

Наука есть ... непорочное увеселение жизни, похвала юности, старости подпора, ... крепость успеха в несчастьи, в счастье украшение, везде верный и безотлучный друг.
М. Ломоносов

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в научно-технической литературе опубликовано достаточно много материалов, посвященных описанию возможностей программы MATLAB, описанию содержания библиотек приложения Simulink, правил работы с отдельными блоками разделов Simulink Library Browser.

Это и отдельные монографии, и статьи в журналах под названием «Уроки MATLAB», в которых приводятся примеры моделирования отдельных устройств силовой электроники в приложении Simulink. В отличие от предыдущих публикаций каждый раздел данного пособия функционально состоит из:

- 1) кратких теоретических сведений, содержащих описание назначения устройства, принципиальной электрической схемы, основных расчетных формул и временных диаграмм, поясняющих его работу;
- 2) схемы замещения устройства, расчетных формул для расчета параметров элементов в схеме замещения, необходимых в дальнейшем для использования в Simulink, вариантов расчетного задания;
- 3) подробного описания процесса «набора» силовой схемы и включения измерительных датчиков и приборов в Simulink;
- 4) функциональной схемы управления и временных диаграмм, поясняющего её работу;
- 5) подробного описания «набора» схемы управления в Simulink;
- 6) содержания объема исследований, таблиц для занесения результатов расчета;
- 7) содержания отчета и контрольных вопросов.

При использовании устройств с замкнутыми системами управления используются результаты исследования этих устройств с разомкнутыми системами управления для своего номера расчетного задания и добавляются новые разделы:

- 1) функциональная схема замкнутой системы управления;
- 2) схема замещения для расчета выходных величин, вывод передаточной функции, методика расчета коэффициентов настройки ПИД регулятора;
- 3) необходимые данные для каждого номера расчетного задания;
- 4) порядок расчета необходимых данных для ПИД регулятора;

- 5) содержание объема исследований, таблицы для занесения результатов расчета, результатов при «набросах» и «сбросах» нагрузки.

В схемах, выполненных в Simulink, подключены не все измерительные датчики и приборы, их необходимо дополнить в соответствии с результатами необходимыми для заполнения таблиц. При исследовании устройств необходимо применять вычислитель ODE23tb, для гармонического анализа и коэффициента гармоник блок FFT из Powergui. Для измерения частоты следования и длительности импульсов блоки –Triggeret System, Memory, Fcn.

Минимальные знания английского языка с помощью Help в «окне» каждого элемента из библиотек Simulink Library Browser позволяют записать необходимые данные для этих элементов из выполненных предварительно расчетов.

Каждый раздел (глава) является автономным, а получаемые знания достаточны, чтобы использовать получаемые компетенции и в дальнейшем применять программный продукт MATLAB-Simulink для исследования других устройств силовой электроники и преобразовательной техники.

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетический комплекс управляет всеми энергетическими ресурсами, поступающими потребителю. Это может быть преобразователь энергии, частотный преобразователь, выпрямитель и т.д.

В промышленности при эксплуатации оборудования – потребителя электрической энергии, решающую роль играют стадии передачи, распределения энергии и ее преобразование в технологические параметры тока и напряжения, а именно такие параметры, как фронт импульса тока, его длительность, частота следования и многие другие параметры, необходимые для работы технологического модуля [1, 2, 3]. Обеспечивает эти параметры «Силовая преобразовательная техника».

Задача энергетиков заключается не только в эксплуатации преобразовательной техники, но и в анализе функциональных возможностей устройств, оценке потерь в элементах преобразователей и влияние искажения формы синусоиды напряжения на качество поставляемой электрической энергии.

Одним из важных показателей схемы электроснабжения является коэффициент реактивной мощности $\text{tg } \varphi$. Анализ схемы преобразователя дает оценку влияния режимов работы устройства на $\text{tg } \varphi$. Из примера анализа работы простейшего тиристорного ключа (рис. 1) видно, что при работе на активно-индуктивную нагрузку при увеличении угла управления наблюдается снижение как активной, так и реактивной мощностей (рис. 2).

При этом коэффициент реактивной мощности (отношение реактивной и активной мощностей) на протяжении практически всего расчета существенно изменяется (см. рис. 3). Из чего следует, что в подобных энергетических системах обеспечить коэффициент реактивной мощности, используя статические компенсаторы, не всегда возможно. Актуально использовать активные фильтры. Поэтому, выбирая преобразователь, необходимо детально анализировать режимы его работы.

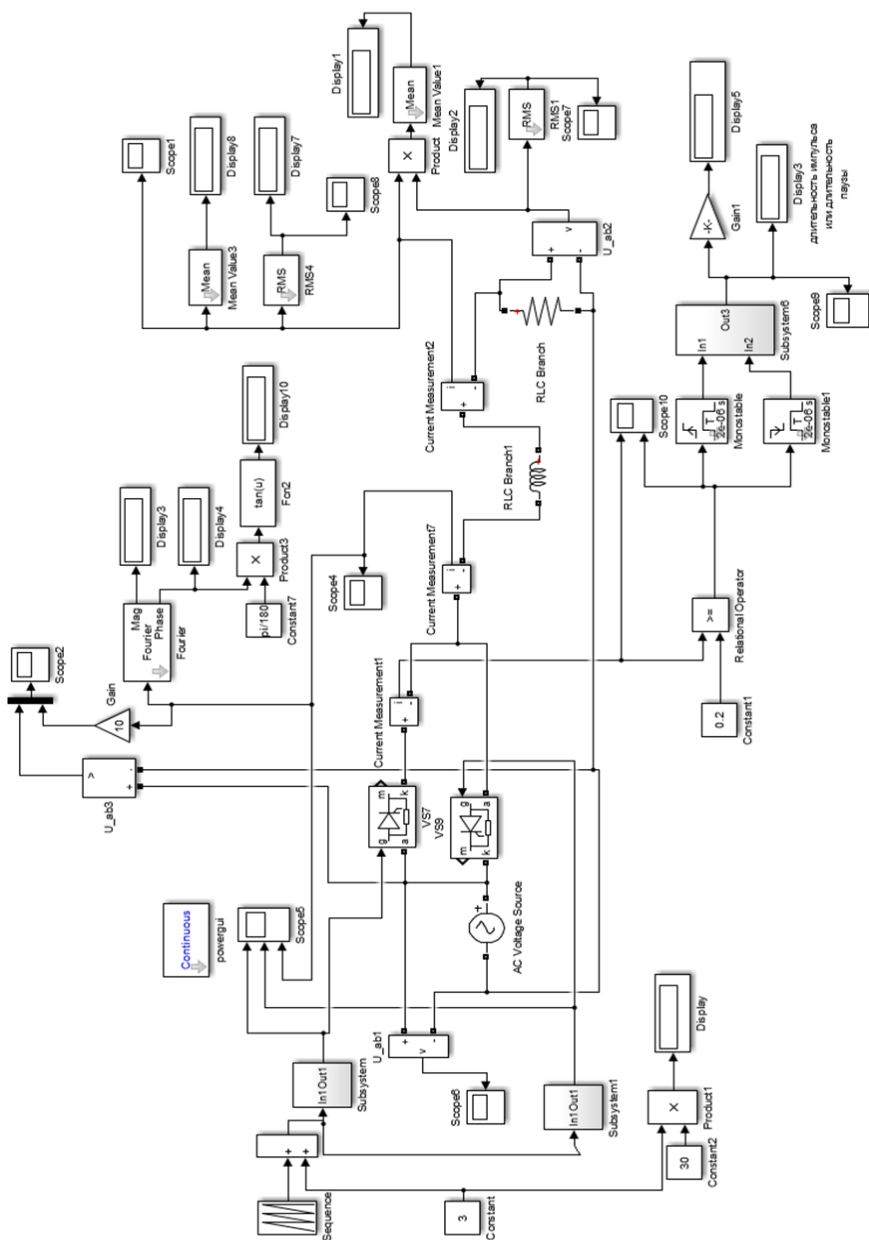


Рис. 1. Схема, моделирующая использования простейшего тиристорного ключа переменного тока

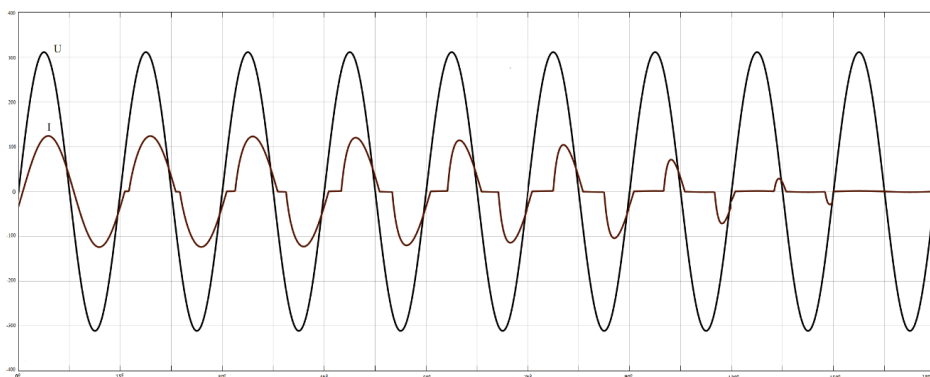


Рис. 2. Зависимость тока от угла управления при $L = 21$ мГн. $R=24.2$ Ом

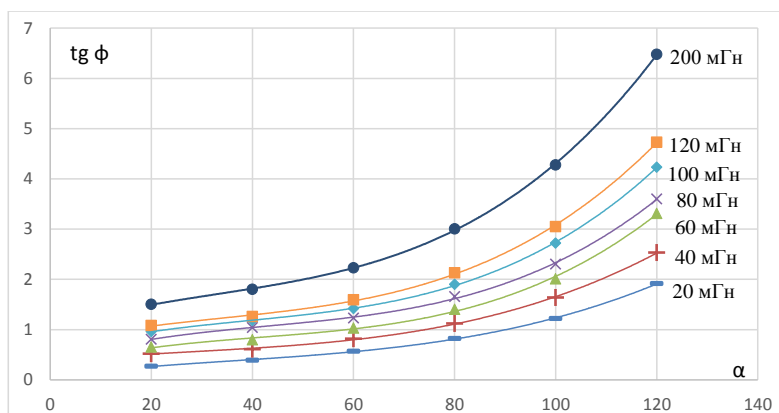


Рис. 3. Зависимость тангенса угла потерь от угла управления при различных значениях индуктивности

Данное пособие поможет студентам, аспирантам и специалистам, использующим преобразовательную технику, осуществлять виртуальное моделирование и анализ работы преобразователей в реальных условиях с целью их последующего использования в различных электротехнических комплексах.

Глава 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: приобретение знаний и умений в области применения программного продукта MATLAB-Simulink для изучения внешних, регулировочных и энергетических характеристик трехфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, к выходу которого через согласующий трансформатор подключен неуправляемый выпрямитель.

Краткие теоретические сведения

Трехфазные тиристорные регуляторы напряжения переменного тока применяются в регулируемых высоковольтных источниках напряжения постоянного тока, для регулирования мощности (температуры) в трехфазных печах сопротивления, для регулирования выходной мощности в промышленных ламповых генераторах и в других установках. Причем мощность промышленных установок с трехфазными тиристорными регуляторами составляет десятки и сотни киловатт.

Принципиальная электрическая схема трехфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, к выходу которого через согласующий трансформатор подключен неуправляемый выпрямитель, приведена на рис. 1.1.

Принцип действия трехфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока заключается в том, что, подавая импульсы управления на тиристоры регулятора ($VS1-VS6$) с регулируемой задержкой относительно точек их естественной коммутации, можно в широких пределах в сторону уменьшения изменять действующее значение напряжения, прикладываемого к первичным обмоткам согласующего трансформатора T_1 , а значит, и выходное напряжение выпрямителя U_d . Благодаря задержке импульсов управления в течение определенного времени на каждом периоде напряжение питающей сети переменного тока не поступает на первичные обмотки согласующего трансформатора, так как закрыты некоторые тиристоры ($VS1-VS6$), и поэтому действующее значение напряжения первичных обмоток трансформатора меньше, чем действующее значение линейного напряжения сети переменного тока.

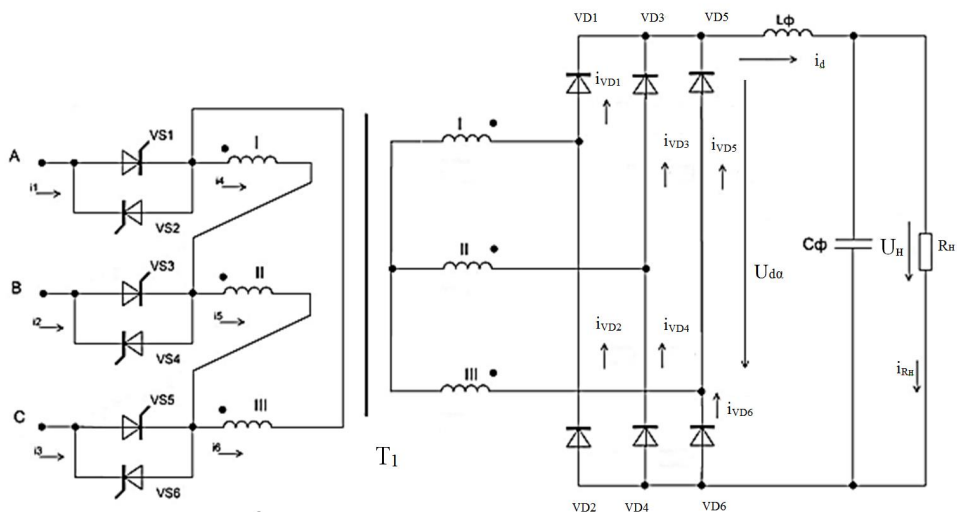
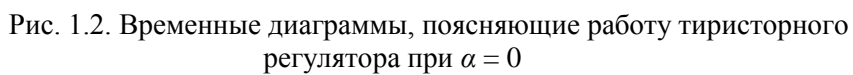


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема трёхфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока

Временные диаграммы, поясняющие работу тиристорного регулятора напряжения при угле управления тиристорами ($VS1-VS6$) $\alpha = 0$, приведены на рис. 1.2. При построении временных диаграмм были приняты допущения, что тиристоры, диоды и трансформатор являются идеальными элементами без потерь, выходной ток выпрямителя полностью сглажен $i_d = I_d$, коэффициент трансформации согласующего трансформатора равен единице. Диоды $VD1$, $VD3$, $VD5$ – диоды катодной группы. Из диодов катодной группы проводит ток тот диод, который анодом подключен к вторичной обмотке трансформатора T_1 , имеющей в данный момент времени наибольшее положительное напряжение. Поэтому на временном интервале $[t_0 - t_1]$ ток проводит диод $VD1$ и тиристор $VS1$, так как на этом временном интервале напряжение u_{AB} является наибольшим положительным в сравнении с u_{BC} и u_{CA} . При открытом тиристоре $VS1$ напряжение вторичной обмотки трансформатора T_1 , к которой подключен диод $VD1$, является напряжением u_{AB} . Соответственно на временном интервале $[t_1 - t_2]$ проводят ток диод $VD3$ и тиристор $VS3$, а на временном интервале $[t_2 - t_3]$ диод $VD5$ и тиристор $VS5$. Диоды $VD2$, $VD4$, $VD6$ – диоды анодной группы. Из диодов анодной группы проводит ток тот диод, который катодом подключен к вторичной обмотке трансформатора T_1 , имеющей в данный момент времени наибольшее отрицательное напряжение. Используя данное правило, построены временные диаграммы для токов диодов $VD2$, $VD4$, $VD6$ и тиристоров $VS2$, $VS4$, $VS6$. u_{AB} , u_{BC} и u_{CA} – мгновенные значения линейных напряжений питающей сети переменного тока, $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca}$ – действующие значения линейных напряжений, i_1 , i_2 , i_3 – мгновенные значения фазных токов, потребляемых от сети, U_a , U_b , U_c – действующие значения фазных напряжений питающей сети.



При угле управления тиристорами регулятора (VS1–VS6) $\alpha = 0$ и принятых допущениях для токов и напряжений элементов схемы регулятора можно написать следующие уравнения:

1) среднее значение напряжения на выходе выпрямителя

$$U_d = \frac{6}{T} \int_{T/6}^{T/3} \sqrt{3} \sqrt{2} U_{\text{л}} \sin(\omega t) dt = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\text{л}}; \quad (1.1)$$

2) среднее значение тока, протекающее через нагрузку,

$$I_d = \frac{U_d}{R_{\text{н}}} = \frac{3\sqrt{6} U_{\text{л}}}{\pi R_{\text{н}}}; \quad (1.2)$$

3) мощность, потребляемая от выпрямителя и выделяющаяся в нагрузке,

$$P_d = U_d I_d = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\text{л}} \right)^2 \frac{1}{R_{\text{н}}}; \quad (1.3)$$

4) среднее и действующее значения тока, протекающего через диоды (VD1–VD6) выпрямителя,

$$I_{\text{д.0}} = \frac{I_d}{3}, \quad (1.4)$$

$$I_{\text{д.действ}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}; \quad (1.5)$$

5) среднее и действующее значения тока, протекающего через тиристоры регулятора (VS1–VS6),

$$I_{\text{тир.0}} = \frac{I_d}{3}, \quad (1.6)$$

$$I_{\text{тир.действ}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}; \quad (1.7)$$

6) действующее значение тока, потребляемого от питающей сети переменного тока,

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{P_d}{3U_{\text{ф}}} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\text{л}} \right)^2 \frac{1}{3U_{\text{ф}} R_{\text{н}}} = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right)^2 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} R_{\text{н}}}; \quad (1.8)$$

7) амплитудные значения первой, третьей, пятой и седьмой гармоник тока, потребляемого от питающей сети переменного тока:

7.1) максимальное значение синусоидальной составляющей первой гармоники

$$I_{1.1\text{мс}} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_d \sin(\omega t) dt + \frac{4}{T} \int_{T/6}^{T/3} I_d \sin(\omega t) dt = \frac{6}{\pi} I_d; \quad (1.9)$$

7.2) максимальное значение косинусоидальной составляющей первой гармоники

$$I_{1.1mc} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_d \cos(\omega t) dt + \frac{4}{T} \int_{T/6}^{T/3} I_d \cos(\omega t) dt = 0; \quad (1.10)$$

7.3) максимальное значение первой гармоники тока:

$$I_{1.1m} = \sqrt{I_{1.1ms}^2 + I_{1.1mc}^2} = \frac{6}{\pi} I_d; \quad (1.11)$$

7.4) максимальное значение третьей гармоники тока:

$$I_{1.3m} = \sqrt{\left(\frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_d \sin 3\omega t dt + \frac{4}{T} \int_{T/6}^{T/3} I_d \sin 3\omega t dt \right)^2 + \left(\frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_d \cos 3\omega t dt + \frac{4}{T} \int_{T/6}^{T/3} I_d \cos 3\omega t dt \right)^2} = 0; \quad (1.12)$$

7.5) максимальное значение пятой гармоники тока:

$$I_{1.5m} = \frac{6I_d}{5\pi}; \quad (1.13)$$

7.6) максимальное значение седьмой гармоники тока:

$$I_{1.7m} = \frac{6I_d}{7\pi}; \quad (1.14)$$

8.) мощность потерь в диоде выпрямителя (VD1–VD6) и в тиристоре (VS1–VS6) на интервалах их проводимости:

$$P_{\text{пот.д}} = U_{\text{пор.д}} I_{\text{д.о}} + R_{\text{дин.д}} I_{\text{д.действ}}^2, \quad (1.15)$$

$$P_{\text{пот.т}} = U_{\text{пор.т}} I_{\text{т.о}} + R_{\text{дин.т}} I_{\text{т.действ}}^2, \quad (1.16)$$

где $U_{\text{пор.д}}$ и $U_{\text{пор.т}}$ – пороговые напряжения для диода и тиристора,

$R_{\text{дин.д}}$ и $R_{\text{дин.т}}$ – динамические сопротивления диода и тиристора.

Временные диаграммы для угла управления тиристорами $\alpha = 60^\circ$ и принятых ранее допущениях построены на рис. 1.3. Выходное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямителя на диодах (VD1–VD6) для углов $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ тиристорами (VS1–VS6) можно определить по следующему уравнению:

$$U_{d\alpha} = \frac{4,5\sqrt{2}U_{\text{л}}}{\pi} \sin \alpha + \frac{3\sqrt{6}U_{\text{л}}}{\pi} [0,5 + \cos(60^\circ + \alpha)]. \quad (1.17)$$

Для угла управления (VS –VS6) $\alpha = 90^\circ$ выходное напряжение выпрямителя равно $\frac{2,25\sqrt{2}U_{\text{л}}}{\pi} = 1,01U_{\text{л}}$.

Для исследования трехфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, к выходу которого через согласующий трансформатор подключён неуправляемый выпрямитель с нагрузкой, используется программный пакет MATLAB 2012b, его приложение Simulink и схема замещения трехфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, приведенная на рис. 1.4.1 и рис. 1.4.2.

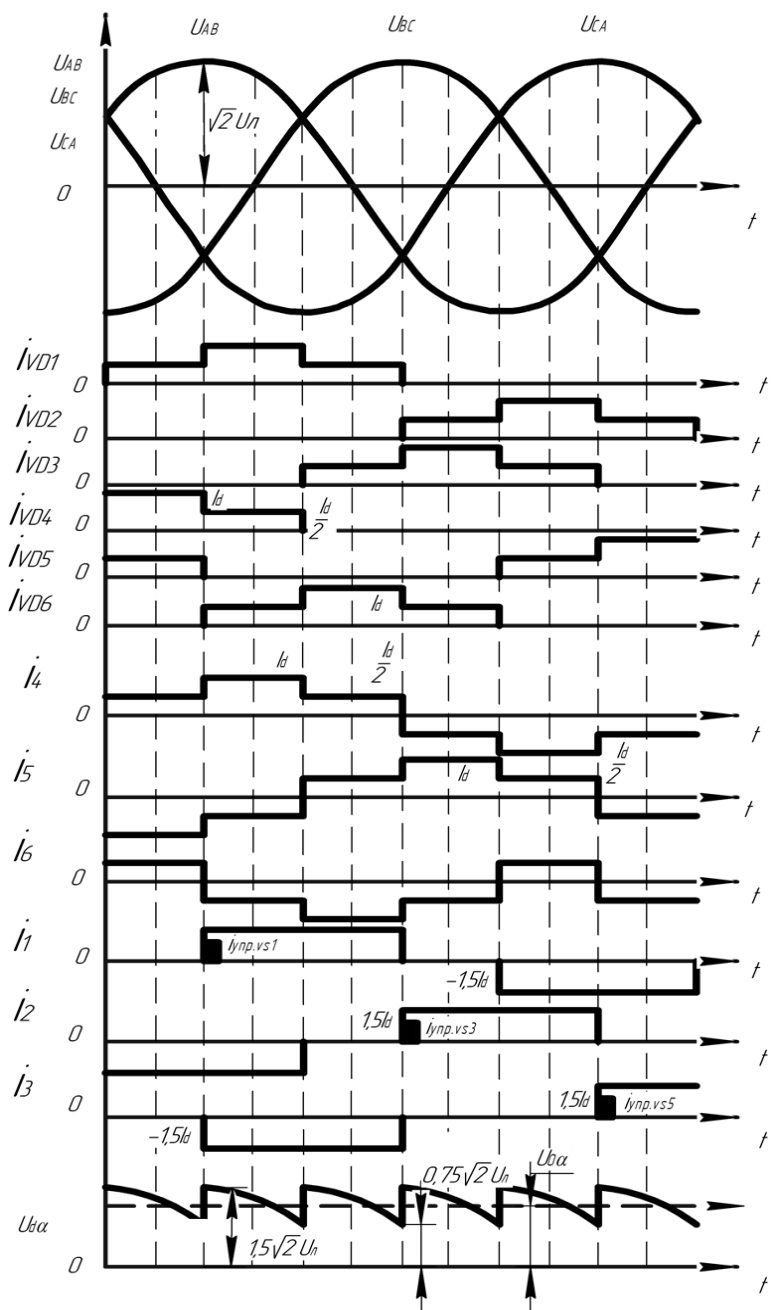


Рис. 1.3. Временные диаграммы, поясняющие работу тиристорного регулятора при $\alpha = 60^\circ$

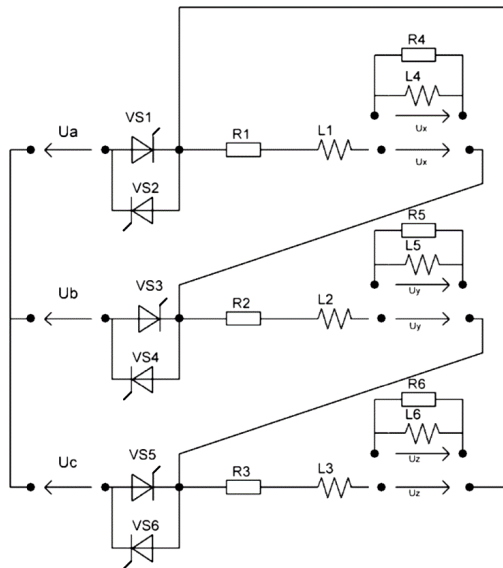


Рис. 1.4.1. Схема замещения трёхфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, к выходу которого через согласующий трансформатор подключён неуправляемый выпрямитель с нагрузкой

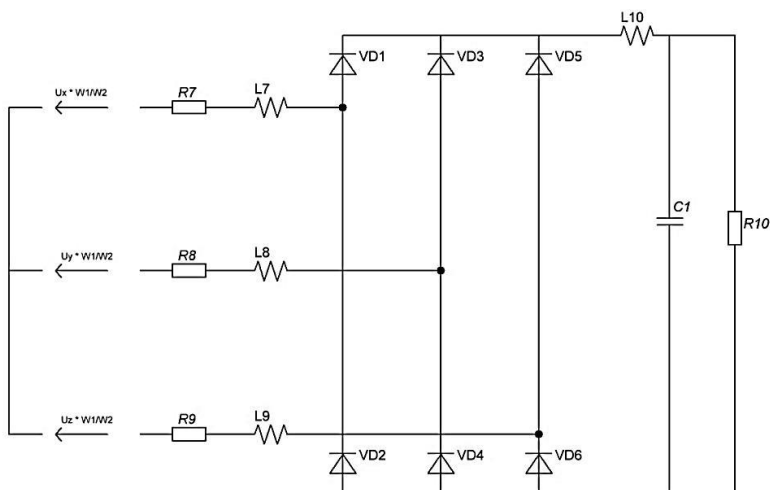


Рис. 1.4.2. Схема замещения трёхфазного тиристорного регулятора напряжения переменного тока, к выходу которого через согласующий трансформатор подключён неуправляемый выпрямитель с нагрузкой

В схеме замещения, изображённой на рис. 1.4.2, использованы следующие обозначения:

- $R_1 - R_3$ – сопротивления первичных обмоток трансформатора;
- $R_4 - R_6$ – сопротивления, определяющие потери в цепи намагничивания;
- $R_7 - R_9$ – сопротивления вторичных обмоток трансформатора;
- R_{10} – сопротивление нагрузки;
- $L_1 - L_3$ – индуктивность рассеяния первичных обмоток;
- $L_4 - L_6$ – индуктивность намагничивания;
- $L_7 - L_9$ – индуктивность рассеяния вторичных обмоток;
- L_{10}, C_1 – индуктивность и ёмкость сглаживающего фильтра;
- $VS1 - VS6$ – схемы замещения тиристоров;
- $VD1 - VD6$ – схемы замещения диодов.

В открытом состоянии тиристора используется спрямлённая характеристика $U_{\text{пор.т}} \approx (0,8 \div 1) \text{ В}$, $R_{\text{дин.т}} \approx 10^{-3} \text{ Ом}$, в закрытом состоянии $R_{\text{тир}}$ определяется токами утечки $R_{\text{тир.зак}} = 10^5 \text{ Ом}$.

В открытом состоянии диода используется спрямленная характеристика $U_{\text{пор.д}} \approx (0,5 \div 0,7) \text{ В}$, $R_{\text{дин.д}} \approx 10^{-3} \text{ Ом}$, в закрытом состоянии сопротивление диода определяется токами утечки $R_{\text{диод.зак}} = 10^5 \text{ Ом}$.

Параметры элементов схемы замещения рассчитываются по следующим формулам:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{P_{\text{к.з.}}}{6I_{1.\text{ном}}^2}, \quad (1.18)$$

$$R_7 = R_8 = R_9 = \frac{P_{\text{к.з.}} W_2^2}{6I_{1.\text{ном}}^2 W_1^2}, \quad (1.19)$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{U_{\text{к.з.}}}{2\omega I_{1.\text{ном}}}, \quad (1.20)$$

$$L_7 = L_8 = L_9 = \frac{U_{\text{к.з.}} W_2^2}{2\omega I_{1.\text{ном}} W_1^2}, \quad (1.21)$$

$$L_4 = L_5 = L_6 = \frac{U_{1.\text{ном}}}{\omega I_{\text{х.х}}}, \quad (1.22)$$

$$R_4 = R_5 = R_6 = \frac{3U_{1.\text{ном}}^2}{P_{\text{х.х}}}, \quad (1.23)$$

$$I_{1.\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3U_{1.\text{ном}}}, \quad (1.24)$$

где $S_{\text{ном}}$ – расчётная мощность трансформатора, $U_{1.\text{ном}} = U_{\text{л}}$ – действующее значение линейного напряжения сети переменного тока, $I_{1.\text{ном}}$ – действующее значение тока, протекающего через первичные обмотки трансформатора, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота питающей сети переменного тока.

Параметры элементов сглаживающего фильтра рассчитывают по следующим приближённым формулам:

$$C_1 = \frac{(2 \div 8)}{6 \cdot 2\pi f R_{\text{н.ном}}}, \quad (1.25)$$

$$L_{10} = \frac{R_{\text{н.ном}}(2 \div 5)}{6 \cdot 2\pi f}, \quad (1.26)$$

$$R_{\text{н.ном}} = \frac{U_{d.\text{ном}}^2}{P_{d.\text{ном}}} = \left(\frac{3\sqrt{6}U_{1.\text{ном}}W_2}{\pi W_1} \right)^2 \frac{1}{P_{d.\text{ном}}}. \quad (1.27)$$

Основной вклад в сглаживание напряжения по нагрузке вносит конденсатор фильтра C_1 .

Перед выполнением лабораторной работы студенты для своего варианта расчётного задания (см. таб. 1.1) рассчитывают параметры элементов схемы замещения, а также следующие значения.

1. Номинальное (среднее) значение напряжения на выходе выпрямителя, без учёта коммутационных процессов и $\alpha = 0$:

$$U_{d.\text{ном}} = U_{\text{н.ном}} = \frac{3\sqrt{6}U_{1.\text{ном}}W_2}{\pi W_1}. \quad (1.28)$$

2. Номинальное значение тока, потребляемого от выпрямителя, без учёта коммутационных процессов при значении $\alpha = 0$:

$$I_{d.\text{ном}} = I_{\text{н.ном}} = \frac{P_{d.\text{ном}}}{U_{d.\text{ном}}}. \quad (1.29)$$

3. Номинальное значение выходного напряжения выпрямителя с учётом коммутационных процессов при значении $\alpha = 0$ и заданном значении индуктивности рассеяния трансформатора L_p :

$$U_{d\alpha.\text{ном}} = \frac{3\sqrt{6}U_{1.\text{ном}}W_2}{\pi W_1} - \frac{3L_p I_{d\alpha.\text{ном}} \omega}{\pi}, \quad (1.30)$$

$$\text{где } L_{\text{расс}} = \frac{U_{\text{кз}}}{\omega I_{1.\text{ном}}} \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2.$$

4. Номинальное значение тока, потребляемого от выпрямителя, с учётом коммутационных процессов:

$$I_{d\alpha.\text{ном}} = \frac{\sqrt{6}U_{1.\text{ном}}W_2}{\omega L_p W_1 2} - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{6}U_{1.\text{ном}}W_2}{\omega L_p W_1 2} \right)^2 - \frac{P_{d.\text{ном}}\pi}{3\omega L_p}}. \quad (1.31)$$

5. Номинальное значение угла коммутации $\gamma_{\text{ном}}$ из уравнения:

$$\cos \gamma_{\text{ном}} = \frac{\left(\frac{\pi R_{\text{н.ном}}}{6\omega L_p} - 0,5 \right)}{0,5 + \frac{\pi R_{\text{н.ном}}}{6\omega L_p}}, \quad (1.32)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru