

**Федеральное агентство по образованию  
Пермский государственный технический университет  
Кафедра электрификации и автоматизации горных  
предприятий**

Утверждено  
на заседании кафедры  
15 марта 2006 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Методическое руководство к лабораторной работе для студентов  
всех специальностей ГНФ всех форм обучения

Пермь 2006

Исследование характеристик трехфазного мостового тиристорного преобразователя. Метод. руководство по курсу «Элементы систем автоматики» для студентов специальности ЭАГП. Сост.: Васильев Б.В., Аристов Е.В., Хузин Р.А. Пермский государственный технический университет, Пермь, 2006.

Приводятся анализ работы трехфазного мостового преобразователя и зависимости для расчета его параметров и характеристик, показывается влияние преобразователя на питающую сеть, содержится программа работы и контрольные вопросы.

# Исследование характеристик трехфазного мостового тиристорного преобразователя

Цель работы:

1. Изучение и анализ работы трехфазной мостовой схемы выпрямителя.
2. Теоретические исследования, расчёт параметров и характеристик преобразователя.
3. Экспериментальное определение показателей и характеристик преобразователя.

## Основные теоретические положения

Тиристорные преобразователи постоянного тока чаще всего изготавливаются на базе трехфазной мостовой схемы выпрямления Ларионова, получившей наибольшее распространение. Это обусловлено такими её преимуществами по сравнению с другими схемами, как малые обратное напряжения на тиристорах, хорошее использование и простое исполнение трансформатора, благоприятный характер внешней характеристики, меньшие пульсации выпрямленного напряжения, несколько более высокий коэффициент мощности и др. Не случайно серийные мощные тиристорные выпрямительные агрегаты состоят из набора силовых модулей, выполненных по трехфазной мостовой схеме [3].

Силовая схема трехфазного мостового преобразователя приведена на рис. 1.

Работа любого тиристорного преобразователя в определенной мере, а в ряде случаев существенно, зависит от характера нагрузки, на которую он работает. В инженерной практике принято с целью упрощения и удобства расчетов, прежде всего, рассматривать работу преобразователя на чисто индуктивную, т.е. идеальную нагрузку, когда  $L_d = \infty$

Трансформатор отделяет электрически и согласовывает по напряжениям нагрузку и питающую сеть. Схема соединений его обмоток может быть:  $\wedge/\wedge$ ,  $\wedge/\Delta$ ,  $\Delta/\wedge$ ,  $\Delta/\Delta$ . в отличие от нулевой схемы вторичная обмотка здесь может быть соединена в "треугольник", т.к. для работы не требуется её нулевой вывод. В принципе трехфазную мостовую схему выпрямления можно рассматривать как две последовательно соединенные трехфазные нулевые схемы: одну с общим катодом и другую с общим анодом. В каждый момент времени, при допущении мгновенности процесса коммутации тиристоров, в схеме открыты по одному тиристоры в катодной и анодной группах, причём всегда в контуре токов оказывается нагрузка. Как и в соответствующих нулевых трехфазных схемах, в катодной группе открывается тот тиристор, у которого анод находится под большим положительным потенциалом относительно анодов других тиристоров, а в анодной группе - тиристор с катодом, обладающим большим отрицательным потенциалом относительно катодов других тиристоров. Так, если рассмотреть момент времени  $t_1$  (рис. 2), то ток протекает от фазы «а» через  $T_1$ , нагрузку, тиристор  $T_2$  и на фазу «с». К нагрузке, таким образом,

оказывается приложенным линейное напряжение (а не фазное, как в трехфазной нулевой схеме). В этом существенное различие мостовой и нулевой схем выпрямления. В точке  $t_2$  тиристор  $T_1$  закрывается, а открывается очередной тиристор  $T_3$ , который проводит ток всё с тем же тиристором  $T_2$  до момента времени  $t_3$ . Чередование работы тиристоров обеих групп показано на рис. 2. Продолжительность проводящего состояния каждого тиристора на индуктивную нагрузку равна  $120^\circ$ .

Трансформатор в преобразователе необходим для обеспечения возможности получения требуемого значения максимального выпрямленного напряжения на нагрузке, его электрической и потенциальной развязки с питающей сетью, а также возможности в случае необходимости построения более сложной силовой схемы.

Из рассмотрения очередности работы тиристоров и схемы преобразователя, в целом, следует, что ток, протекающий через вторичную обмотку трансформатора, носит знакопеременный характер. Первичный фазный ток равен вторичному поделенному на коэффициент трансформации трансформатора. Его можно построить на основании закона первичных токов М.А.Ченышева.

Рис. 2-7 детально иллюстрирует формы токов и напряжение в каждой точке схемы, как при чисто индуктивной, так и активной нагрузке.

При активно-индуктивной нагрузке токи и напряжения имеют форму промежуточное значение чем то, которое было при чисто индуктивной или активной нагрузке.

### Основные расчетные параметры преобразователя

Расчет параметров трехфазной мостовой схемы приводится для режима  $L_d = \infty$

Среднее значение тока протекающего через тиристор:

$$I_v = \frac{1}{2} \pi \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d \cdot d\nu = 0.33 I_d \quad (1)$$

(1)

Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре равно амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки:

$$U_{обр. \max} = \sqrt{6} U_{2\phi} = 2.45 U_{2\phi} = 1.05 U_{d_0} \quad (2)$$

Действующее значение тока протекающего через тиристор:

$$I_{в.д} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 d\nu} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_d = 0.577 I_d \quad (3)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_{2\phi} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( 2 \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 \cdot d\nu \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.817 I_d \quad (4)$$

Среднее значение вторичного фазного тока за период, как видно из рис. 2, равно нулю, поэтому потоков вынужденного намагничивания трансформатора в данной схеме, в отличие от нулевой, нет:

Действующее значение фазного тока первичной обмотки трансформатора при соединении её в «звезду»:

$$I_{1\phi} = \frac{1}{K_T} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = 0.817 \frac{I_d}{K_T}, \quad (5)$$

а сетевого тока, потребляемого преобразователем из энергосистемы, при соединении первичной обмотки в «треугольник» равно:

$$I_{c.\phi} = \sqrt{3} I_{1\phi} = \frac{\sqrt{2}}{K_T} I_d = 1.41 \frac{I_d}{K_T} \quad (6)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения проще всего определить в интервале проводимости равном  $\frac{\pi}{3}$ :

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{\pi}{2}} \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_{2\phi} \cdot \sin \nu \, d\nu = 2,34 U_{2\phi} \cos \alpha = U_{d_0} \cos \alpha \quad (7)$$

или:  $U_d = 1.35 \cdot U_{2\phi} \cdot \cos \alpha = U_{d_0} \cdot \cos \alpha$ ,

где:

$\sqrt{2} U_{2\phi}$  - амплитудное значение вторичного фазного напряжения трансформатора, а  $\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_{2\phi}$  линейного напряжения;

$U_{d_0} = 2,34 U_{2\phi} \cos \alpha$  - максимальное выпрямленное напряжение преобразователя при  $\alpha = 0$ ;

$\alpha$  - угол отпирания тиристорov отсчитываемый от точки естественной коммутации;  $U_{2\phi}$  - действующее значение линейного вторичного напряжения трансформатора.

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора одинаковы и равны типовой мощности трансформатора:

$$S_1 = S_2 = S_T = 3 U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} = \frac{\pi}{3} P_{d_H} = 1.05 P_{d_H}, \quad (8)$$

где:  $P_d = U_{d_0} \cdot I_{d_H}$  - номинальная мощность.

Коэффициент повышения расчётной мощности трансформатора:

$$K_{\Pi} = \frac{S_T}{P_{d_H}} = 1.05, \quad (9)$$

что на 29 % ниже, чем у нулевого преобразователя.

Коэффициенты использования тиристорov по напряжению и току, соответственно равны:

$$K_J = \frac{I_{e.d}}{I_d} = 1/\sqrt{3} = 0.577, K_u = \frac{U_{обр.мах}}{U_d} = \pi/3 = 1.05 \quad (10)$$

Как видно из (9), расчётная мощность трансформатора практически равна мощности нагрузки ( $S_T$  превосходит  $P_{dH}$  всего на 5 %). Величина  $U_{обр.мах}$  на тиристорах также на 5 % превышает напряжение  $U_d$ . Как отмечалось, этим объясняется широкое использование данной схемы во многих отраслях преобразовательной техники.

### Гармонический состав первичного тока

Исследование состава и величин гармоник первичного тока трансформатора. Высшие гармонические составляющие в первичном токе преобразователя оказывают существенное влияние на другие потребители, питающиеся от этой же сети, создают потери, вызывают помехи в линиях связи и системах управления преобразователями, сбои в аппаратуре автоматики и т.д. Поэтому необходимо знать состав и величину гармоник первичного тока. Кроме этого, знание их позволяет обосновать рациональную структуру и рассчитать параметры компенсирующего устройства, включающего и сетевые фильтры высших гармоник. По гармоникам первичного тока можно определить гармоники выпрямленного напряжения, энергетические и другие характеристики преобразователя. Для определения гармоник используют разложение кривой первичного тока в тригонометрический ряд, называемый рядом Фурье.

В первичном токе трехфазного мостового преобразователя независимо от схемы соединения первичных или вторичных обмоток "звезда" или "треугольник" содержатся кроме первой, т.е. основной гармоники высшие 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т.д. гармонические составляющие ( $n = 6k \pm 1$ , где  $k$  – любое натуральное число).

$$I_{(n)m} = \frac{4I_d}{\pi k_T} \sin n \frac{\pi}{2} \sin n \frac{\pi}{3},$$

где  $n$  - порядковый номер гармоники (1, 2, 3,...).

При условии поддержания постоянства тока нагрузки  $I_d$  с изменением величины выпрямленного напряжения амплитудные значения гармоник первичного тока не изменяются. Не зависят они и от угла  $\alpha$ , но с увеличением номера гармоник их амплитуды уменьшаются. При необходимости обычно компенсируются наибольшие по амплитуде 5, 7, а иногда 11, 13 гармоники.

### Гармонический состав выпрямленного напряжения

Кривая выпрямленного напряжения содержит шесть пульсаций за период, что характерно для шестифазных нулевых схем выпрямления. Поэтому мостовую схему иногда называют шестифазной.

В напряжении нагрузки содержатся 6, 12, 18, 24 и т.д. гармоники, т.е. кратные шести. Основная (низшая) гармоника шестая имеет частоту 300 Гц. С увеличением угла  $\alpha$  амплитуда гармоник увеличиваются, а с возрастанием номера гармоник - падает.

Величины гармоник определяются по формуле [1]:

$$U_{(n)m} = U_{d_0} \cos \alpha \frac{2}{36n^2 - 1} \sqrt{1 + 36n^2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

В тиристорном электроприводе постоянного тока величина сглаживающей индуктивности устанавливаемой в якорной цепи двигателя рассчитывается с учётом амплитуды шестой гармоники.

Наличие гармоник в выпрямленном напряжении приводит к появлению этих же гармоник и в выпрямленном токе, что негативно сказывается на потребителе. Если это электродвигатель, то ухудшается коммутация тока в коллекторе, возникает дополнительный нагрев двигателя, сокращается срок службы изоляции обмотки якоря и т.д. Наличие пульсаций якорного тока двигателя приводит к пульсациям момента, особенно в области прерывистых токов, изменяет к худшему механические характеристики. С целью уменьшения этих недостатков в цепь якоря приходится вводить сглаживающий реактор. На практике уменьшение уровня гармоник выпрямленного напряжения и первичного тока может быть достигнуто за счёт увеличения фазности преобразователя или в результате иного усложнения силовой схемы.

### Энергетические показатели и характеристики преобразователя

При работе преобразователь потребляет из сети несинусоидальный ток, первая гармоника которого сдвинута в сторону отставания относительно кривой питающего напряжения, т.е. он ведёт себя как индуктивная нагрузка и потребляет реактивную мощность. Это является существенным недостатком не только данной схемы, но и большинства других схем тиристорных преобразователей. Толчки реактивной мощности (возникают при бросках нагрузки с углами  $\alpha$ , соответствующими малым выпрямленным напряжениям) приводят к просадкам напряжения питающей сети, а наличие процесса коммутации тиристоров к искажению его формы.

Энергетические показатели преобразователя оцениваются:

- коэффициентом искажения, характеризующим степень отличия кривой первичного тока от синусоиды:

$$K_u = \frac{I_{(1)m}}{\sqrt{2}I_1} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (12)$$

где  $I_1$  - действующее значение тока потребляемого преобразователем из сети;

- коэффициентом сдвига, характеризующим степень сдвига основной гармоники первичного тока относительно напряжения сети:

$$K_c = \cos \alpha \quad (13)$$

- коэффициентом мощности, характеризующим степень потребления преобразователем реактивной мощности:

$$K_m = K_u K_c = 0,955 \cos \alpha \quad (14)$$

По энергетическим показателям легко определяются значения потребляемых преобразователем мощностей:

- активной:

$$P_a = U_d I_d = 2,34 U_{2\phi} I_d \cos \alpha \quad (15)$$

- реактивной:

$$P_p = \frac{P_a}{K_m} \sqrt{1 - K_c^2} = 2,34 U_{2\phi} \cdot I_d \cdot \sin \alpha \quad (16)$$

- искажения:

$$P_p = \frac{P_a}{K_m} \sqrt{1 - K_u^2} = \frac{U_{d_0} \cdot I_d}{3} \sqrt{\pi^2 - 9} \quad (17)$$

Полная мощность равна:

$$P_{\Pi} = \sqrt{P_a^2 + P_p^2 + P_u^2} = \frac{\pi}{3} U_{d_0} \cdot I_d \quad (18)$$

Таким образом, характер изменения энергетических показателей и характеристик у мостового преобразователя практически такой же, как и у нулевой схемы. Разница состоит в том, что мостовой преобразователь имеет меньший коэффициент мощности при  $\alpha = 0$  на 12,5 %. В целом же из (16) видно, что преобразователь является значительным потребителем реактивной мощности, особенно при больших углах  $\alpha$ , т.е. малых значениях выпрямленного напряжения. Это является одним из самых существенных недостатков как данной, так и многих других схем тиристорных преобразователей. Тиристорные преобразователи, в том числе и мостовые, имеют высокий коэффициент полезного действия, который определяется как:

$$\eta = \frac{U_d I_d \cdot P_a}{U_d I_d + \Delta P_{Tr} + \Delta P_{By} + \Delta P_T},$$

где  $\Delta P_{Tr}$ ,  $\Delta P_{By}$ ,  $\Delta P_T$  - потери мощности, соответственно, в трансформаторе, вспомогательных устройствах и на тиристорах. К.п.д. преобразователя может достигать значений равных 95-98 %.

### Внешние характеристики

Внешние характеристики  $U_d = f(I_d)$  снимаемые при различных  $\alpha$  или  $U_{впр}$  охватывают все режимы работы преобразователя, начиная с холостого хода и кончая коротким замыканием, а потому являются весьма важными. С увеличением тока нагрузки выпрямленное напряжение снижается из-за падения напряжений на активных сопротивлениях схемы, на тиристорах и на индуктивностях трансформатора вследствие процесса коммутации тиристорov. В преобразователях рассчитанных на большое выпрямленное напряжение ( $U$  свыше 500 В) падением напряжения на тиристорах можно пренебречь, на активных сопротивлениях в ряде случаев тоже. Наибольшее

влияние в мощных преобразователях на величину  $U_d$  оказывает процесс коммутации. Коммутация осуществляется при переходе тока с одного тиристора на другой, поочередно сначала в катодной, а затем в анодной группах. Этот процесс длится на интервале угла коммутации  $\gamma$ . При этом каждый раз одновременно оказываются открытыми два тиристора, например,  $T_1$  и  $T_3$ , что приводит к резкому уменьшению сопротивления между коммутируемыми фазами, т.к. сопротивление нагрузки оказывается расположенным вне контура коммутации. На рис. 8 показано влияние процесса коммутации, как на напряжение, так и на токи. Выпрямленное напряжение в зоне коммутации (угла  $\gamma$ ) изменяется по закону:

$$U'_d = \frac{E_a + E_b}{2} = \frac{1}{2} E_{2m} \cos \nu,$$

где  $E_a$  и  $E_b$  - мгновенные значения э.д.с. вторичной обмотки трансформатора;  $E_{2m}$  - амплитудное значение вторичного фазного напряжения.

Падение напряжения от одного процесса коммутации, а всего таких интервалов времени шесть, равно  $\Delta U$ . Общая потеря напряжения составляет  $\Delta U_{\Sigma} = 6 \cdot \Delta U$ .

Угол коммутации находится из выражения:

$$\gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - \frac{2x_a \cdot I_d}{\sqrt{3} E_{2m}} \right] - \alpha$$

где  $x_a$  - индуктивное сопротивление вторичной фазной обмотки трансформатора.

Отсюда видно, что с увеличением  $\alpha$  и  $E_{2m}$  угол  $\gamma$  уменьшается, а  $X_a$  и  $J_a$  - возрастает.

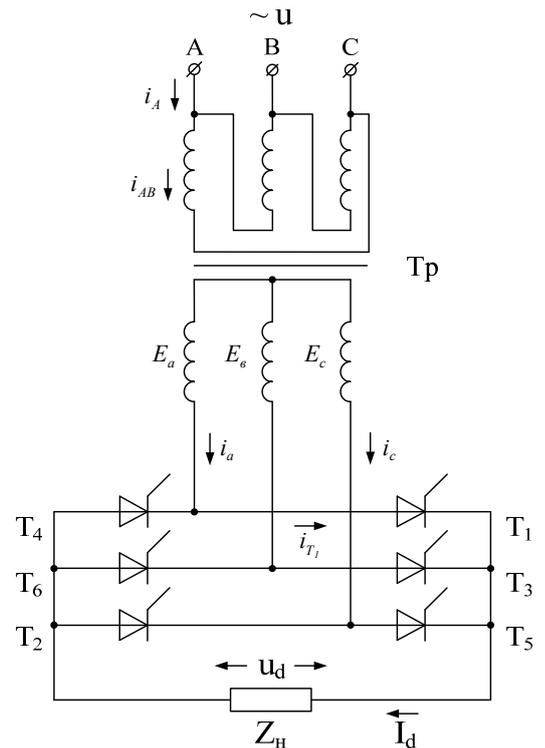


Рис. 1. Силовая схема преобразователя

Среднее значение выпрямленного напряжения с учетом коммутации:

$$u_d = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left( \frac{E_a + E_b}{2} \right) d\nu + \int_{\alpha+\gamma}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} E_b d\nu \right] =$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_{2m} \left( \cos \alpha - \frac{x_a I_d}{\sqrt{3} \cdot E_{2m}} \right)$$

и определяет внешние характеристики преобразователя при  $\gamma < \pi/3$  и длительности токов через тиристоры  $\lambda < \pi$ . Они при различных значениях угла  $\alpha$  представляют собой семейство прямых, параллельных друг другу.

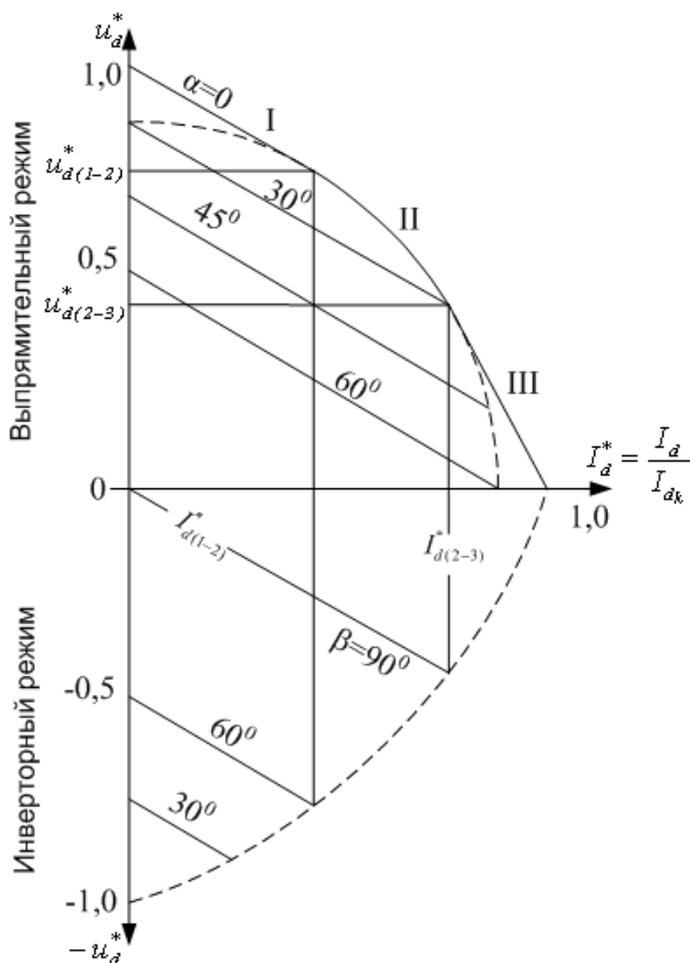


Рис. 9. Внешние характеристики преобразователей

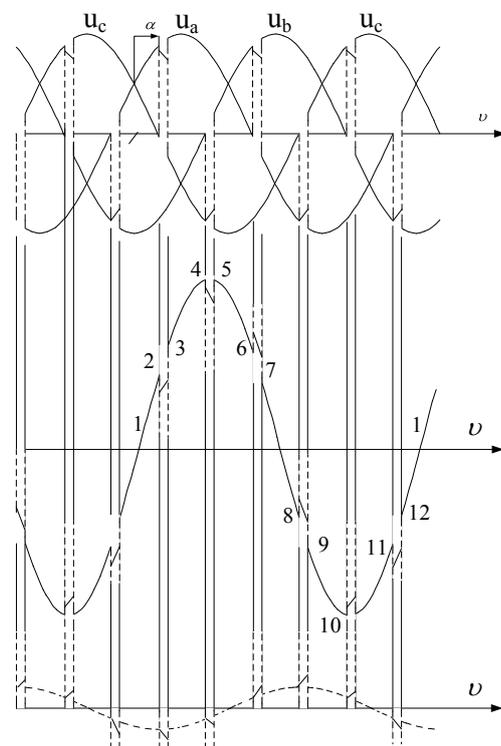


Рис. 10. Коммутационные искажения при работе мостового преобразователя

Полные внешние характеристики трехфазной мостовой схемы в относительных единицах приведены на рис. 9. В качестве базовой величины по току был принят ток короткого замыкания, а по напряжению -  $U_{d0}$ . Из графиков видны режимы работы преобразователя, когда при малых токах в схеме проводят ток в анодной группе 1, а в катодной группе 2 тиристора и наоборот (I режим 1-2), а ближе к точке короткого замыкания сначала 2-3 (II режим), затем уже 3-4 (III режим) и в точке к.з. в любой момент времени пропускают ток четыре тиристора, при этом угол  $\gamma = 2\pi/3$  и длительность протекания токов через тиристор достигает  $\lambda = 4\pi/3$ .

### Влияние преобразователя на питающую сеть

Процессы коммутации, приводящие к скачкообразным изменениям параметров цепей, принципиально отличают тиристорный преобразователь от других потребителей электроэнергии. Они сопровождаются режимами к.з. линейного либо фазного напряжения. В результате в линейном напряжении сети появляются коммутационные искажения (рис. 10), которые определяются следующими параметрами: углом коммутации  $\gamma$ , отношением

$P_d/P_{к.з}$  и полным значением э.д.с. короткого замыкания на вторичной обмотке трансформатора преобразователя  $l_k$ . Чем меньше соотношение мощностей и больше  $l_k$  тем больше угол  $\gamma$ . Площадь коммутационного провала изменяющего своё местоположение в функции угла  $\alpha$ , тем не менее не зависит от текущих значений  $\alpha$  и  $\gamma$  и остаётся неизменной. В относительных единицах она равна:

$$S_k^* = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{P_{dH}}{P_{к.з}} \cdot \frac{I_d}{I_{dH}}$$

Разложение в ряд Фурье искаженного напряжения сети показывает содержание в нем тех же гармоник, что и в кривой первичного тока:

$$K = p \cdot m \pm 1$$

где  $m = 6$  - эквивалентное число фаз преобразователя,

$p=1,2,3\dots$  - любое целое число. По мере уменьшения угла коммутации действующее значение высших гармоник в напряжении сети увеличивается, т.к. глубина провалов возрастает. Искажение напряжения сети при питании преобразователя от сети соизмеримой мощности существенно влияет на других потребителей, а также на преобразователь, через его систему управления. Требуемое соотношение между номинальной мощностью преобразователя и мощностью короткого замыкания сети, при котором действующее значение высших гармоник сетевого напряжения не превосходит допустимого значения  $\Delta l_{в.дон}=5\%$ , для мостовой схемы требует кратности [6]:

$$\frac{P_{к.з}}{P_{dH}} \geq 35 \div 22$$

При расчётах в ряде случаев её снижают до 10. При невыполнении этого условия мощность установки должна быть раздроблена или необходимо применение сетевых фильтров высших гармоник.

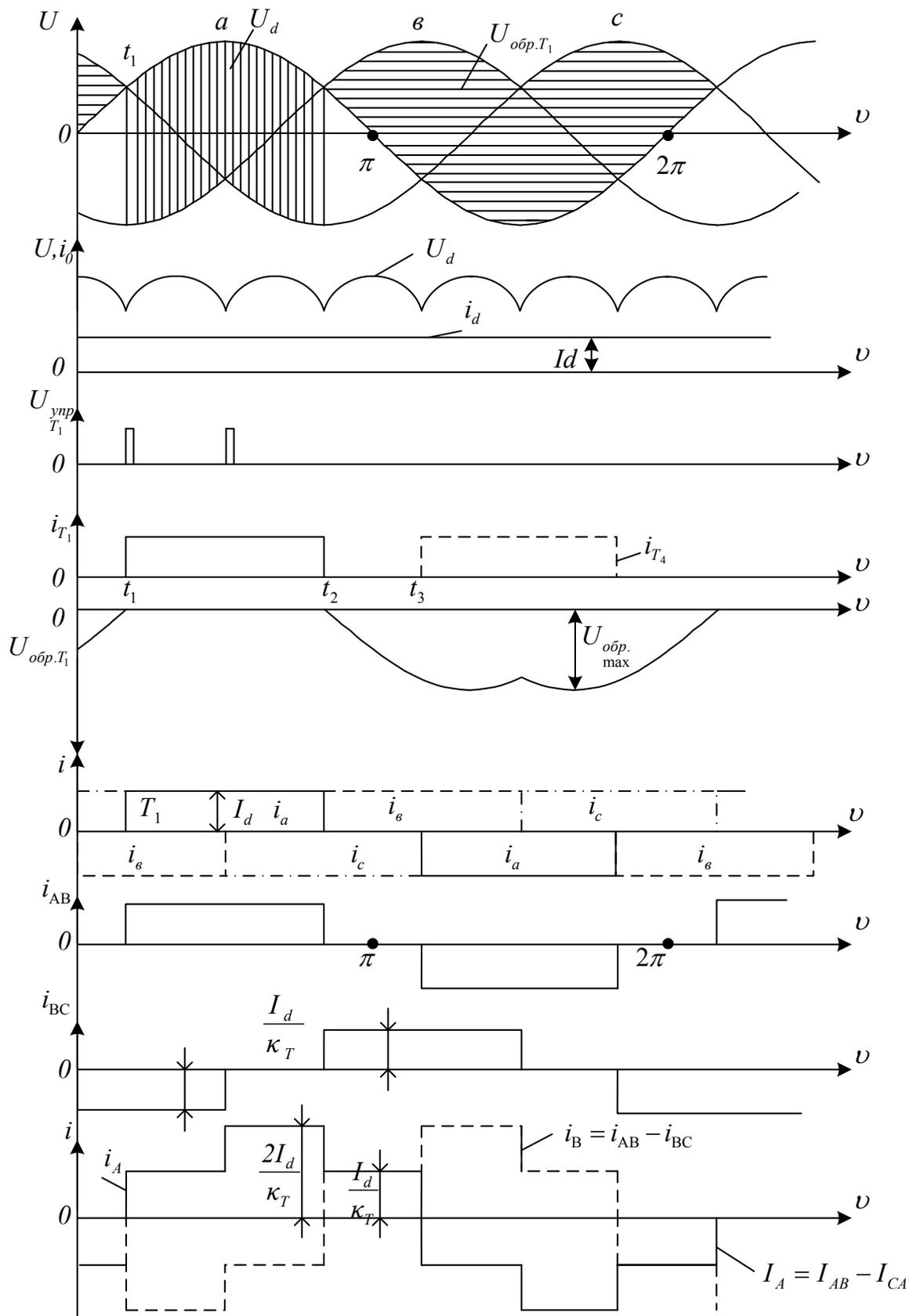


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов преобразователя при работе на индуктивную нагрузку при  $\alpha = 0$

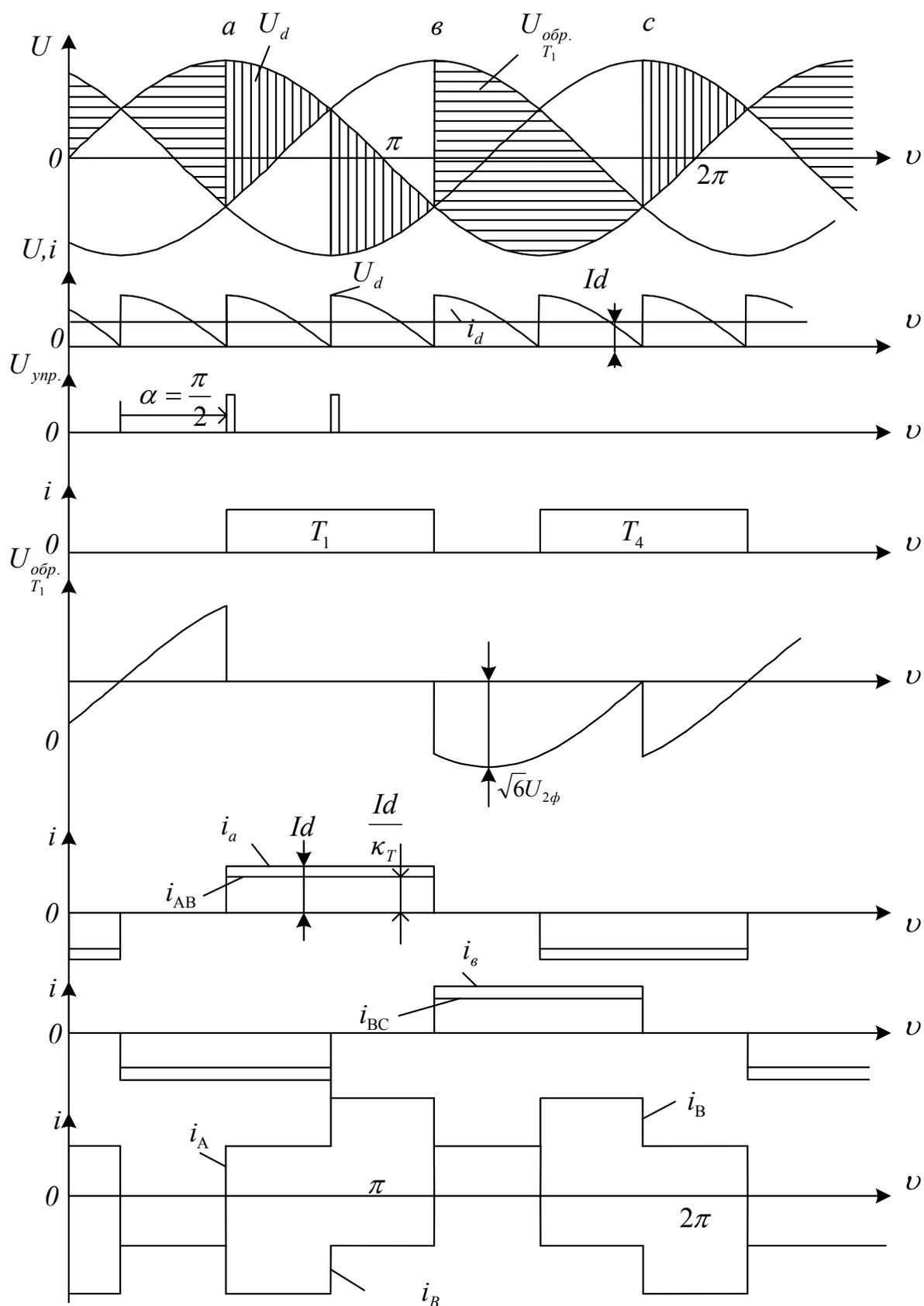


Рис. 3. Диаграммы работы преобразователя при  $\alpha = \frac{\pi}{3}$  и  $L_d = \infty$

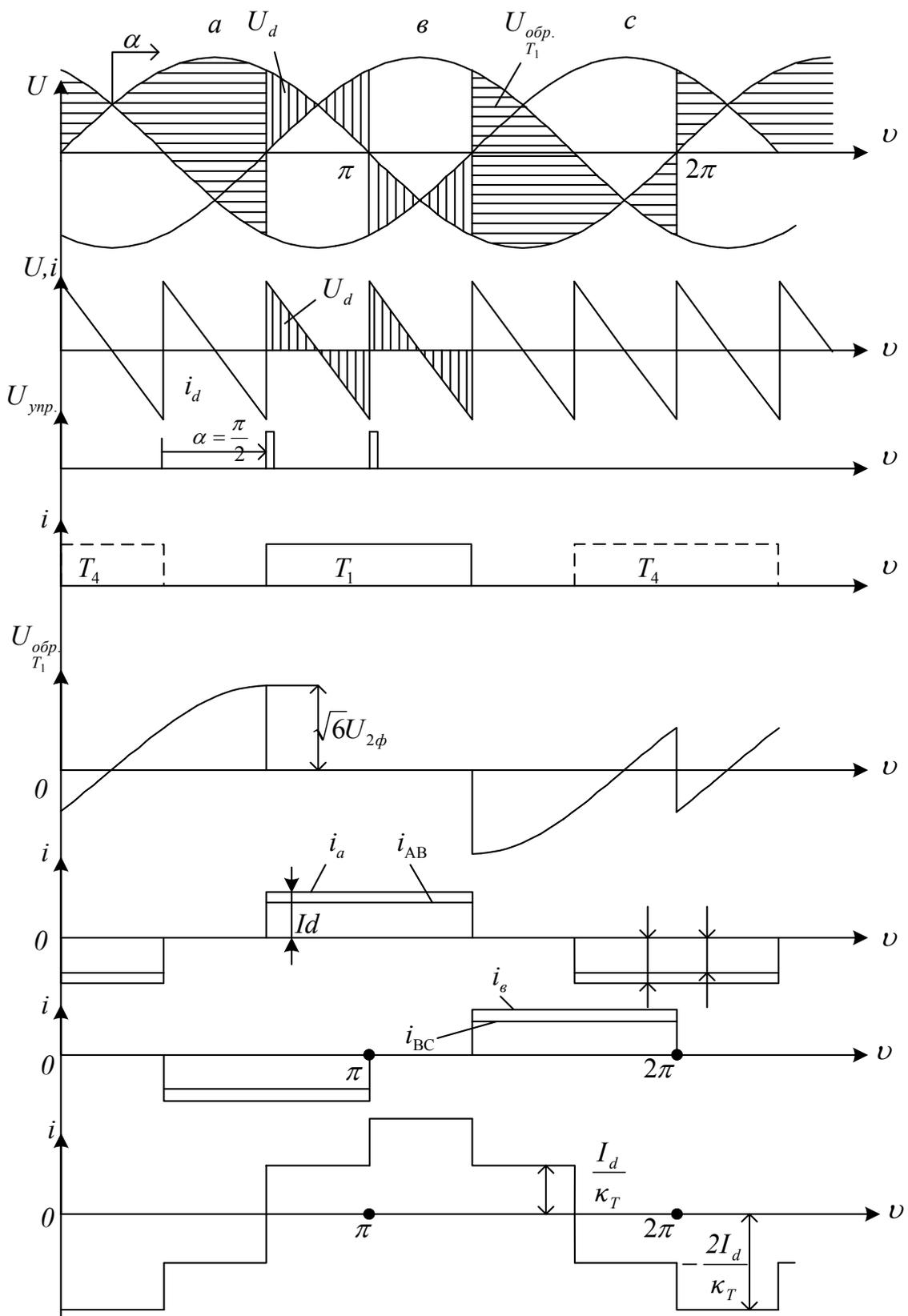


Рис. 4. Диаграммы работы преобразователя при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $L_d = \infty$

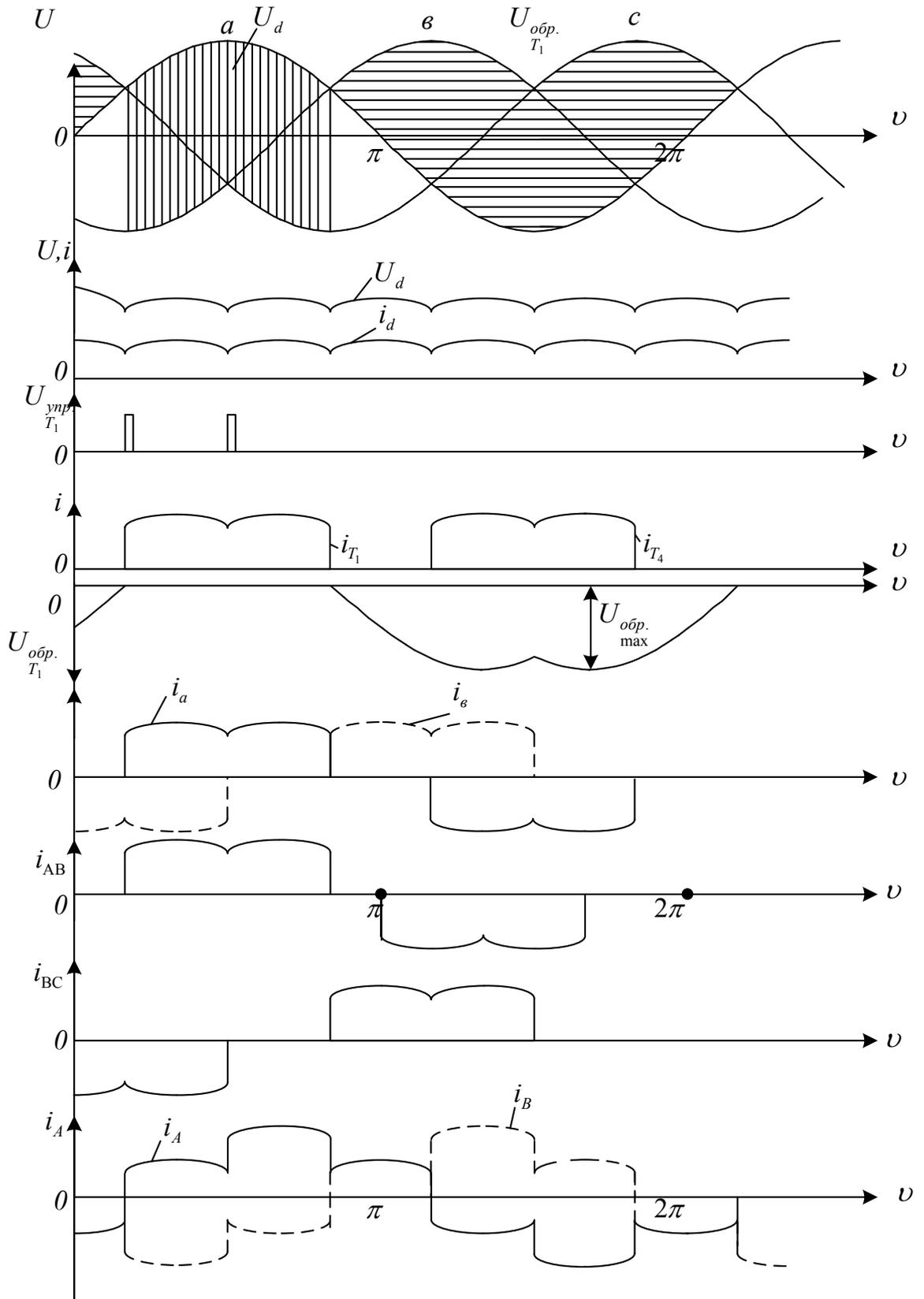


Рис. 5. Диаграммы напряжений и токов преобразователя при работе на активную нагрузку при  $\alpha = 0$

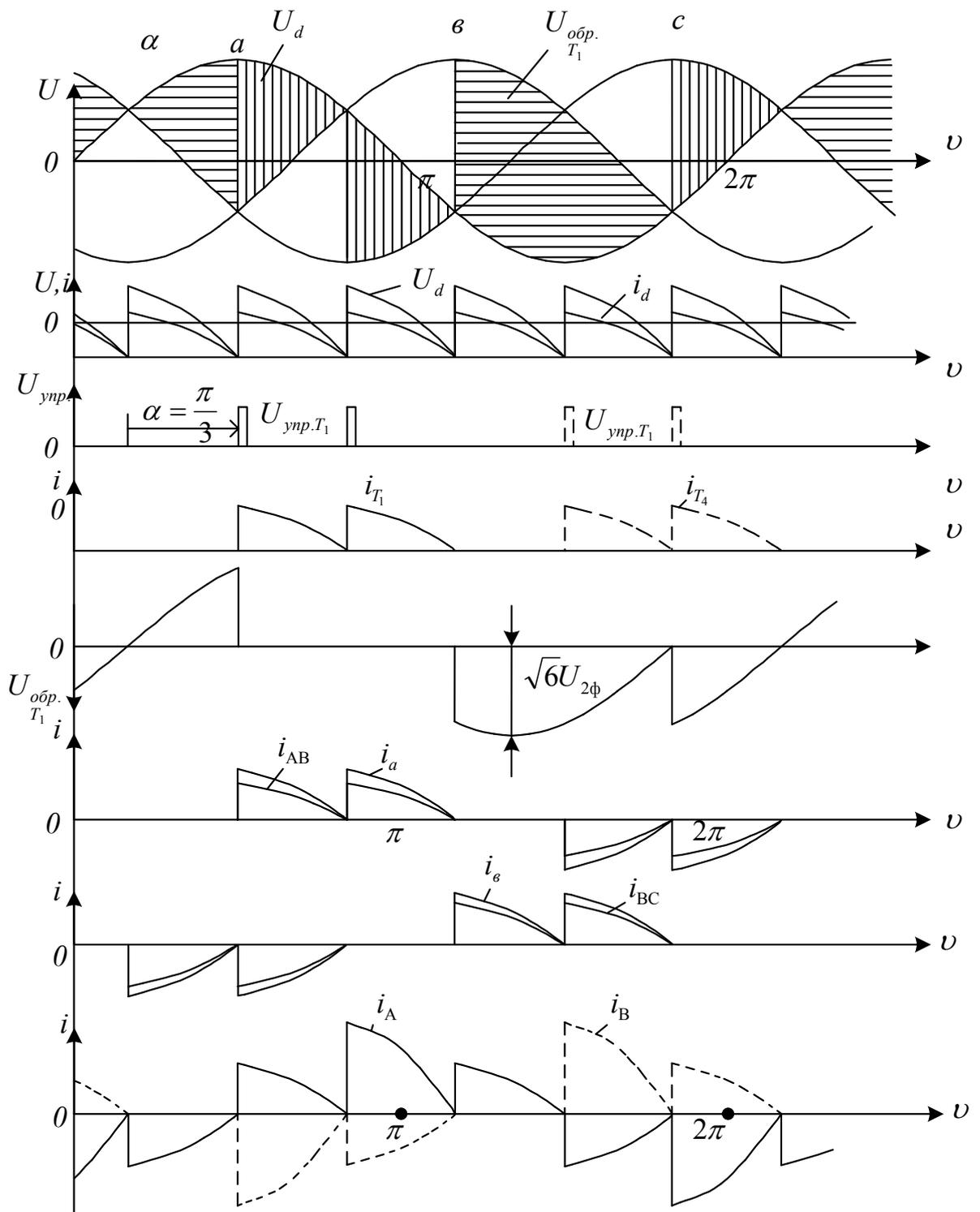


Рис. 6. Диаграммы работы преобразователя при  $\alpha = \frac{\pi}{3}$  и  $L_d = 0$

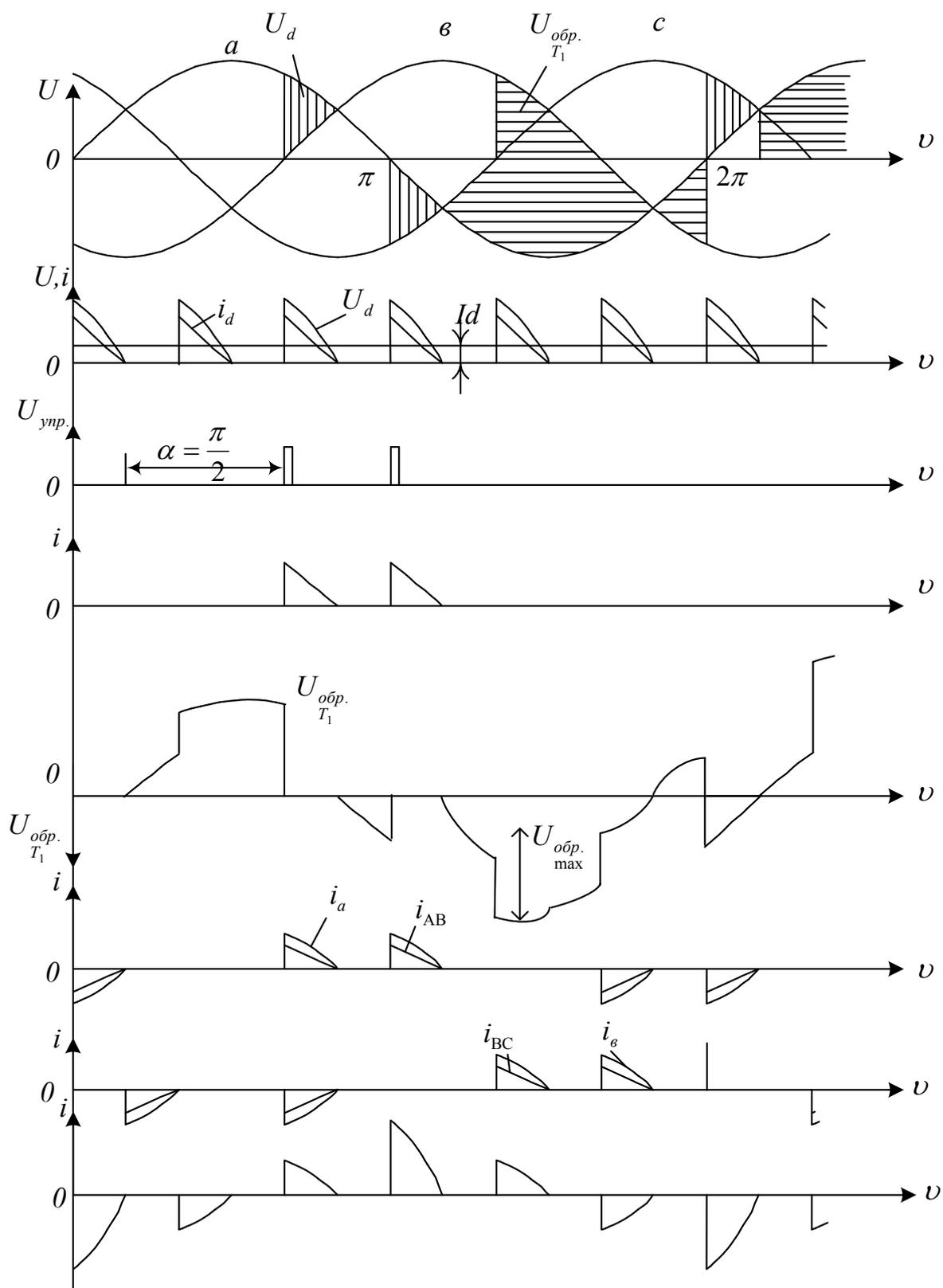


Рис. 7. Диаграммы работы преобразователя при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $L_d = 0$

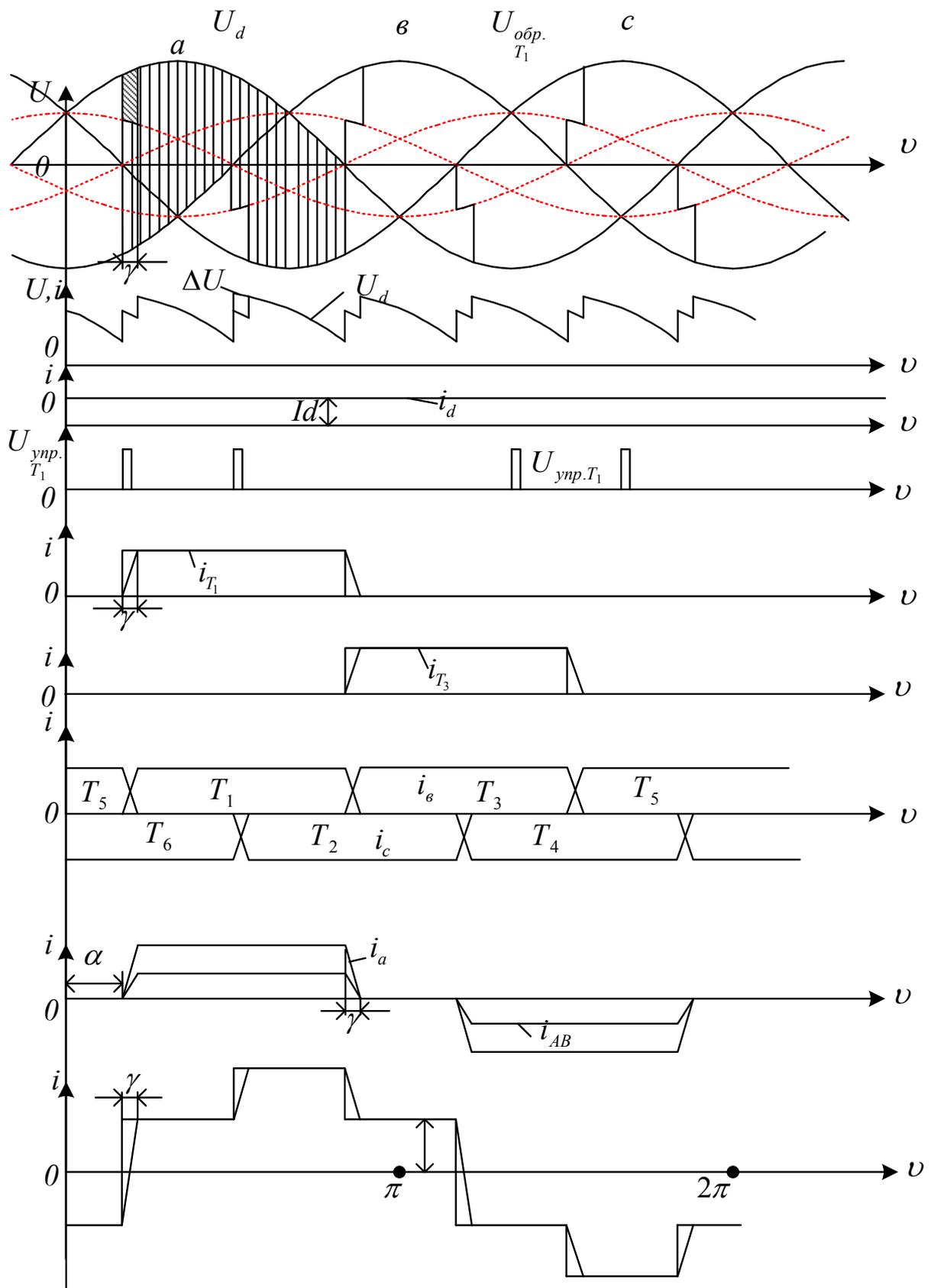


Рис. 8. Диаграммы работы преобразователя при  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  с учетом процесса коммутации тиристоров

## Экспериментальные исследования

Силовая схема экспериментально исследуемого преобразователя соответствует рис 1, с той разницей, что трансформатор соединен по схеме  $\Delta/\Delta$ . В ходе выполнения практической части лабораторной работы необходимо:

1. снять регулировочную характеристику преобразователя -  $U_d = f(\alpha)$  и построить график полученной зависимости;
2. снять естественную внешнюю характеристику преобразователя -  $U_d = f(I_d)$ , и построить график полученной зависимости;
3. определить параметры и показатели, характеризующие работу трехфазного мостового выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку, а именно:
  - коэффициент повышения расчетной мощности трансформатора;
  - коэффициент полезного действия;
  - коэффициент мощности выпрямителя;
  - коэффициент искажения кривой тока, потребляемого выпрямителем из сети преобразователем;
  - коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.
4. определить гармонический состав первичного тока и выпрямленного напряжения.

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда «ТК» источника питания (блок 201.2).
3. Соедините гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений приведенной на рис.11 и рис.12

Опыт № 1. Снятие регулировочной характеристики.

Для снятия регулировочной характеристики  $U_d = f(\alpha)$  трехфазного мостового управляемого преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку:

- 1) Переключатели реостата (блок 323.2) установите в положение согласно таблице 1. Вариант задается преподавателем.
- 2) Переключатели блока дросселей (блок 342) установите в положение согласно таблице 1. Вариант задается преподавателем.
- 3) Переключатели номинальных фазных напряжений трансформаторов (блоки 333.2) установите в положение «73 В».

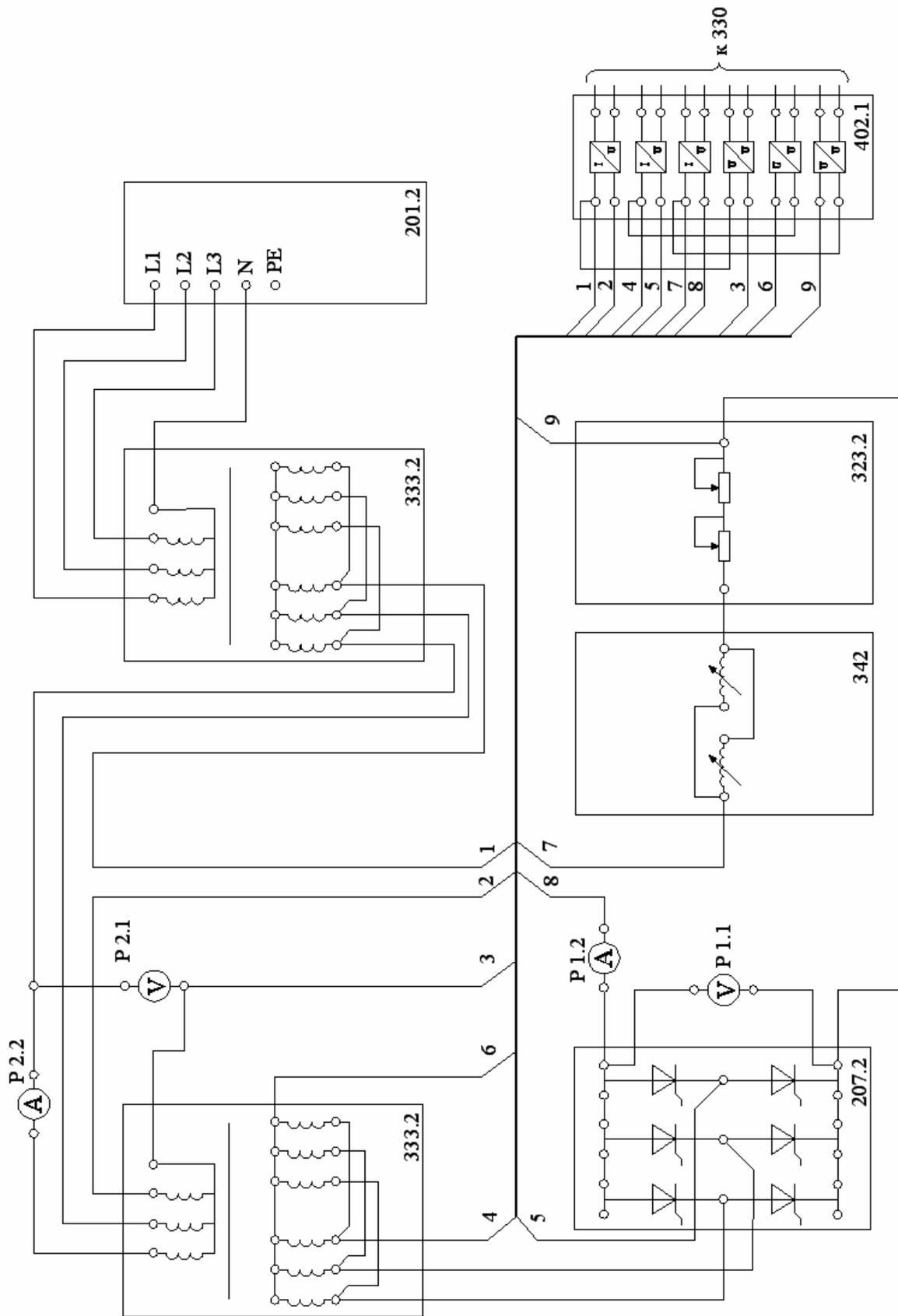


Рис.1.1 Схема соединения силовой части стенда

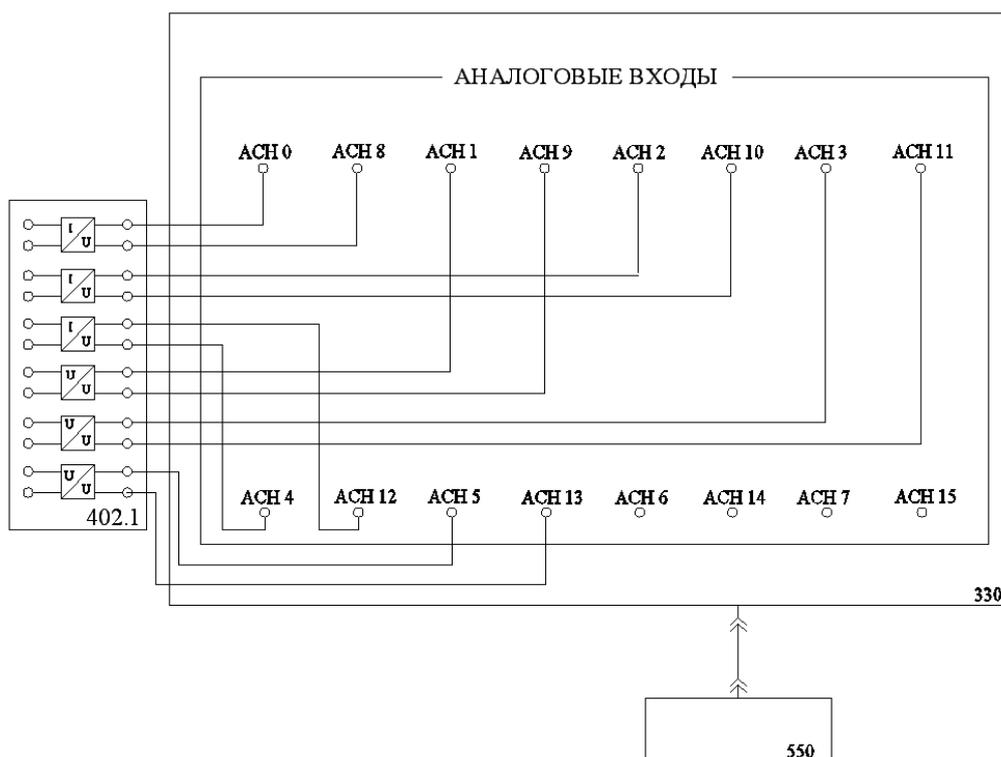


Рис. 12. Схема соединения измерительных цепей стенда

Таблица 1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Переключатели блока реостата (блок 323.2), Ом	30	40	50				
Переключатели блока дросселей (блок 342), Гн							

- 4) Тумблеры делителей напряжений коннектора (блок 330) установите в положение «1:1».
- 5) Включите персональный компьютер, запустите при помощи расположенного на рабочем столе ярлыка программу «ВП преобразовательная техника».
- 6) Включите выключатели «Сеть» блоков мультиметров
- 7) Включите выключатель «Сеть» датчиков тока и напряжения (блок 402.1).
- 8) Включите выключатель «Сеть» преобразователя (блок 207.2).
- 9) Вращая регулировочную рукоятку преобразователя, установите по его индикатору минимальный угол управления.
- 10) Нажмите кнопку «3Ф преобразователь» на лицевой панели преобразователя (блок 207.2) и удерживайте его до тех пор пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.
- 11) Включите источник (блок 201.2). О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.

- 12) Выберите режим работы каналов запущенной программы, а именно переключатели режима работы каналов входов АСН0-АСН8, АСН2-АСН10 и АСН4- АСН12 установите в положение «3А/3В», входов АСН1- АСН9, АСН3- АСН11 и АСН5- АСН13 установите в положение «600В/3В».
- 13) Запустите виртуальный осциллограф в программе «ВП преобразовательная техника», выбрав его в главном меню программы
- 14) Установите в программе осциллограф видимыми каналы АСН4- АСН12 и АСН5- АСН13 – ток через нагрузку и напряжение на ней соответственно.
- 15) Регулируя сопротивление реостата (блок 323.2) установите по амперметру Р 1.2 выпрямленный ток преобразователя равным, например, 0,5 А, **но не более 1А**.
- 16) Увеличивайте регулировочной рукояткой преобразователя (блок 207.2) угол управления  $\alpha$ , записывая его значения и показания вольтметра Р 1.1 в таблицу 2. В это время на экране компьютера вы можете наблюдать форму напряжения на нагрузке и форму тока в нагрузке.

Таблица 2

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$ , град.								
$U_d$ , В								

- 17) Используя данные таблицы 2 затем необходимо будет построить регулировочную характеристику преобразователя  $U_d = f(\alpha)$ .
- 18) Отключите источник (блок 201.2)

Опыт № 2. Снятие естественной внешней характеристики.

Для определения естественной внешней характеристики трехфазного мостового управляемого преобразователя  $U_d = f(I_d)$  при работе на активно-индуктивную нагрузку:

- 1) Переключатели реостата (блок 323.2) установите в положение согласно таблице 1. Вариант задается преподавателем.
- 2) Включите источник (блок 201.2) о наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- 3) Вращая регулировочную рукоятку преобразователя (блок 207.2) установите значение угла управления  $\alpha$  ( задается преподавателем).
- 4) Уменьшая сопротивление реостата (блок 323.2) увеличивайте выпрямленный ток  $I_d$  преобразователя (**не превышая 1А**) и

записывайте показания вольтметра Р 1.1 и амперметра Р 1.2 в таблицу 3. Показания снять для двух случаев  $L \neq 0$  и  $L = 0$ , при изменении величины индуктивности необходимо следить, что бы выпрямленный ток  $I_d$  **не превышал 1 А**.

Таблица 3

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_d$ , А								
$U_d$ , В								

- 5) Используя данные таблицы 3 затем необходимо будет построить естественную внешнюю характеристику преобразователя  $U_d = f(I_d)$  для обоих случаев.

Опыт № 3. Определение параметров и показателей, характеризующих работу преобразователя.

Для определения параметров и показателей, характеризующих работу трехфазного мостового выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку:

- 6) Переключатели блока дросселей (блок 342) установите в положение «3 Гн».
- 7) Переключатели реостата (блок 323.2) установите в положение «50 Ом».
- 8) Вращая регулировочную рукоятку преобразователя (блок 207.2) установите желаемое значение угла управления  $\alpha$ , (задается преподавателем). Ток и напряжение на выходе преобразователя наблюдайте на амперметре Р 1.2 и вольтметре Р1.1.
- 9) В главном меню программы «ВП преобразовательная техника» выберите пункт «Параметры преобразователя». На экране изобразятся рассчитанные параметры, а именно:

– коэффициент повышения расчетной мощности трансформатора:

$$k_{II} = \frac{S_1 + S_2}{2P_d},$$

где:  $S_1$  – полная мощность, потребляемая выпрямителем из питающей сети;

$S_2$  – полная мощность, потребляемая вентильной частью выпрямителя;

$P_d$  – активная мощность, потребляемая нагрузкой;

– коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_d}{P_1},$$

где:  $P_1$  – активная мощность, потребляемая выпрямителем из питающей сети;

– коэффициент мощности выпрямителя:

$$\chi = \frac{P_1}{S_1};$$

– коэффициент искажения кривой тока, потребляемого выпрямителем из сети преобразователем:

$$\nu = \frac{I_{(1)}}{I_1},$$

где  $I$ ,  $I_{(1)}$  – действующие значения тока, потребляемого выпрямителем из сети и его первой гармоники;

– коэффициент пульсации выпрямленного напряжения:

$$k_{\text{пульс.}} = \frac{U_{d\sim}}{U_d},$$

где  $U_{d\sim}$  - действующее значение переменной составляющей напряжения,

$U_d$  - среднее значение выпрямленного напряжения.

10) Записать полученные значения и угол  $\alpha$ , при котором проходил эксперимент для последующего сравнения с полученными в теоретической части методического пособия.

#### Опыт № 4. Определение гармонического состава напряжения и тока.

Для определения гармонического состава выпрямленного напряжения и потребляемого из сети тока трехфазного мостового управляемого выпрямителя:

- 11) В программе «ВП преобразовательная техника» отключите все каналы кроме АСН0- АСН8 и АСН5-АСН13.
- 12) В главном меню программы выберите «Анализатор спектра». В открывшемся окне задайте вход исследуемого сигнала и вход напряжения сети. Используя возможности программы, определит характер гармонического состава напряжения и тока, запишите значения первых десяти гармоник тока и напряжения в таблицу 4, отдельно для тока и напряжения

Таблица 4

№ гармоники	Амплитуда, о.е.
1	
2	
...	

По окончании эксперимента выключите источник питания (блок 201.2), питание преобразователя (блок 207.2), блока датчиков тока и напряжения (блок 402.1) и питание блоков измерительных мультиметров.

### Содержание отчета

Отчет оформляется отдельно каждым студентом и должен содержать следующие пункты:

1. Краткие теоретические сведения.
2. Силовую схему преобразователя.
3. Регулировочную характеристику преобразователя, полученную в ходе эксперимента.
4. Естественную внешнюю характеристику преобразователя.
5. Значения коэффициентов, полученных при выполнении опыта № 3 практической части лабораторной работы.
6. Диаграмму напряжений и токов преобразователя при работе на нагрузку (угол регулирования и тип нагрузки задается преподавателем индивидуально каждому).
7. График распределения коэффициентов  $n$  – ой гармонической гармоник первичного тока и выпрямленного напряжения, построенного по таблице 4.
8. Выводы по работе, в которых необходимо отразить соответствие/несоответствие данных полученных в ходе эксперимента и полученных в теоретической части работы. Уметь объяснить имеющиеся расхождения.

## Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы трехфазной мостовой схемы выпрямления.
2. Сравните по показателям и характеристикам трехфазную мостовую и нулевую схемы тиристорных преобразователей.
3. Как влияет характер нагрузки на форму выпрямленного напряжения и тока при углах  $\alpha > 0$ .
4. Рассчитать коэффициент мощности мостового преобразователя при  $\alpha = 30$  и  $U_{2\phi} = 127 \text{ В}$ .
5. Нарисовать зависимость угла коммутации от угла  $\alpha$  при различных значениях  $X_a, I_d, E_{2m}$ .
6. Изобразите графически спектры высших гармоник первичного тока, потребляемого выпрямителем из питающей сети и выпрямленного напряжения.
7. Может ли работать мостовой преобразователь в инверторном режиме? Что для этого нужно сделать?
8. Чем вызывается искажение сетевого напряжения, питающего выпрямитель?
9. Для чего необходимо ограничивать содержание высших гармоник в сетевом напряжении, и до какой величины?
10. От чего зависит длительность тока протекающего через тиристоры преобразователя?
11. Перечислите основные расчётные показатели преобразователя.
12. Чем объясняется необходимость завышения мощности трансформатора преобразователя?
13. Какие факторы влияют на пульсации выпрямленного напряжения, на наличие высших гармоник в токах трансформатора?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович Е.И. и др. Полупроводниковые выпрямители, - М.: Энергия, 1967.
2. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства, - М: Энергия, 1970.
3. Аптер :-;1. и др. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока.- М.: Энергия, 1975.
4. Ф.Чаки и др. Силовая электроника. Примеры и расчеты, пер. с англ., - М.: Энергия, 1982.
5. О.А.Маевский. Энергетические показатели вентильных преобразователей.-М.: Энергия, 1978.
6. В.И.Шипило. Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть.- ЭП Серия «Электропривод» № 1, - 1970.