

3. Генераторные установки. часть 1: вентильные генераторы

3.1. Общие сведения

Генераторная установка состоит из электрогенератора и регулятора напряжения. Они, вместе с элементами контроля работоспособности и защиты от возможных аварийных режимов, образуют систему электроснабжения автомобиля.

Генераторная установка обеспечивает питанием электропотребители, включенные в бортовую сеть автомобиля и заряжает аккумуляторную батарею при работающем двигателе.

Генераторная установка питает бортовую сеть автомобиля постоянным током. Однако известно, что механическую энергию можно преобразовать в электрическую только посредством переменного тока. Поэтому ранее автомобили снабжались выпрямителем-коллектором со щетками в генераторах постоянного тока, а теперь - полупроводниковым выпрямителем в повсеместно применяющихся автомобильных вентильных генераторах.

Вентильный генератор - синхронный генератор, у которого выпрямление тока и напряжения осуществляется полупроводниковым выпрямителем (собранным на диодах – «вентильях»), встроенным в генератор, а возбуждение генератора может быть как электромагнитное, так и магнитное (с помощью постоянного магнита).

3.2. Принцип действия вентильного генератора

Автотракторные синхронные генераторы имеют в основном электромагнитное возбуждение, так как в этом случае легко осуществляется поддержание постоянства напряжения на генераторе в широком диапазоне частоты вращения.

Рассмотрим принцип действия синхронного генератора электромагнитного возбуждения с использованием упрощенной схемы (рис.3.1).

Магнитопровод статора (якоря) 1 набирают из штампованных пластин электротехнической стали (для уменьшения потерь на вихревые токи), в пазах которого находится обмотка якоря. Трехфазная обмотка состоит из трех однофазных обмоток 2, сдвинутых в пространстве на 120 град. относительно друг друга. На полюсах ротора 3 (индуктора) располагают катушку обмотки 4 возбуждения, концы которой выводят к двум контактными кольцам 5, расположенным на валу 6 и изолированным друг от друга и вала. Ротор генератора приводится во вращение с частотой n_{pm} с помощью ременной передачи от

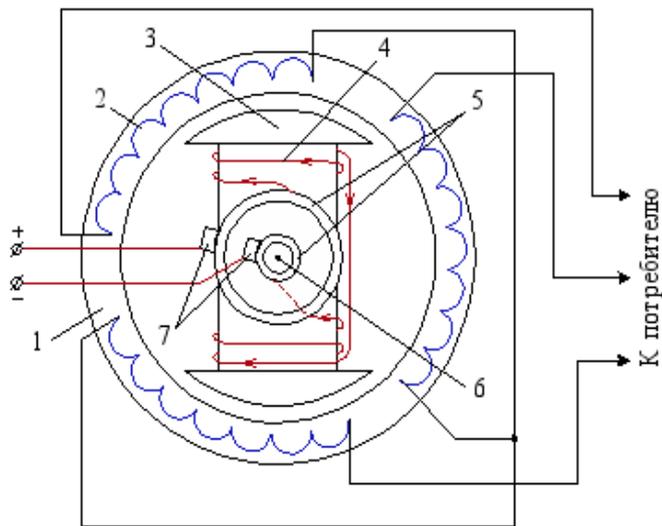


Рис. 3.1. Упрощенная электромагнитная схема синхронного генератора электромагнитного возбуждения

двигателя, с помощью щеток 7, скользящих при его вращении по кольцам, к обмотке возбуждения подходит ток постоянной силы, который, протекая по обмотке 4, создает магнитное поле – поле возбуждения. Поле, вращаясь вместе с ротором, пересекает проводники обмотки якоря и наводит в фазах обмотки ЭДС E_{ϕ} одинаковой величины и частоты, но сдвинутые по фазе на 120 эл. град. ЭДС.

В обмотках статора индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), прямо пропорциональная скорости изменения магнитного потока.

ЭДС, наводимая в обмотке статора

$$E = c n_{\text{рт}} \Phi ,$$

где c – постоянная, учитывающая число витков в обмотках статора, размеры генератора и др.; $n_{\text{рт}}$ – число оборотов в минуту ротора; Φ – величина магнитного потока [Вб], создаваемого током возбуждения $I_{\text{в}}$.

Генераторы на большие напряжения изготавливаются с большим числом витков обмоток статора.

Ток возбуждения является свободным параметром, изменением которого поддерживается постоянное напряжение в бортовой сети автомобиля регулятором напряжения.

Линейная ЭДС $E_{\text{л}}$ на выходе синхронного трехфазного генератора зависит от схемы соединения фазных обмоток статора:

в звезду (Y): $E_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot E_{\phi}$; в треугольник (Δ): $E_{\text{л}} = E_{\phi}$.

При подключении к обмотке статора нагрузки в фазах генератора появляются фазные токи. Магнитное поле переменного тока вращается в пространстве с той же скоростью, что и ротор, т. е. синхронно. Отсюда и название - синхронный генератор.

При мощности генератора до 600 Вт их выполняют трехфазными с соединением фаз в звезду, при большей мощности генератора фазы соединяют в треугольник, двойную звезду, двойной треугольник и переходят на большее число фаз.

Частота ЭДС, индуцированной в обмотке статора $f = n_{pm} / 60p$, определяется частотой вращения ротора $n_{pm} = k_{nep} \cdot n$, (где n – частота вращения коленчатого вала, $k_{nep} = n_{pm}/n$ – передаточное число ременного привода, p – число пар полюсов обмотки статора).

В автомобилях и тракторах k_{nep} выбирается в пределах $1,5 \div 2,5$.

3.3. Электрическая схема простейшей генераторной установки Г-250

Генератор Г-250 является одним из самых распространенных и имеет наиболее простую электрическую схему (рис. 3.2).

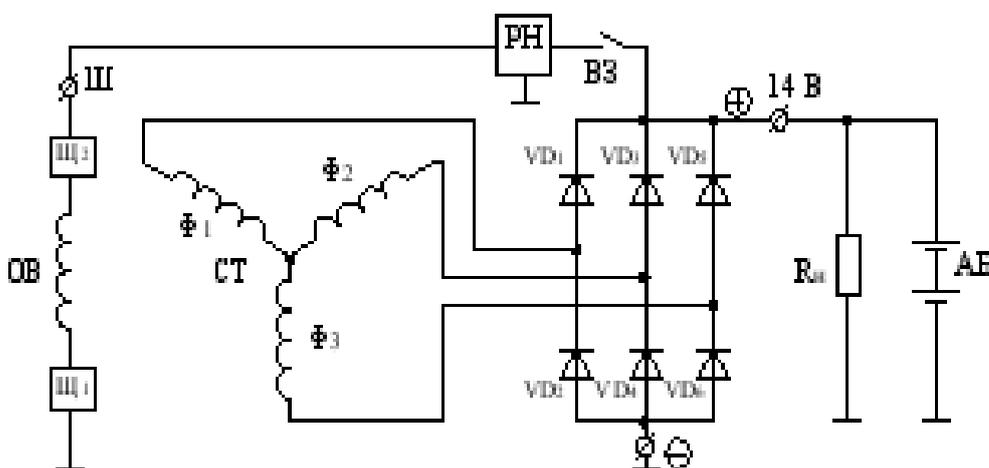


Рис. 3.2. Электрическая схема подключения генератора Г-250

на автомобиле ГАЗ-53А: СТ – обмотки статора; ОВ – обмотка возбуждения; Щ₁, Щ₂ – щетки;

+, Ш – выводы генератора; РН – регулятор напряжения; Ф₁, Ф₂, Ф₃ – выводы фаз обмоток статора;

VD₁...VD₆ – выпрямительные диоды; ВЗ – выключатель в замке зажигания; R_н – сопротивление нагрузки.

Обмотки статора генератора подключены по схеме "звезда". Ток на обмотку возбуждения ОВ подается от регулятора напряжения РН через щетки Щ₁ и Щ₂. Один вывод щеточного узла заземлен, а другой подключен к клемме Ш. Выводы фаз Ф₁, Ф₂, Ф₃ обмоток статора СТ генератора подключены к диодам VD₁ ... VD₆ выпрямительного узла.

Ток возбуждения подается от регулятора напряжения и создает магнитное поле ротора. При вращении ротора генератора обмотки статора пронизывает переменный магнитный поток и в них индуцируется переменное трехфазное напряжение.

3.4. Характеристики вентильных генераторов

Особенность работы автомобильных генераторов состоит в том, что в связи с непостоянной скоростью движения автомобиля изменяется n_{pm} , а следовательно частота и величина ЭДС, наводимой в обмотках статора.

Автомобильные генераторы имеют следующие частотные параметры:

- минимальная частота вращения ротора в режиме холостого хода ($n_{pm\ x}$), при которой генератор еще развивает номинальное напряжение;
- номинальная частота вращения $n_{pm\ n}$ при которой генератор развивает номинальную мощность при номинальном напряжении;
- минимальная частота вращения ротора $n_{pm\ p}$, соответствует режиму, при котором отношение выпрямленной мощности к $n_{pm\ p}$ максимально (режим максимальной тепловой нагрузки);

- максимальная частота вращения ротора $n_{pm\ max}$.

Характеристики вентильных генераторов имеют особенности, связанные с наличием выпрямителя, соответствующим подбором обмоточных данных, обеспечивающих минимальную частоту вращения, при которой в режиме холостого хода выпрямленное напряжение достигает номинального значения, и самоограничение тока отдаваемого генератором.

Характеристики холостого хода вентильного генератора (рис. 3.3) представляют собой зависимость выпрямленного напряжения от силы тока возбуждения $E_d = f(I_{вз})$ при $n_{pm} = const$ и $I_d = 0$ ($R_{из} = \infty$) полученные при независимом возбуждении.

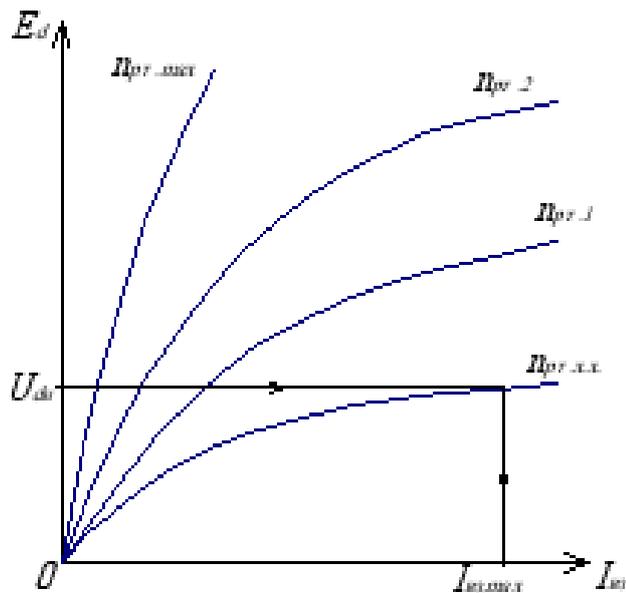


Рис. 3.3. Семейство характеристик холостого хода вентильного генератора

Внешние характеристики вентильного генератора (рис. 3.4) при работе генератора в условиях независимого возбуждения (напряжение $U_{вз}$, соответствует номинальному напряжению генератора) представляют собой зависимость выпрямленного напряжения от силы тока нагрузки $U_d = f(I_d)$ при $n_{pm} = const$, $U_{вз} = U_d = const$ и сопротивлении возбуждения $R_{вз} = const$. При увеличении нагрузки выпрямленное напряжение снижается под действием реакции якоря, падения напряжения в цепи якоря и в выпрямителе. Падение напряжения в выпрямителе невелико, падение напряжения в обмотках якоря значительно и зависит от частоты вращения ротора.

Полное сопротивление фазы обмотки статора

$$Z_{\phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + X^2} = \sqrt{R_{\phi}^2 + (2\pi n_{пр} L_1 / 60 p)^2}$$

где R_{ϕ} — активное сопротивление фазы;

X - синхронное индуктивное сопротивление фазы, равно $2\pi f L_1 = 2\pi(n_{pm}/60p)L_1$,

L_1 - индуктивность фазы.

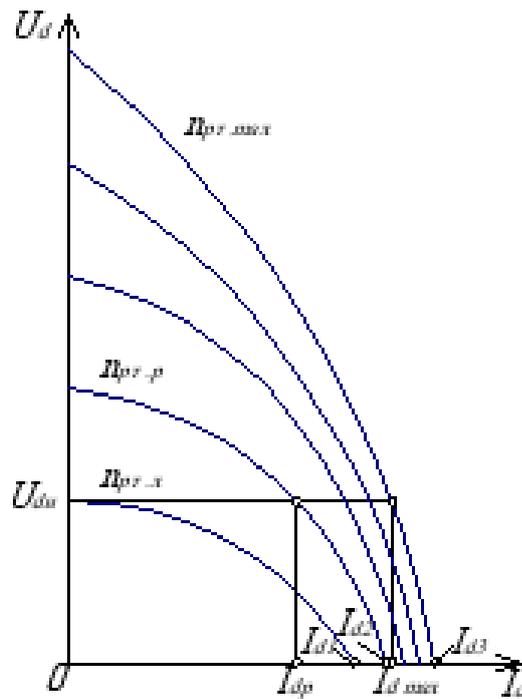


Рис. 3.4. Внешние характеристики вентильного генератора

Величина Z_{ϕ} зависит от частоты n_{pm} , поэтому с ее повышением крутизна спада напряжения U_d увеличивается. На характеристике отмечают значения

$I_{d\ max}$ - максимальное значение выпрямленного тока при $n_{pm\ max}$ и $U_d = U_{dn}$; I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} - выпрямленный ток короткого замыкания соответственно при частоте вращения $n_{pm\ x}$, $n_{pm\ p}$, $n_{pm\ max}$.

В вентильных генераторах с самоограничением силы выпрямленного тока, ток короткого замыкания (на больших частотах рабочего диапазона) близок к максимальной силе выпрямленного тока $I_{d\ max}$ при номинальном выпрямленном напряжении U_{dn} .

Способность генераторной установки обеспечивать электропитанием потребителей электроэнергии на автомобиле во всех режимах его работы характеризует *токоскоростная характеристика* (ТСХ), т.е. зависимость силы тока, отдаваемого генератором в нагрузку, от частоты вращения его ротора при постоянной величине напряжения на силовых выводах генератора.

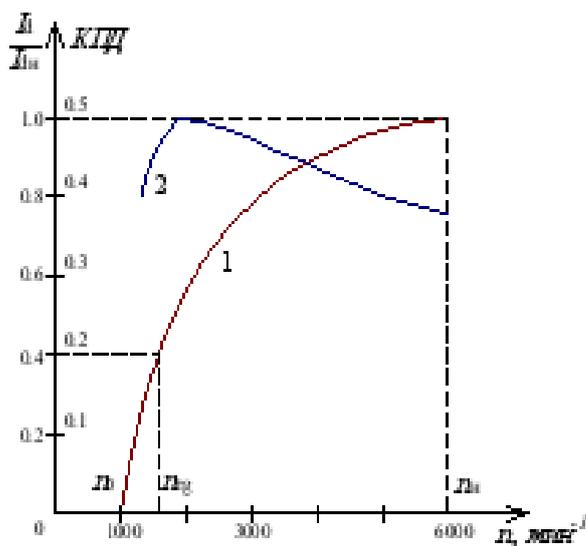


Рис. 3.5. Выходные характеристики генераторной установки:
 1 - токоскоростная характеристика; 2 - КПД по току к токоскоростной характеристике

Вид токоскоростной характеристики генераторных установок легковых автомобилей, построенной в относительных единицах по отношению к номинальной величине силы отдаваемого тока, представлен на рис. 3.5.

Характеристика демонстрирует существенное достоинство вентильных генераторов - их самозащиту и самоограничение отдаваемого ими тока. Достигнув определенной величины, ток практически не увеличивается с

ростом частоты вращения ротора.

Токоскоростная характеристика имеет характерные точки, к которым относятся:

n_0 - начальная частота вращения ротора без нагрузки. Поскольку обычно снятие характеристики начинают с тока нагрузки около 2 А, то эта точка получается экстраполяцией снятой характеристики до пересечения с осью абсцисс.

n_{rg} - минимальная рабочая частота вращения ротора, т.е. частота вращения, примерно соответствующая оборотам холостого хода двигателя. Условно принимается $n_{rg} = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (для высокоскоростных генераторов – 1800 мин^{-1}). Сила тока I_{dg} при этой частоте обычно составляет 40-50% номинального тока и, во всяком случае, должна быть достаточна для обеспечения питанием тех потребителей энергии на автомобиле, от которых зависит безопасность.

n_n - номинальная частота вращения ротора, при которой вырабатывается номинальный ток I_{dn} , т.е. ток, сила которого не должна быть меньше номинальной величины.

n_{max} - максимальная частота вращения ротора. При этой частоте генератор вырабатывает максимальный ток I_{max} , сила которого мало отличается от силы номинального тока. Отечественные изготовители ранее обычно указывали номинальный ток генератора при частоте вращения ротора 5000 мин^{-1} , а также указывали частоту вращения ротора генератора в расчетном режиме n_p , соответствующему расчетному току генератора I_{dp} , обычно составляющему две трети номинального тока. В расчетном режиме нагрев узлов генератора

наибольший. Характеристики определялись при напряжении 14 В.

3.5. Принцип действия трехфазного выпрямителя

Трехфазный двухтактный выпрямитель (рис. 3.6) содержит две группы диодов – анодную группу (VD2,VD4,VD6) и катодную группу (VD1,VD3,VD5).

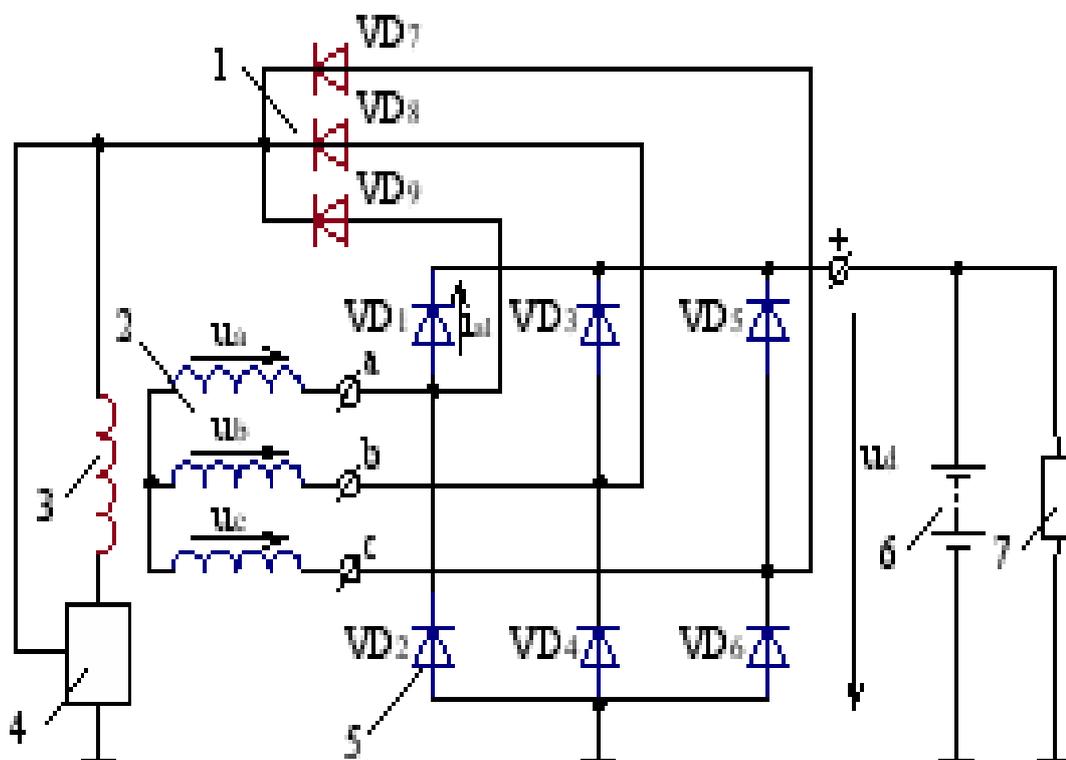


Рис. 3.6. Принципиальная схема генераторной установки:

u_a, u_b, u_c – фазные напряжения обмоток статора; u_d – выпрямленное напряжение;

1 – диоды выпрямителя обмотки возбуждения; 2 – обмотки фаз статора;

3 – обмотки возбуждения; 4 – регулятор напряжения; 5 – диоды силового выпрямителя;

6 – аккумуляторная батарея; 7 – нагрузка.

Полупроводниковые диоды находятся в открытом состоянии и не оказывают существенного сопротивления прохождению тока при приложении к ним напряжения в прямом направлении и практически не пропускают ток при обратном напряжении.

Подключение обмотки возбуждения к собственному выпрямителю на диодах VD7 – VD9 препятствует протеканию через нее тока разряда аккумуляторной батареи при неработающем двигателе автомобиля.

К каждому плечу силового выпрямителя (VD1 – VD2 и др.) приложены фазные напряжения обмоток статора, которые изменяются по кривым, близким к синусоиде, и сдвинуты на 120 эл. град. В любой момент времени ток в выпрямителе проводят два диода: один в катодной группе, другой - в анодной. В катодной группе открыт тот вентиль, потенциал которого выше потенциалов анодов других вентилях в группе, а в анодной группе – вентиль, потенциал катода которого ниже потенциалов катодов других вентилях группы.

Коммутация тока с одного вентиля на следующий, очередной в данной группе происходит в моменты пересечения синусоид фазных напряжений обмоток статора (рис. 3.7). Например, на интервале $\pi/6 < \omega t < \pi/2$ наибольшее значение имеет напряжение u_a , а наименьшее – u_b . Соответственно открыты диоды VD1 и VD4, ток замыкается по контуру 2–VD1–R_d–VD4–2, к нагрузке приложено напряжение $u_{ab} = u_a - u_b$. На интервале $\pi/2 < \omega t < 5\pi/6$ открыты VD1, VD6, к нагрузке прикладывается напряжение u_{ac} и т. д. В результате к нагрузке в любой момент времени приложено линейное напряжение.

Токи через диоды анодной и катодной группы (VD1 и VD3, VD3 и VD5, VD2 и VD4, VD4 и VD6) сдвинуты относительно друг друга во времени на треть периода; токи через диоды анодной и катодной группы одной и той же фазы находятся в противофазе.

Кривая обратного напряжения на закрытом диоде состоит из «кусков» синусоид соответствующих линейных напряжений.

Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d изменяется и частота пульсации выпрямленного напряжения в 6 раз больше переменного напряжения. Минимальное значение выпрямленного напряжения равно $1,5U_m$, а максимальное $1,73U_m$ (U_m – амплитуда фазного напряжения). Для трехфазной мостовой схемы выпрямления среднее значение выпрямленного напряжения в 2,34 раза больше действующего фазного и в 1,35 раза больше действующего линейного напряжения.

Диоды выпрямителя обмотки возбуждения работают аналогично, питая выпрямленным током эту обмотку. В выпрямитель обмотки возбуждения входят также 6 диодов, но три из них - VD2, VD4, VD6 - общие с силовым выпрямителем. Ток в обмотке возбуждения значительно меньше, чем ток, отдаваемый генератором в нагрузку. Поэтому в качестве диодов VD7 – VD9 применяются малогабаритные слаботочные диоды, рассчитанные на ток не более 2 А.

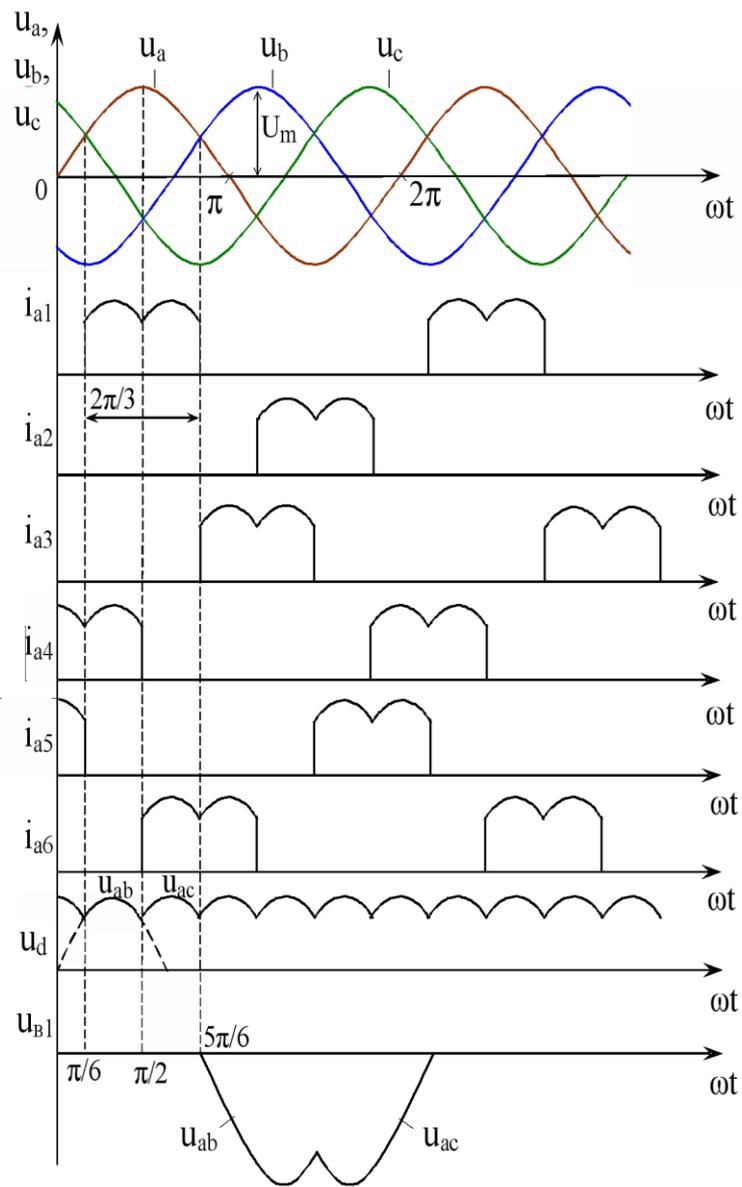


Рис. 3.7. Временные диаграммы электромагнитных процессов в трехфазном двухтактном выпрямителе