Электрические машины – электромеханические преобразователи энергии

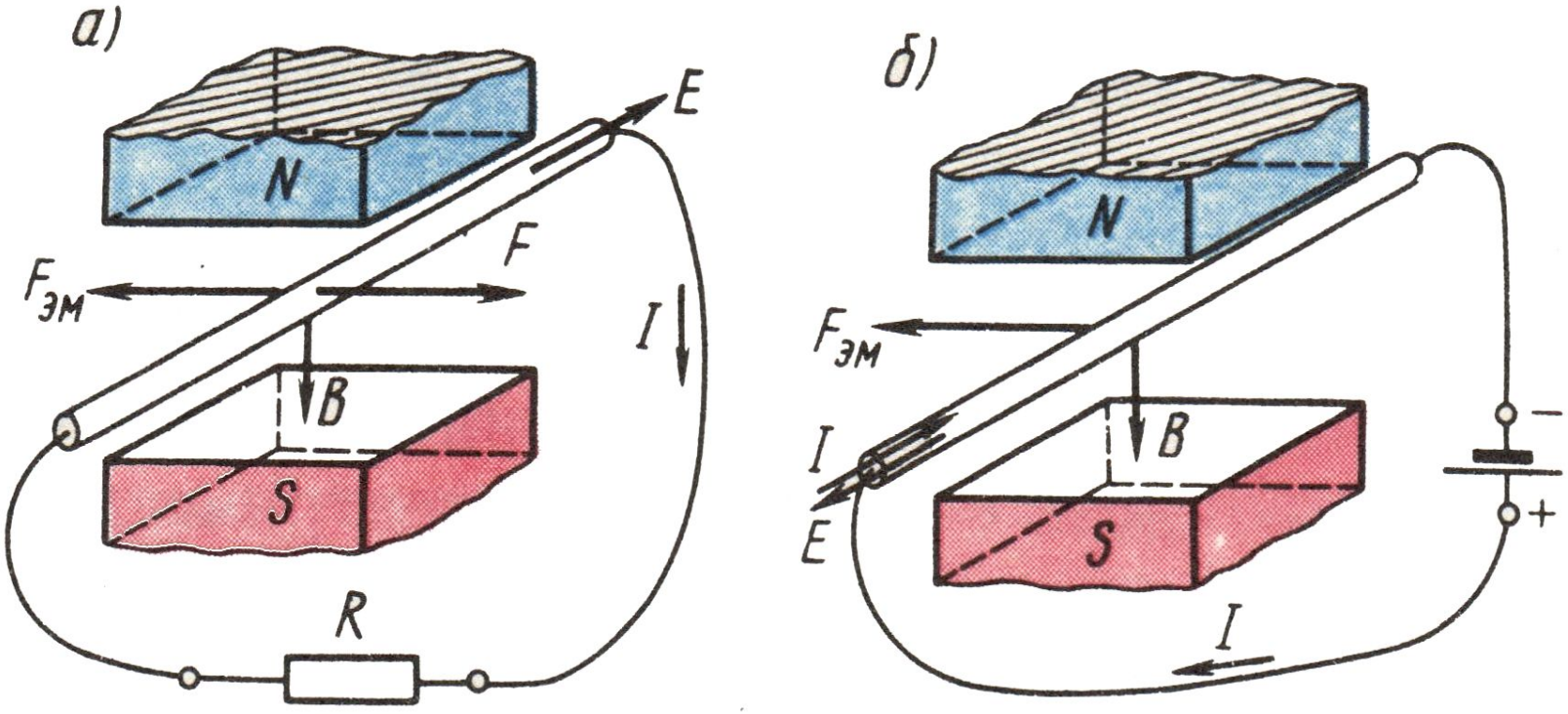


Рис. 1 К понятиям об «элементарном генераторе» (*а*) и «элементарном двигателе» (*б*)

Электродвижущая сила (ЭДС)

$$E = B \cdot l \cdot \upsilon, \quad (1)$$

Электромагнитная сила

$$F_{ЭМ} = B \cdot l \cdot I, \quad (2)$$

Падение напряжения в проводнике:

$$U = E + I \cdot r, \quad (3)$$

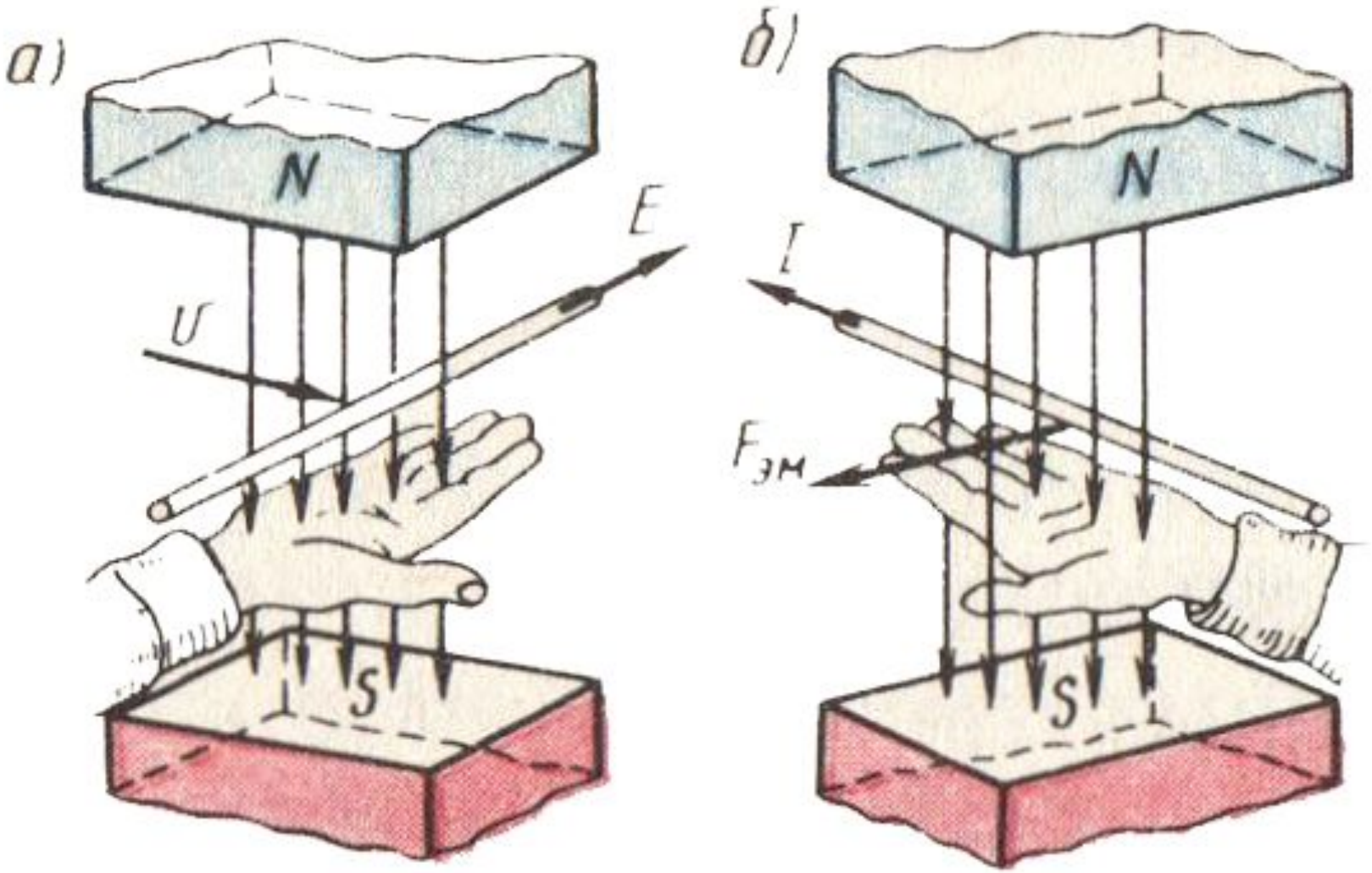


Рис. 2. Правила «правой руки» и «левой руки»

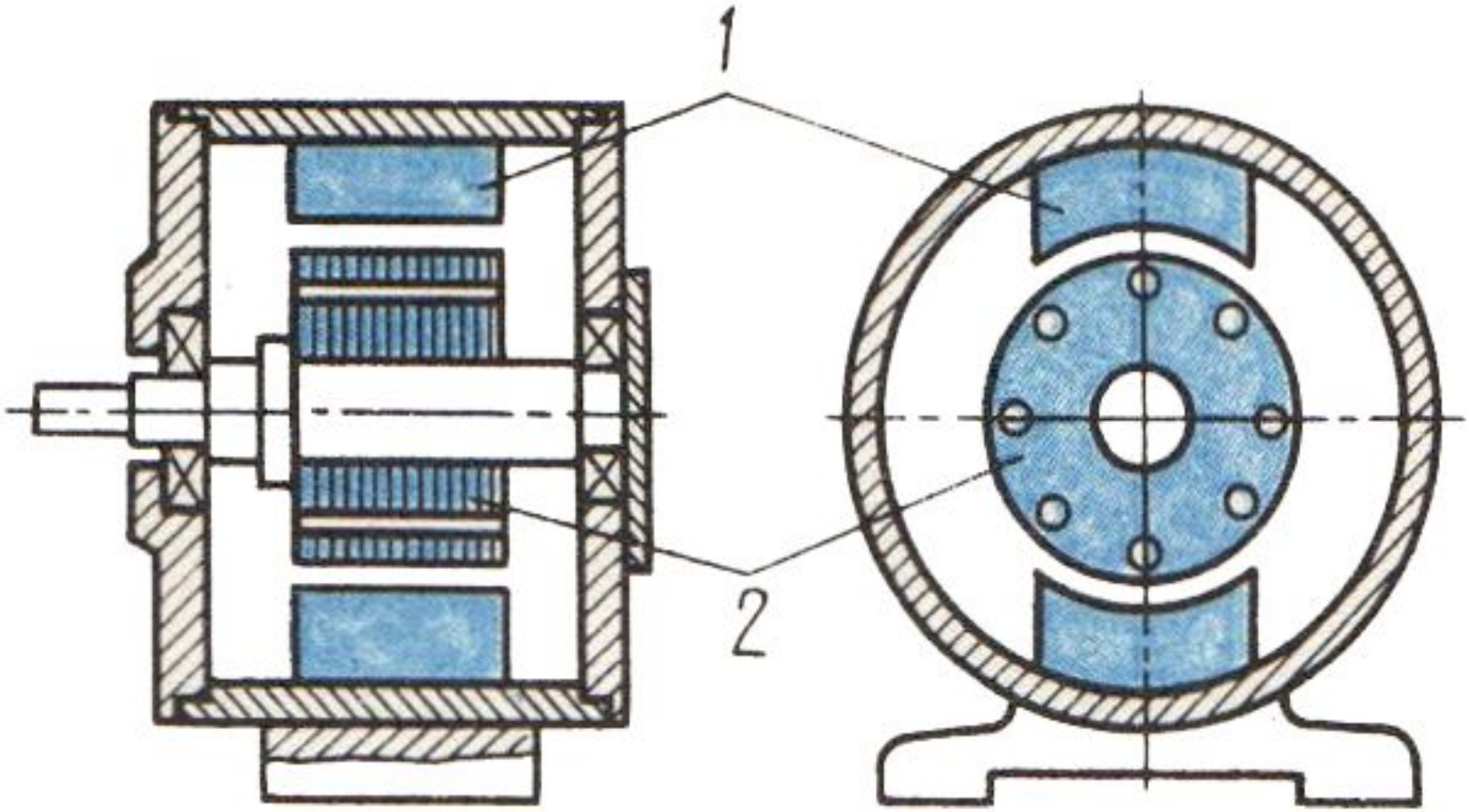
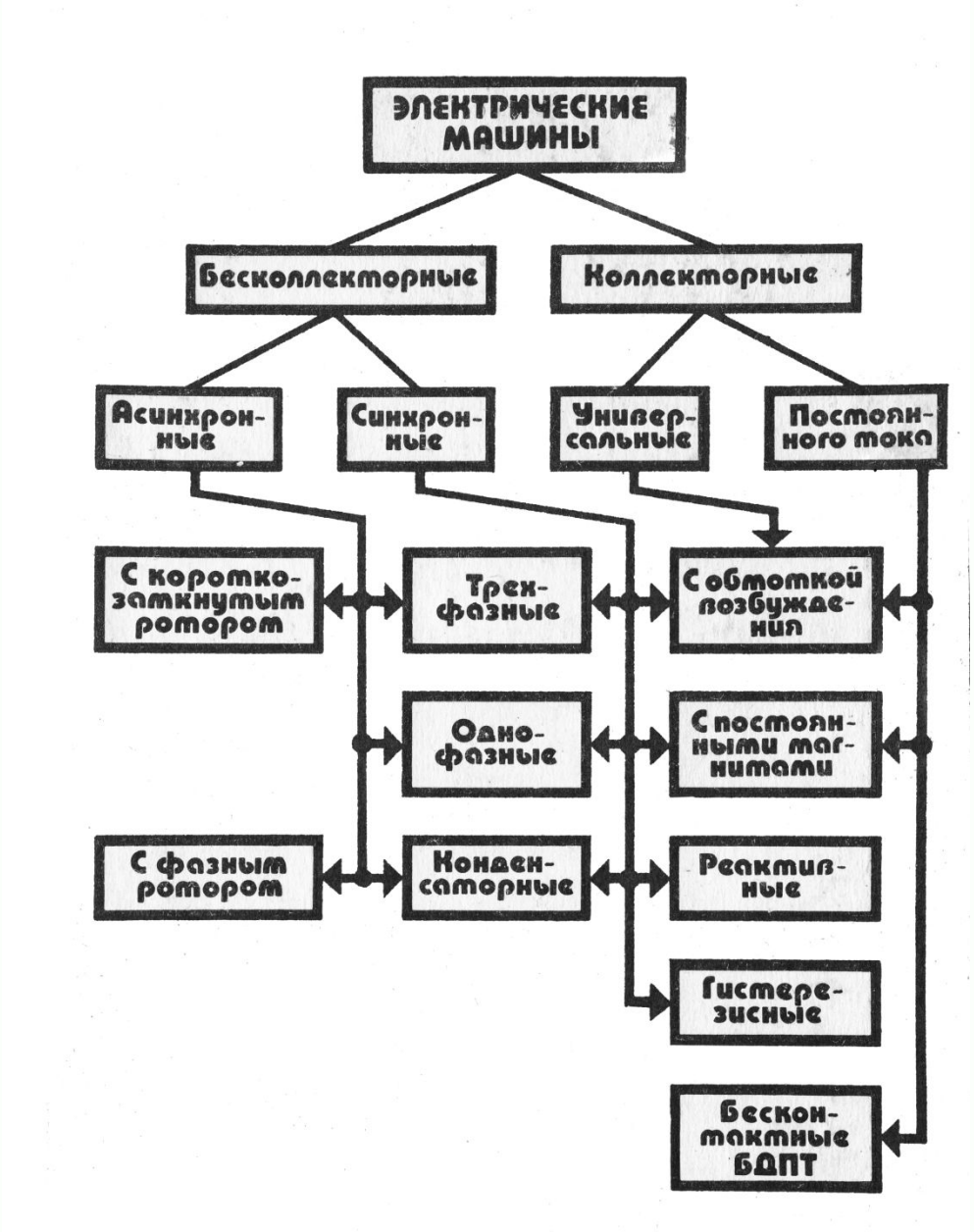


Рис. 3 Обобщенная конструктивная схема электрической машины

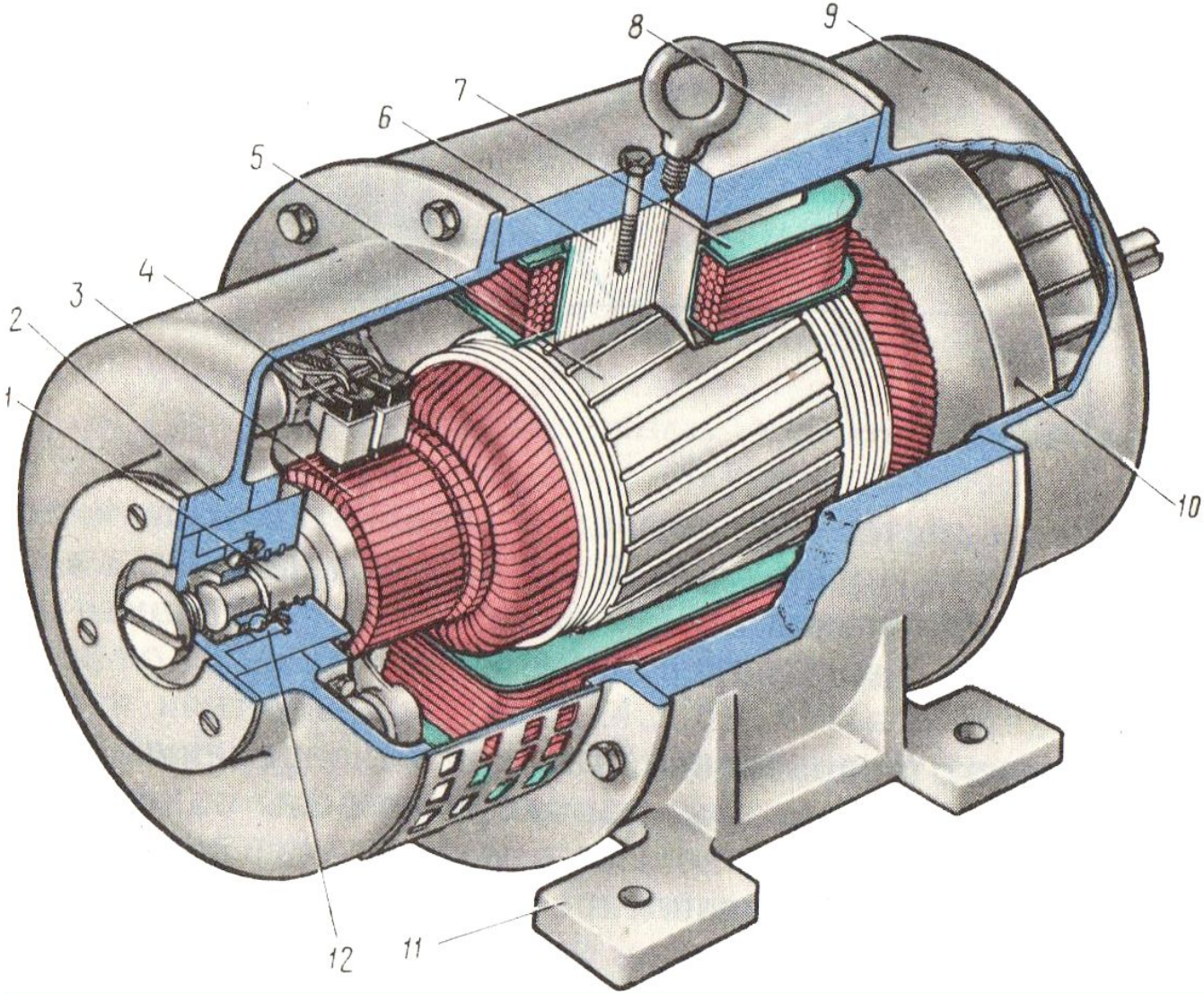
Классификация электрических машин

Рис. 4



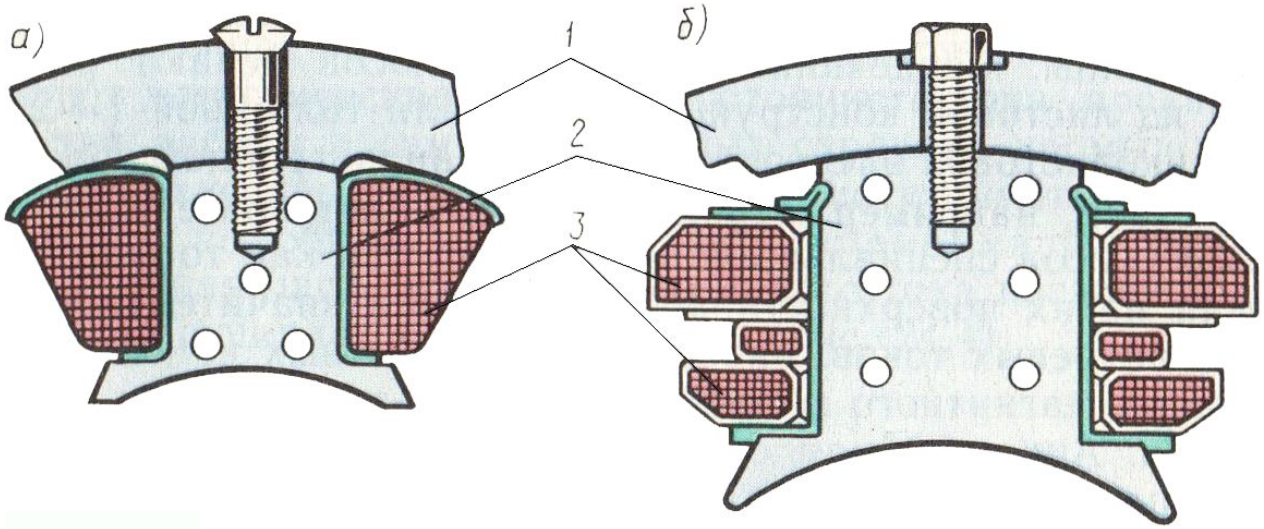
Устройство машин постоянного тока

Принцип действия машин постоянного тока



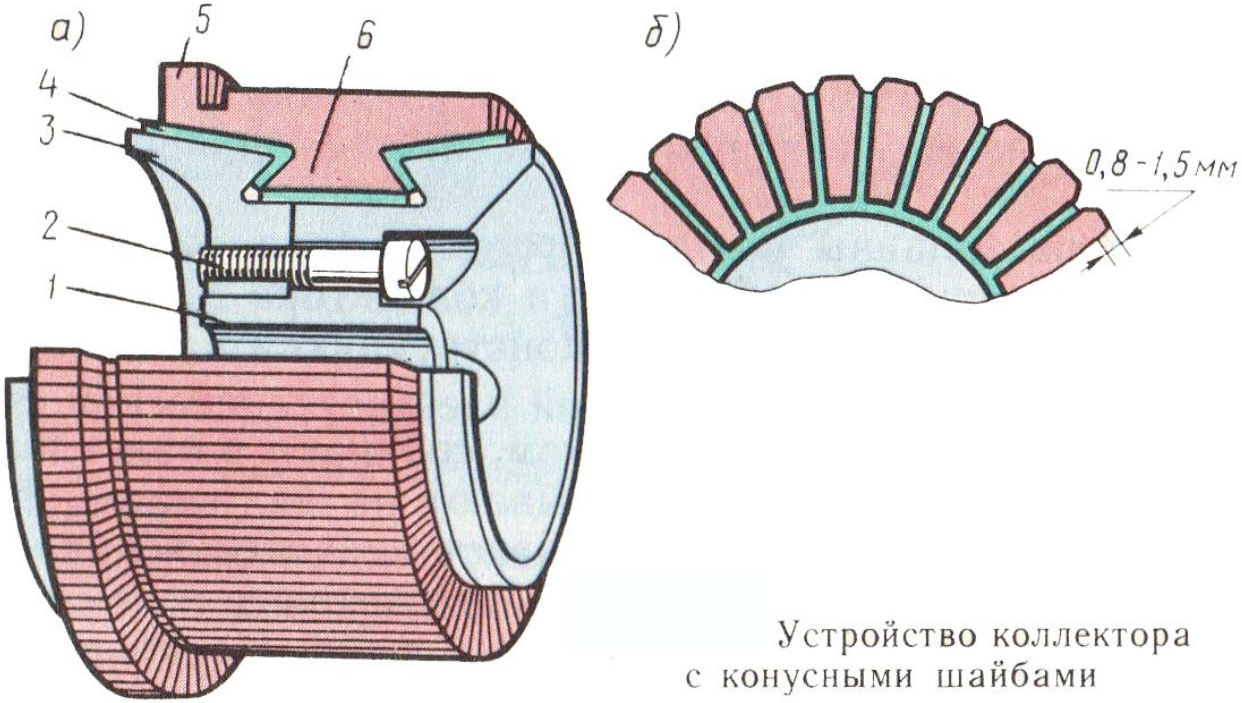
1 – коллектор;
2 – щетки;
3 – якорь;
4 – главный полюс;
5 – полюсная катушка;
6 – станина;
7, 12 – подшипниковые щиты;
8- вентилятор;
9 – обмотка якоря;
10 – вал;
11 – лапы

Рис. 5. Устройство машины постоянного тока

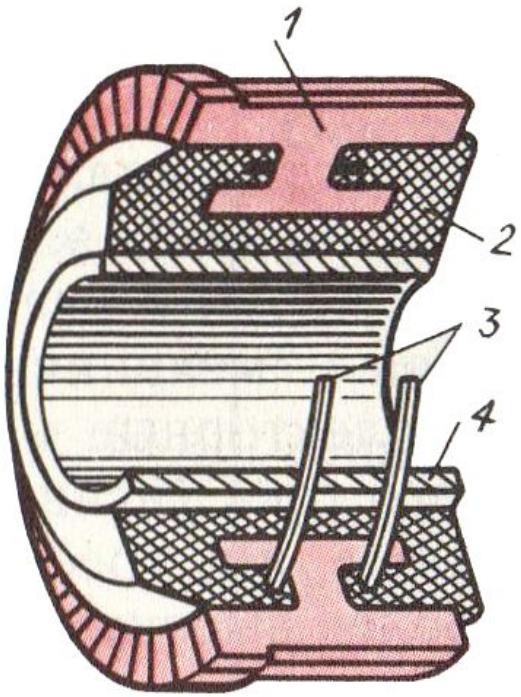


Главные полюсы с бескаркасной (*а*) и каркасной (*б*) полюсными катушками:

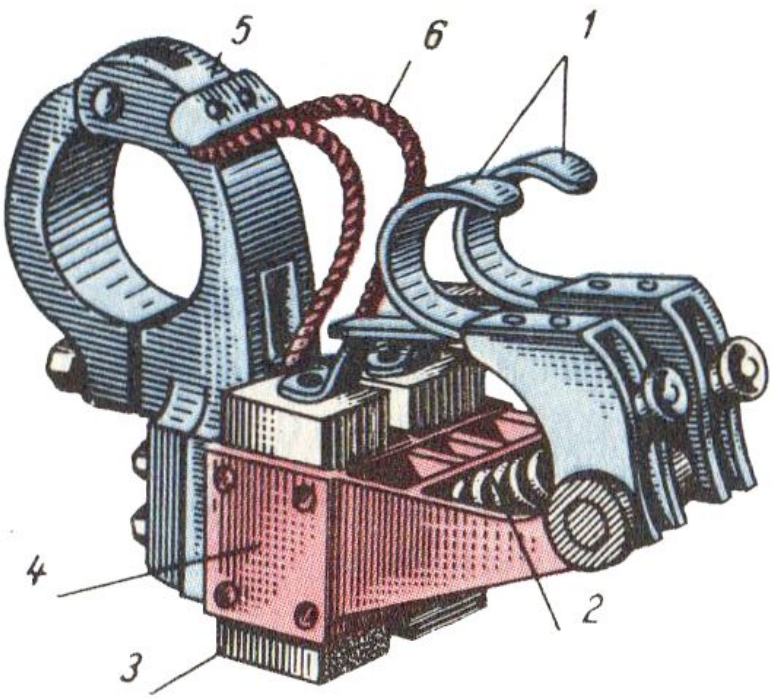
1 — станина; *2* — сердечник полюса; *3* — полюсная катушка



Устройство коллектора с конусными шайбами



Устройство коллектора на пластмассе



Щеткодержатель (сдвоенный) машины постоянного тока

Магнитный поток Ф

$$\Phi = \frac{I_в \cdot W_в}{R_м} \quad (4)$$

Электромагнитный момент М

$$M = C_м \cdot I_я \cdot \Phi \quad (5)$$

ЭДС

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n \quad (6)$$

Ток в обмотке якоря

$$I_я = \frac{U - E}{R_я} \quad (7)$$

$$U = E + I_я \cdot Rя \quad (8)$$

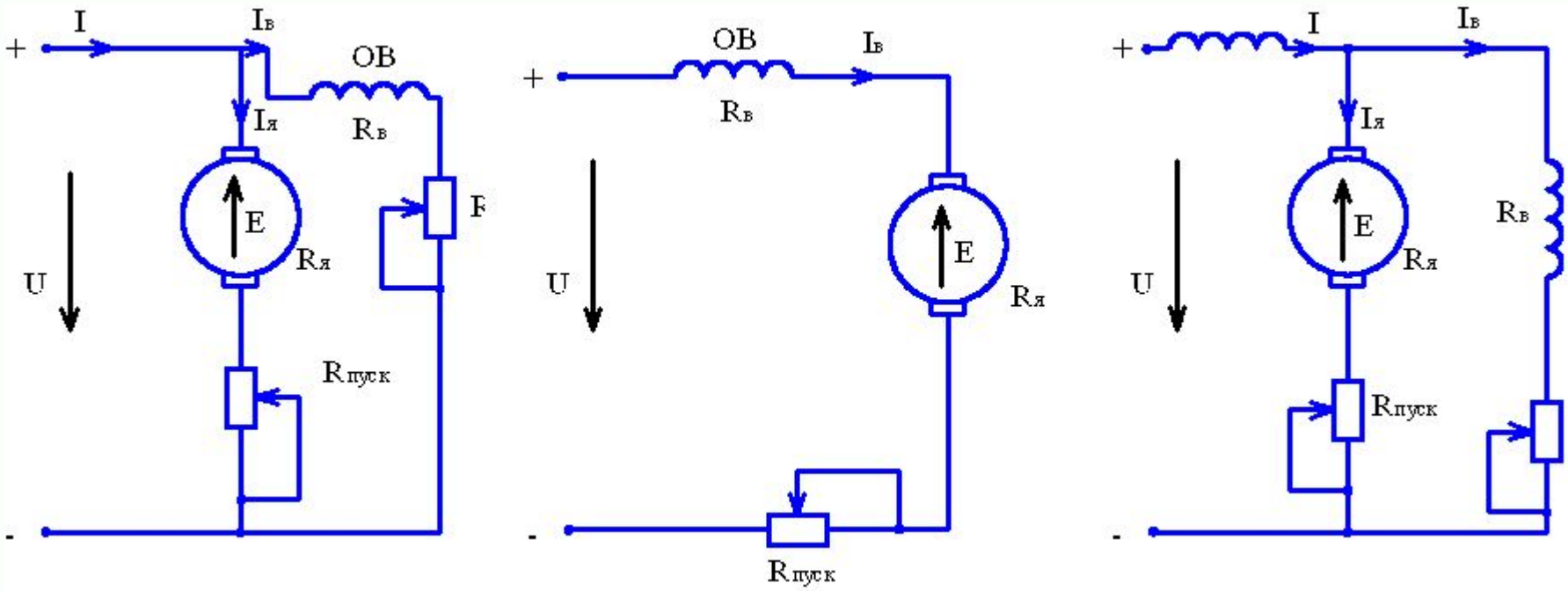


Рис. 6. Схемы включения двигателей постоянного тока:
а – с параллельным возбуждением; *б* – с последовательным; *в* – со смешанным

Магнитное поле машины постоянного тока
Магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме х.х. определяется суммой магнитных напряжений на участках магнитной цепи:

$$A_{âî} = \sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z} + 2F_{m} + F_{a} + F_{\ddot{y}} \quad (9)$$

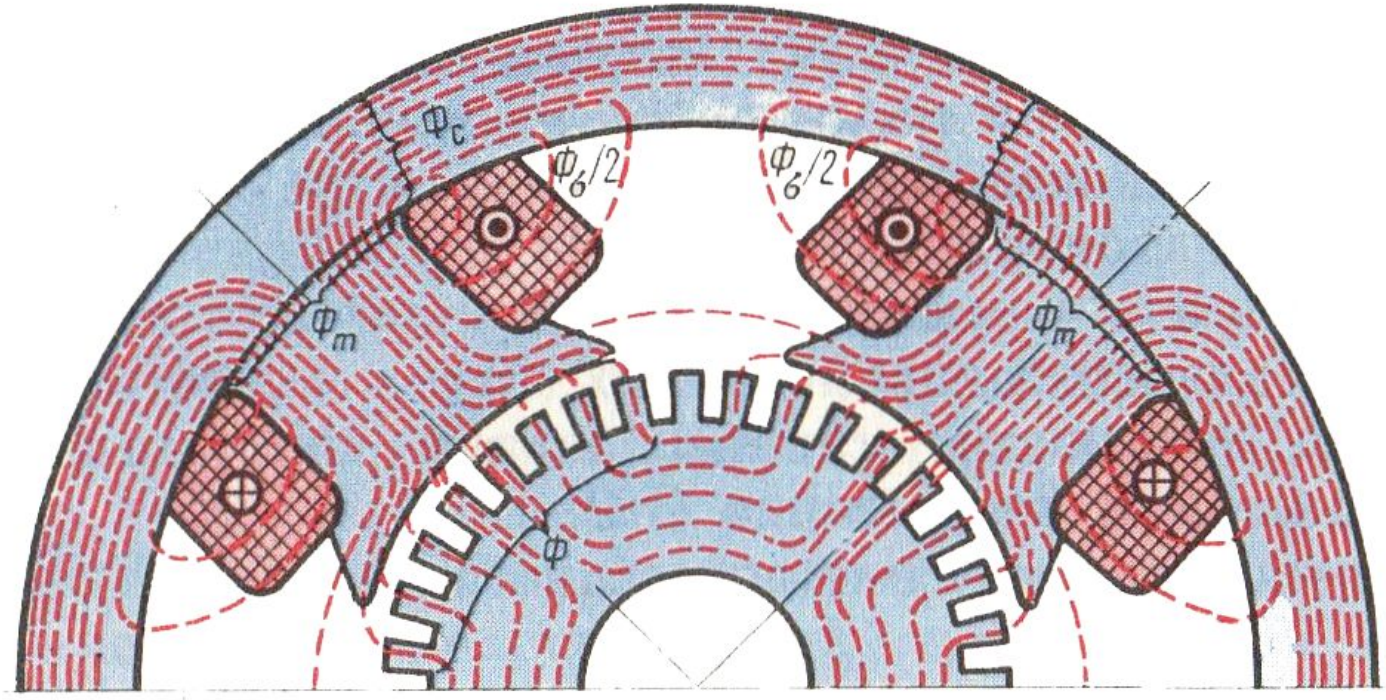


Рис. 7 Магнитное поле машины постоянного тока в режиме х.х.

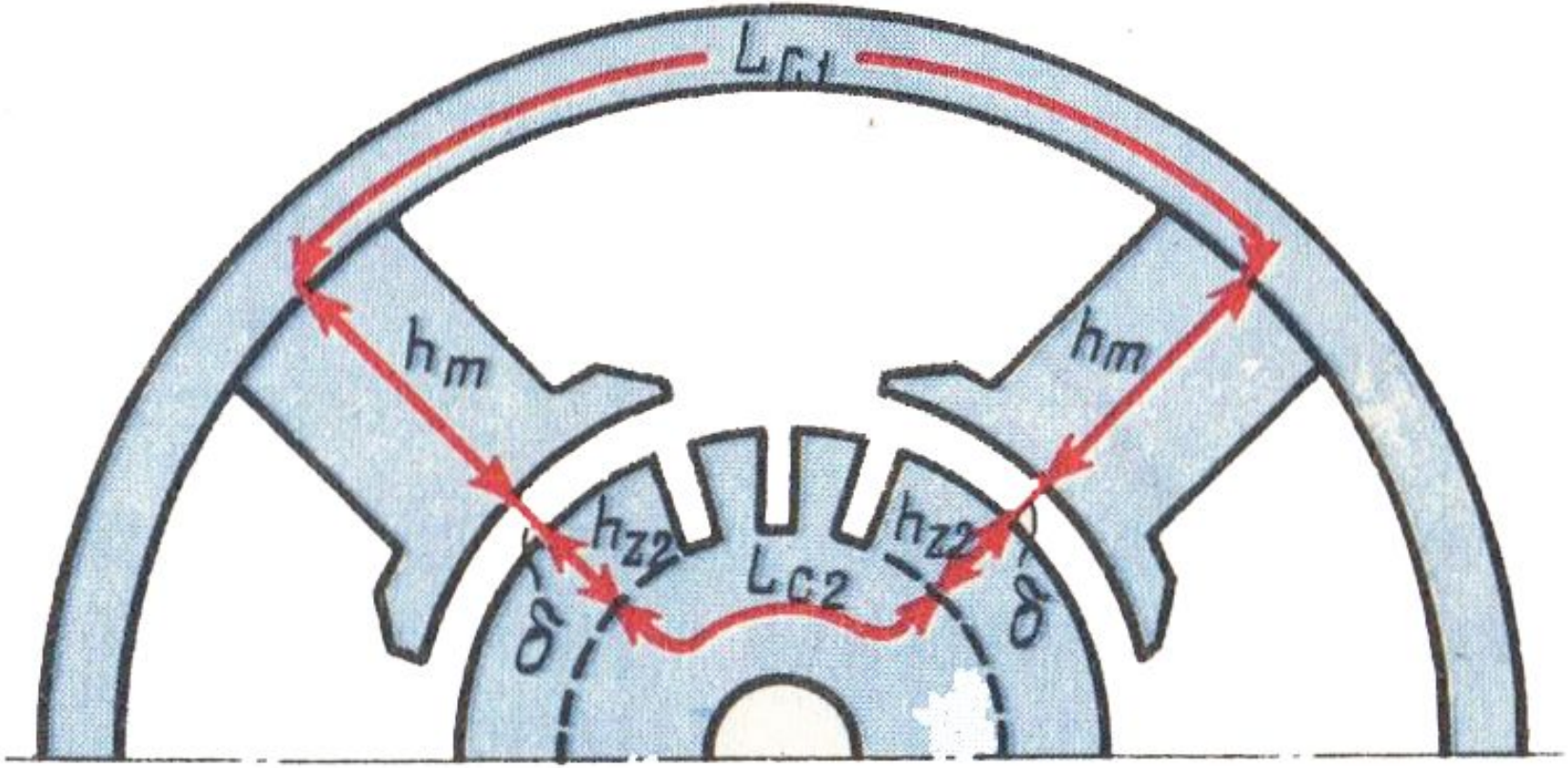
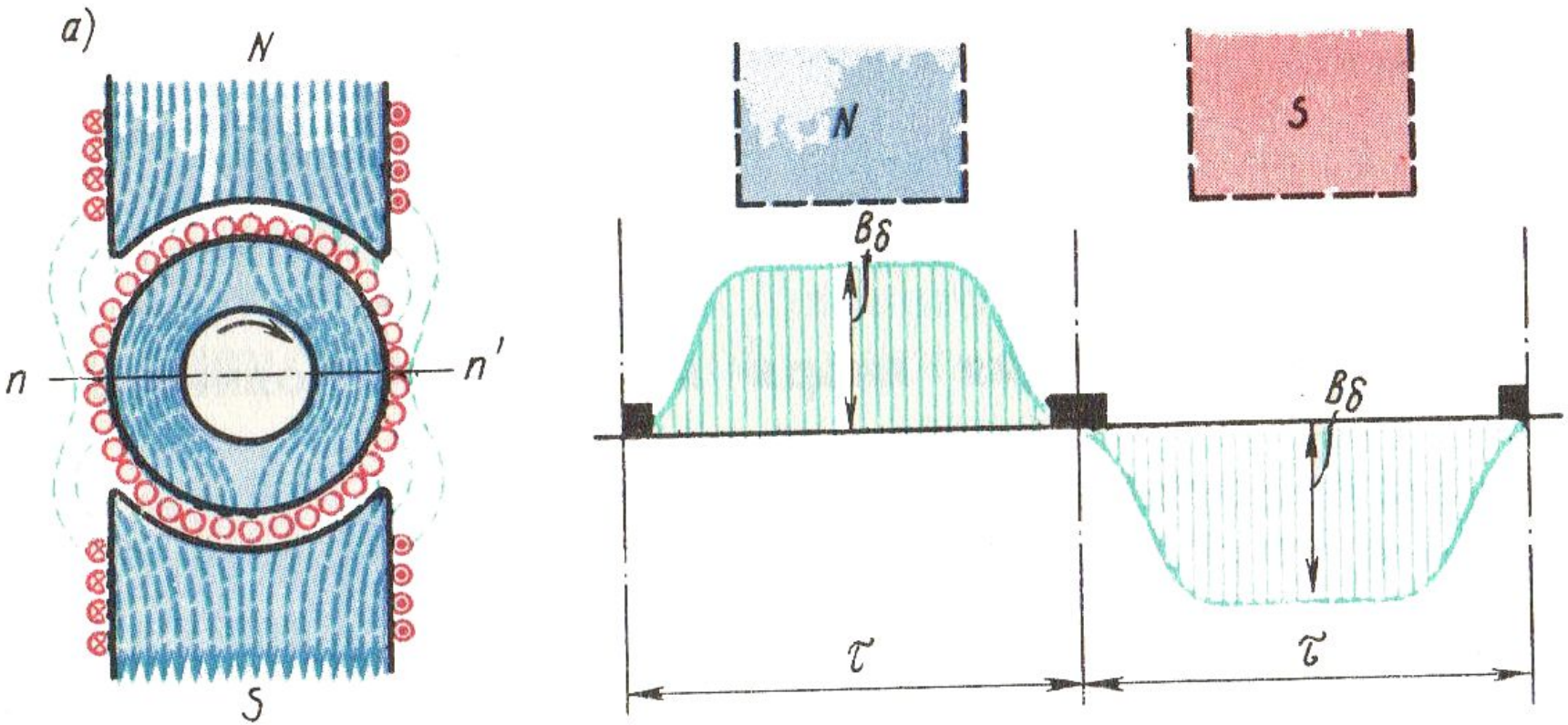


Рис. 8 Расчетный участок магнитной цепи четырехполюсной машины постоянного тока

Магнитное напряжение воздушного зазора (А)

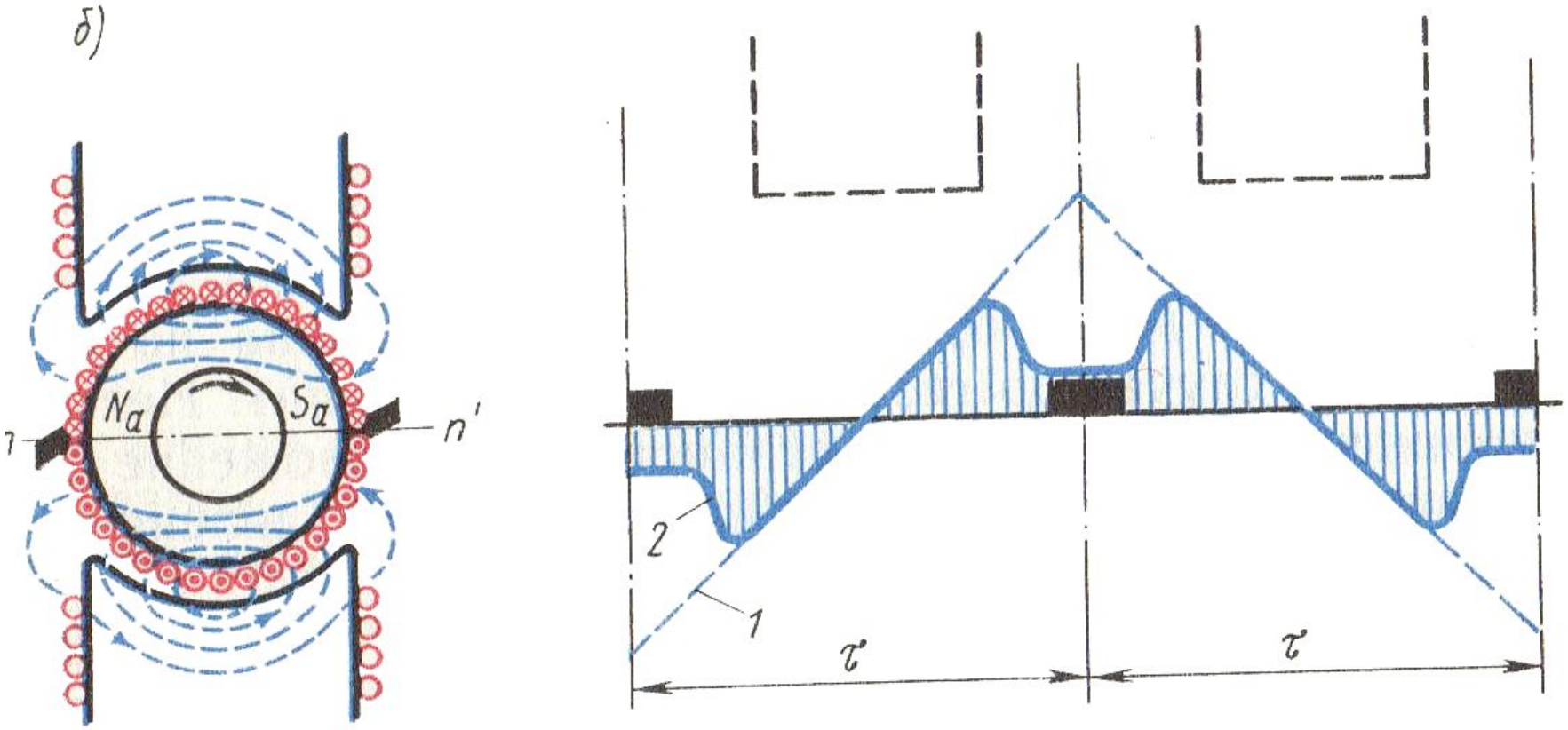
$$F_\delta = 0{,}8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^3 \quad (10)$$

Реакция якоря машины постоянного тока



Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 9, *а*).

Магнитное поле, созданное МДС*, будет иметь вид, представленный на рис. 9, *б*.



*МДС - магнитная система машины

Показано распределение магнитных силовых линий результирующего поля машины, работающей в генераторном режиме при вращении якоря по часовой стрелке.

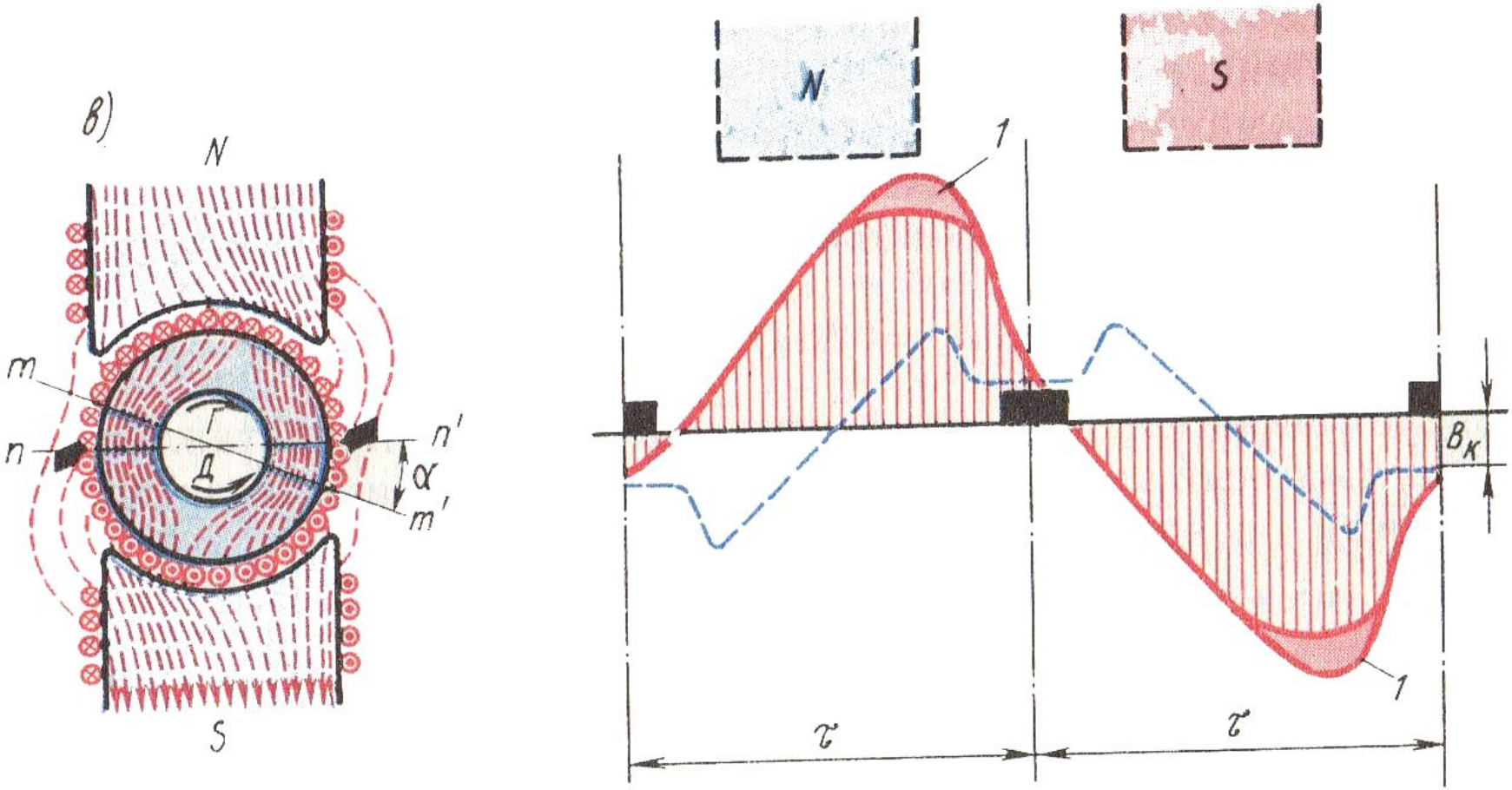


Рис. 9. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

Способы уменьшения вредного влияния реакции якоря

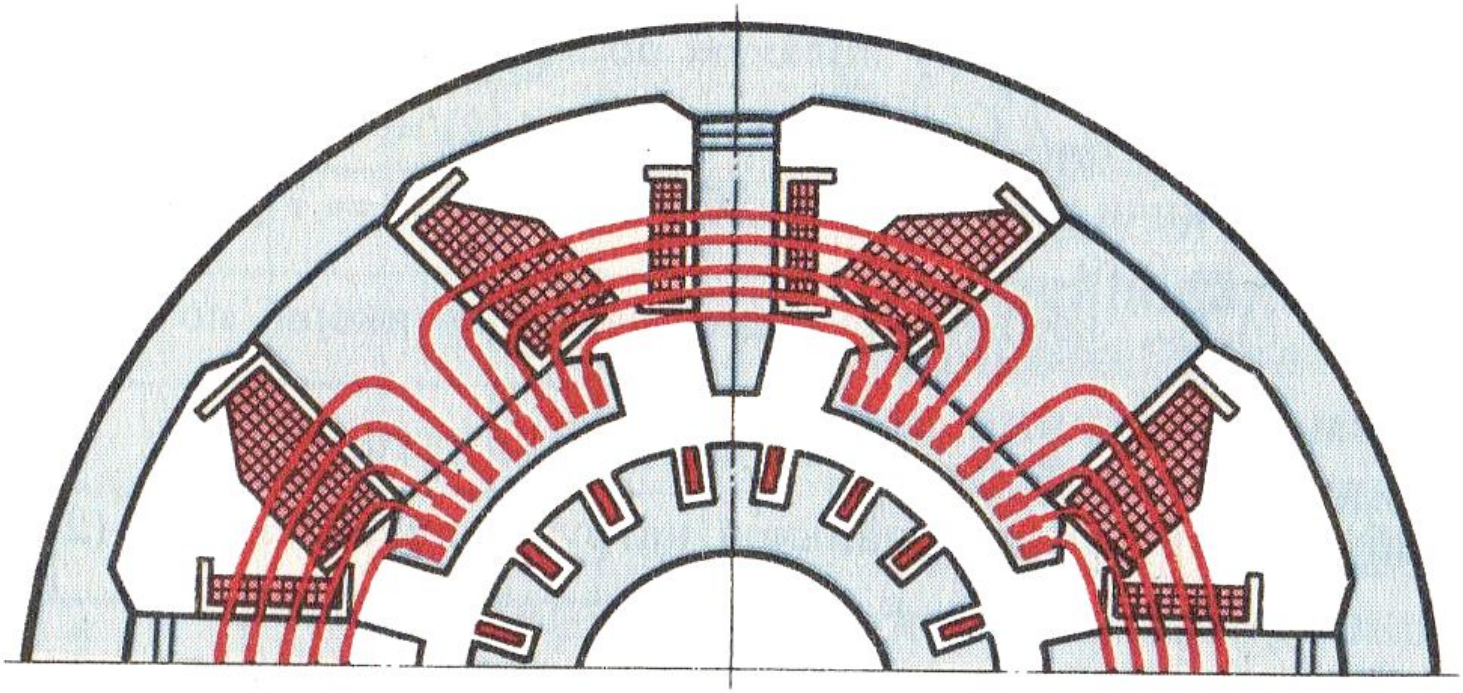


Рис. 10. Компенсационная обмотка

Способы возбуждения машин постоянного тока

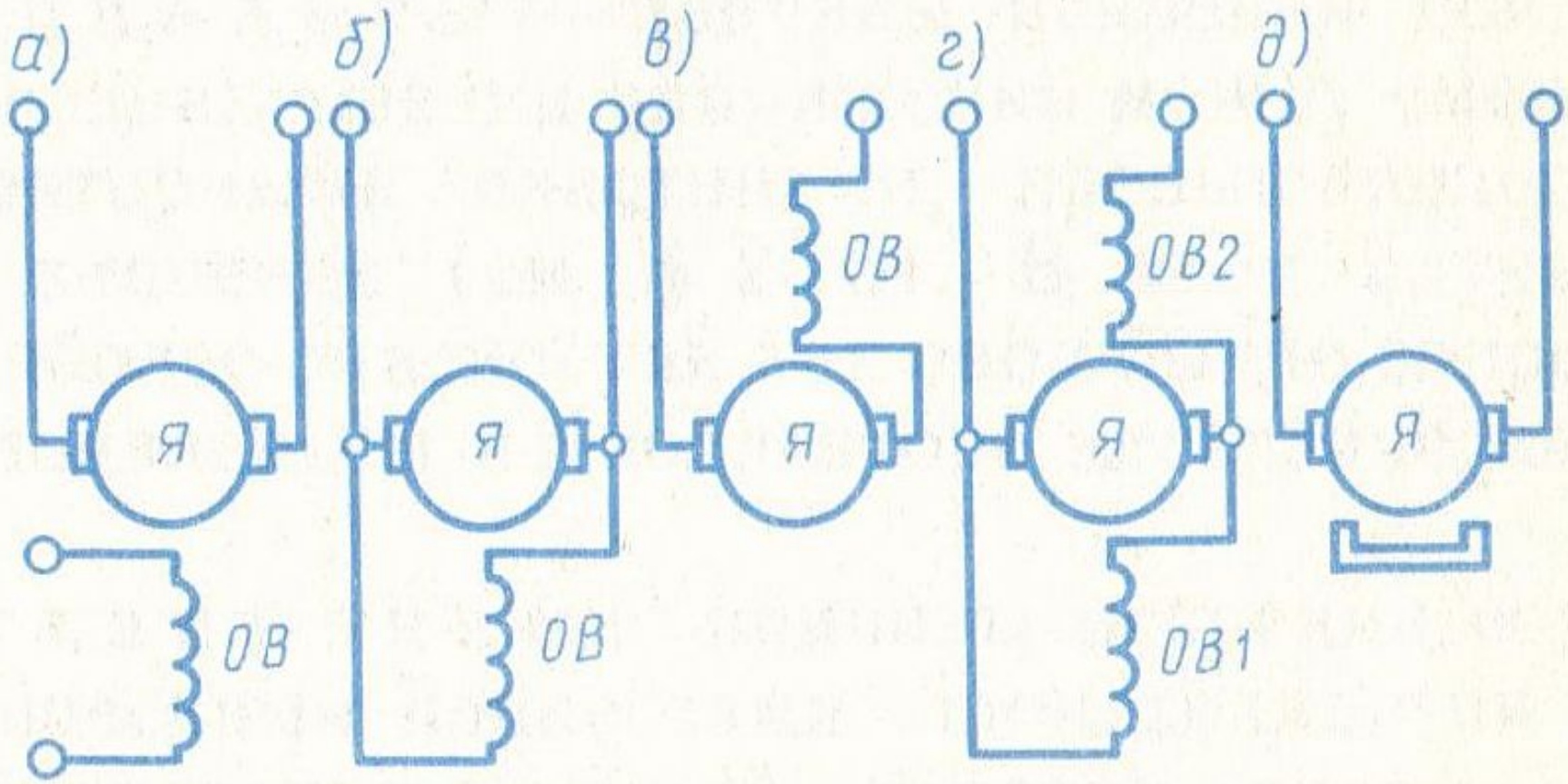


Рис. 11. Способы возбуждения машин постоянного тока

Генераторы постоянного тока и их основные характеристики

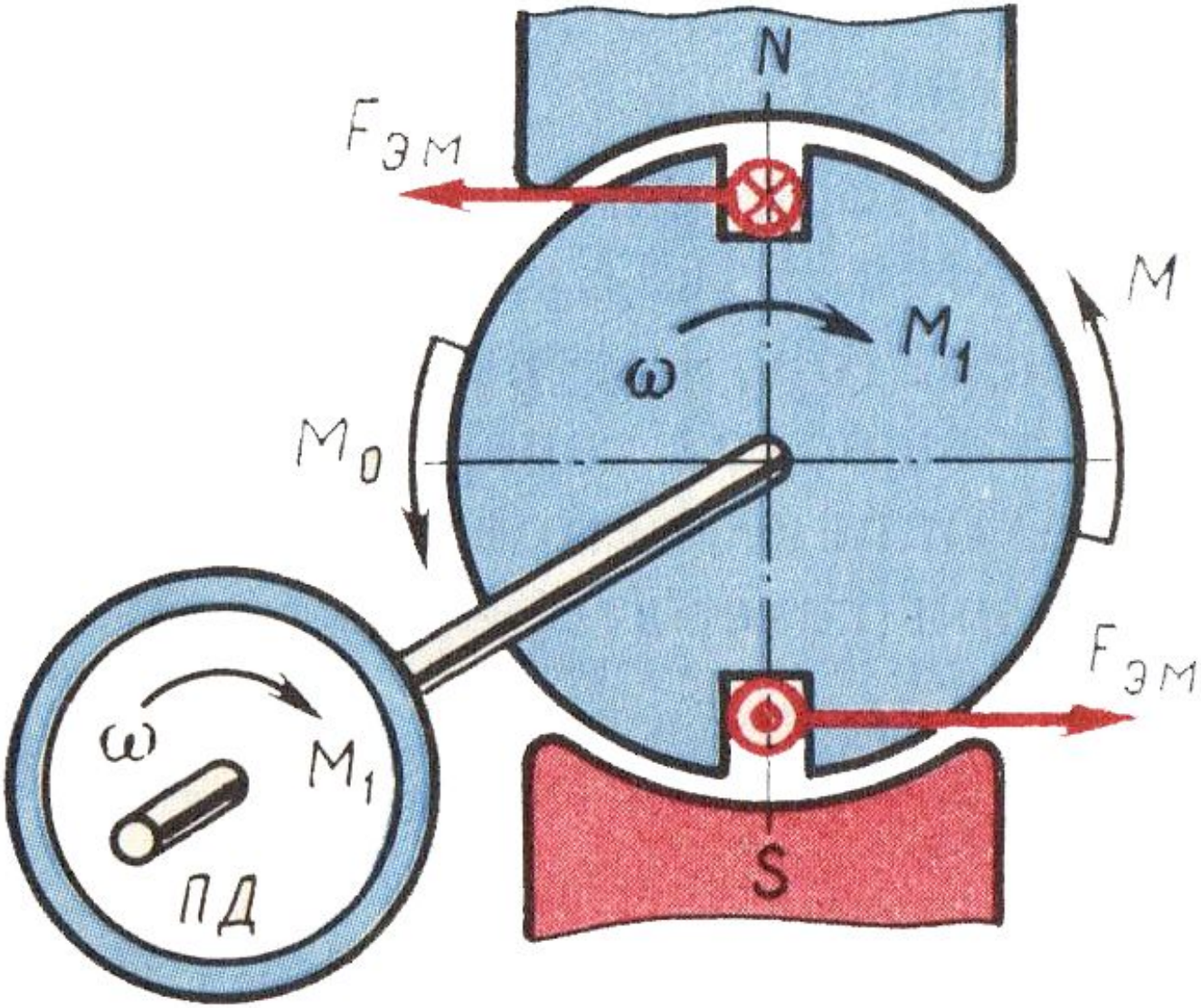


Рис. 12. Моменты, действующие в генераторе постоянного тока

Уравнение мощностей для генератора постоянного тока:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{эа} + P_{э.в} \quad (11)$$

Следовательно, *механическая мощность, развиваемая приводным двигателем P_1, преобразуется в генераторе в полезную электрическую мощность P_2, передаваемую нагрузке, и мощность, затрачиваемую на покрытие потерь (P_0+$P_{эа}$+ $P_{э.в}$).*

Генератор независимого возбуждения

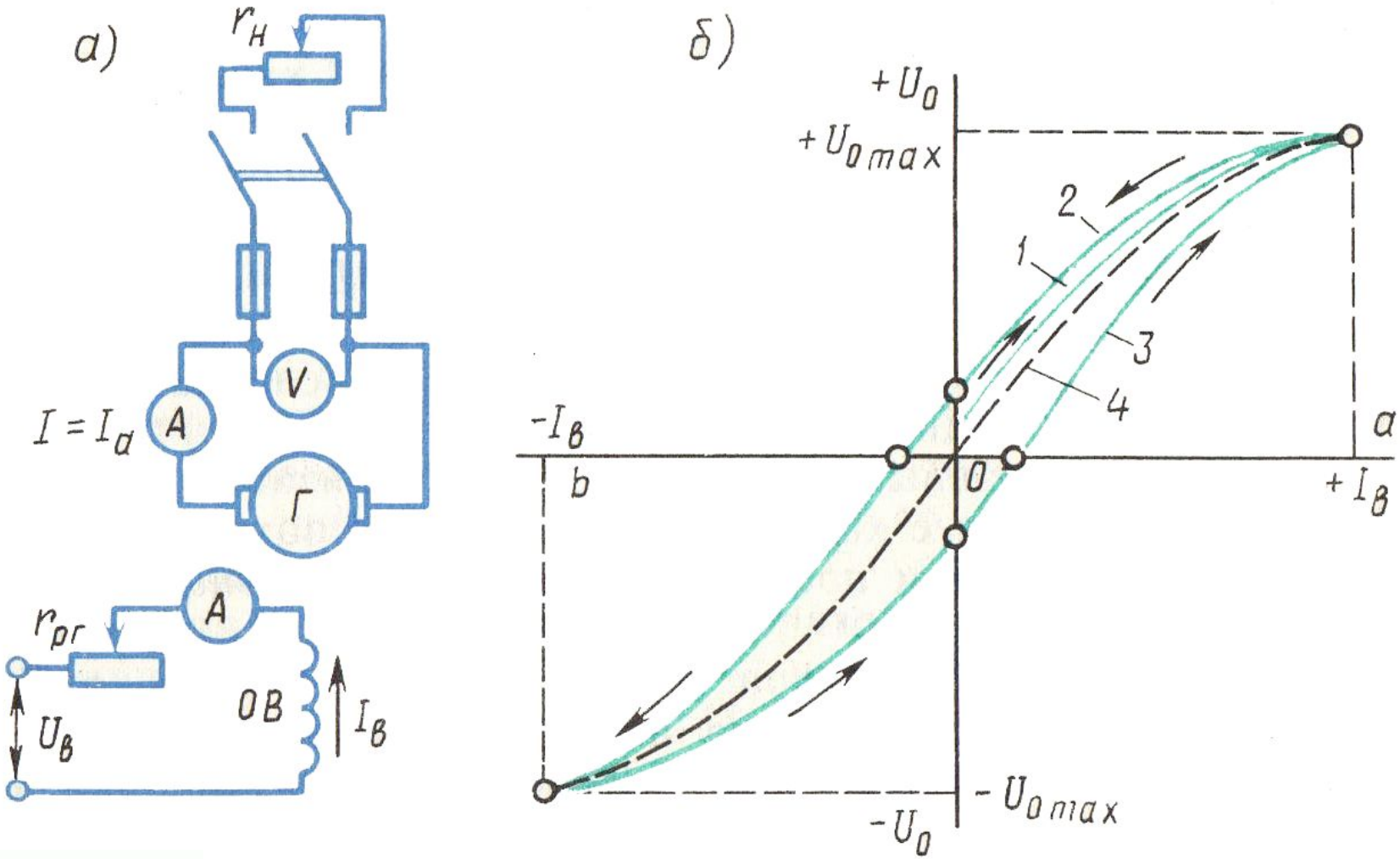


Рис. 13. Принципиальная схема (*а*) и характеристики х.х. (*б*) генератора независимого возбуждения

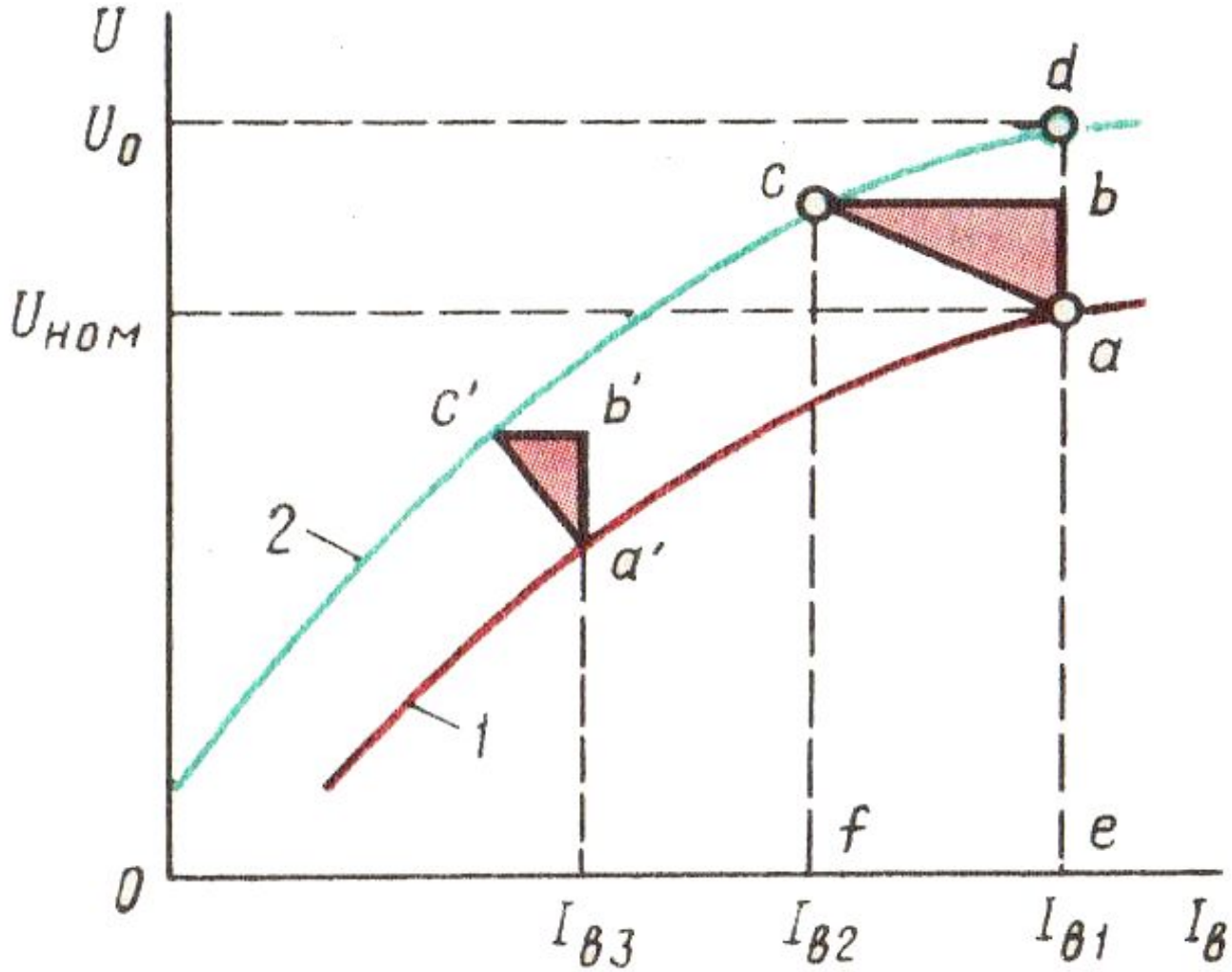


Рис. 14. Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения

Внешняя характеристика генератора.

Номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Обычно для генератора независимого возбуждения $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$.

Регулировочная характеристика генератора.

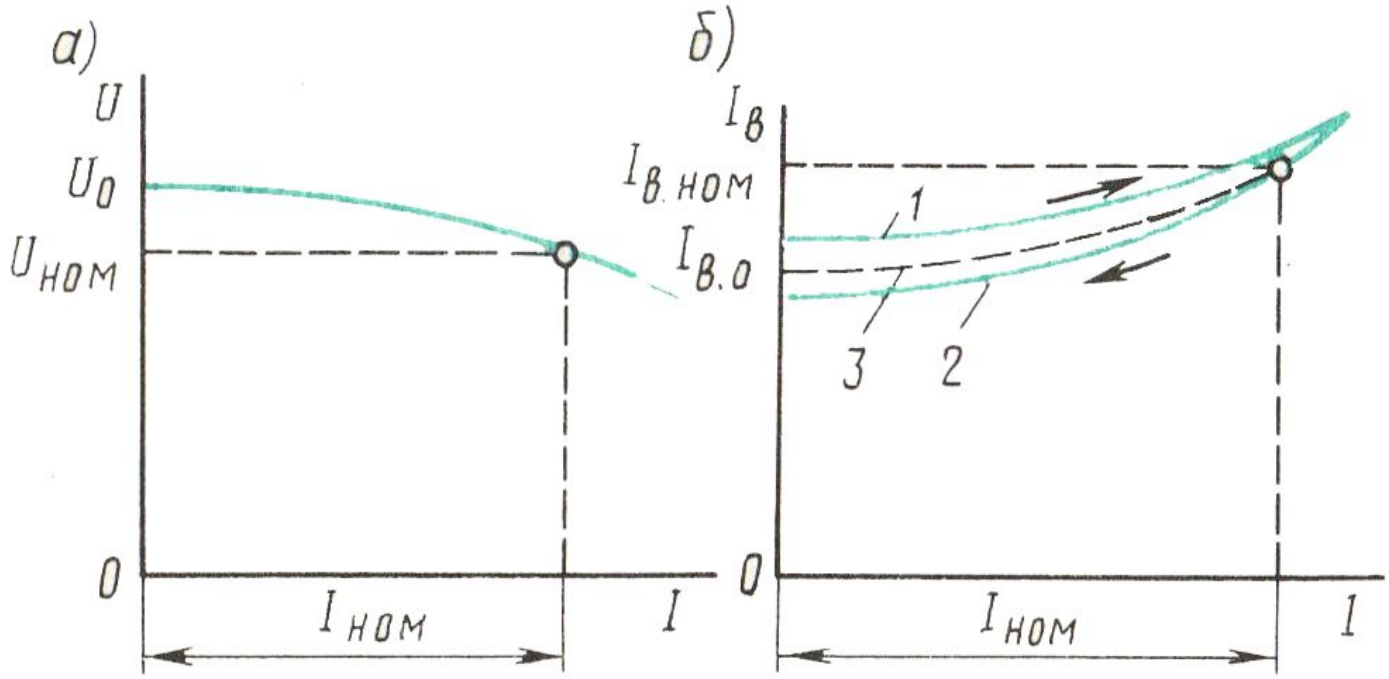


Рис. 15. Внешняя (*а*) и регулировочная (*б*) характеристики генератора независимого возбуждения

Генератор параллельного возбуждения

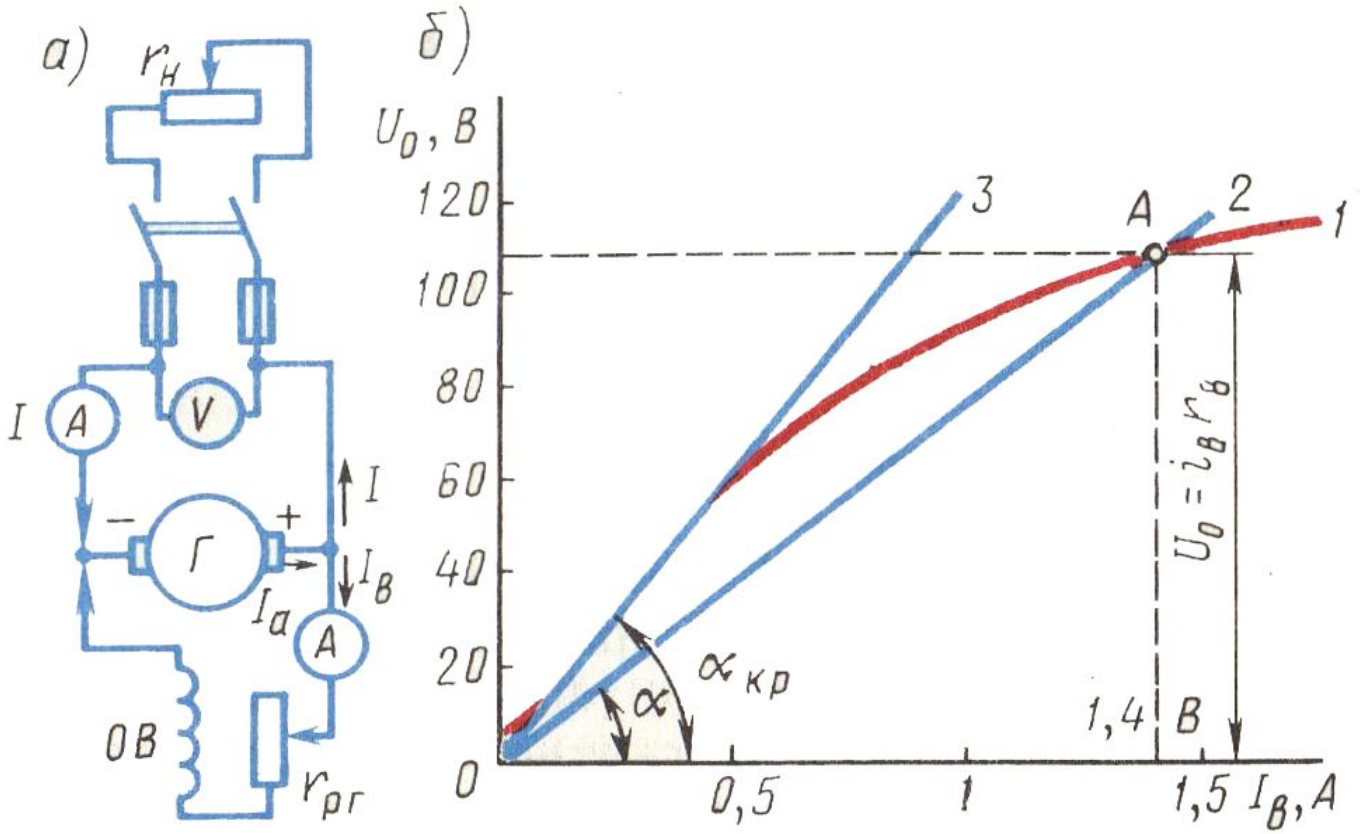


Рис. 16. Принципиальная схема (*а*) и характеристика х. х. (*б*) генератора параллельного возбуждения

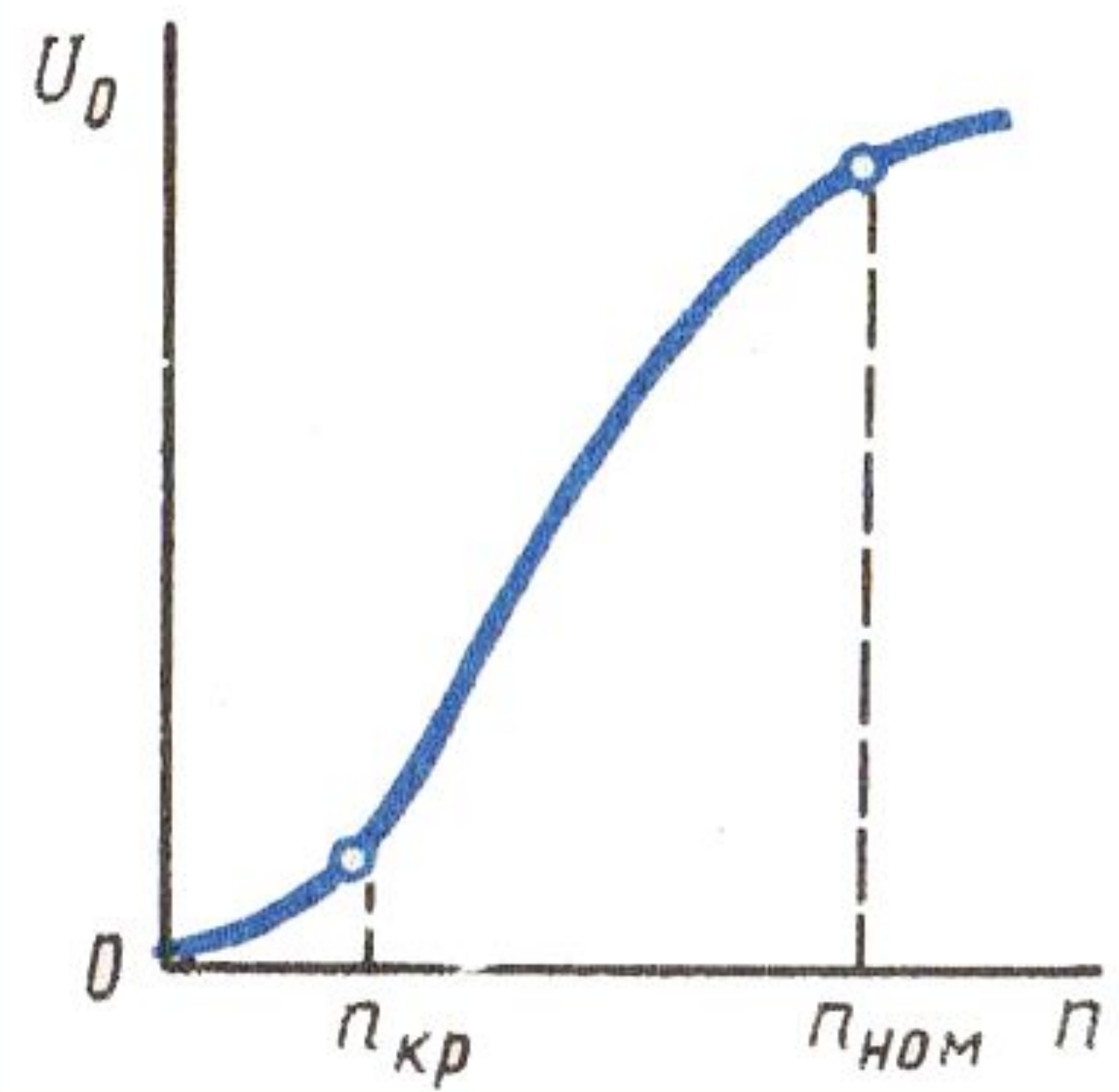


Рис. 17. Характеристика самовозбуждения

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения *1* (рис. 18) менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения.

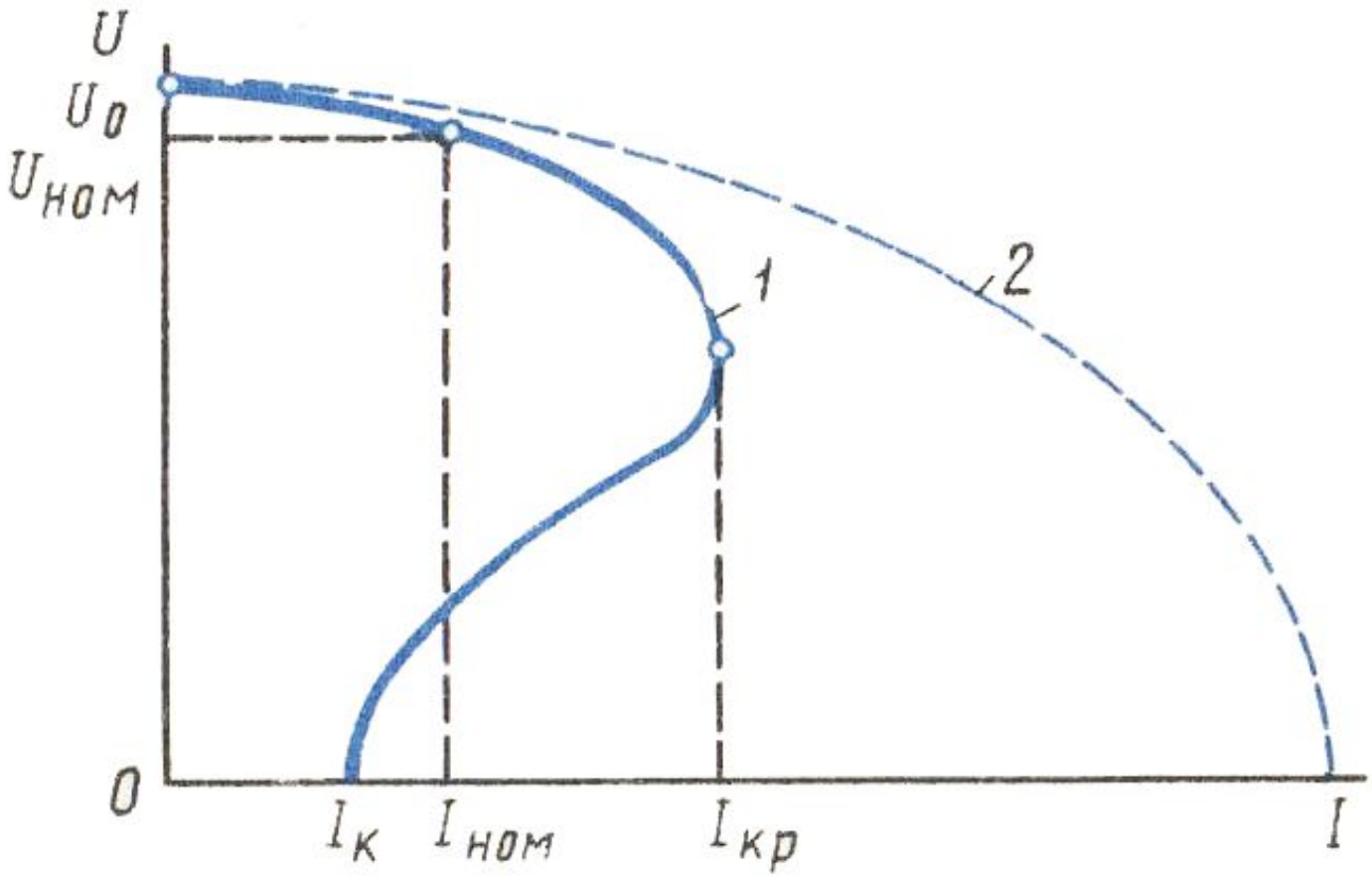


Рис. 18. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения

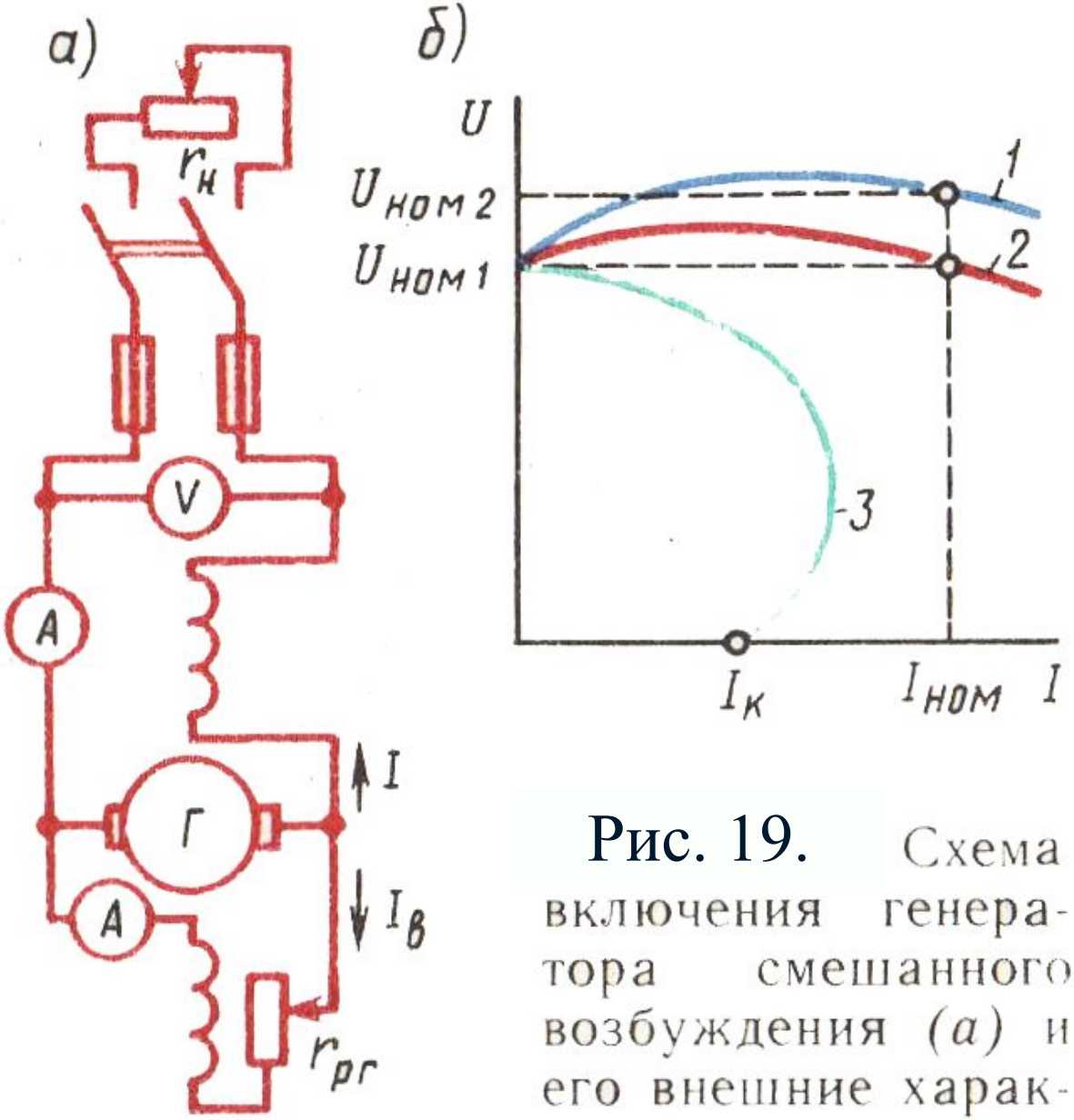


Рис. 19. Схема включения генератора смешанного возбуждения (*а*) и его внешние характеристики (*б*)

Коллекторные двигатели
Основные понятия

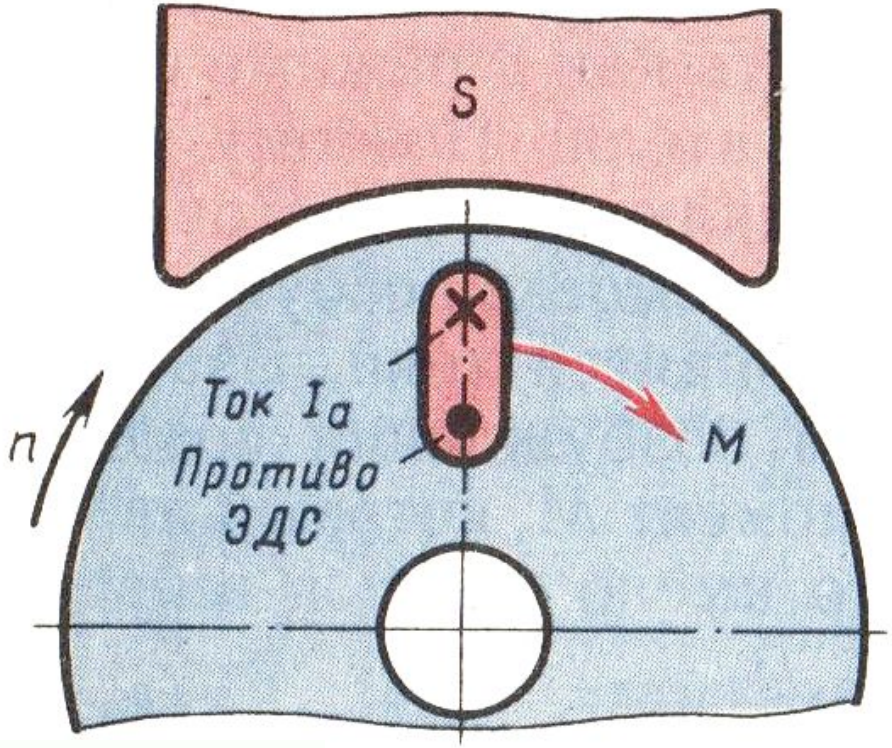


Рис. 20. Направление противо-ЭДС в обмотке якоря двигателя

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E_a + I_a \Sigma r \quad (13)$$

Уравнение мощности для цепи якоря:

$$UI_a = I_a^2 \Sigma r + E_a I_a, \quad (14)$$

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \Sigma r. \quad (15)$$

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением нагрузки на вал двигателя, т. е. с увеличением электромагнитного момента M, возрастает мощность в цепи обмотки якоря UI_a, т. е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным (U = const), то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a.

В соответствии с формулой ЭДС $E_a = c_e \Phi n$ частота вращения двигателя (об/мин)

$$n = E_a/(c_e \Phi). \quad (16)$$

Подставив значение E_a из (29.1), получим (об/мин)

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi}, \quad (17)$$

т. е. *частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения.*

Пуск двигателя

Пусковой ток

$$I'_а = U/\Sigma r. \quad (18)$$

Пусковой ток якоря при полном сопротивлении пускового реостата

$$I_п = \frac{U - E_а}{\Sigma r + r_{п.р}}. \quad (19)$$

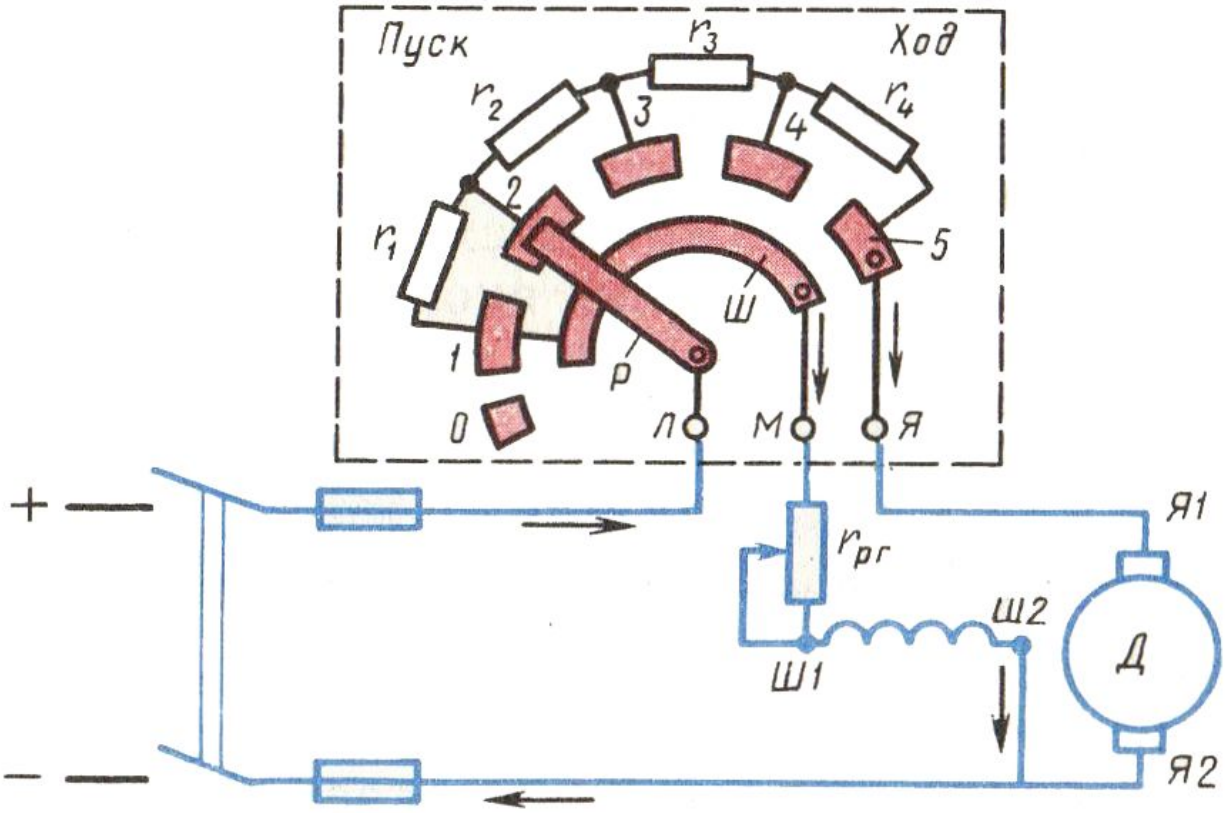


Рис. 21. Схема включения пускового реостата

Двигатель параллельного возбуждения

Номинальное изменение частоты вращения:

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100, \quad (20)$$

Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n_{ном} = 2 \div 8\%$

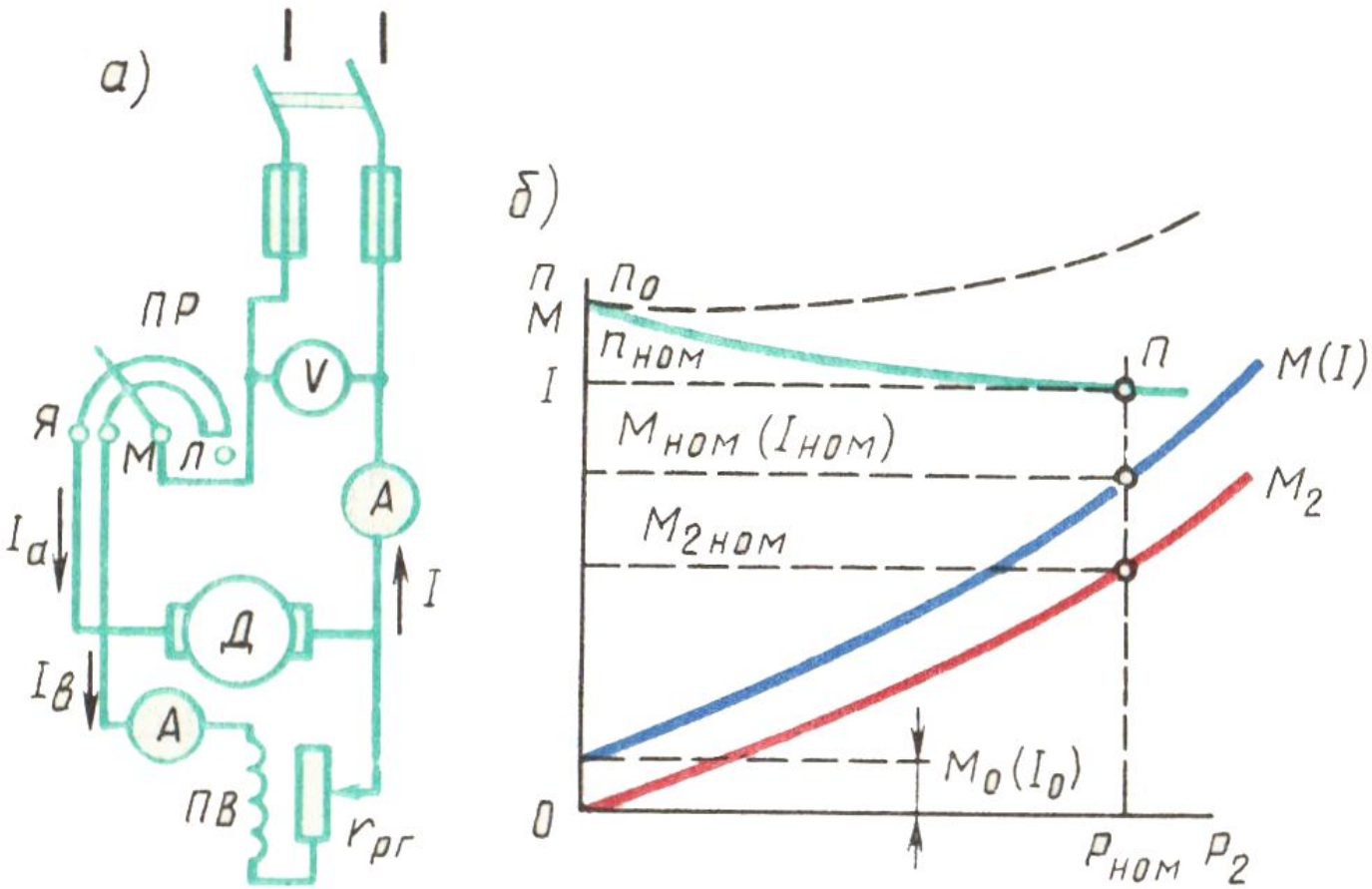


Рис. 22. Схема двигателя параллельного возбуждения (*а*) и его рабочие характеристики (*б*)

Для получения аналитического выражения *механической характеристики n = f (M)* преобразуем выражение (29.5):

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \Sigma r}{c_e \Phi}; \quad (21)$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \Sigma r}{c_e c_м \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (22)$$

Ниже представлены *механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:*

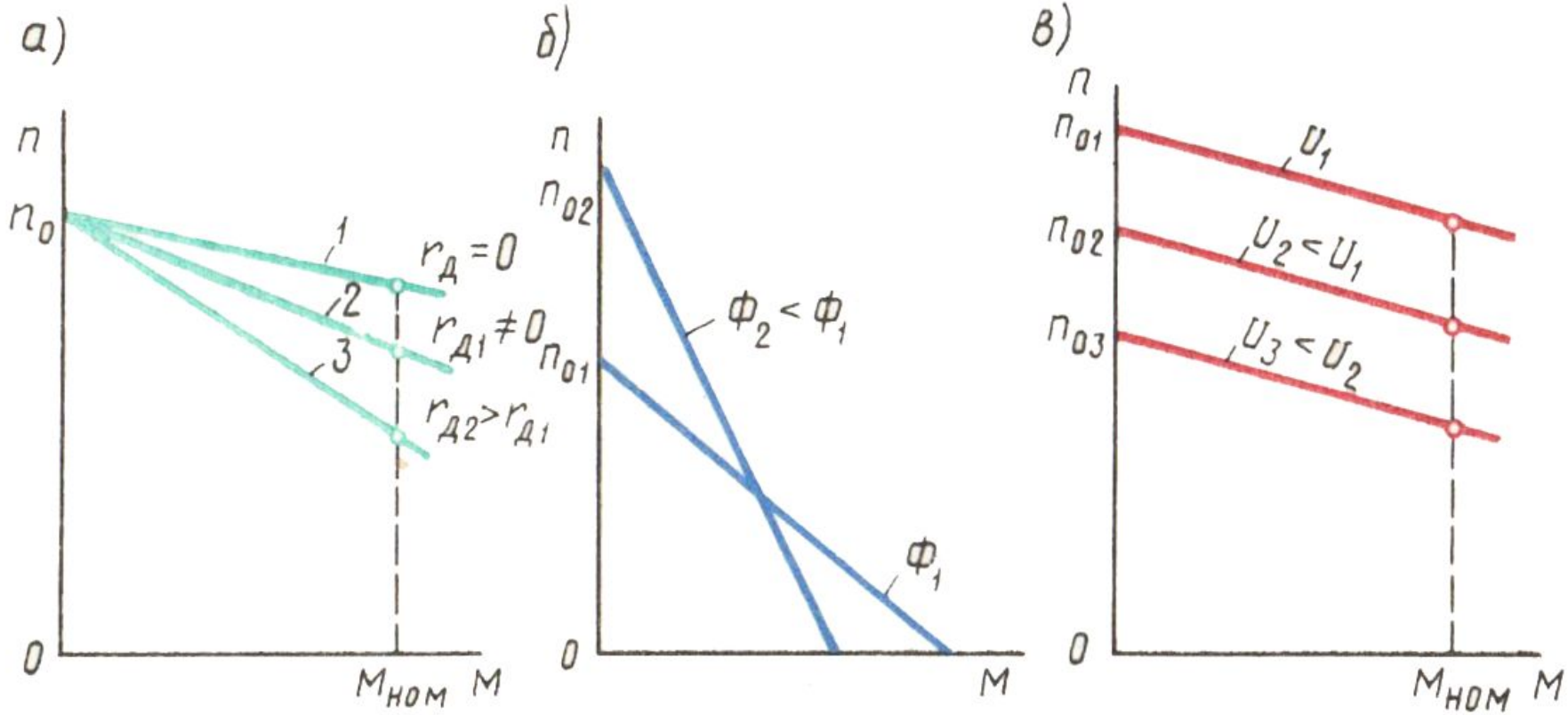


Рис. 23. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:

а – при введении в цепь якоря добавочного сопротивления;

б – при изменении основного магнитного потока;

в – при изменении напряжения в цепи якоря

Двигатель последовательного возбуждения

Электромагнитный момент:

$$M = c_M k_\Phi I_a I_a = c'_M I_a^2. \quad (23)$$

Формула частоты вращения

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e k_\Phi I_a} = \frac{U - I_a \Sigma r}{c'_e I_a}. \quad (24)$$

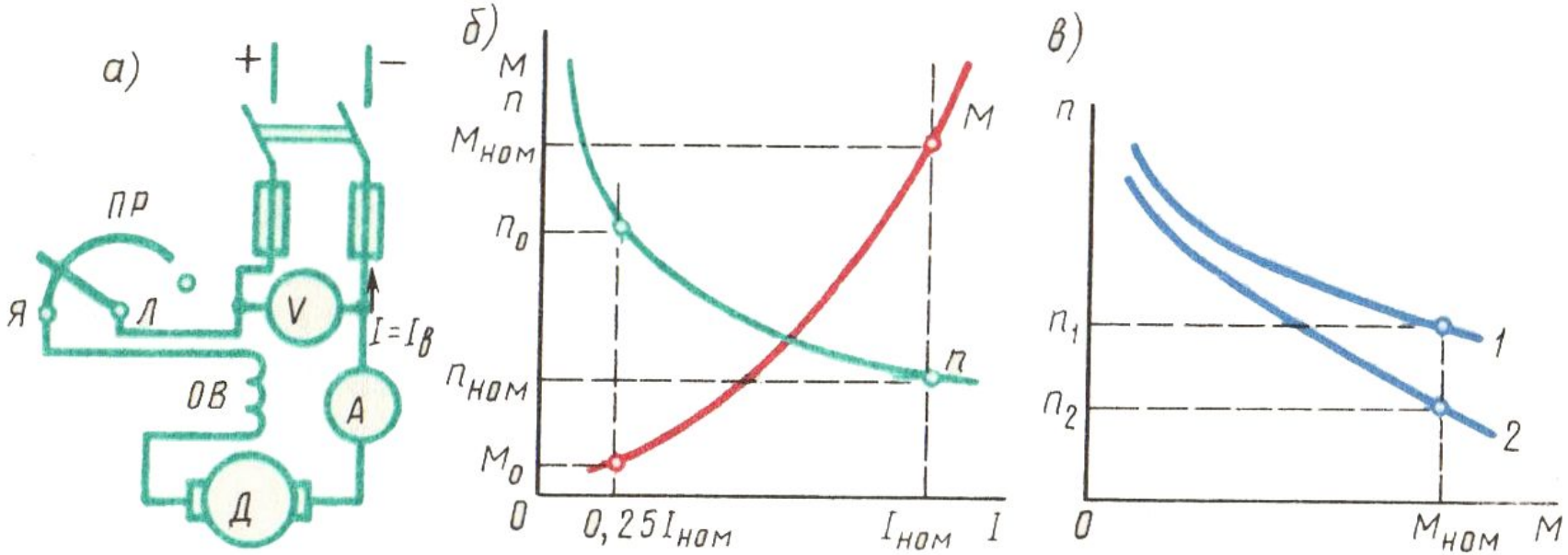


Рис. 24. Двигатель последовательного возбуждения:
а – принципиальная схема;
б – рабочие характеристики;
в – механические характеристики;
1 – естественная характеристика;
2 – искусственная характеристика

Номинальное изменение частоты вращения двигателя последовательного возбуждения

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{[0,25]} - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\%, \quad (25)$$

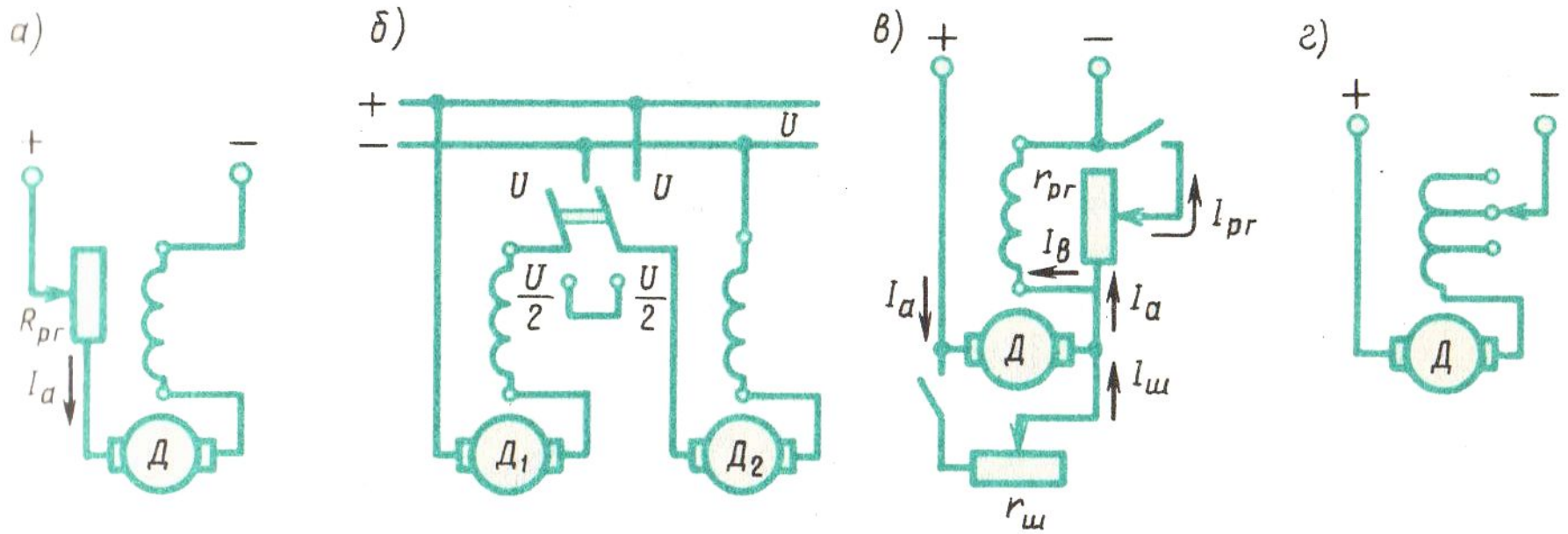


Рис. 25. Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения

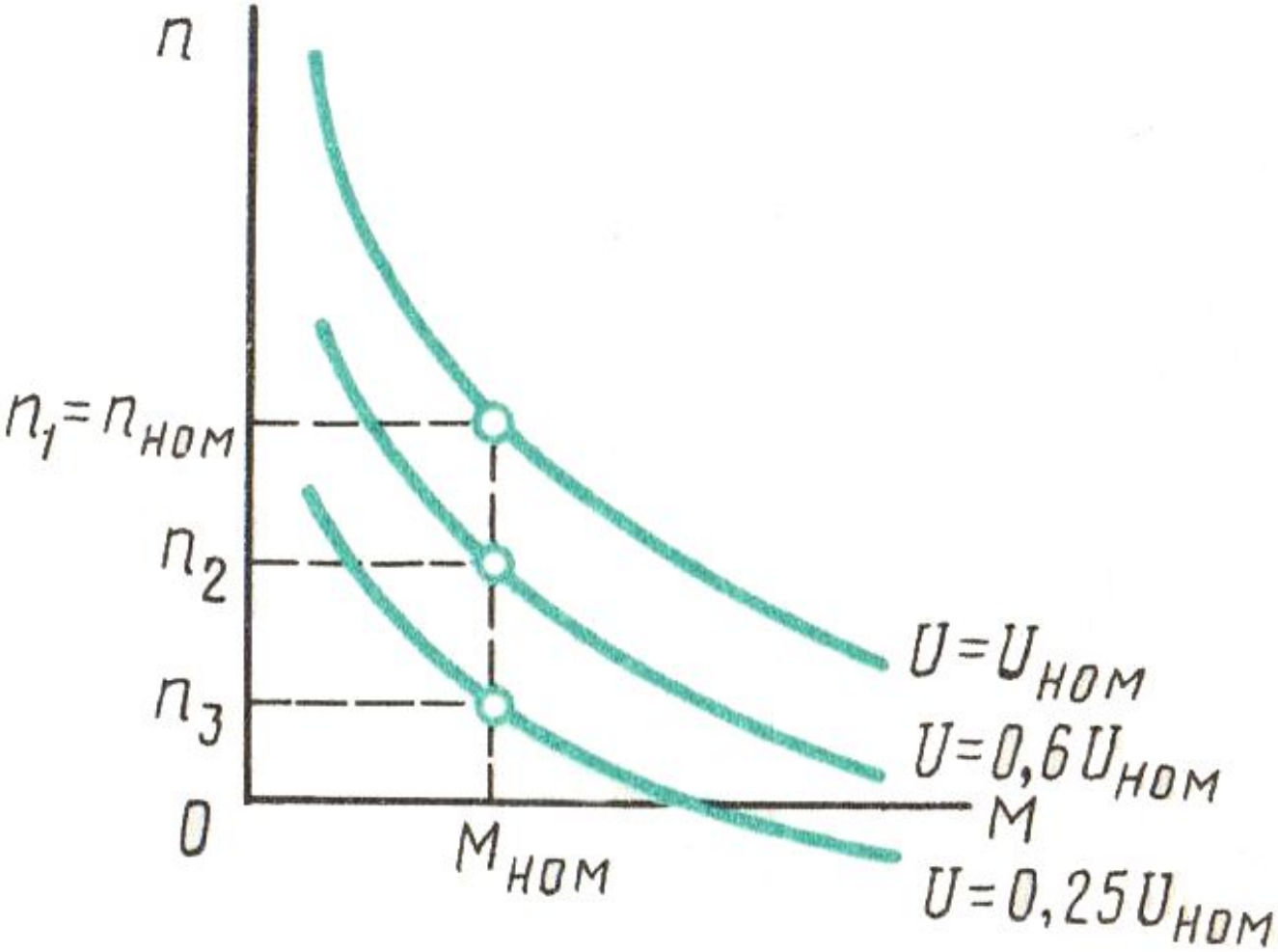


Рис. 26. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при изменении подводимого напряжения

Двигатель смешанного возбуждения

Частота вращения этого двигателя

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e\left(\Phi_1 \pm \Phi_2\right)}, \quad (26)$$

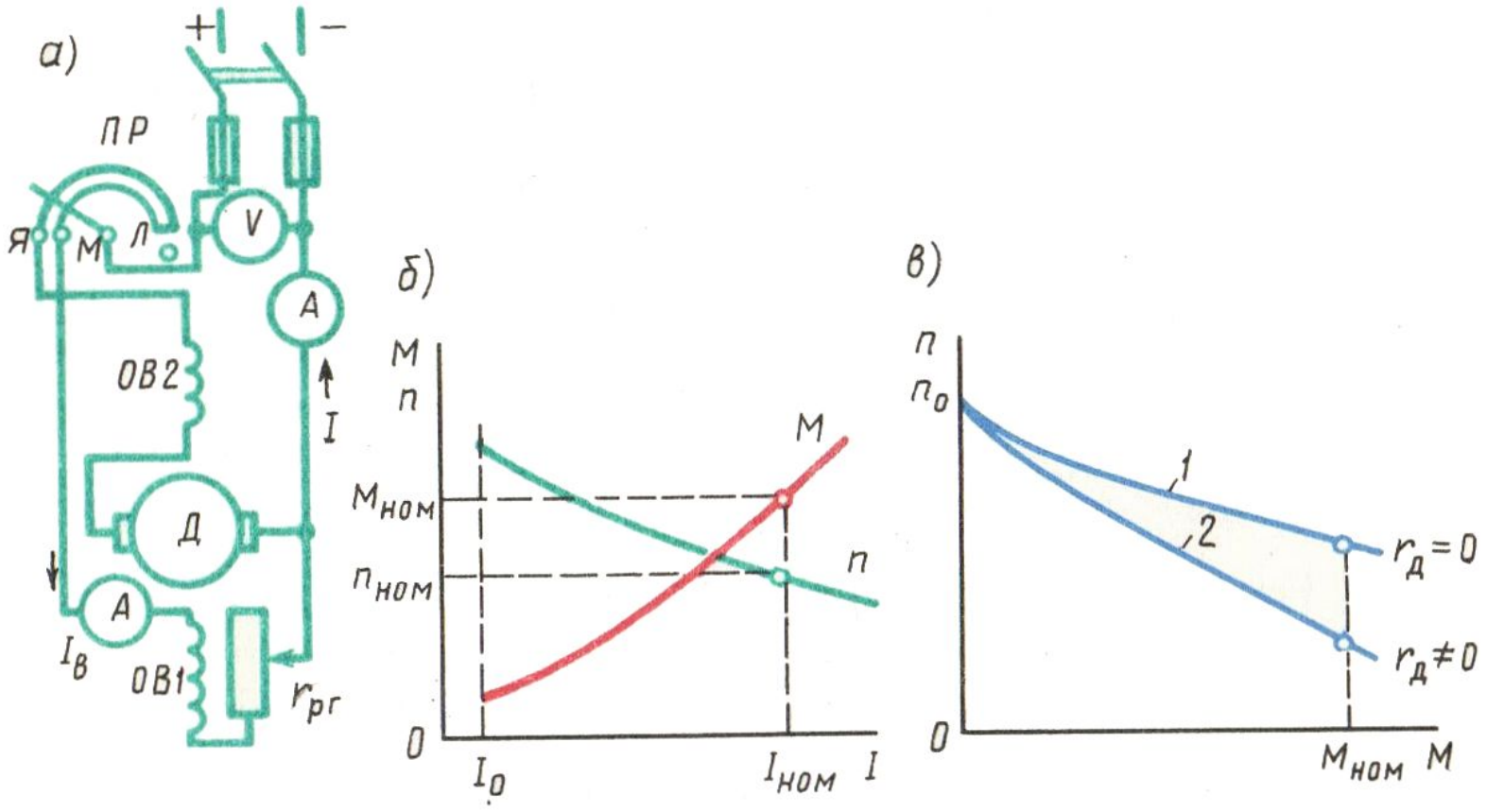


Рис. 26. Схема двигателя смешанного возбуждения (*а*), его рабочие (*б*) и механические (*в*) характеристики

Мощность (Вт) **на выходе машины** (полезная мощность):

для генератора (электрическая мощность)

$$P_{2ген} = UI; \quad (27)$$

для двигателя (механическая мощность)

$$P_{2дв} = 0{,}105 M_2 n. \quad (28)$$

Коэффициент полезного действия.

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (29)$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\Sigma P = P_м + P_{мех} + P_{э.в} + P_{эа} + P_{эщ} + P_д, \quad (30)$$

можно подсчитать КПД машины по одной из следующих формул:

для генератора

$$\eta_г = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI + \Sigma P}; \quad (31)$$

для двигателя

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \Sigma P}{UI} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI}. \quad (32)$$

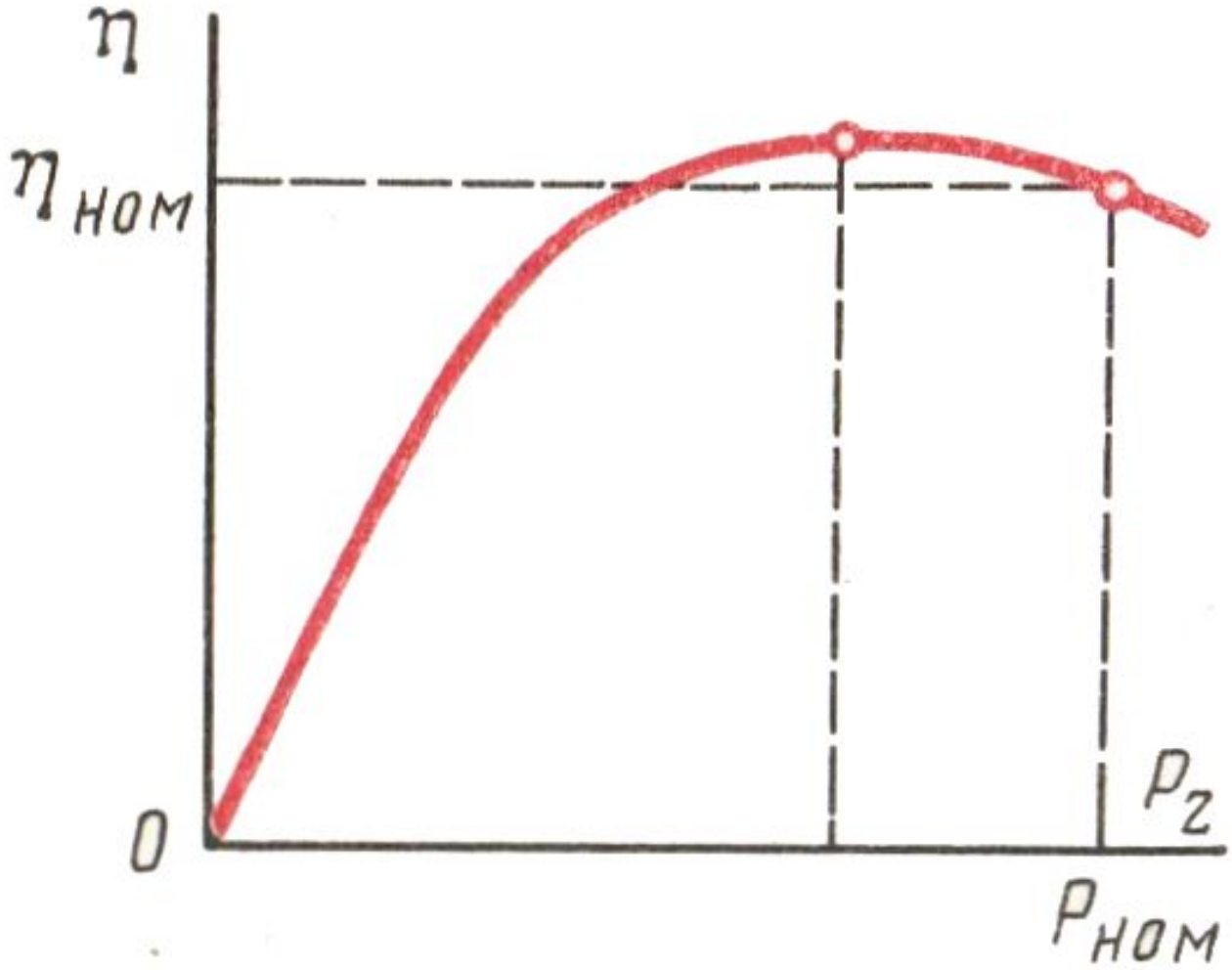


Рис. 28. Зависимость $\eta = f(P_2)$