$  определим суммарное приведенное сопротивление ротора:

$$R_{2\Sigma} = (R_2 + R_{2_{доб}}) K_R = (0,055 + 0,77) \cdot 2,57 = 2,12 \text{ Ом}.$$

13. Определяем критическое скольжение:

$$S_k = \frac{R_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{2,12}{0,141 + 0,79} = 2,68.$$

14. Реостатную характеристику скорости в соответствии с уравнением:

$$M = \frac{2.740 \cdot (1 + 2,68)}{S / 2,68 + 2,68 / S + 2 \cdot 2,68}.$$

Расчет механической характеристики для данного примера можно произвести и по упрощенной формуле Клосса.

15. Определяем:

$$R_2 = \frac{S_{ном} \cdot E_{2k}}{\sqrt{3} \cdot I_{2_{ном}}} = \frac{0,03 \cdot 225}{\sqrt{3} \cdot 72} = 0,054 \text{ Ом}.$$

16. Приведенное сопротивление:

$$R_{2'} = 0,054 \cdot 2,57 = 0,139 \text{ Ом}.$$

17. Критическое скольжение определить по формуле (11.5) затруднительно, так как требуются дополнительные расчёты по определению  $X_k$ . Определяем  $S_k$ :

$$S_k = S_{ном} \cdot (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

где

$$\lambda = \frac{M_{кр}}{M_{ном}} = \frac{810}{310} = 2,61.$$



$$S_K = 0,03 \cdot (2,61 + \sqrt{(2,61)^2 - 1}) = 0,15.$$

18. Естественную механическую характеристику строим по зависимости:

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}} = \frac{2 \cdot 810}{\frac{S}{0,15} + \frac{0,15}{S}}.$$

19. При включении  $R_{2_{доб}}$  в цепь ротора увеличивается критическое скольжение:

$$S_{K_M} = S_K \cdot \frac{R_{2_H} + R_{2_{доб}}}{R_{2_H}} = 0,15 \cdot \frac{1,83 + 0,77}{1,83} = 2,21.$$

20. Строим искусственную механическую характеристику по упрощенной формуле Клосса.

#### Пример 9

Рассчитать сопротивления пусковых ступеней трехступенчатого реостата для пуска двигателя МТБ211-6.

$$M_{I_*} = 1,5, \quad M_{K_*} = 2,1, \quad P_{НОМ} = 7,5 \text{ кВт}, \quad n_{НОМ} = 930 \text{ об/мин},$$

$$E_{2_K} = 256 \text{ В}, \quad I_{2_{НОМ}} = 19,8.$$

#### Решение.

1. Пусковой момент относительно критического (максимального)

$$\frac{M_{I_*}}{M_{K_*}} = \frac{1,5}{2,1} = 0,715 < 0,75.$$

Поэтому применяем аналитический метод.

2. Определяем номинальный момент:

$$M_{НОМ} = 9,55 \cdot \frac{P_{НОМ}}{n_{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{7500}{930} = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Пусковой (пиковый) момент:

$$M_{II} = 1,5 \cdot M_{НОМ} = 1,5 \cdot 77 = 115 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Момент переключения:

$$\begin{aligned} M_{пр} &= M_{II} \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{II} \cdot S_{НОМ}}{M_{НОМ}}} = \\ &= 115 \cdot \sqrt[3]{\frac{115 \cdot 0,07}{77}} = 54,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

5. Кратность пусковых моментов:

$$C = \frac{M_{\Pi}}{M_{\Pi p}} = \frac{115}{54,3} = 2,12.$$

6. Номинальное скольжение:

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{\Pi_0 - \Pi_{\text{НОМ}}}{\Pi_0} = \frac{1000 - 930}{1000} = 0,07.$$

7. Номинальное сопротивление ротора:

$$R_{2_{\text{НОМ}}} = \frac{E_{2_K}}{\sqrt{3} \cdot I_{2_{\text{НОМ}}}} = \frac{256}{\sqrt{3} \cdot 19,8} = 7,46 \text{ Ом}.$$

8. Сопротивление обмотки ротора:

$$R_2 = S_{\text{НОМ}} \cdot R_{2_{\text{НОМ}}} = 0,07 \cdot 7,46 = 0,522 \text{ Ом}.$$

9. Определяем полное сопротивление цепи ротора на ступенях переключения реостата:

$$R_{\Sigma_3} = C \cdot R_2 = 2,12 \cdot 0,522 = 1,106 \text{ Ом},$$

$$R_{\Sigma_2} = C \cdot R_{\Sigma_3} = 2,12 \cdot 1,16 = 2,34 \text{ Ом},$$

$$R_{\Sigma_1} = C \cdot R_{\Sigma_2} = 2,12 \cdot 2,34 = 4,96 \text{ Ом}.$$

10. Сопротивления секции реостата:

$$R_{\text{доб}_3} = R_{\Sigma_3} - R_2 = 1,106 - 0,522 = 0,584 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{доб}_2} = R_{\Sigma_2} - R_2 - R_{\text{доб}_3} = 2,34 - 0,522 - 0,584 = 1,234 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{доб}_1} = R_{\Sigma_1} - R_{\Sigma_2} = 4,96 - 2,34 = 2,62 \text{ Ом}.$$