

СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
АВТОМОБИЛЕЙ

# **1 Общие сведения о системах электроснабжения**

## **1.1 Назначение и состав систем электроснабжения**

Система электроснабжения служит для питания бортовых электропотребителей электроэнергией. В ее состав входят такие элементы, как генератор, регулятор напряжения, аккумуляторная батарея, а также коммутационная, защитная и сигнальная аппаратура.

Генератор служит для преобразования механической энергии вращения двигателя внутреннего сгорания в электрическую энергию и питания ею электропотребителей. Генератор является основным источником электроэнергии на борту.

Регулятор напряжения служит для поддержания постоянным напряжения на выходе генератора. Генератор в комплекте с регулятором напряжения принято называть генераторной установкой.

Аккумуляторная батарея в системе электроснабжения выполняет следующие функции:

- является автономным источником электроэнергии на борту (она питает электропотребители и осуществлять пуск двигателя внутреннего сгорания при отсутствии других источников электроэнергии);
- является резервным источником электроэнергии на борту (она снабжает электроэнергией потребители совместно с генератором в случае, если генератор вырабатывает недостаточное количество электроэнергии);
- является аварийным источником (при отказе генератора она берет на себя питание всех электропотребителей);
- является фильтром (улучшает качество электроэнергии, вырабатываемой генератором).

Система электроснабжения характеризуется рядом параметров:

- номинальное напряжение сети и номинальное напряжение генератора;
- мощность генератора;
- диапазон изменения частоты вращения;
- передаточное отношение привода генератора;
- емкость аккумуляторной батареи.

Номинальное напряжение сети имеет следующие величины: 6 В (используется на мотоциклах), 12 В (применяется на автомобилях с карбюраторными двигателями), 24 В (используется на автомобилях с дизельными двигателями). В перспективе на автомобилях с большой мощностью потребителей напряжение достигнет 36 В. На некоторых автомобилях с дизельными двигателями (например, ЗИЛ) и тракторах используются системы электроснабжения на два уровня напряжения : 12 и 24 В: 12 В- для питания основных электропотребителей и 24 В- для запуска двигателя электростартером. Номинальные напряжения генератора бывают следующей величины: 7В, 14В, 28В, 42 В, что соответствует номинальным напряжениям сети 6В, 12В, 24В, 36 В соответственно. Мощность генераторов в настоящее время может достигать 4 кВт.

Диапазон изменения частоты вращения автомобильных генераторов составляет- 1:12, а тракторных генераторов- 1:4.

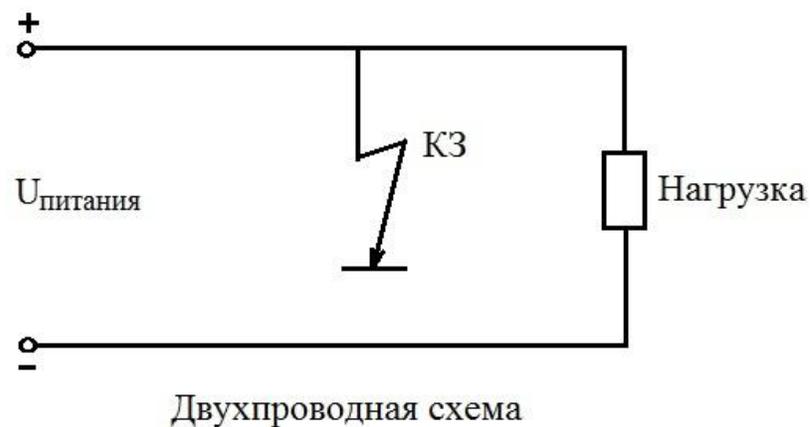
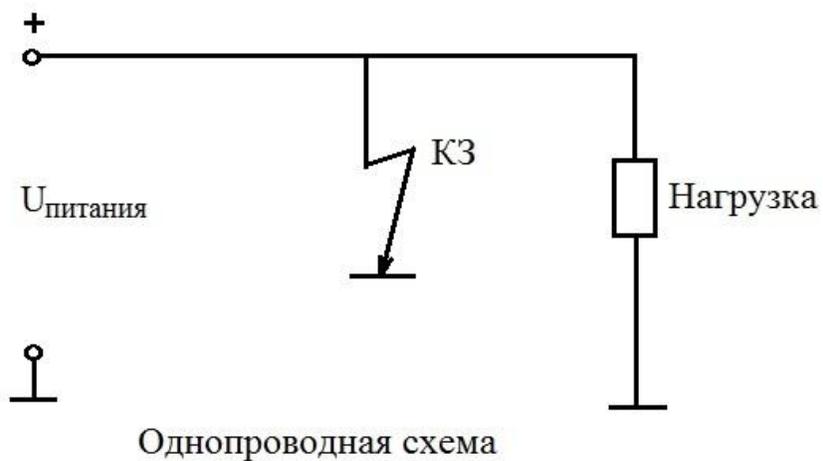
Передаточное отношение привода генератора в настоящее время может достигать-3. Это значит, что в предельном варианте частота вращения генератора может в три раза превосходить частоту вращения коленчатого вала двигателя.

Емкость аккумуляторной батареи в наше время находится в диапазоне от 44 до 190 А·ч.

## **1.2 Виды электроэнергии на борту**

В основном на борту автомобилей имеет место постоянный ток. В отдельных случаях используется переменный ток (например, на легких мотоциклах, на которых отсутствует аккумуляторная батарея). Иногда переменный и постоянный ток используют совместно (когда некоторые электропотребители работают на переменном токе лучше, чем на постоянном).

Питание потребителей электроэнергии в основном осуществляется по однопроводной схеме. В этом случае роль второго провода, соединяющего электропотребитель с минусовым выводом генератора, выполняют металлические элементы конструкции автомобиля. Некоторые ответственные потребители электроэнергии подключены к источнику электроэнергии по двухпроводной схеме.



Уровень напряжения на борту автомобиля зависит от количества потребителей (то есть от их общей мощности). Чем выше уровень напряжения на борту, тем при одной и той же мощности потребителей по проводам протекает электрический ток меньшей величины. Для меньшего по величине тока требуются провода меньшего сечения и веса. Поэтому при росте мощности потребителей на борту используется больший уровень напряжения.

$$\uparrow P_{\text{нагр}} = U_{\text{ном}} I_{\text{нагр}} \uparrow$$

$$\uparrow I_{\text{нагр}} = \uparrow S_{\text{провода}} j_{\text{доп}}$$

$$\uparrow S_{\text{провода}} = \uparrow I_{\text{нагр}} \cdot l_{\text{провода}}$$

$P_{\text{нагр}}$  - мощность потребителей

$U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение

$I_{\text{нагр}}$  - ток нагрузки

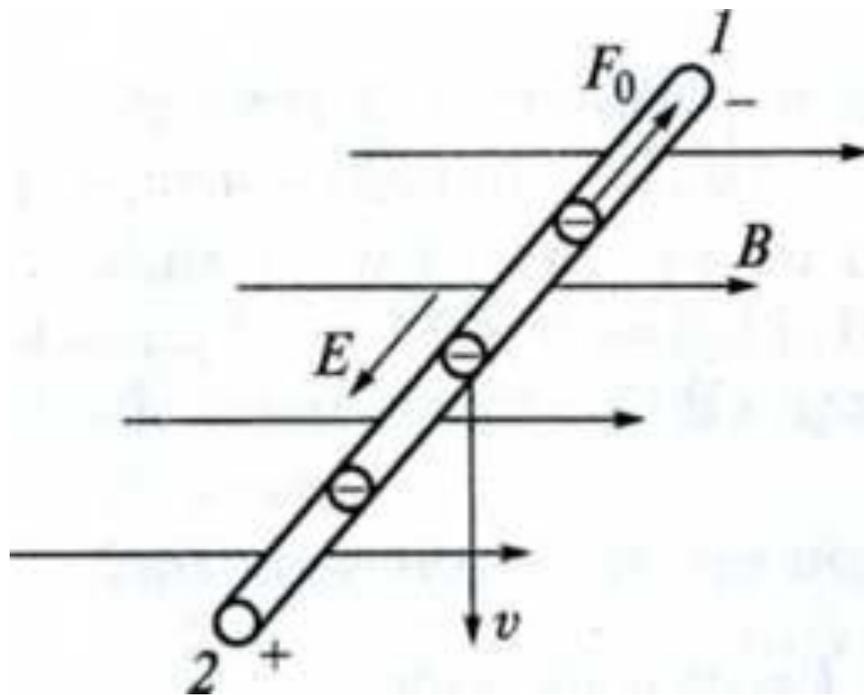
$S_{\text{провода}}$  - сечение провода, подающего ток на нагрузку

$j_{\text{доп}}$  - допустимая плотность тока

$$\text{Поэтому } \uparrow P_{\text{нагр}} = \uparrow U_{\text{ном}} I_{\text{нагр}}$$

---

Проводник длиной  $l$ , который движется со скоростью  $v$  в магнитном поле. В проводнике имеются свободные электроны, которые вместе с проводником движутся в магнитном поле. Магнитное поле воздействует на эти электроны с силой  $F_0$ , которая смещает электроны к концу 1 проводника. На другом конце 2 проводника будут концентрироваться положительные заряды (там возникает недостаток электронов).



В результате в проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС электромагнитной индукции  $\mathcal{E}$ ), а явление ее возникновения называется электромагнитной индукцией.

Электродвижущая сила определяется выражением  $\mathcal{E} = Bv l \sin \alpha$ . Если скорость  $\mathbf{V}$  перпендикулярна вектору  $\mathbf{B}$ , то  $\alpha = 90^\circ$  и в этом случае  $\mathcal{E} = Bvl$ .

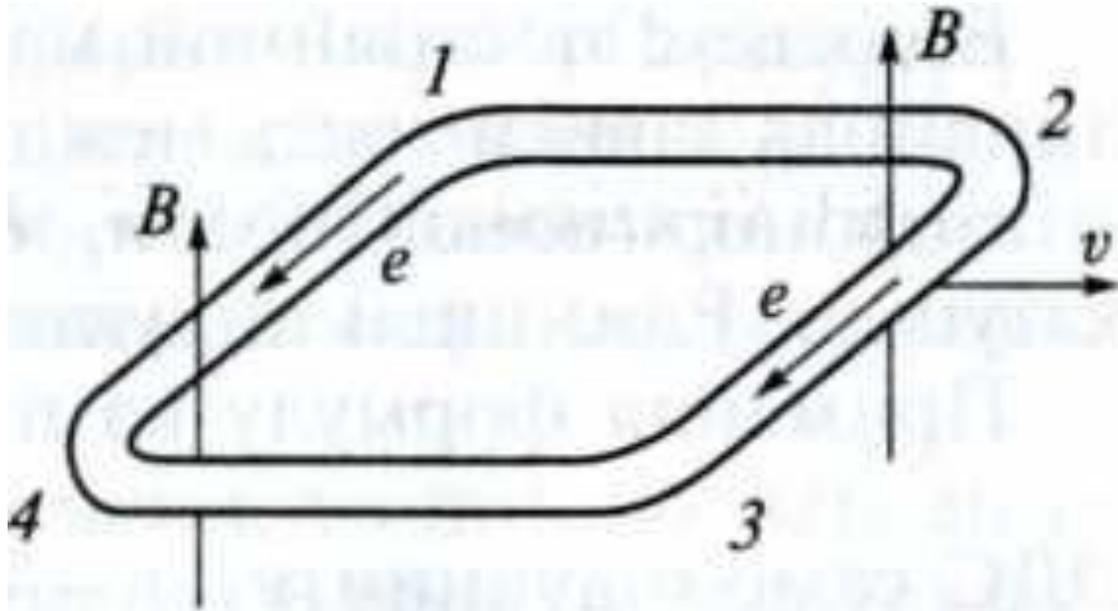
Направление  $\mathcal{E}$  можно определить по правилу правой руки: если магнитные силовые линии  $\mathbf{B}$  входят в ладонь, а отогнутый большой палец расположен по направлению скорости  $\mathbf{V}$ , то четыре вытянутые пальца ладони показывают направление  $\mathcal{E}$ .

Закон электромагнитной индукции был открыт английским физиком М. Фарадеем. Формулируется он следующим образом: любое изменение магнитного поля, в которое помещен проводник произвольной формы, вызывает в проводнике появление ЭДС электромагнитной индукции.

## ЭДС индукции в контуре. Закон Ленца

Поместим в магнитное поле замкнутый контур — рамку из проводников, которая перемещается со скоростью  $v$  перпендикулярно линиям индукции (рис. 3.2). Если магнитное поле однородное (одинаковое во всех точках поля), то в проводниках 1 — 4 и 2 — 3 рамки будут индуцироваться одинаковые ЭДС  $e$ , в проводниках 1 — 2 и 3 — 4 ЭДС появляться не будут, так как они не пересекают силовые линии поля. Суммарная ЭДС в контуре будет равна нулю.

При перемещении рамки в неоднородном магнитном поле в ней будет появляться ЭДС, которую рассчитывают по формуле:  $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , где  $\Delta\Phi$  — изменение магнитного потока, пронизывающего контур,



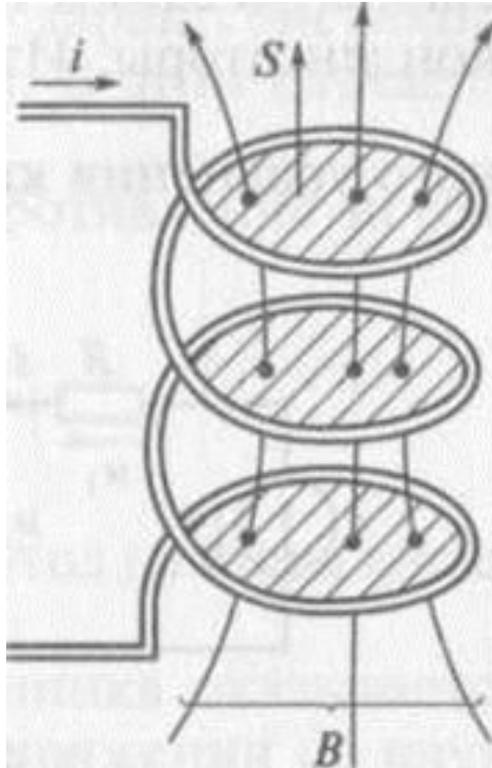
за время  $\Delta t$ . Изменение магнитного потока может происходить по различным причинам:  
из-за неоднородности магнитного поля при движении рамки;  
вследствие изменения потока  $\Phi$  во времени;  
при деформации самой рамки.

Индукцированная в рамке ЭДС приводит к появлению в ней тока. Русский ученый Э.Х.Ленц первым сформулировал закон, который позволяет определить направление индуцированных ЭДС и тока. Этот закон называют законом Ленца. Формулируется он следующим образом: в замкнутом контуре, помещенном в магнитное поле, индуцируется ток такого направления, чтобы препятствовать изменению основного магнитного потока, пронизывающего контур.

Если магнитный поток, пронизывающий рамку, увеличивается, индуцируемый в рамке ток старается уменьшить основной поток, и наоборот, при уменьшении потока индуцируемый ток будет увеличивать общий поток. Об этом и говорит знак «минус» в формуле расчета ЭДС.

Несколько рамок, соединенных последовательно, являются катушкой.

Индуктивная катушка (индуктивный элемент) запасает энергию магнитного поля  $W_M = \frac{L \cdot i^2}{2}$ .



Ее мгновенная мощность  $p = u \cdot i$

характеризует скорость изменения этой энергии во времени. Ток  $i$  создает магнитное поле, направление индукции которого показано стрелками.

Полагая плотность индукции  $B$  одинаковой по сечению  $S$  катушки, магнитное поле можно охарактеризовать магнитным потоком:

$$\Phi = BS.$$

Произведение этого потока на число витков  $W$  катушки называют потокосцеплением:  $\varphi = \Phi \cdot W$ .

Индуктивность характеризует связь между

потокосцеплением и вызывающим его током:  $\varphi = L \cdot i$ .

Единицей магнитного потока является тесла (1 Тл = 1 Вб · 1 м<sup>2</sup>), единицей индуктивности — генри (1 Гн = 1 Тл/1 А).

## ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменными токами, напряжениями и ЭДС называются токи, напряжения и ЭДС, изменяющиеся с течением времени.

Значения тока в произвольные моменты времени  $t$  называются мгновенными значениями тока и обозначаются  $i(t)$ . Аналогично определяемые мгновенные значения напряжения и ЭДС обозначаются соответственно  $u(t)$  и  $e(t)$ .

Мгновенные значения синусоидальных токов  $i(t)$ , напряжений  $u(t)$  и ЭДС  $e(t)$  математически описываются формулами:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi_i);$$

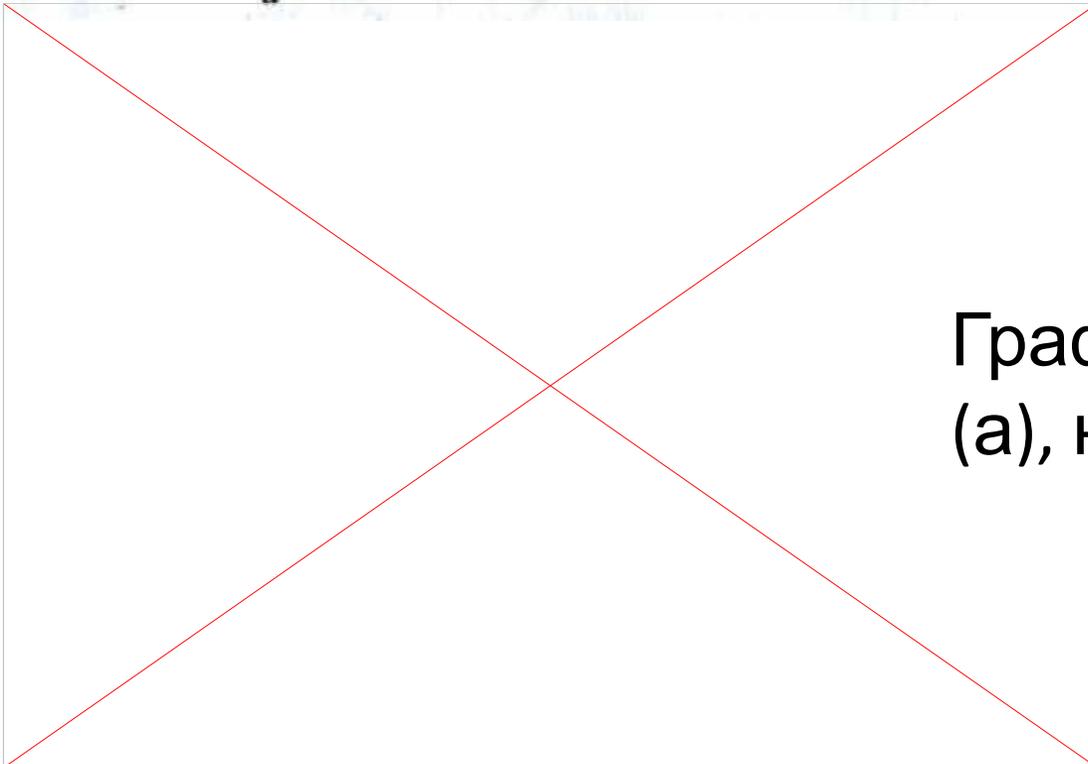
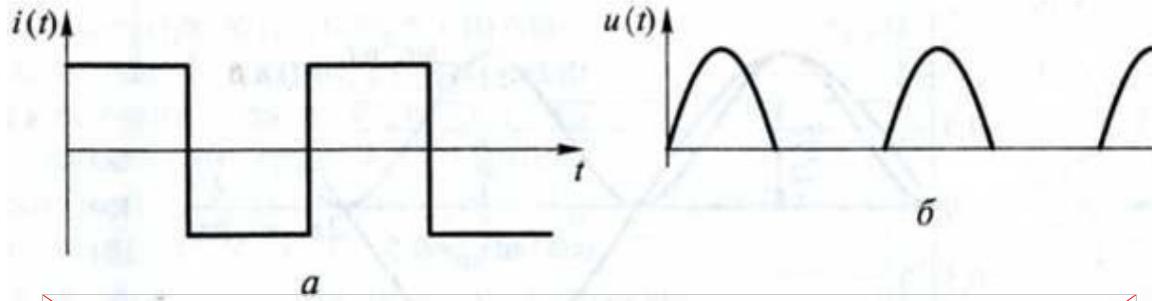
$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \Psi_u);$$

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \Psi_e),$$

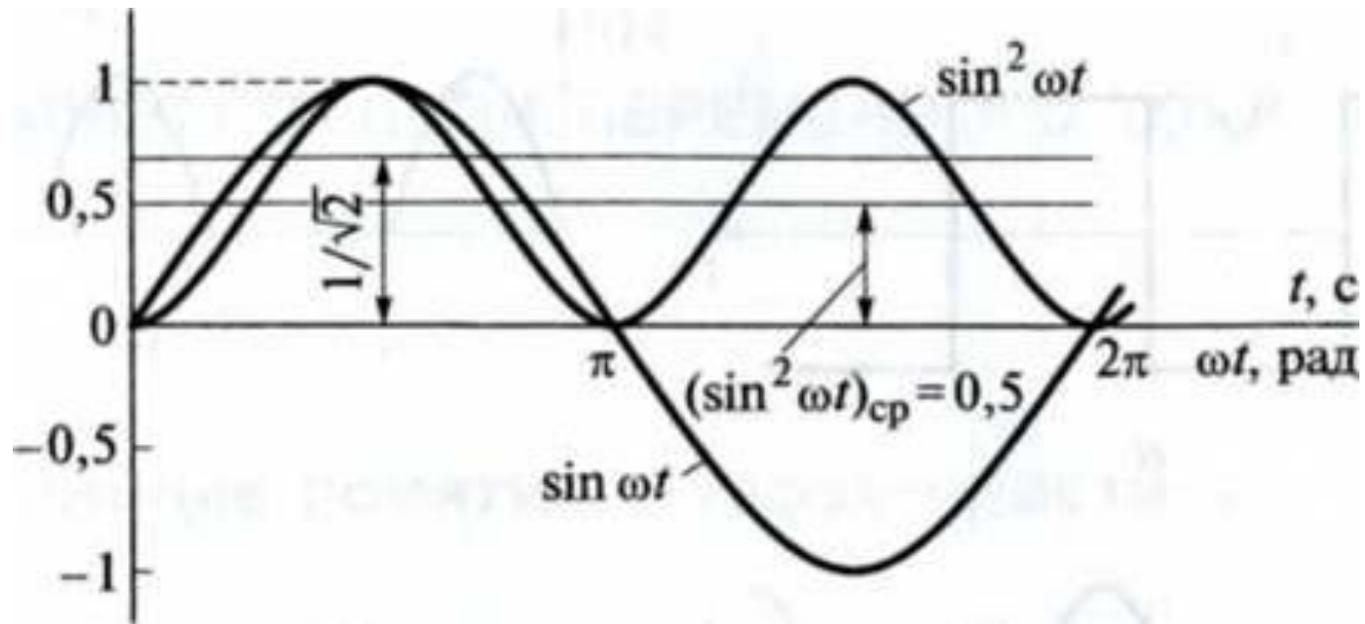
где  $I_m$ ,  $U_m$ ,  $E_m$  — амплитудные значения тока, напряжения и ЭДС;

$\omega$  — угловая частота синусоидальной функции;  $\varphi_i$ ;  $\varphi_u$ ;  $\varphi_e$  — начальные фазы тока, напряжения и ЭДС.

Угловая частота  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , где  $f$ ,  $T$ - соответственно частота и период синусоидальной функции



Графики мгновенных значений тока (а), напряжения (б) и ЭДС (в)



Синусоида, квадрат синусоиды, среднее за период значение квадрата синусоиды, равное  $0,5$ , и среднеквадратическое значение синусоиды, равное  $1/\sqrt{2}$

Переменный ток  $i(t)$  характеризуют по его действующему значению  $I$ , равному среднеквадратическому значению переменного тока:  $I = \sqrt{(i^2)_{\text{cp}}}$ .

Численно действующее значение переменного тока равно такому значению постоянного тока, при котором выделяется за один период такое же количество теплоты, как и при данном переменном токе:

$$RI^2 = R(i^2)_{\text{ср.}}$$

В случае синусоидального тока

$$I^2 = (i^2)_{\text{ср.}} = (I_m^2 \sin^2 \omega t)_{\text{ср.}} = I_m^2 / 2.$$

Отсюда действующее значение синусоидального тока  $I = I_m / \sqrt{2}$

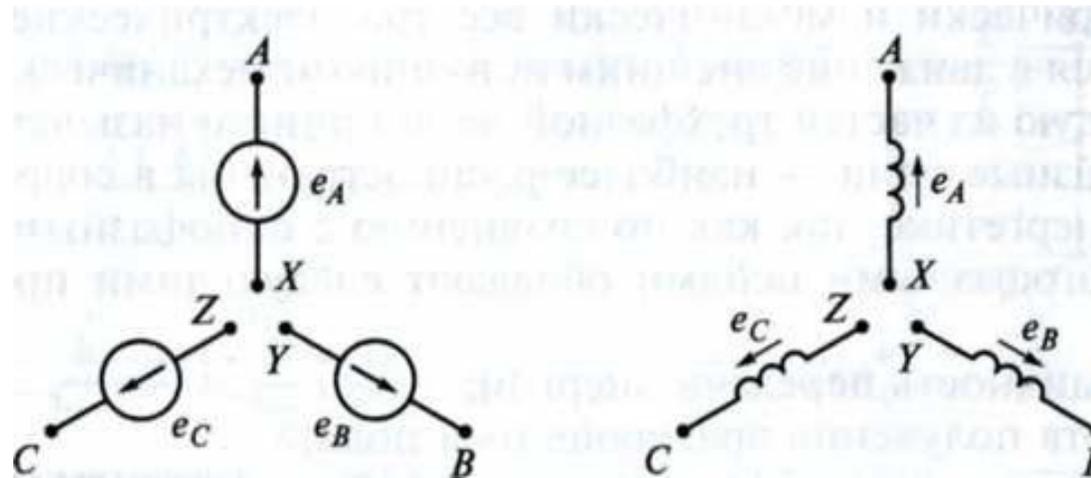
Аналогично действующие значения синусоидальных напряжения и ЭДС

$$U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2}.$$

# Трёхфазные электрические цепи

Трёхфазная цепь представляет собой совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, синхронизированные таким образом, что их начальные фазы отличаются на угол  $2\pi/3 = 120^\circ$ . Трёхфазные машинные генераторы объединяют электрически и механически все три электрические цепи и приводятся в движение внешним источником механической энергии. Каждую из частей трёхфазной цепи называют **фазой** и называют фазой в виде:

$$e_A = E_m \sin \omega t; e_B = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3); e_C = E_m \sin (\omega t + 2\pi/3).$$



Схемы замещения фаз трёхфазного генератора)

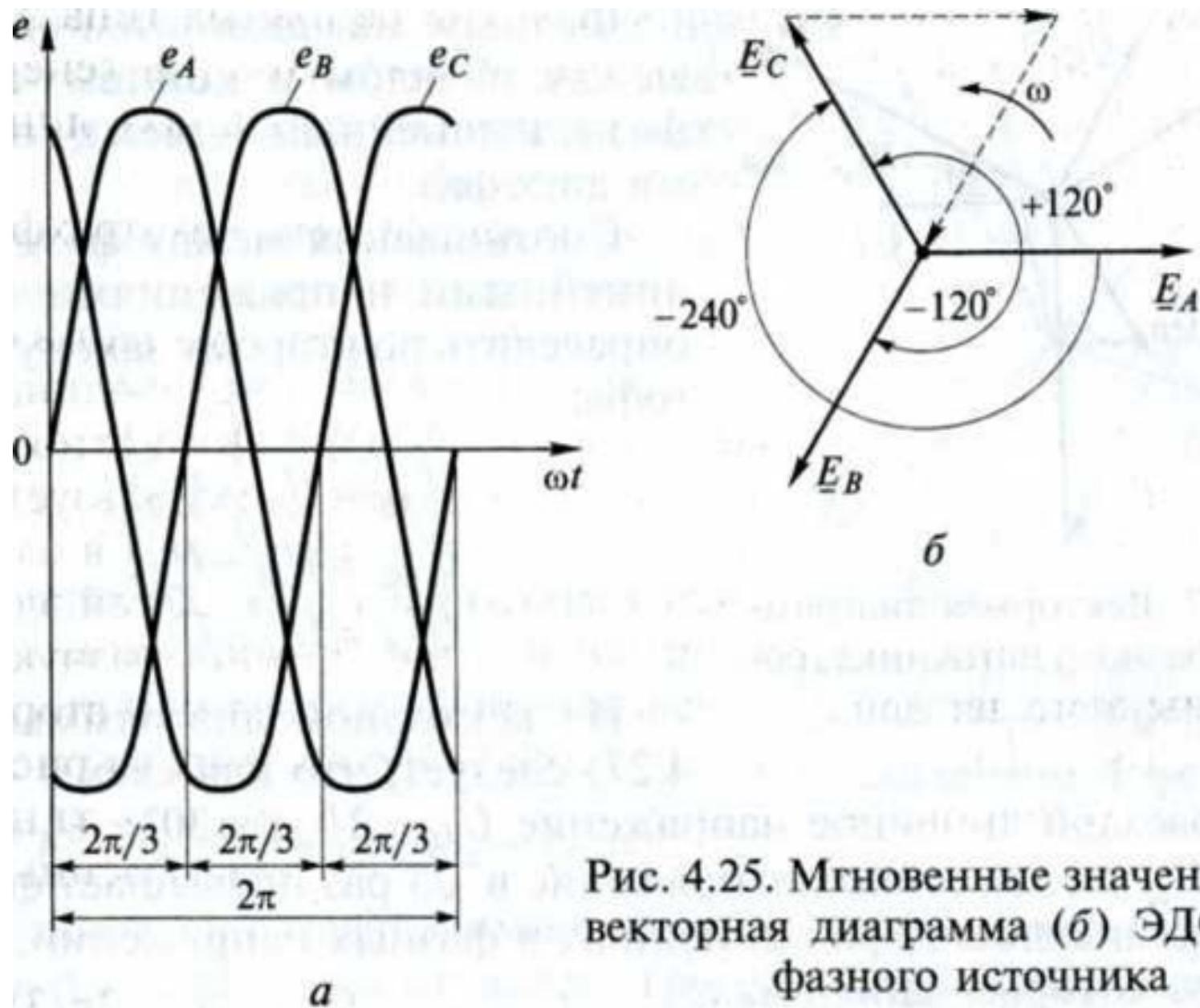
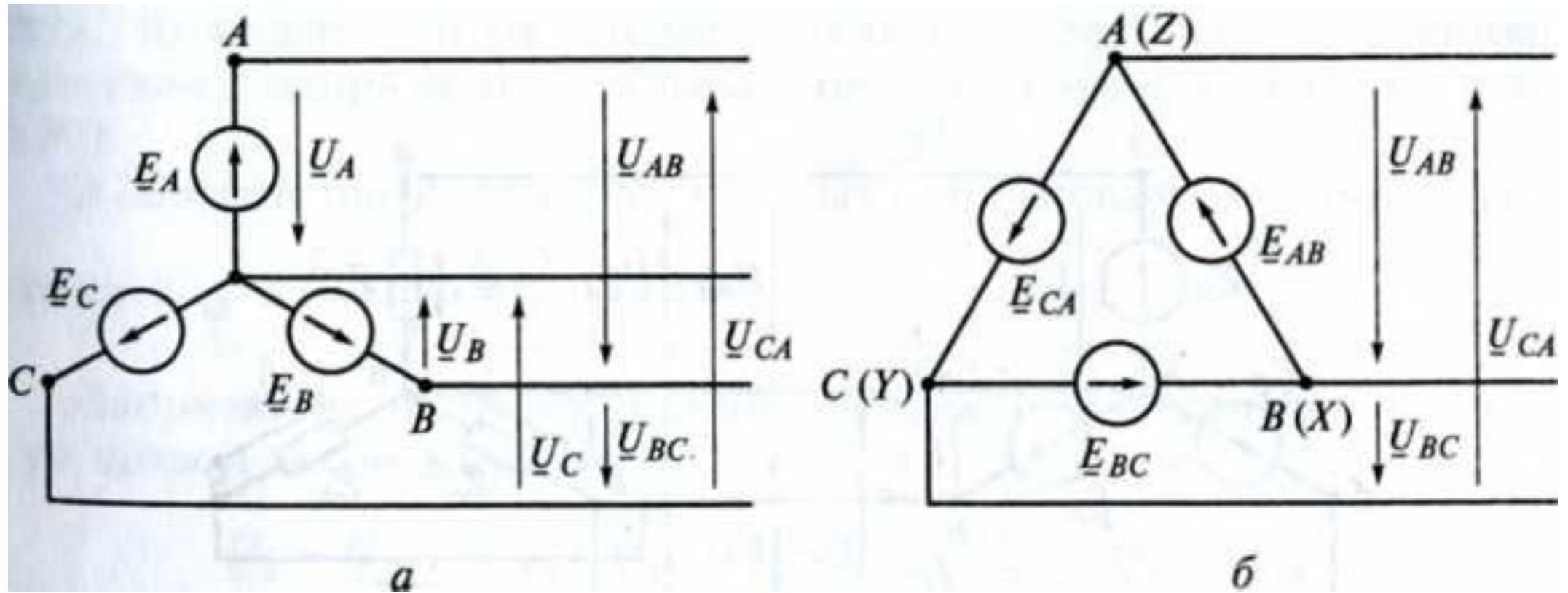


Рис. 4.25. Мгновенные значения (а) и векторная диаграмма (б) ЭДС трехфазного источника



Соединение фаз трехфазного источника звездой (а) и треугольником (б)

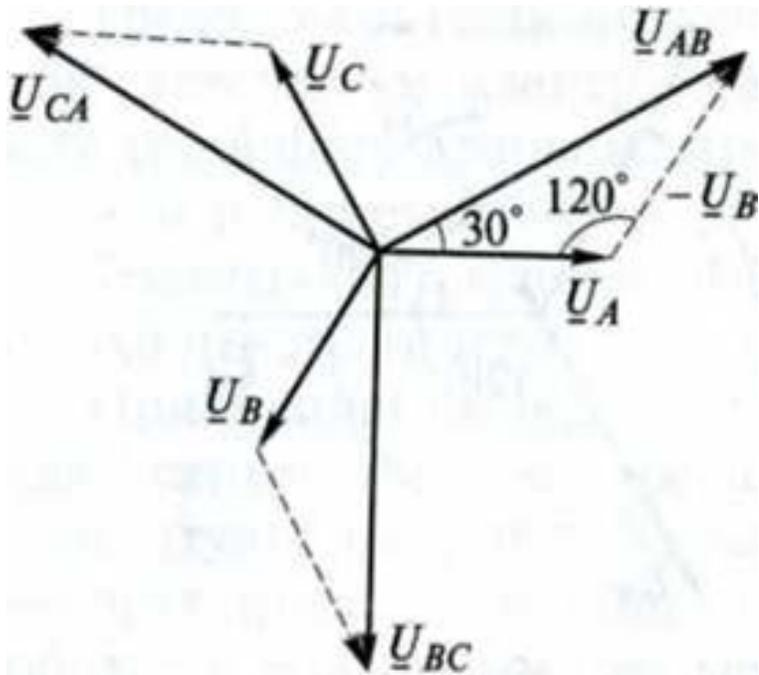


Рис. 4.27. Векторная диаграмма трехфазного источника, соединенного звездой

Фазным называют напряжение между началом и концом каждой фазы, а линейным — между началами двух фаз. Соотношения между фазными и линейными напряжениями можно определить по второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B;$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C;$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

## Устройство синхронного генератора

Возникновение эдс в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников.

В первом случае полюсы, т. е. индуктирующая часть машины (индуктор), возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуктируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается эдс, - на вращающейся части машины (на роторе).

Во втором случае, используемом в автомобильных генераторах,

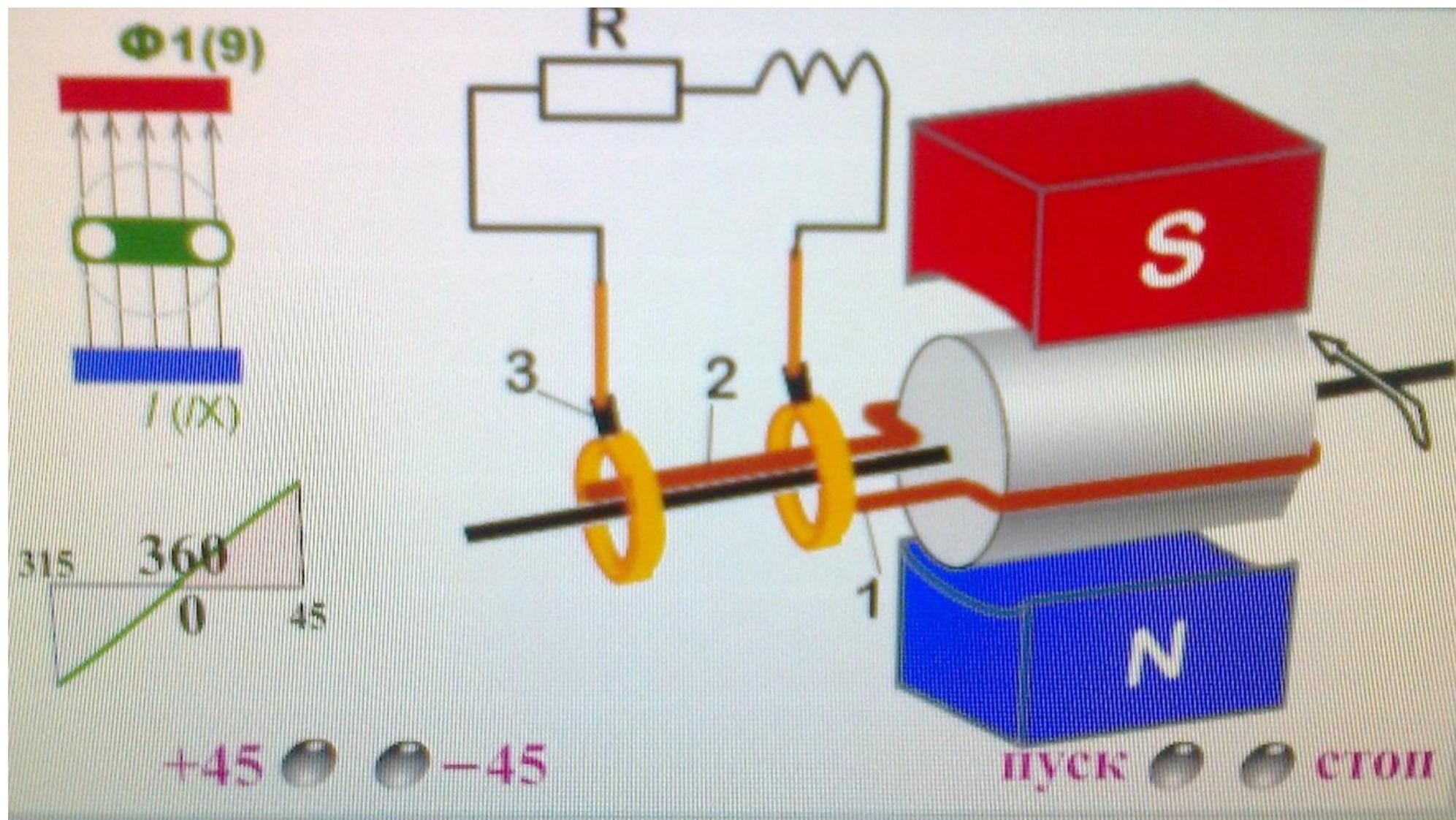
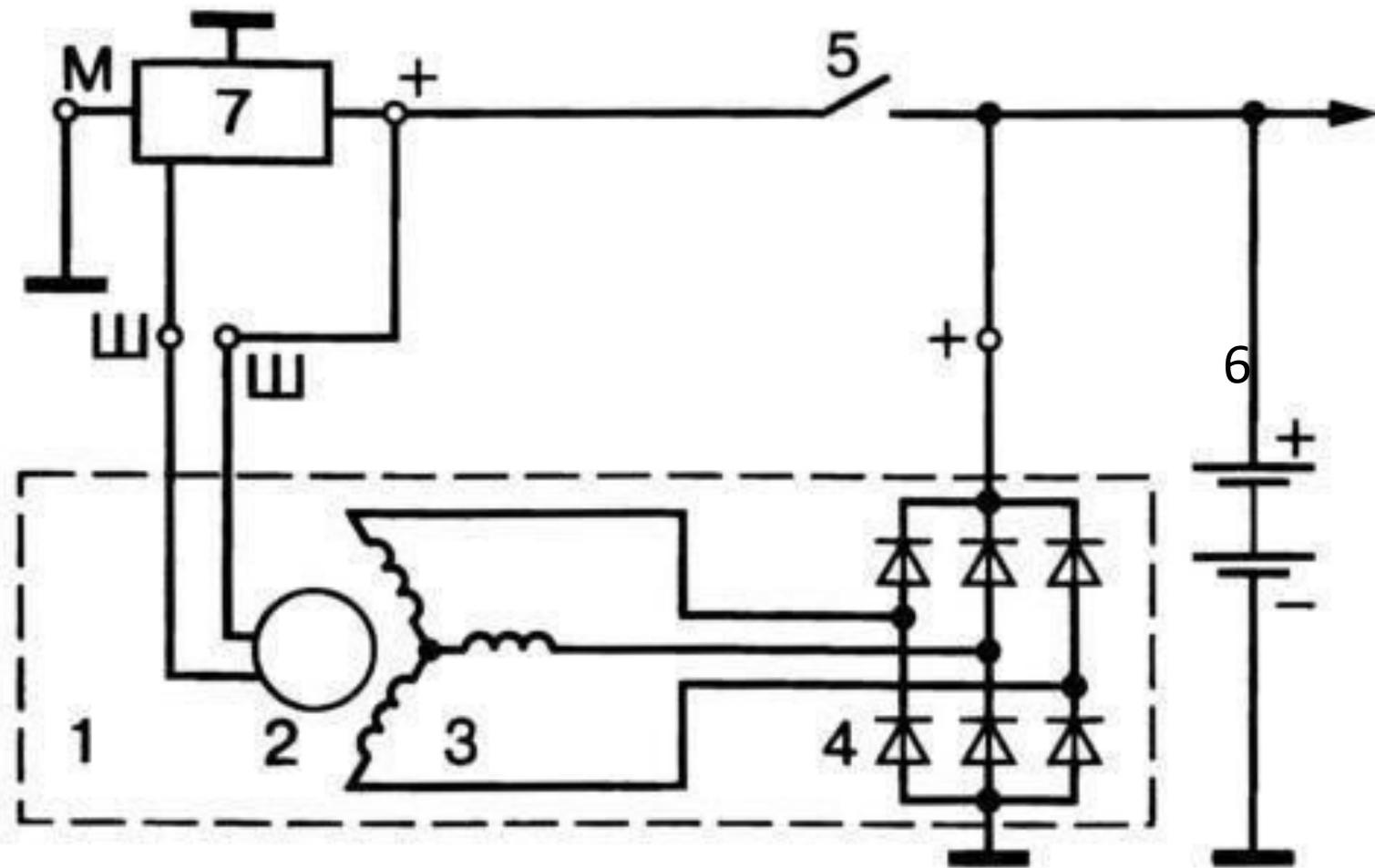


Схема генератора переменного тока:

**1** и **2** - проводники, **3** - кольца





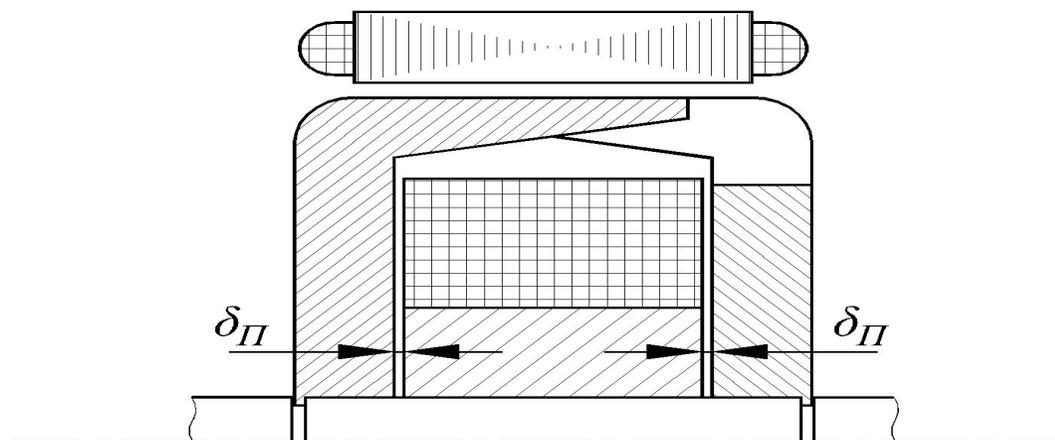


- 1- генератор,
- 2- обмотка возбуждения (ротора),
- 3- обмотка якоря (статора),
- 4- выпрямитель,
- 5- выключатель зажигания,
- 6- аккумуляторная батарея,
- 7- регулятор напряжения



## Конструкция ротора с подчеканкой.

а)

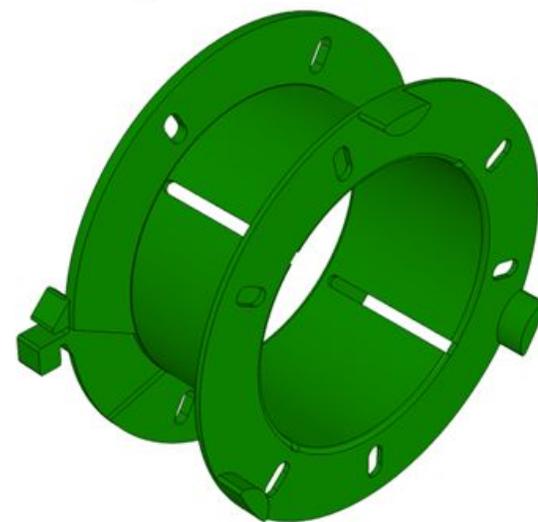
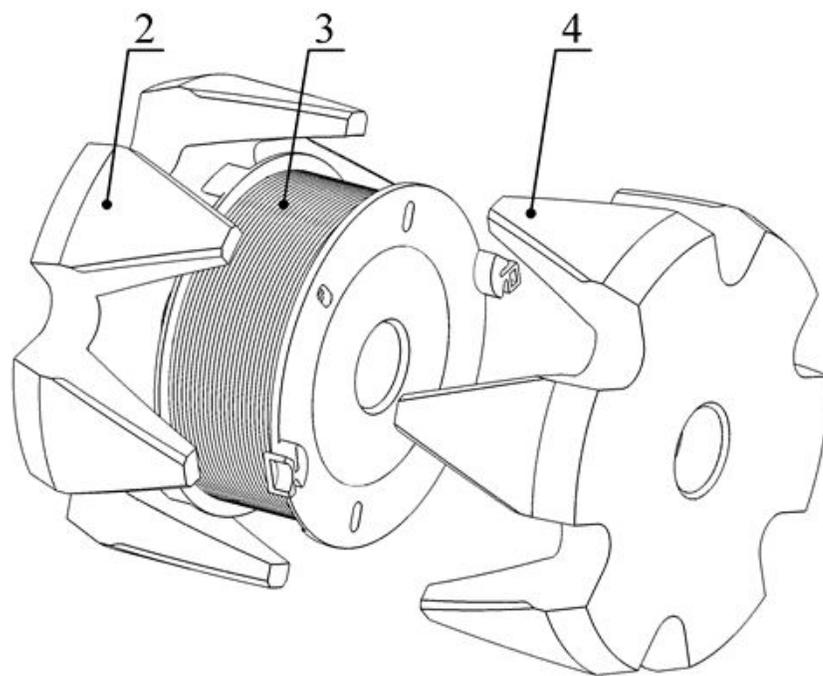
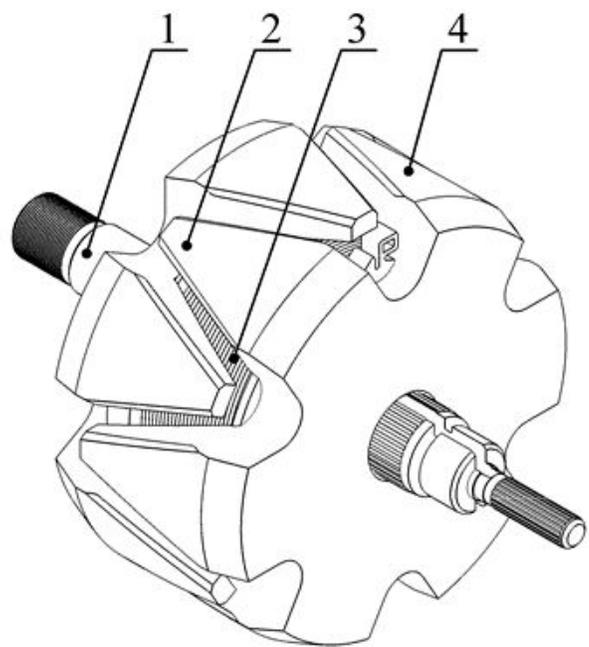


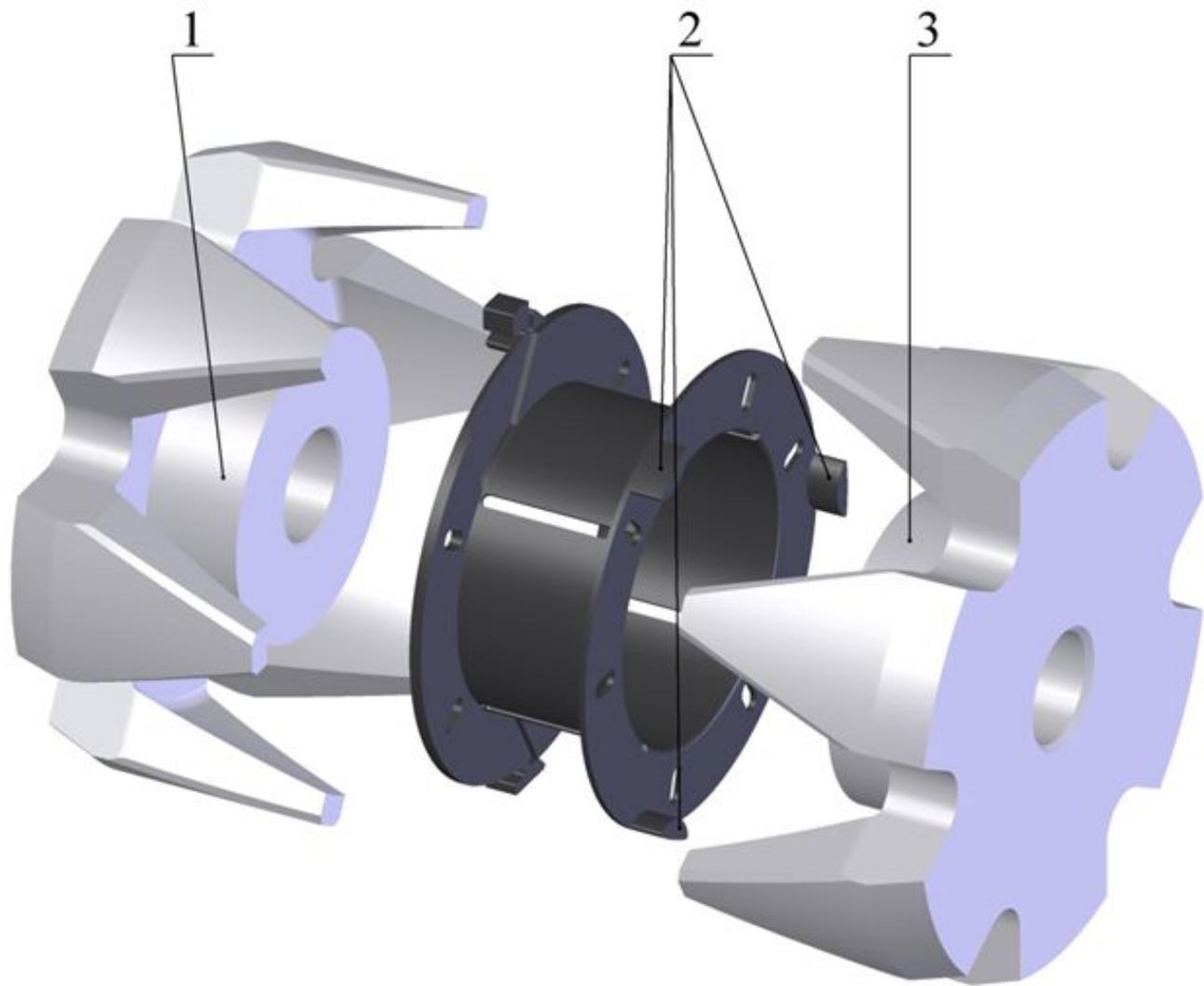
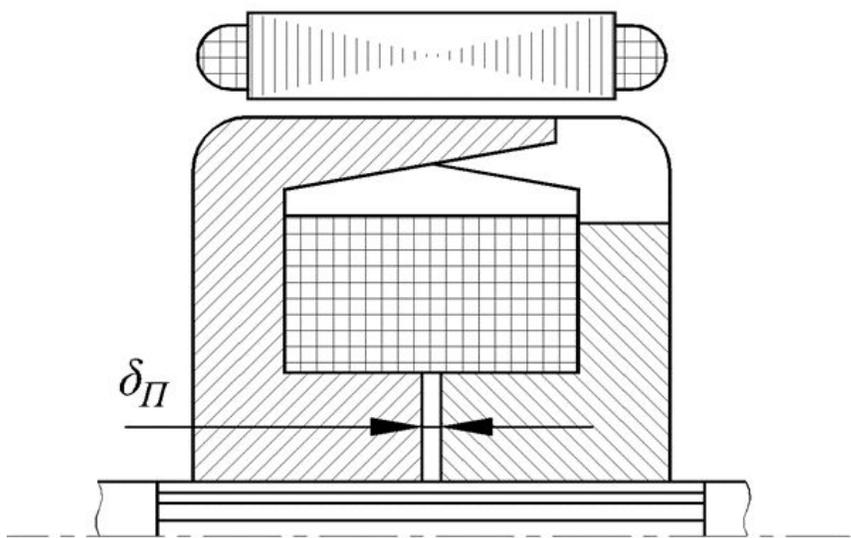
б)

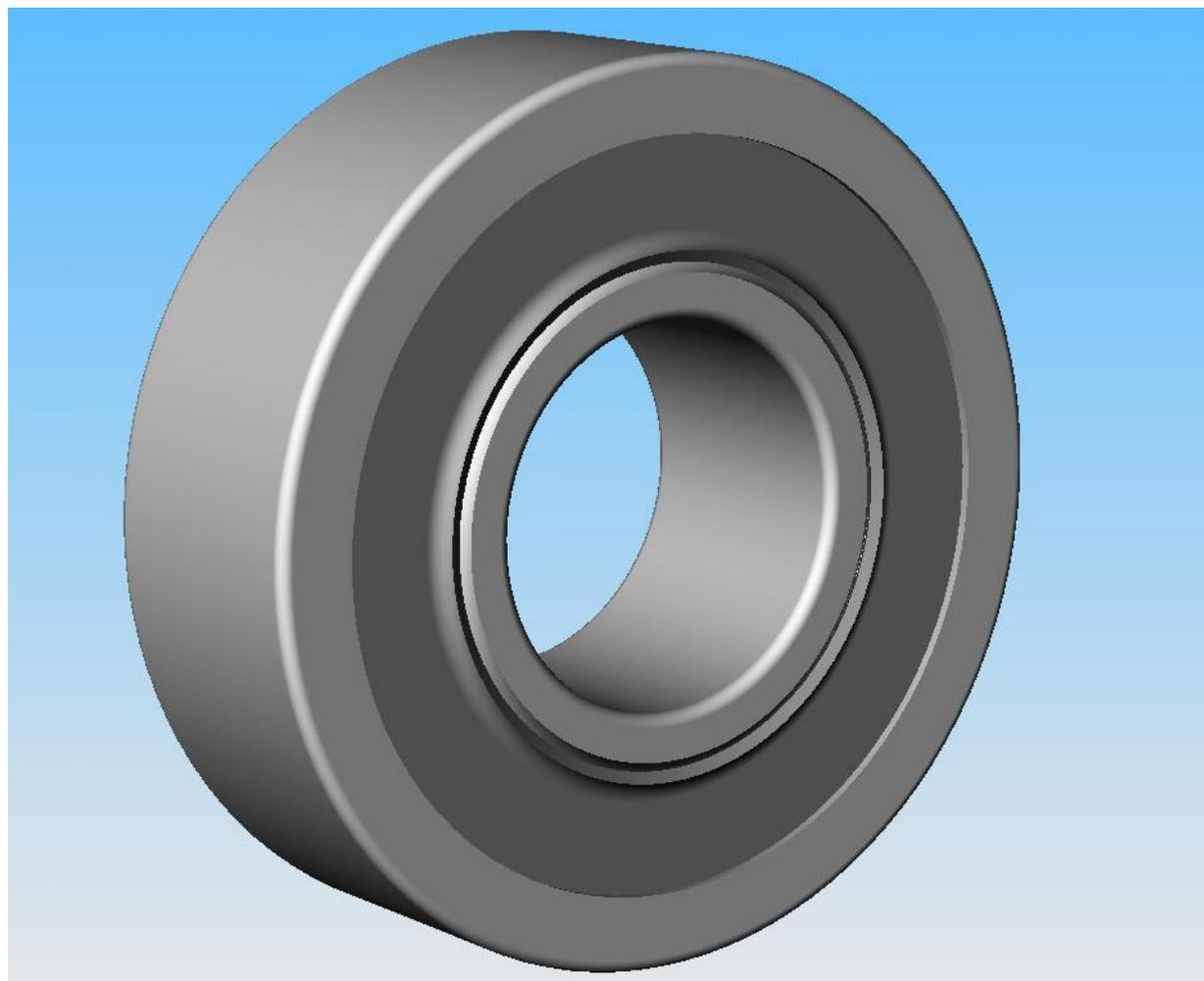
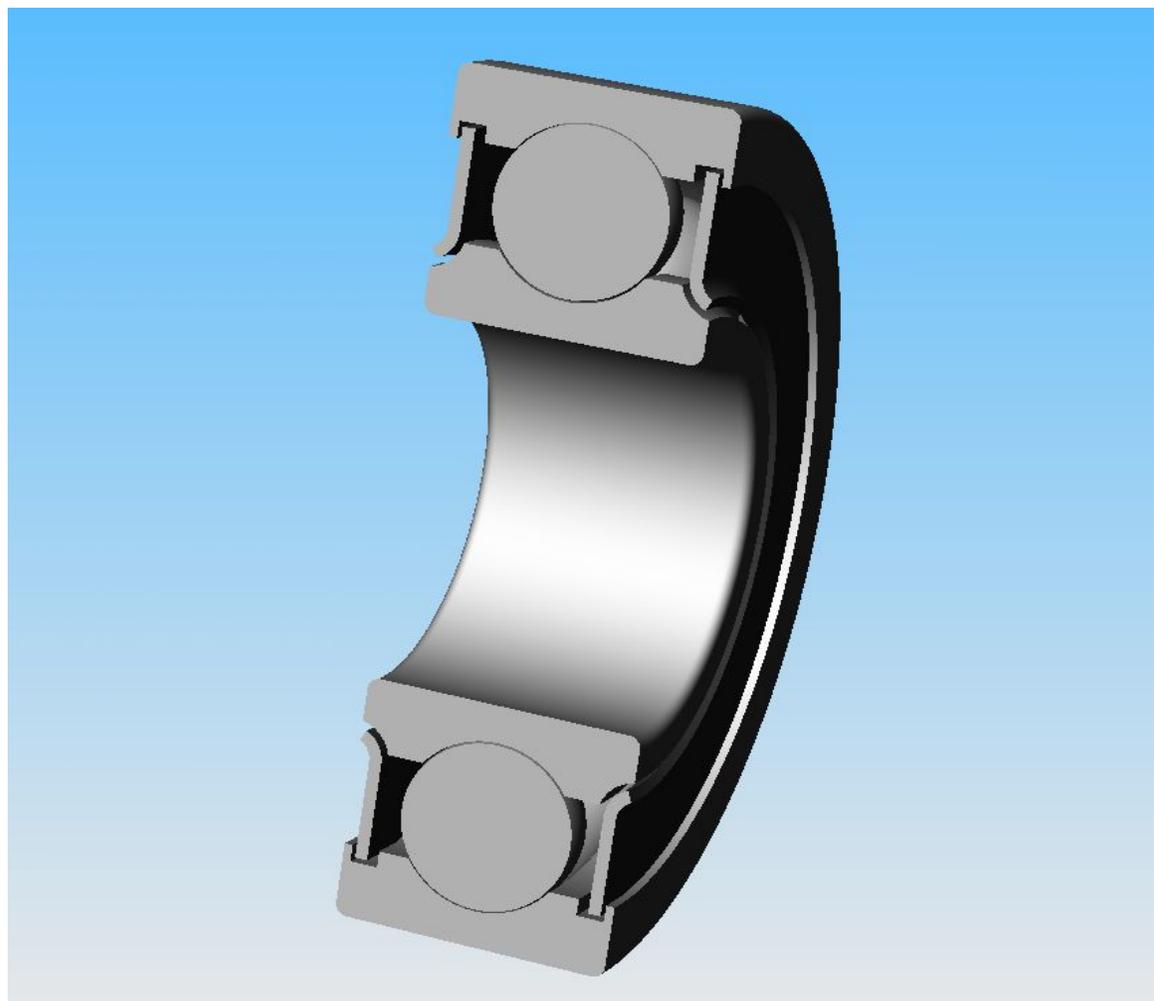
а) магнитная цепь;

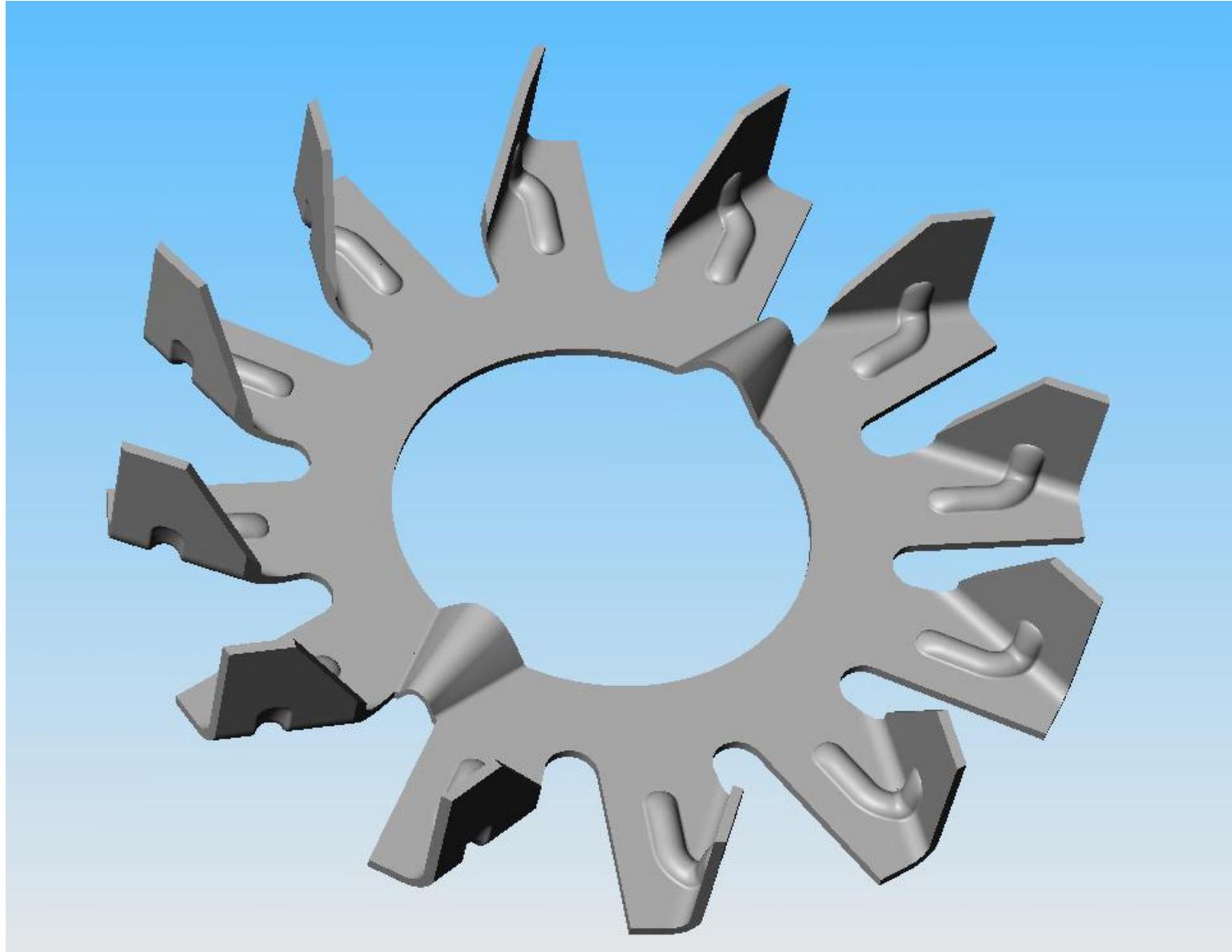
б) вал с прорезями под подчеканку

Вал в этой конструкции ротора выполняется с прорезями под подчеканку.





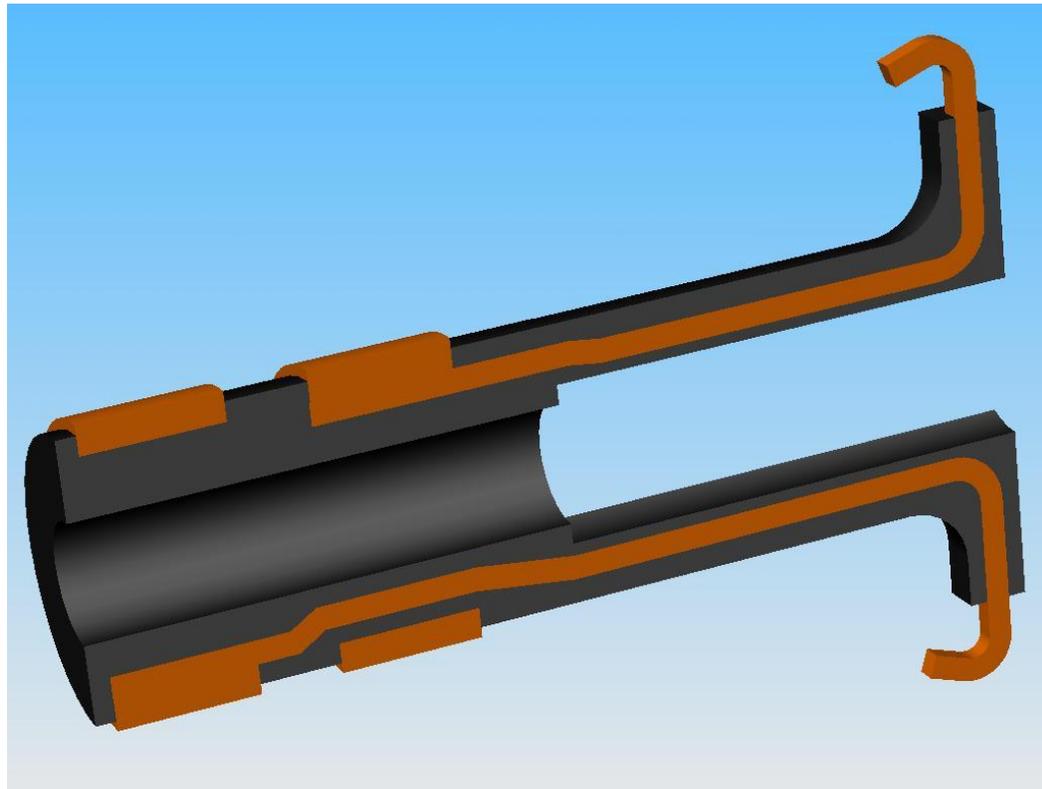




Для уменьшения износа контактных колец их диаметр уменьшается, делается равным диаметру вала ротора.



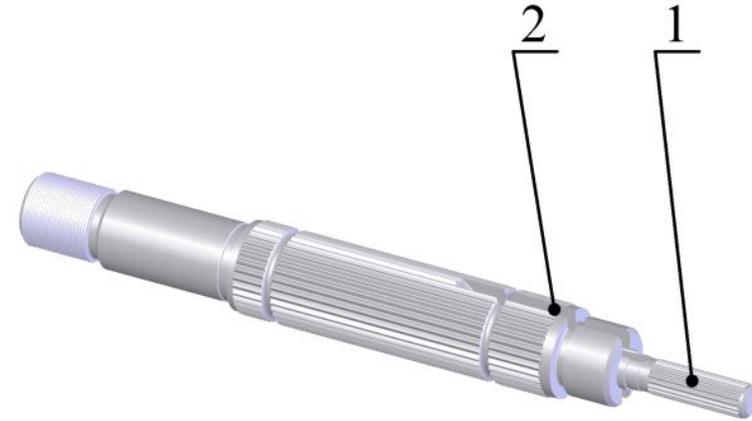
Контактные кольца генераторов:  
а- традиционной конструкции;  
б- компактной конструкции.



Они напрессовываются на задний конец вала 1,  
прорезь 2 для выводов обмотки возбуждения



а)

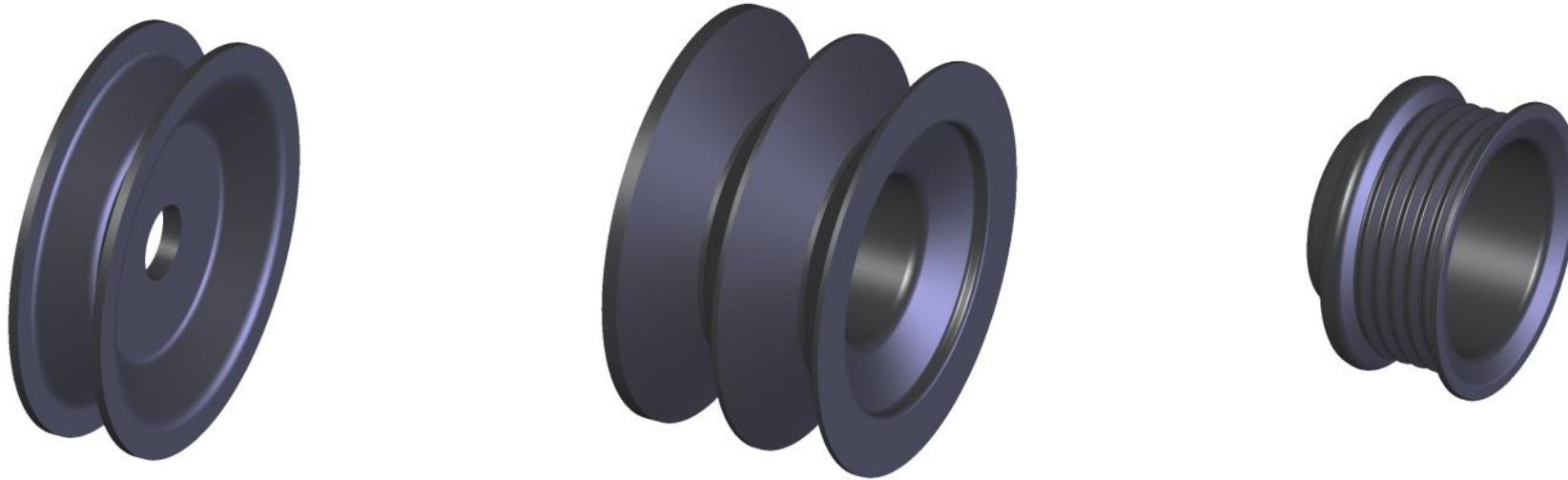


б)

Валы генераторов:  
а- традиционной конструкции;  
б- компактной конструкции.

По отношению к генератору традиционной конструкции у генераторов компактной конструкции задний подшипник меняется местами с контактными кольцами, что и позволяет уменьшить диаметр контактных колец.

Для привода генераторов компактной конструкции используется поликлиновый ремень и многоручейный шкив.



а)

б)

Шкивы генераторов:

а- традиционной конструкции;

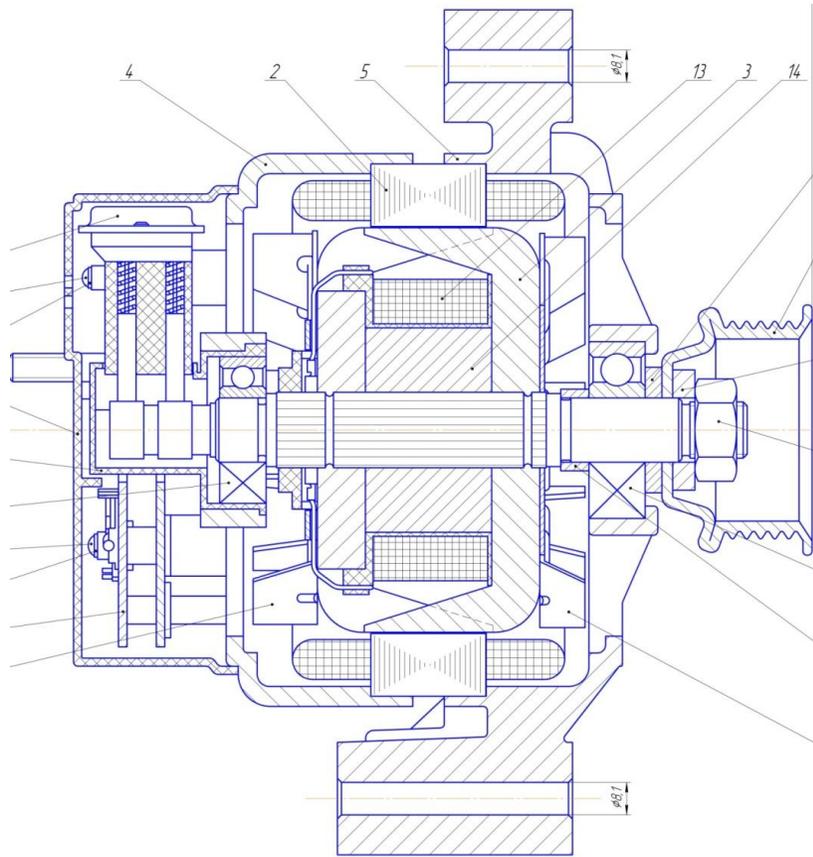
б- компактной конструкции.

В генераторах компактной конструкции используется многоручейный шкив. Это позволяет увеличить передаточное отношение привода генератора, доведя его до 3- 3,5.

У генераторов традиционной конструкции, использующих клиновый ремень и одноручейный или двухручейный шкив передаточное отношение привода генератора может достигать только величин 1.8-2.5.

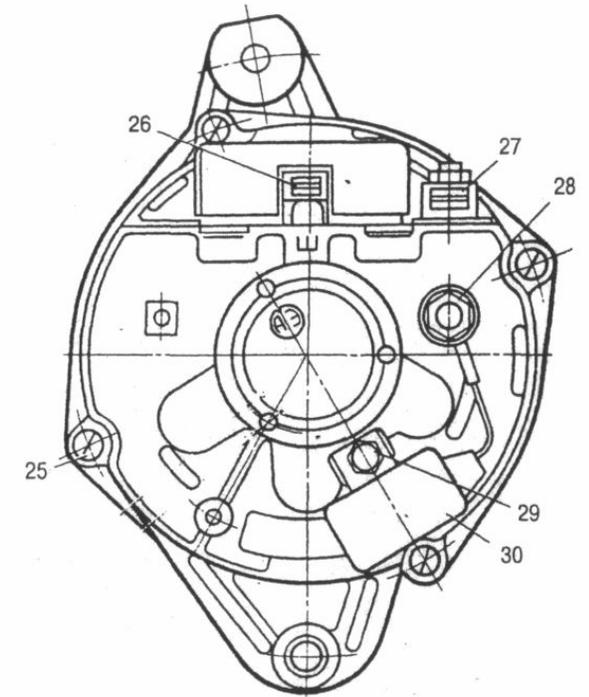
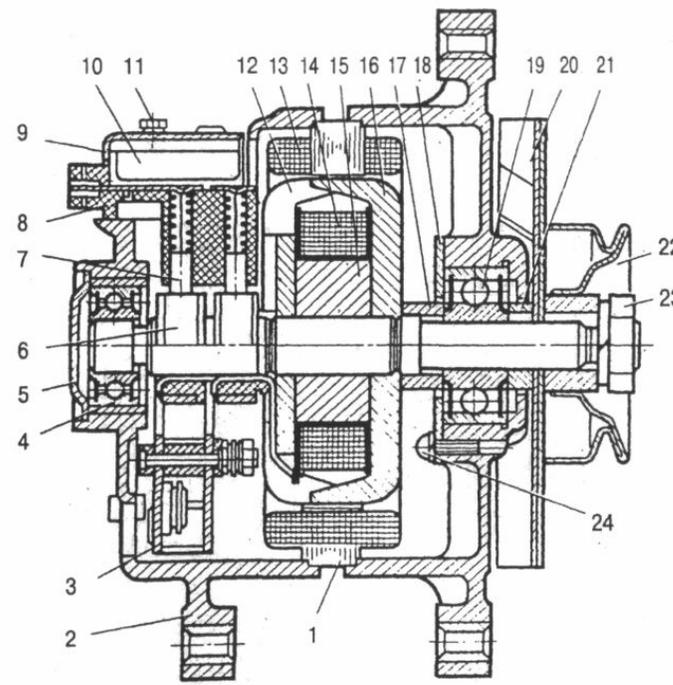
## Крепление генератора компактной конструкции

Передняя крышка имеет крепежную лапу с длинным цилиндрическим отверстием, параллельным оси генератора и лапу для натяжения приводного ремня.

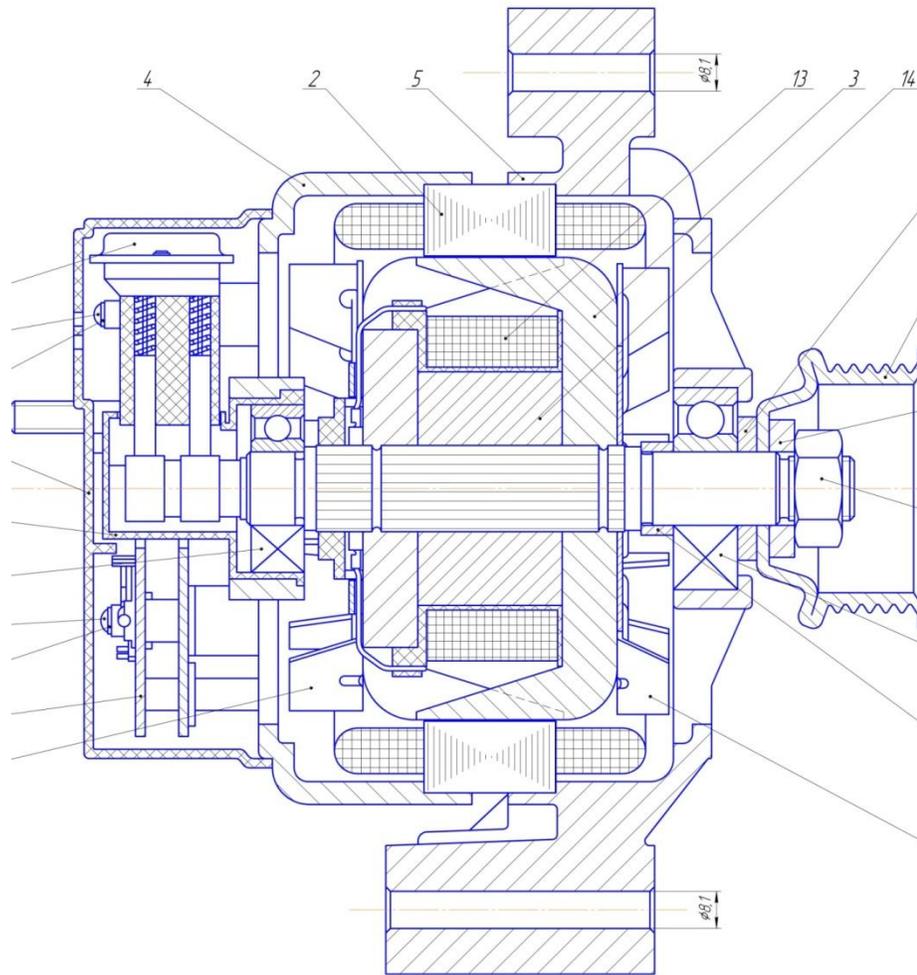


## Крепление генератора традиционной конструкции.

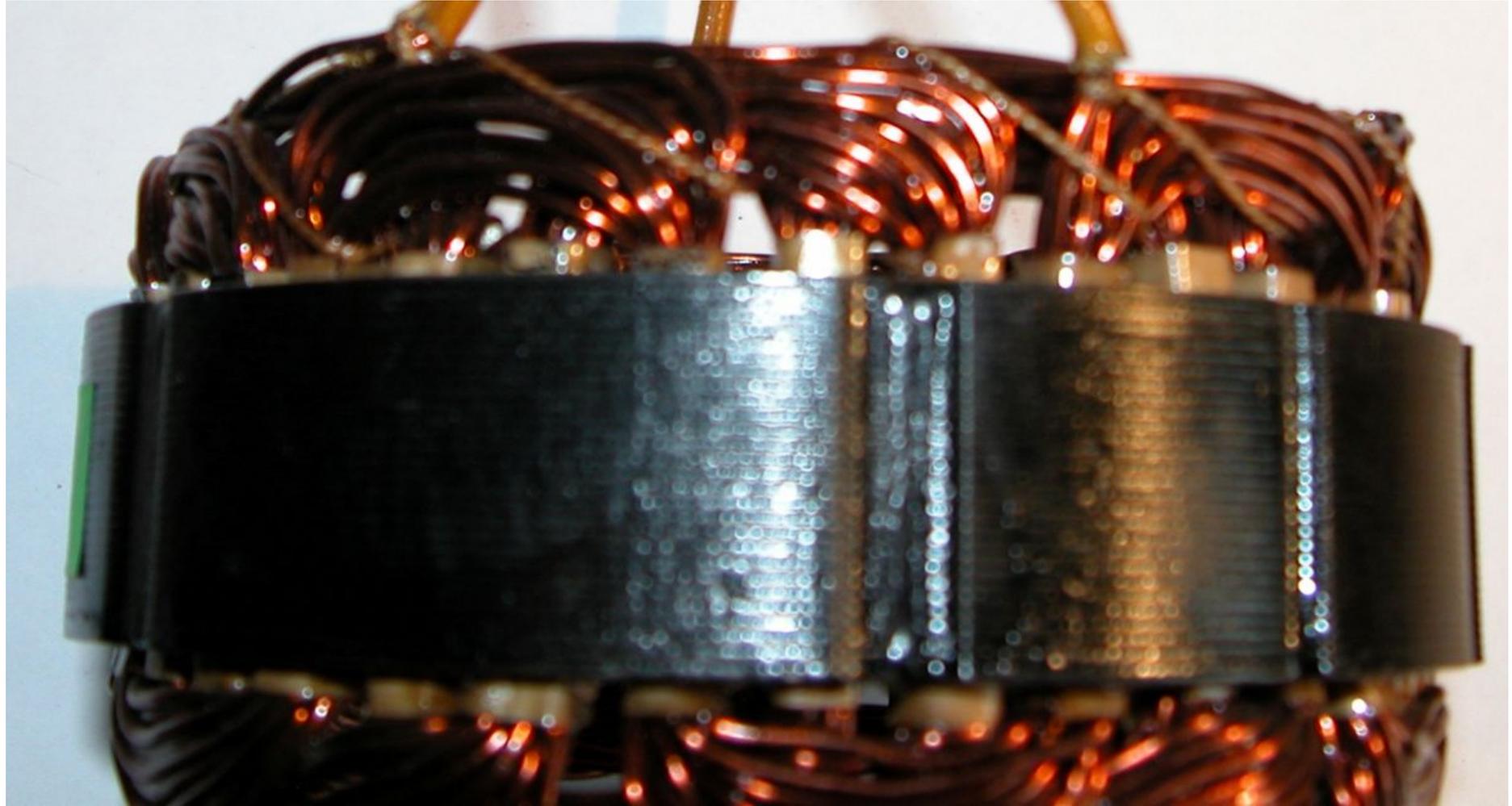
Передняя и задняя крышки имеют крепежные лапы. Передняя крышка имеет лапу для натяжения приводного ремня.



# Крепление генератора компактной конструкции



Передняя крышка имеет крепежную лапу с длинным цилиндрическим отверстием, параллельным оси генератора и лапу для натяжения приводного ремня.

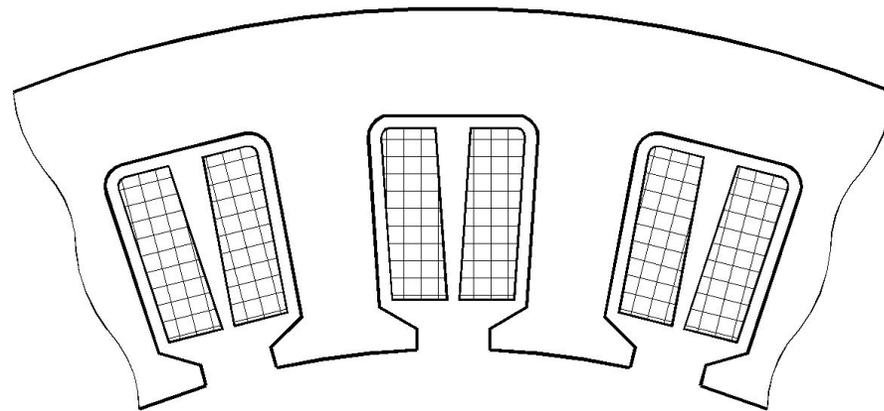


У современных генераторов число зубцов на полюс и фазу

$q = 1$ , так как число зубцов

$$Z_1 = 36.$$

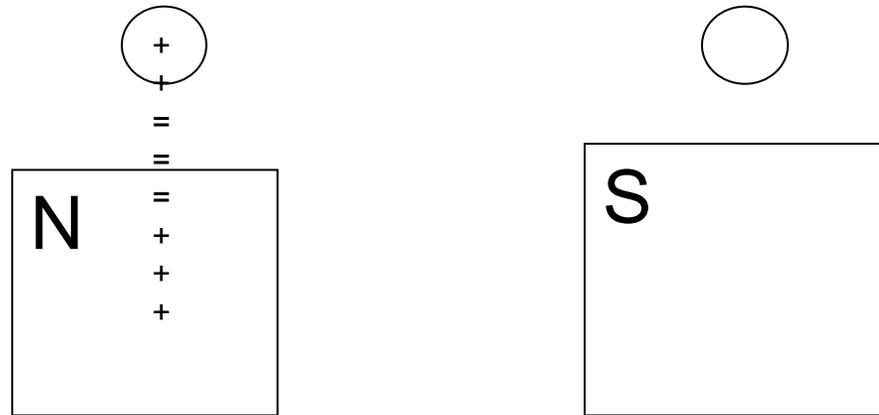
В современных генераторах намотка обмотки статора производится прямо в паз. Это делает возможным использование полузакрытых пазов.



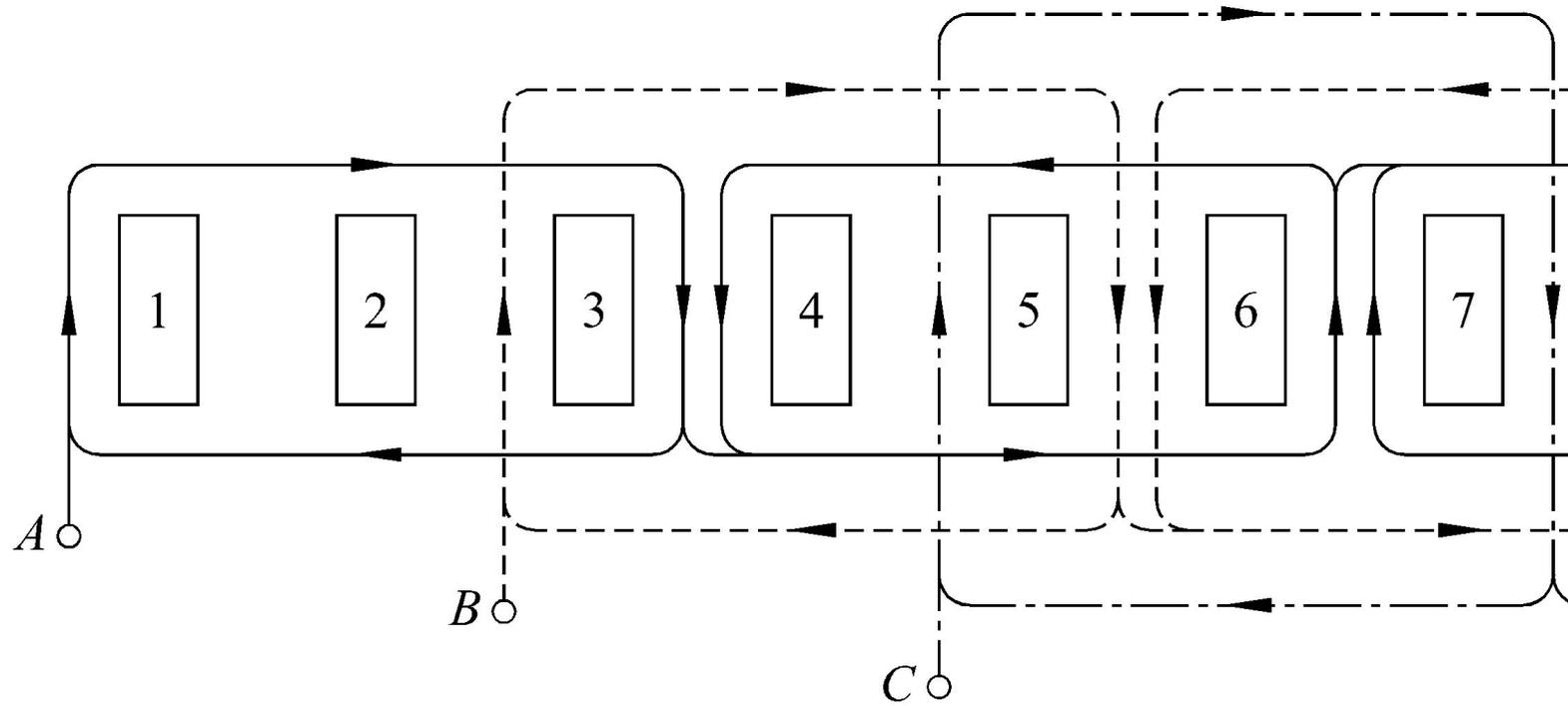
Формы полузакрытых пазов

ВИТОК ОБМОТКИ СТАТОРА

рабочий воздушный зазор



ПОЛЮСА РОТОРА



Петлевая обмотка при намотке в развал  
При намотке в развал отсутствуют отдельные элементы соединения между катушками одной фазы. Автоматизация её намотки проста.

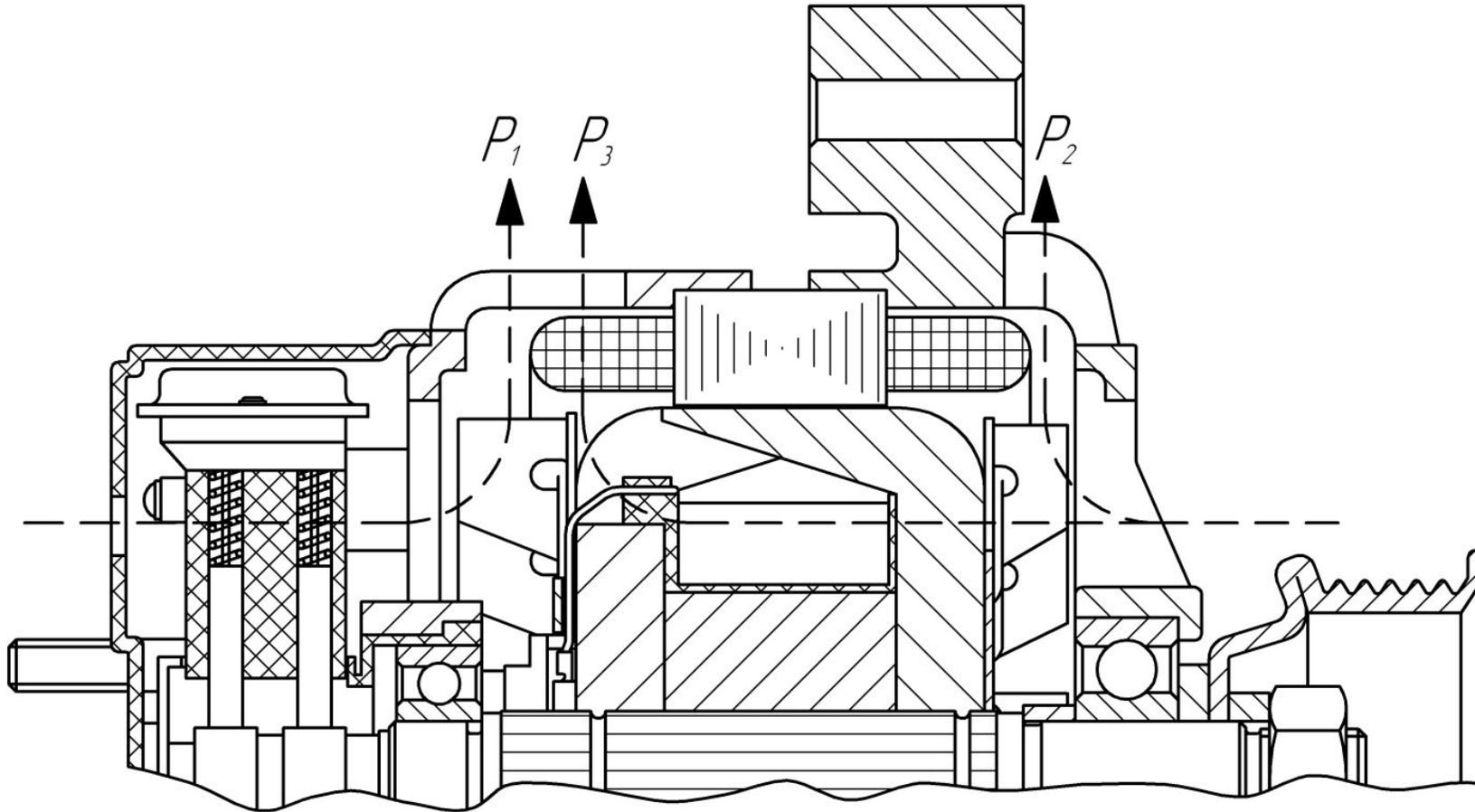
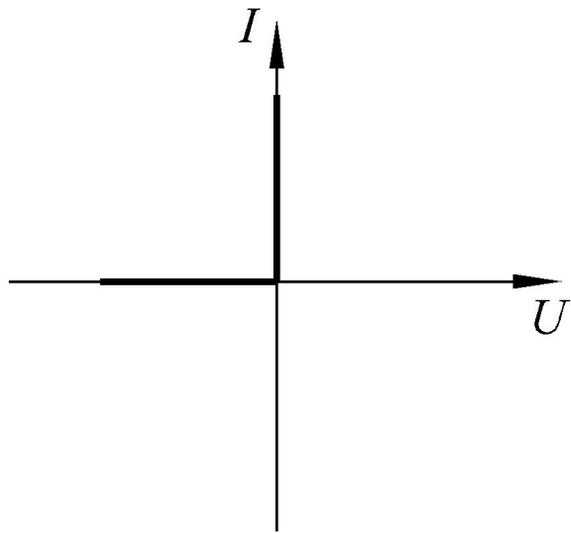
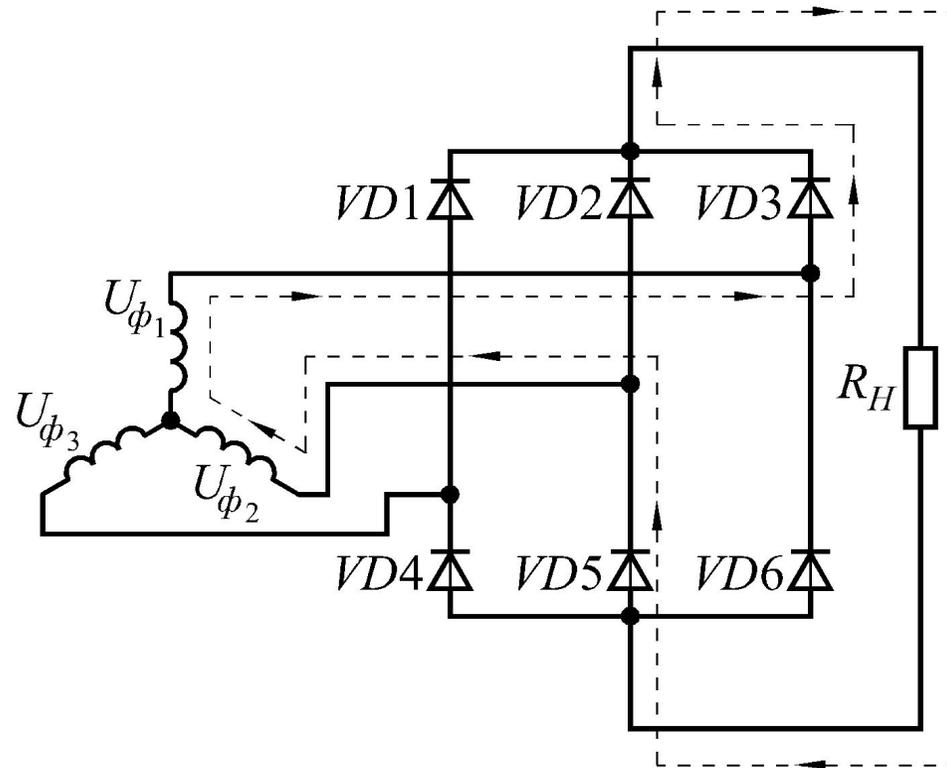


Схема системы охлаждения генераторов компактной конструкции.

Использование двух вентиляторов, расположенных согласно рисунку, увеличивает интенсивность охлаждения и уменьшает шумность генератора.



*a)*



*б)*

Работа выпрямителя в идеальных условиях: *a)* – вольтамперная характеристика диода в идеальных условиях; *б)* – схема Ларионова.

В мостовой двухполупериодной схеме выпрямления имеется шесть диодов. Верхняя группа диодов (диоды  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ ) называется катодной (у них объединены катоды). Нижняя группа диодов (диоды  $VD4$ ,  $VD5$ ,  $VD6$ ) называется анодной (у них объединены аноды). Два диода, подключенные к одной фазе, называются плечом. Показанный на рисунке 5.1,б выпрямительный блок содержит 3 плеча: первое плечо на диодах  $VD1$ ,  $VD4$ , второе - на диодах  $VD2$ ,  $VD5$ , третье – на диодах  $VD3$ ,  $VD6$ .

Данный выпрямительный блок является двухполупериодным. При трехфазной обмотке якоря генератора выпрямляется шесть векторов линейного напряжения, показанных на рисунке 5.2. Диаграмма выпрямленного напряжения представляет собой совокупность вершин линейных напряжений.

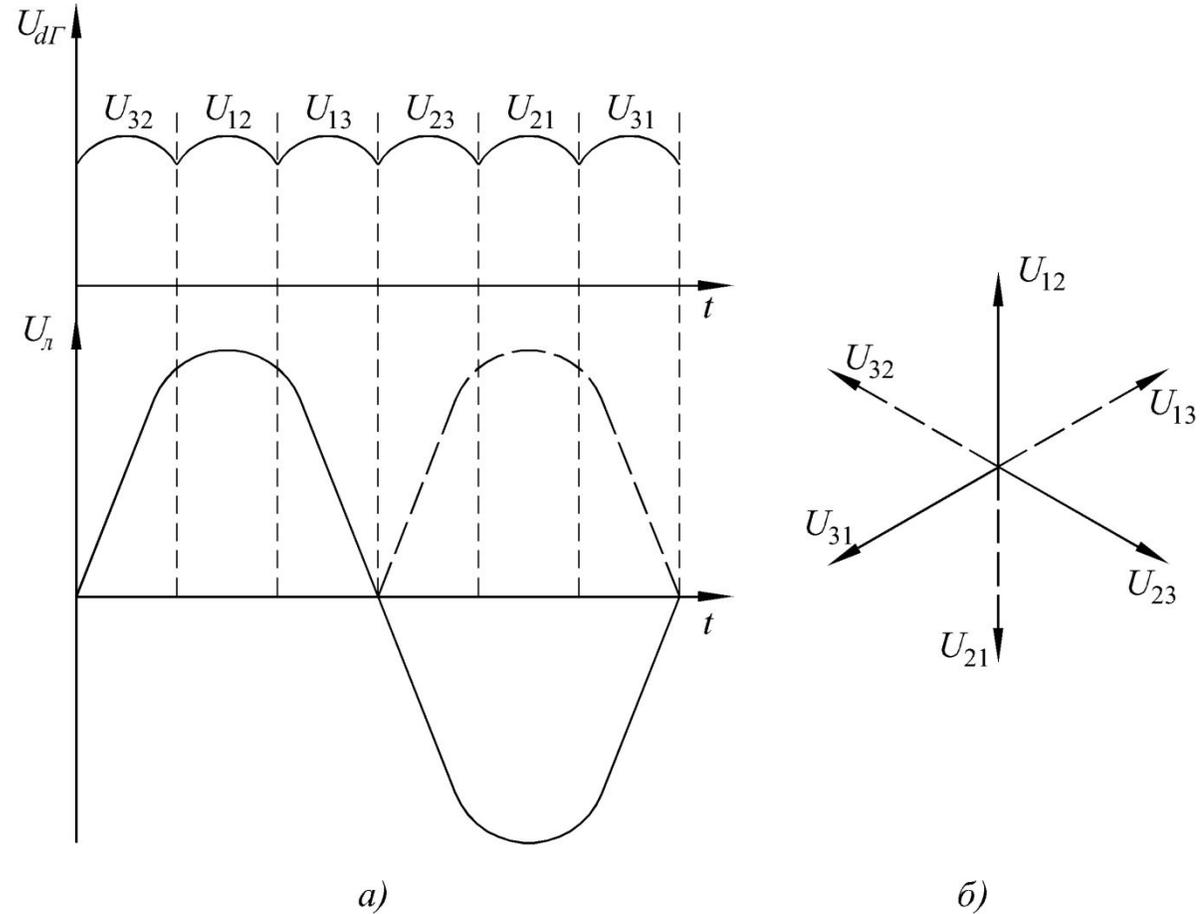


Диаграмма фазного (одна фаза) и выпрямленного напряжений

Выпрямитель работает следующим образом: в каждый момент времени открыт тот диод катодной группы, к которому подключена фаза с наибольшим по величине положительным мгновенным значением напряжения, и один из диодов анодной группы, к которому подключена фаза с наибольшим по абсолютной величине отрицательным напряжением. Если в определенный момент времени наибольшее положительное фазное напряжение -  $U_{\phi_1}$ ,

то будет проводить ток диод  $VD_3$ . Если в этот же момент времени наибольшее по абсолютной величине отрицательное напряжение -  $U_{\phi_2}$ , то проводить ток будет диод  $VD_5$ .

Выпрямленное напряжение  $U_{d\Gamma}$  с фазным  $U_{\phi}$  связано соотношением

$$U_{d\Gamma} = k_B k_{cx} U_{\phi},$$

где  $k_{cx}$  – коэффициент схемы, учитывающий схему соединения фаз («звезда» или «треугольник»);

Коэффициент схемы численно равен отношению амплитудного значения выпрямленного напряжения к амплитудному значению фазного напряжения. Так для «звезды» он равен  $\sqrt{3}$ , а для «треугольника» - 1

$k_B$  – коэффициент выпрямления, учитывающий схему соединения диодов, то есть схему выпрямителя ( в нашем случае  $k_B = 1,35$ ).

Выпрямленный ток с фазным связан коэффициентом выпрямления по току

$$k_I = \frac{I_{\phi}}{I_d}$$

Для соединения фаз в звезду этот коэффициент равен 0,82, а для соединения фаз в треугольник -0,43.

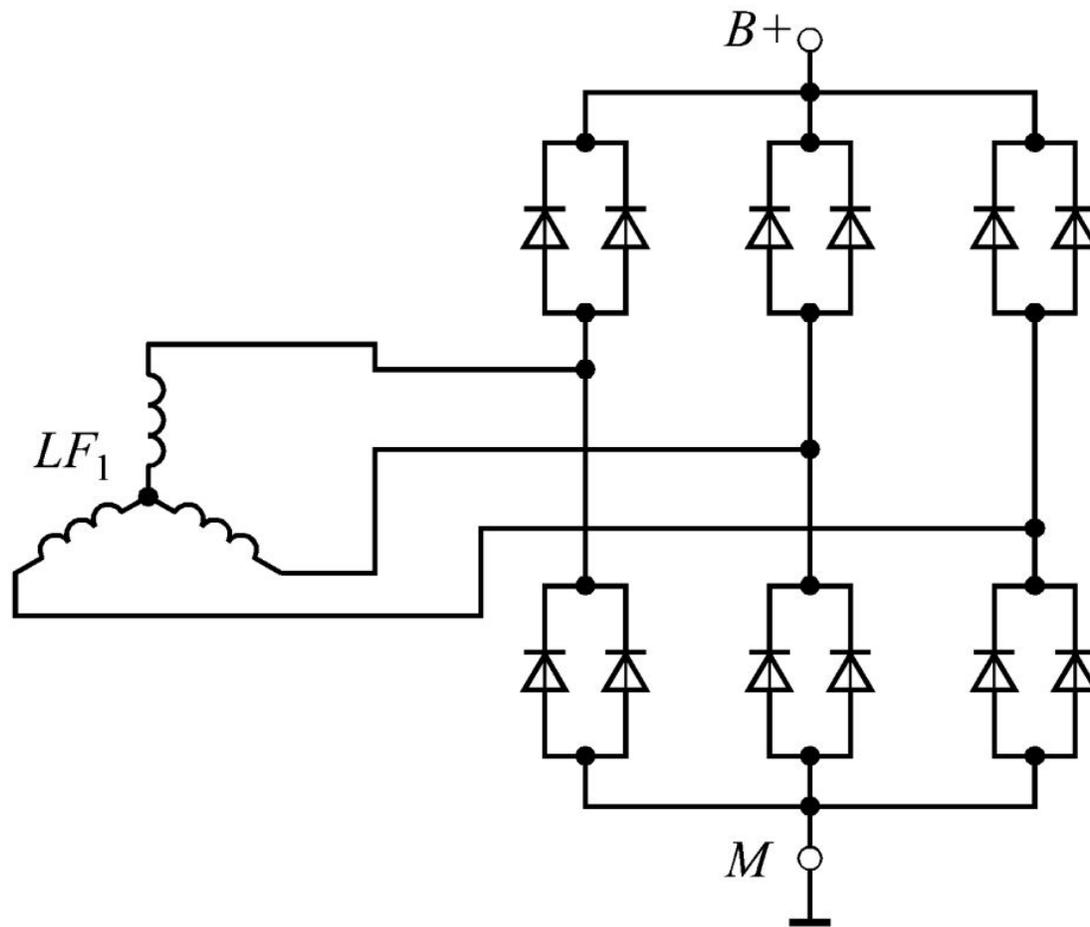


Схема выпрямительного блока с двенадцатью диодами.

Удвоения тока генератора при увеличении в два раза числа диодов не происходит, так как ток между двумя параллельными диодами распределяется неравномерно. От выпрямительного блока показанного на рисунке 5.5 с диодами на 20 А можно получить ток 90-100 А.

Для того, чтобы обеспечить большой выходной ток генератора можно увеличить количество фаз обмотки статора.

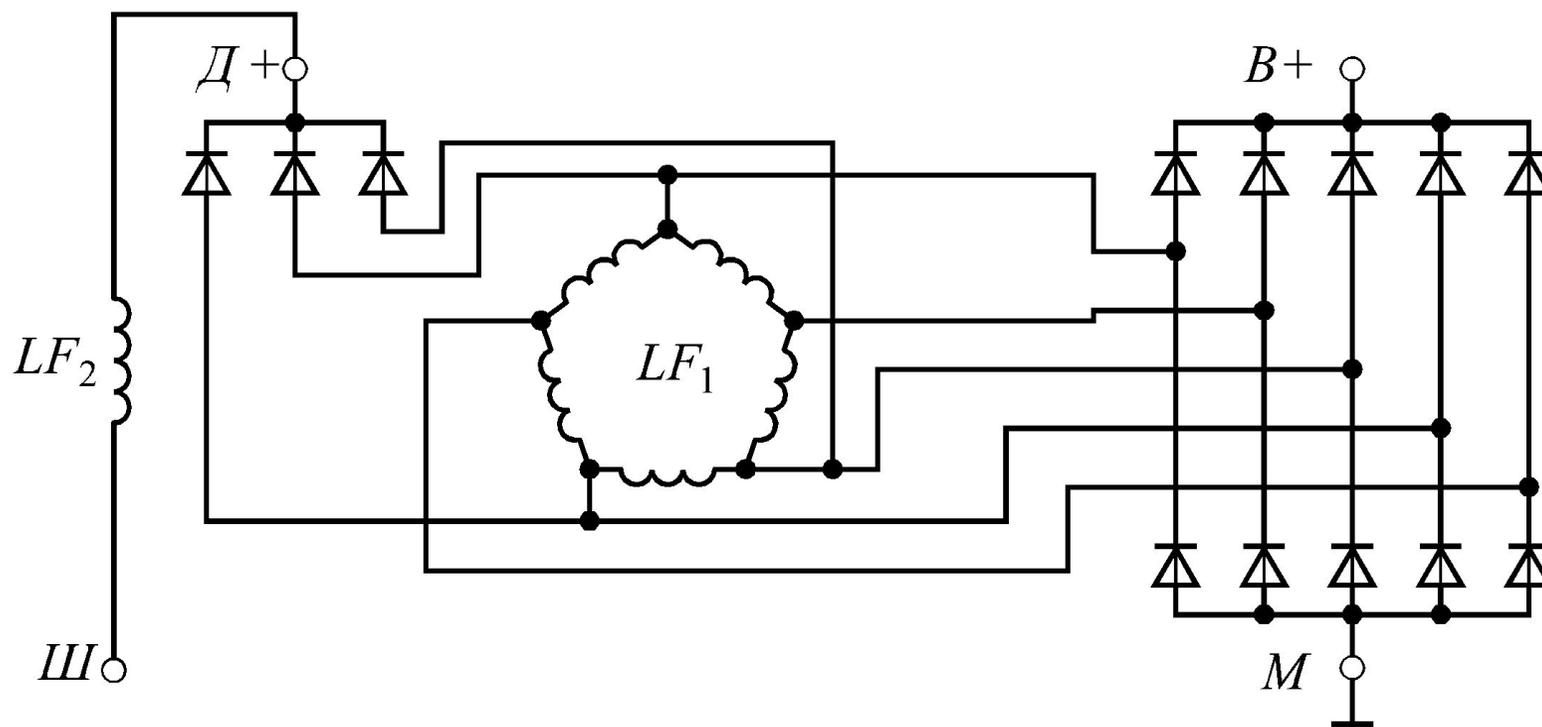
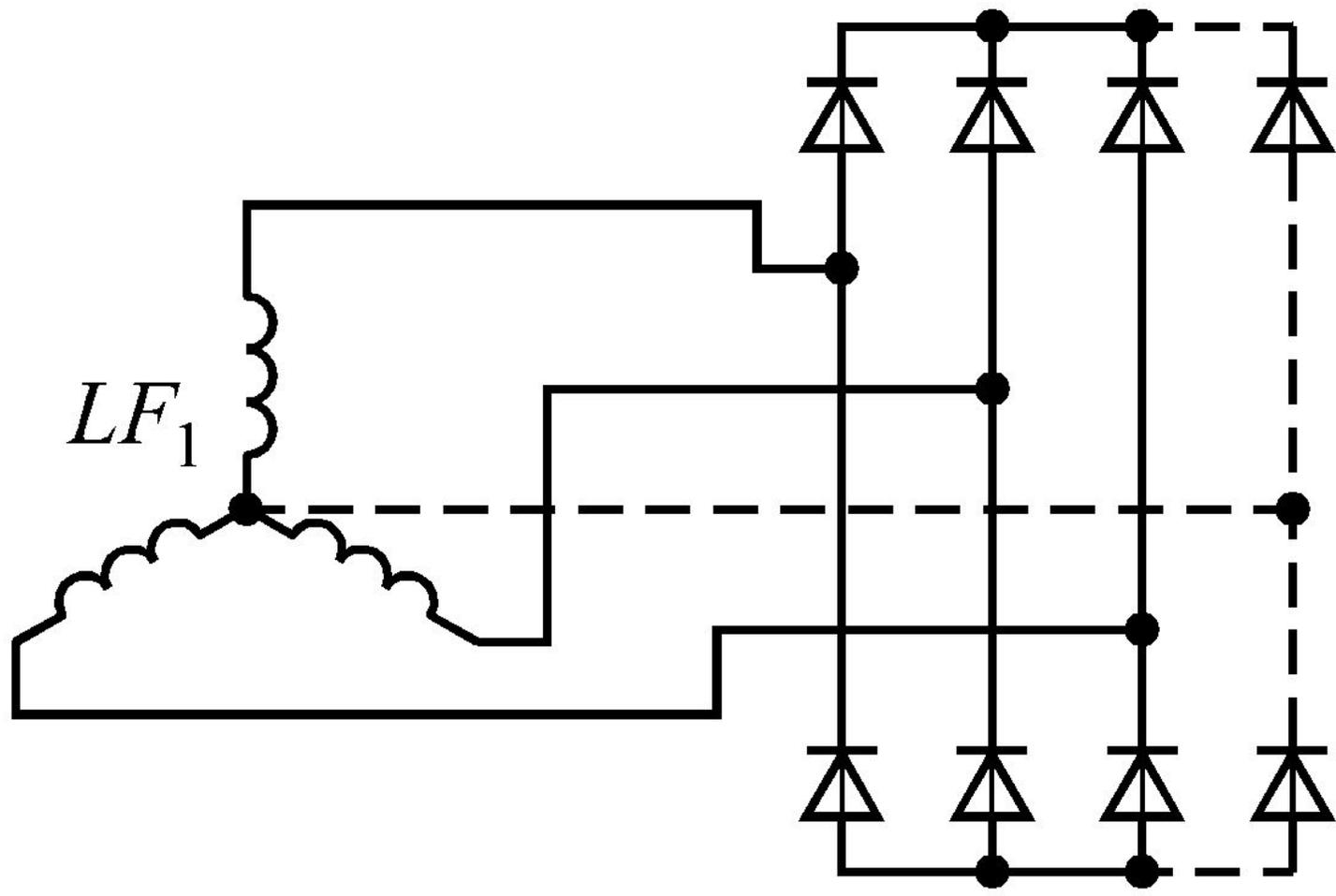
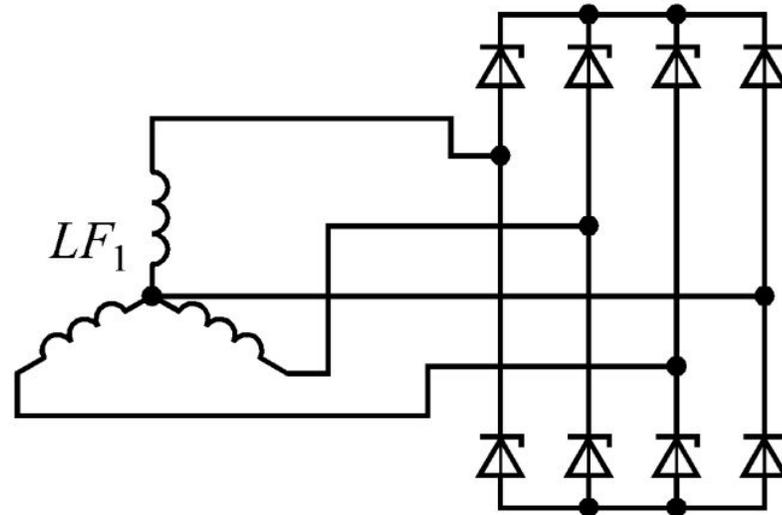


Схема выпрямительного блока для генератора с пятью фазами и трехфазным дополнительным выпрямителем.



Выпрямитель с дополнительным плечом.

Для уменьшения импульсов повышенного напряжения в электрической сети вместо диодов в выпрямительном блоке применяются стабилитроны, напряжение стабилизации которых в 1,5 раза больше чем напряжение генератора.



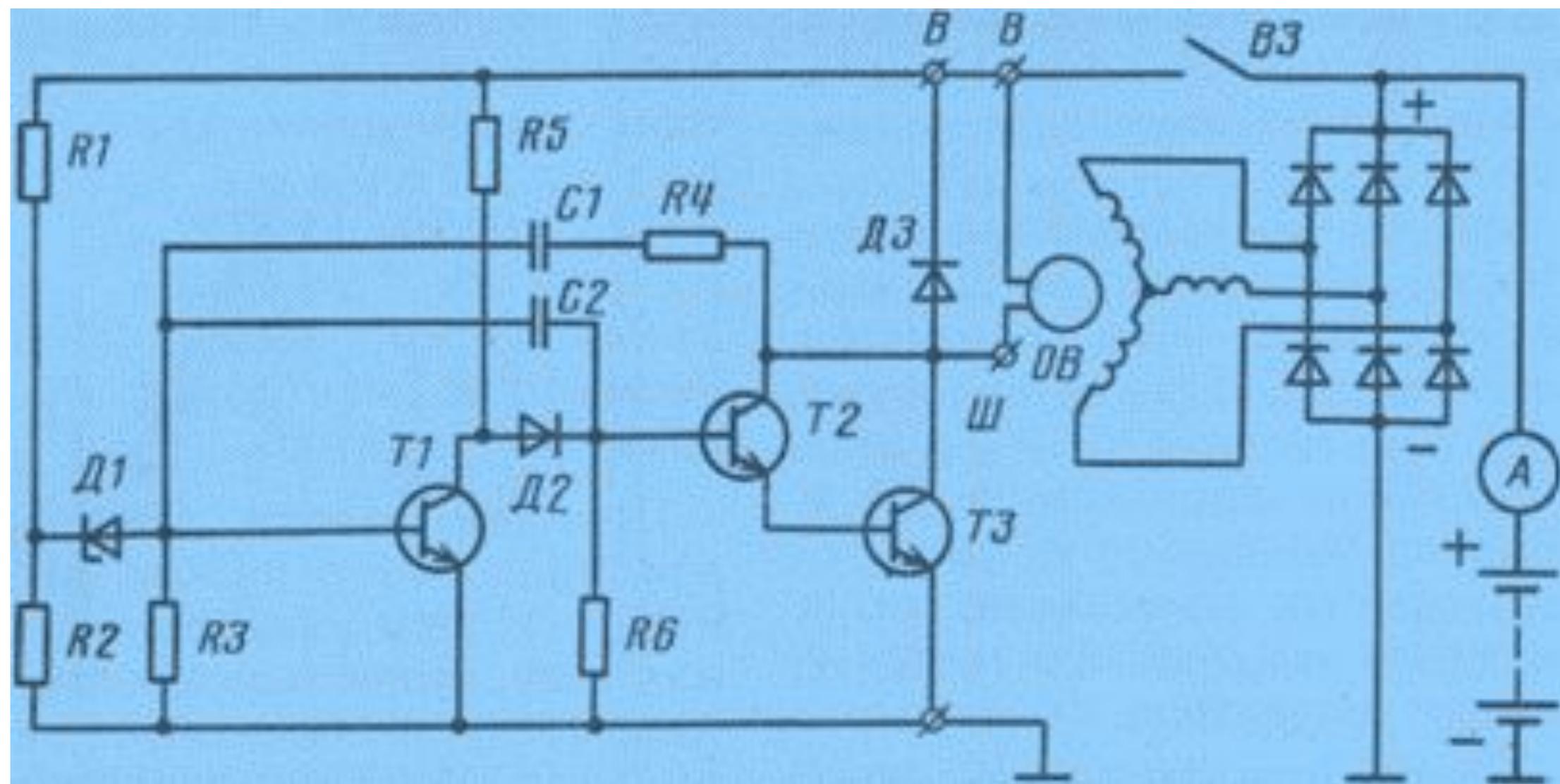
### **Схема выпрямительного моста с применением стабилитронов.**

Если мгновенное значение напряжения на выходе генератора превзойдет трехкратное номинальное напряжение генератора, то стабилитроны пробьются и подгрузят генератор дополнительным током, что приведет к понижению амплитуды импульса выходного напряжения генератора.



VTN





## Характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика генератора

Характеристика холостого хода (ХХХ) представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения

$$U_{d\Gamma} = f(I_B)$$

в ненагруженном режиме, когда ток на выходе генератора равен нулю

$$I_H = 0$$

при постоянной частоте вращения

$$n = \text{const}$$

Напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода пропорционально напряжению фазы обмотки статора.

$$U_{dГ} = K \cdot U_{\Phi}$$

У генератора с независимым возбуждением при отсутствии тока нагрузки напряжение фазы обмотки статора равно ЭДС фазы этой обмотки и рассчитывается по формуле (4.1).

$$U_{\phi} = E_{\phi} = C_e \cdot \Phi \cdot n \quad (4.1)$$

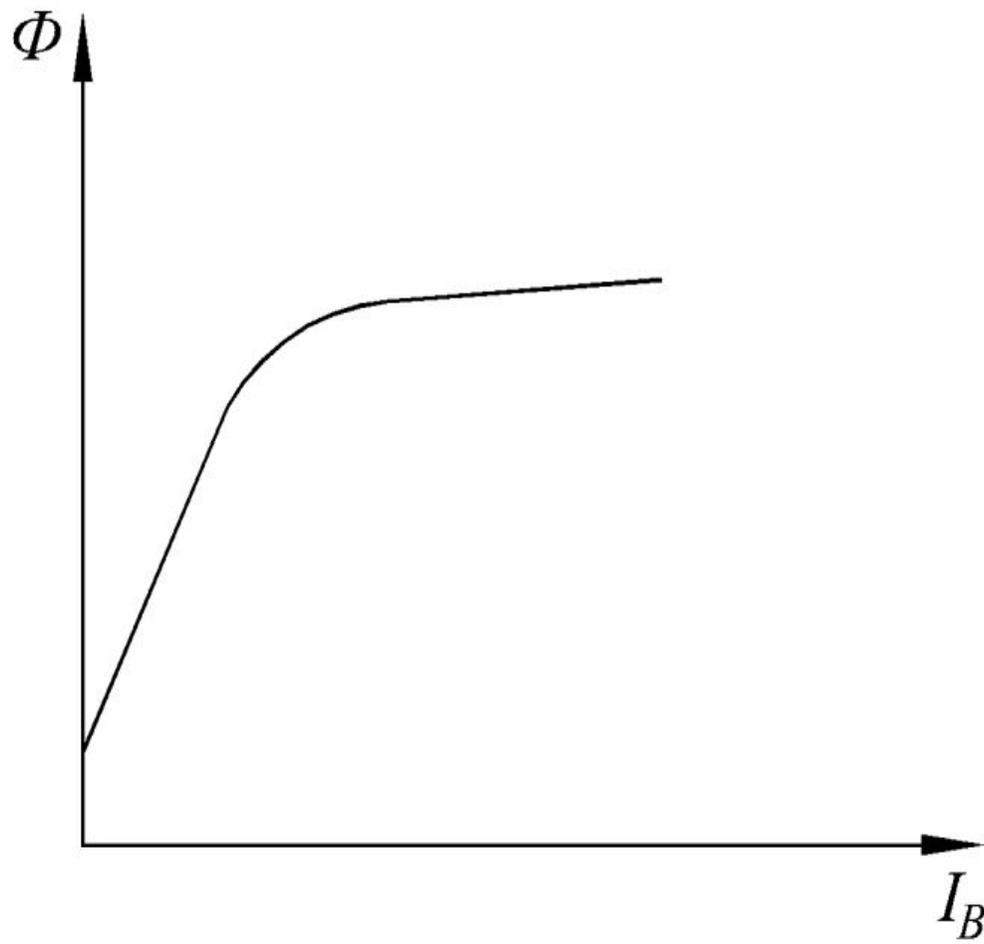
где

$C_e$  – конструктивный коэффициент;

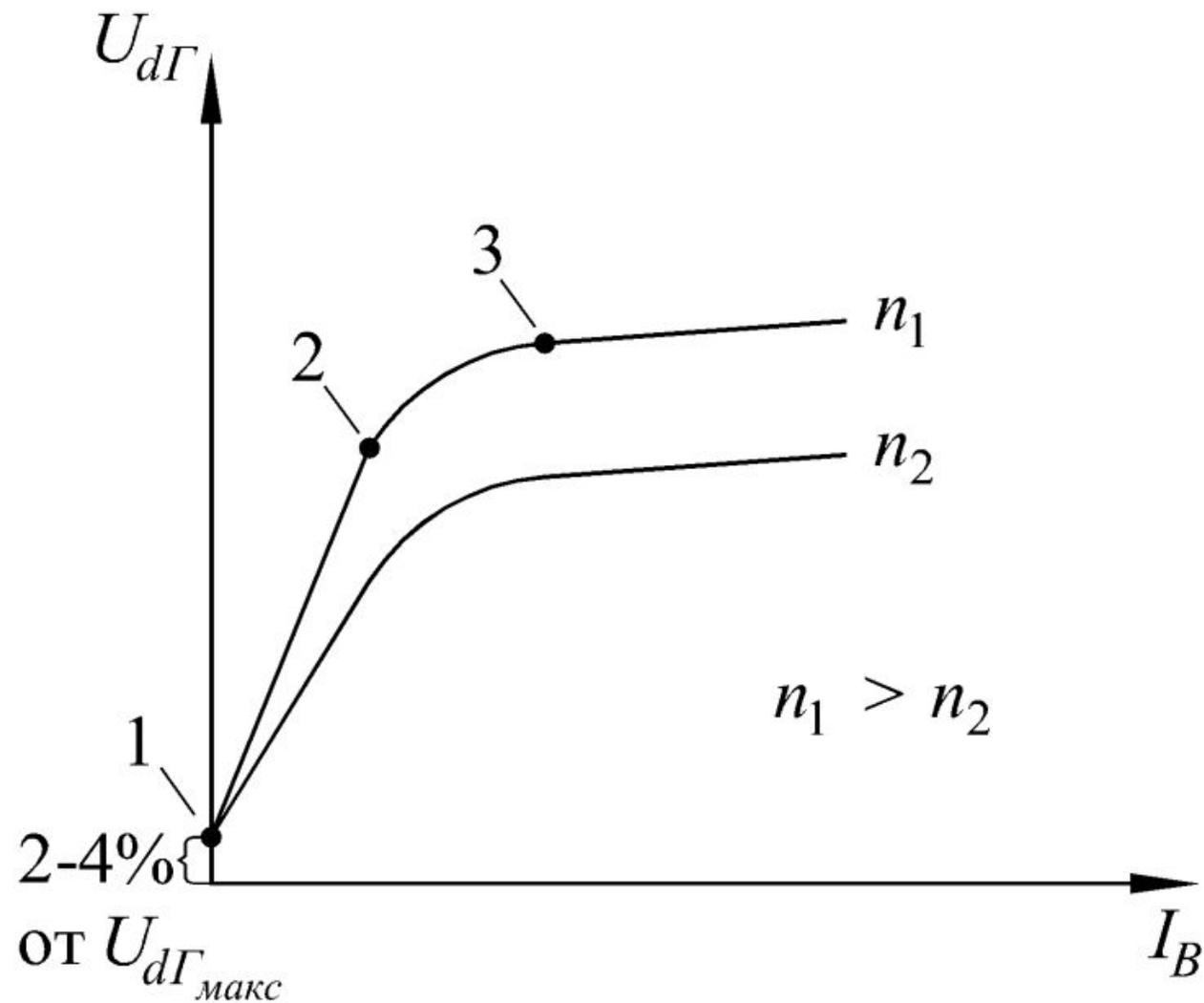
$\Phi$  – магнитный поток;

$n$  – частота вращения ротора генератора.

Характеристика холостого хода повторяет в некотором масштабе кривую намагничивания магнитной цепи генератора.



Кривая намагничивания магнитной цепи генератора



Характеристика холостого хода;

Точка 1 соответствует напряжению, имеющему место из-за остаточного намагничивания генератора.

Участок от точки 1 до точки 2 соответствует ненасыщенной магнитной цепи генератора.

Участок от точки 2 до точки 3 (коллено) – это участок перехода от ненасыщенной магнитной цепи к насыщенной.

Точка 3 и участок далее соответствуют насыщенной магнитной цепи генератора.

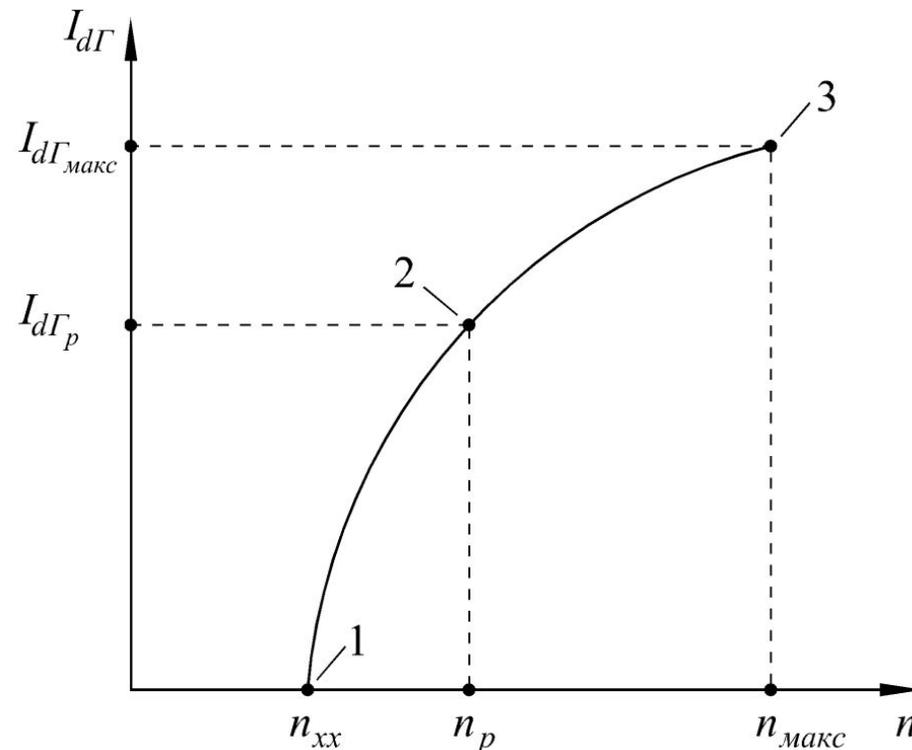
Ординаты этой характеристики пропорциональны частоте вращения ротора генератора  $n$

## Токоскоростная характеристика генератора

Токоскоростной характеристикой (ТСХ) генератора является зависимость тока на выходе генератора от частоты вращения его ротора при постоянных напряжении генератора и сопротивлении возбуждения, то есть

$$I_{d\Gamma} = f(n) \quad \text{при} \quad U_{d\Gamma} = const \quad \text{и} \quad R_B = const$$

. При этом  $I_B = \frac{U_{d\Gamma}}{R_B} = const.$



Токоскоростная характеристика генератора.

. Она имеет несколько характерных точек и соответствующих им параметров. Точка 1 характеризуется начальной частотой вращения ротора генератора без нагрузки  $n_{xx}$  и нулевым током на выходе генератора. Точке 2 соответствует расчетная частота вращения ротора и расчетный ток на выходе генератора, точке 3 – максимальные значения частоты вращения и тока на выходе генератора. Номинальным током генератора является величина его выходного тока по токоскоростной характеристике при определенной частоте вращения ротора генератора. Эта частота вращения для отечественных генераторов обычно составляет 5000 об./мин, а для иностранных генераторов- 6000 об./мин.



## **Работа системы электроснабжения.**

Режим I. Двигатель не запущен. Выключатель зажигания

$S$  разомкнут.

Режим II. Замыкается выключатель зажигания  $S$ , но двигатель автомобиля не запущен.

Режим III. После пуска двигателя.

Режим IV. Отказ генератора.

Режим V. Остановка двигателя.

Размыкается выключатель зажигания  $S$

И система электроснабжения возвращается в режим I.