

Выпрямители синусоидального тока

Вольтамперная характеристика электропреобразовательного диода

На рис. 1.1. представлена вольтамперная характеристика (ВАХ) электропреобразовательного диода и условное обозначение диода. Здесь: А – анод диода; К – катод диода; РТ – рабочая точка ВАХ для номинальных параметров тока и напряжения (I_H , U_H) при прямом включении диода; ЭП – электрический пробой и ТП – тепловой пробой при обратном включении диода. При равенстве прямого и обратного напряжений прямой ток на несколько порядков больше обратного тока, что и определяет работу диодов в схемах выпрямления (подробно, о работе диода смотри соответствующий раздел курса физики).

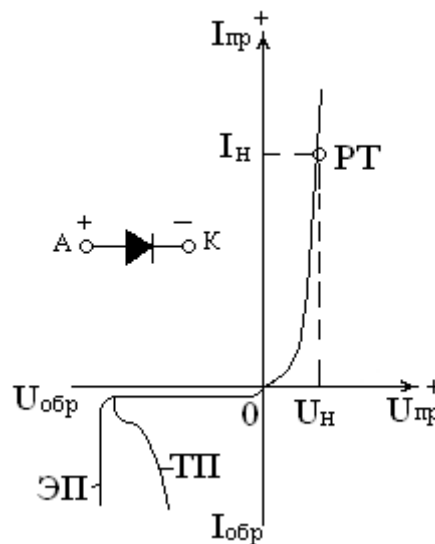


Рис. 1.1.

Структурная схема выпрямителя.

Выпрямитель представляет собой устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный ток.

На рис. 1.2. представлена структурная схема выпрямителя. 1- трансформатор. 2- выпрямляющий блок. 3- фильтр. 4- нагрузка. 5- автоматический выключатель (блок защиты и сигнализации). 6- система управления (для управляемого выпрямителя). U_1 - напряжение сети. U_2 - напряжение входа в выпрямительный блок. U_d - среднее значение выпрямленного напряжения. U_d^l - среднее значение выпрямленного напряжения после фильтра. U_y - напряжение управления для функционирования управляемого выпрямителя.

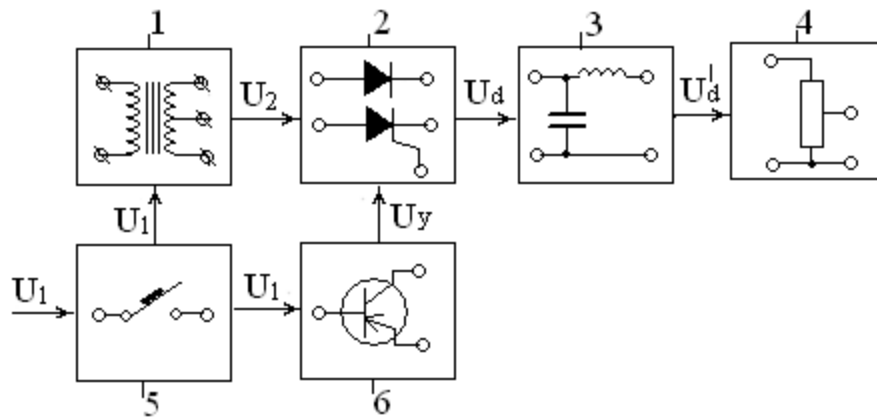


Рис. 1.2.

Фильтр предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. В качестве пассивного низкочастотного фильтра могут быть использованы различные схемы, содержащие индуктивности, конденсаторы и резисторы. Различают: Г-образные схемы (рис. 1.3), Т-образные схемы (рис. 1.4), П-образные схемы (рис. 1.5) и другие схемы низкочастотных фильтров.

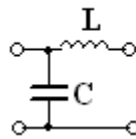


Рис. 1.3.

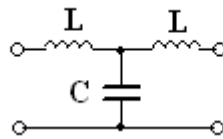


Рис. 1.4.

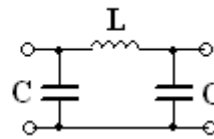


Рис. 1.5.

В схемах фильтров индуктивность считается токовым элементом и всегда подключается последовательно с нагрузкой, ёмкость (конденсатор) – фильтром напряжения, подключается параллельно нагрузке. В индуктивности работает запасенная энергия магнитного поля, в ёмкости – запасенная энергия электрического поля.

Двухполупериодная однофазная нулевая схема выпрямления

На рис. 1.6. представлена двухполупериодная однофазная нулевая схема выпрямления, на рис. 1.7. – её аналог в модификации лабораторной установки с учетом Г-образного фильтра в редакторе Multisim 8. Для схемы (рис. 1.6.): Т - однофазный трансформатор со средней нулевой точкой ($U_2 = U_{21} = U_{22}$ на-пряжение выхода). D1, D2- низкочастотные электропреобразовательные диоды. I_a - анодный ток диода. R_H - сопротивление нагрузки.

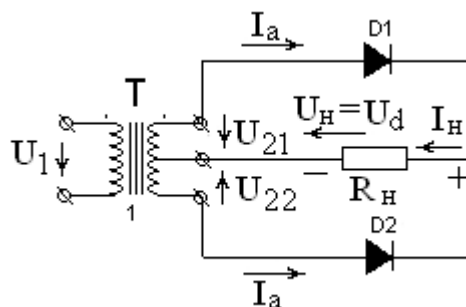


Рис. 1.6.

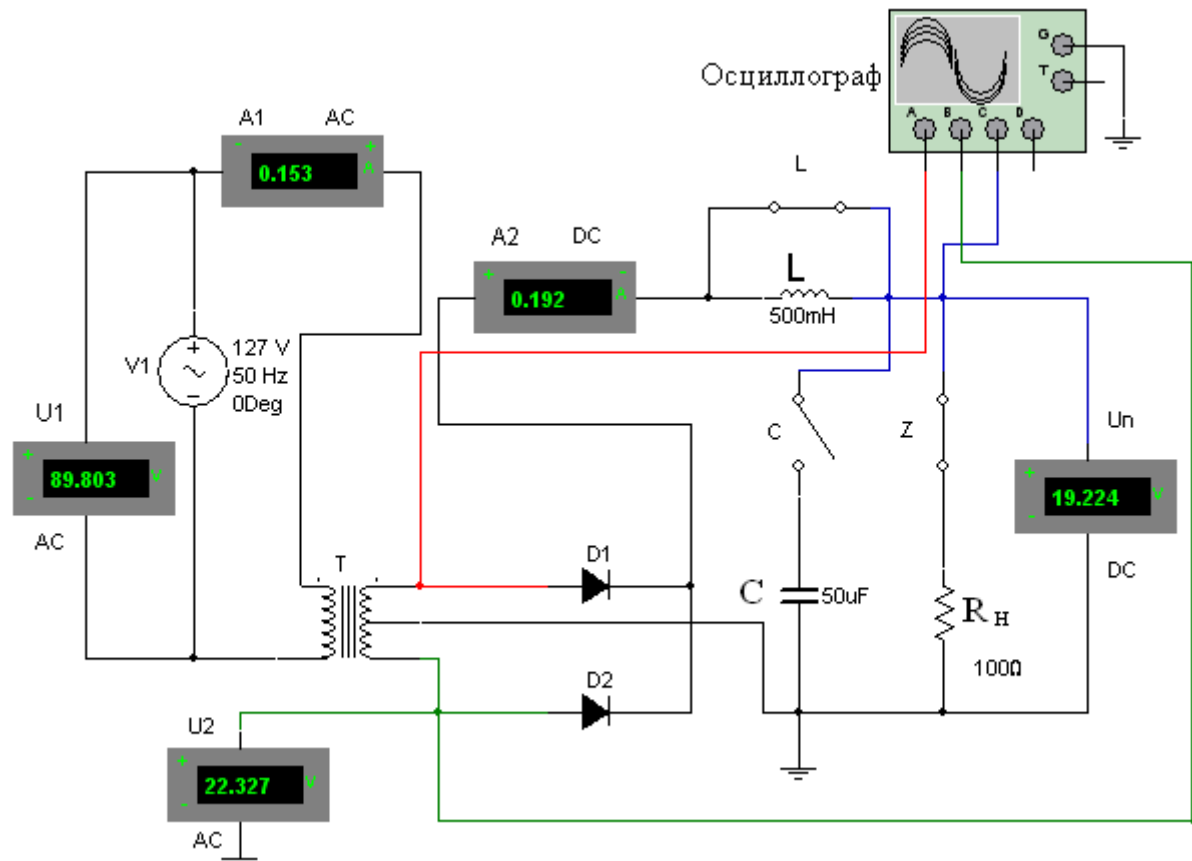


Рис. 1.7. V1- однофазный источник синусоидального напряжения с $U_{1m} = 127$ В, $U_1 = 89,803$ В и частотой $f = 50$ Гц. Т- трансформатор, где $U_1 = 89,803$ В, $U_2 = 22,327$ В. Измерительные приборы: вольтметры и амперметры AC - электромагнитной системы; DC – магнитоэлектрической системы. Показания приборов соответствуют работе выпрямителя без фильтра.

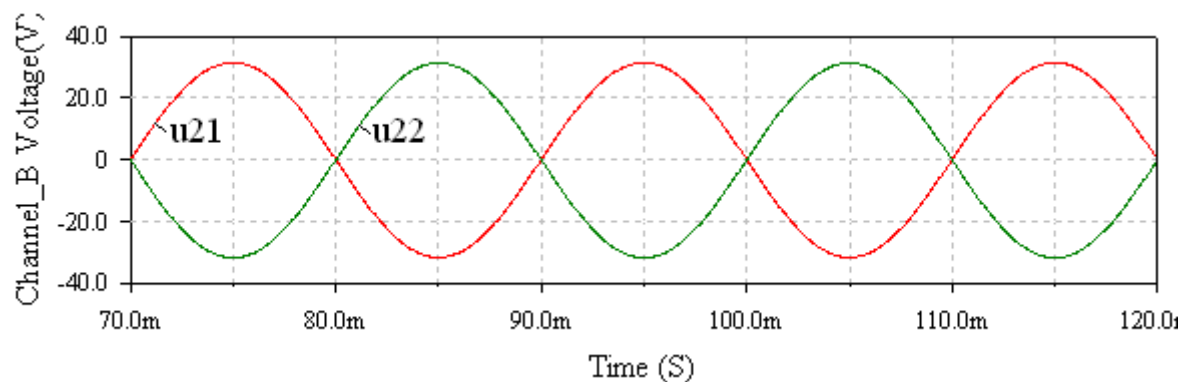


Рис. 1.8. Напряжения с выходных обмоток трансформатора.

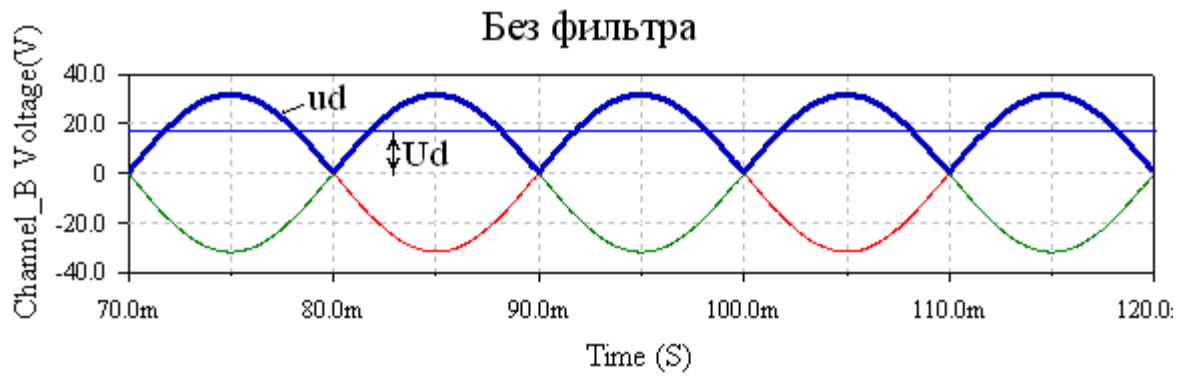


Рис. 1.9. Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d . Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 19,223$ В.

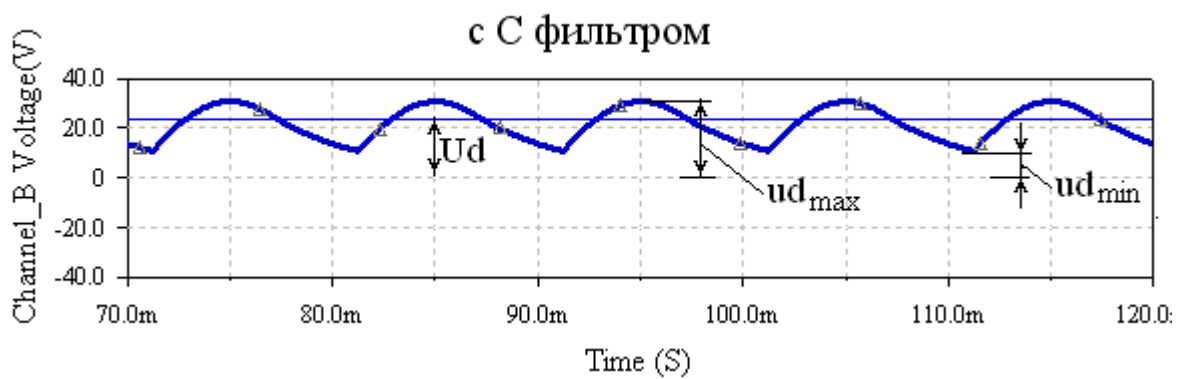


Рис. 1.10. Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 21,761$ В.

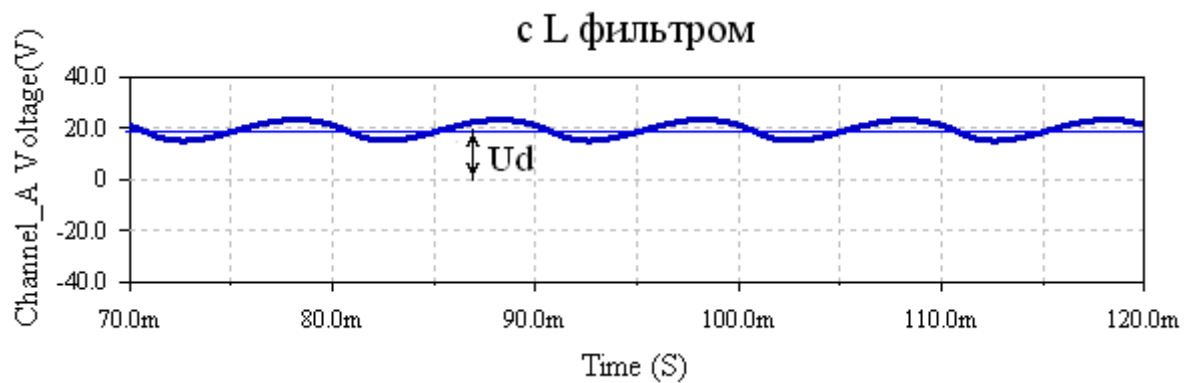


Рис. 1.11. Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 19,013$ В.

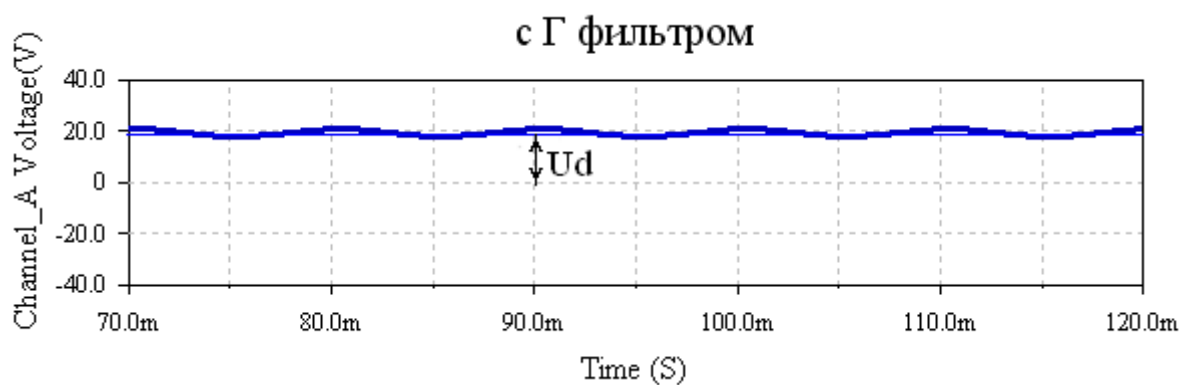


Рис. 1.12. Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 19,379$ В.

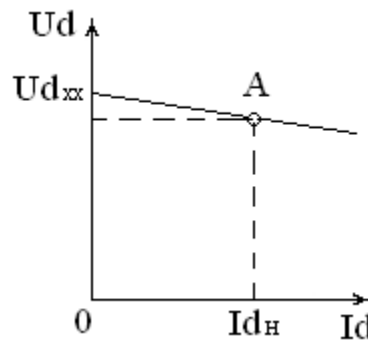


Рис. 1.13. Внешняя характеристика выпрямителя $U_d = f(I_d)$.

Среднее значение выпрямленного напряжения можно определить из выражения

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} = 0.9 U_2$$

Среднее значение выпрямленного тока $I_d = U_d / R_n$.

Максимальное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{2 \text{ обр. max}} = \pi \cdot U_d = 2 U_{2 \text{ max}}$$

Действующий ток во вторичной обмотке трансформатора (ток в диоде)

$$I_a = (\pi/4) \cdot I_d = 0.785 I_d$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для k -ой гармоники

$$K_{п(k)} = \frac{U_{2m(k)}}{U_d} = \frac{2}{(k^2) \cdot m^2 - 1},$$

m - число фаз выпрямителя или число полуволн выпрямленного напряжения в одном периоде.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы

$$K_{п(1)} = \frac{2}{(1^2) \cdot 2^2 - 1} \cdot 100\% = 66,6666 \approx 67 \%$$

Коэффициент пульсации для кривых выпрямленного напряжения с фильтром, на примере рис. 1.10.

$$K_{п(k)} = \frac{u_{d \text{ max}} - u_{d \text{ min}}}{U_d}$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (с Γ фильтром) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы

$$K_{п(1)} = 15,78 \approx 16 \%$$

Достоинством выпрямителя является его высокая надёжность за счёт минимального числа диодов.

К недостаткам следует отнести дополнительное подмагничивание магнитопровода трансформатора постоянным током, что снижает КПД и большая величина обратного напряжения на диоде, что увеличивает его стоимость. Выпрямитель можно применять для нагрузок в основном малой мощности (до 1 кВт).

Двухполупериодная однофазная мостовая схема выпрямления

На рис. 2.1. представлена *двухполупериодная однофазная мостовая схема выпрямления*, на рис. 2.2. – её аналог в модификации лабораторной установки с учетом Г-образного фильтра в редакторе Multisim 8. Для схемы (рис. 2.1.). Т - однофазный трансформатор (U_2 напряжение выхода). D1, D2, D3, D4 - низкочастотные электропреобразовательные диоды. R_H - сопротивление нагрузки.

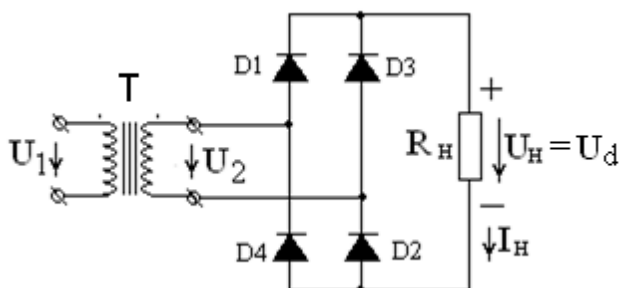


Рис. 2.1.

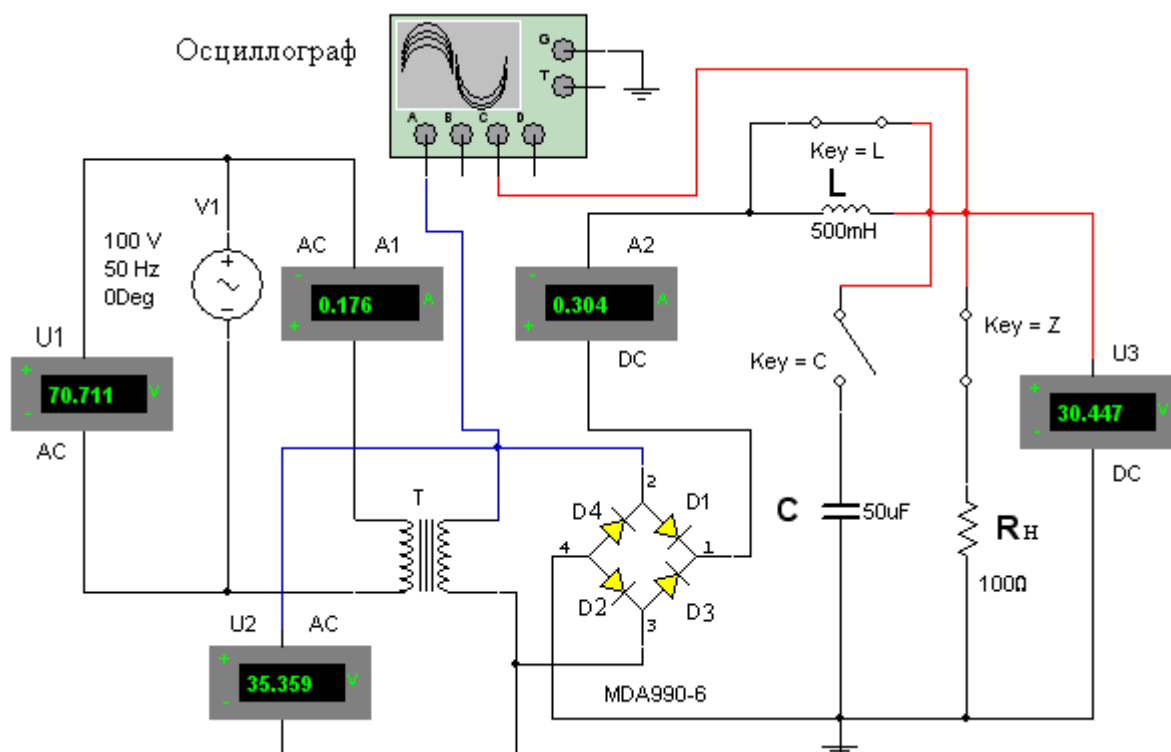


Рис. 2.2.

На рис. 2.2.: V1- однофазный источник синусоидального напряжения с $U_{1m} = 100$ В, $U_1 = 70,711$ В и частотой $f = 50$ Гц. Т- трансформатор, где $U_1 = 70,711$ В, $U_2 = 35,359$ В.

Измерительные приборы: вольтметры и амперметры AC - электромагнитной системы; DC – магнитоэлектрической системы. Показания приборов со-

ответствуют работе выпрямителя без фильтра. Однофазный выпрямительный мост типа MDA990-6 (диоды D1, D2, D3, D4).

Вентили (диоды) в этой схеме работают парами поочередно. В положительный полупериод напряжения U_2 проводят ток D1 и D3. В это время вентили D2 и D4 – закрыты. В отрицательный полупериод напряжения U_2 картина меняется на противоположную, D1 и D3 – закрыты, а D2 и D4 – открыты.

Среднее значение выпрямленного напряжения U_d и коэффициенты пульсаций рассчитываются по тем же формулам, что и двухполупериодная однофазная нулевая схема выпрямления.

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} = 0.9 U_2$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для k -ой гармоники

$$K_{п(k)} = \frac{U_{2m(k)}}{U_d} = \frac{2}{(k^2) \cdot m^2 - 1},$$

m - число фаз выпрямителя или число полуволн выпрямленного напряжения в одном периоде.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы и графика рис. 2.3.

$$K_{п(1)} = \frac{2}{(1^2) \cdot 2^2 - 1} \cdot 100\% = 66,6666 \approx 67 \%$$

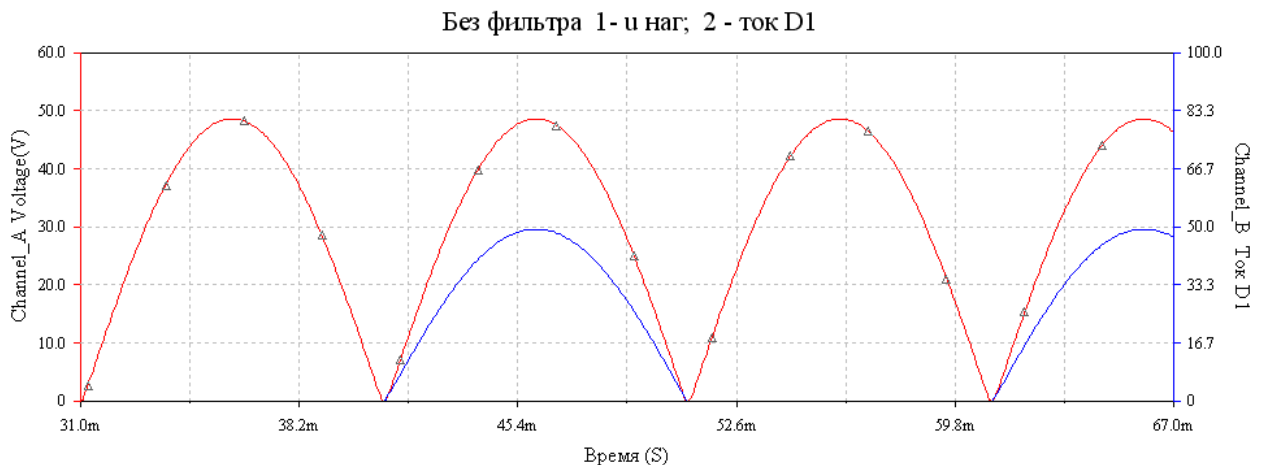


Рис. 2.3. Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d (красная линия). Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 30,447$ В. Ток через диод D1 (голубая линия)

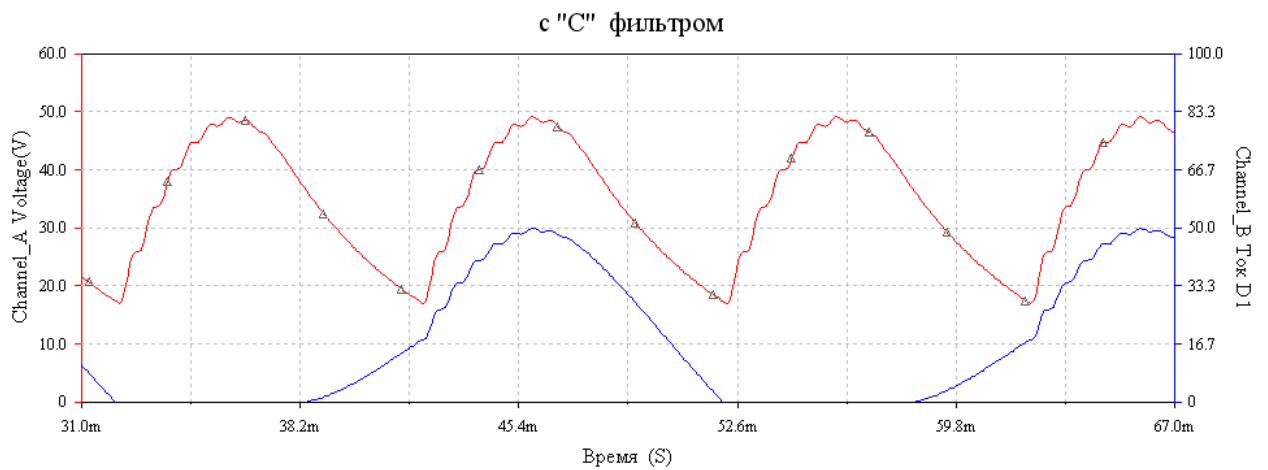


Рис. 2.4. Мгновенное значение выпрямленного напряжения ud (красная линия). Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 34,548$ В.

Здесь сказывается влияние параметров конденсатора и индуктивностей трансформатора на форму выпрямленного напряжения (ud) и тока через диоды в виде небольшого колебательного процесса.

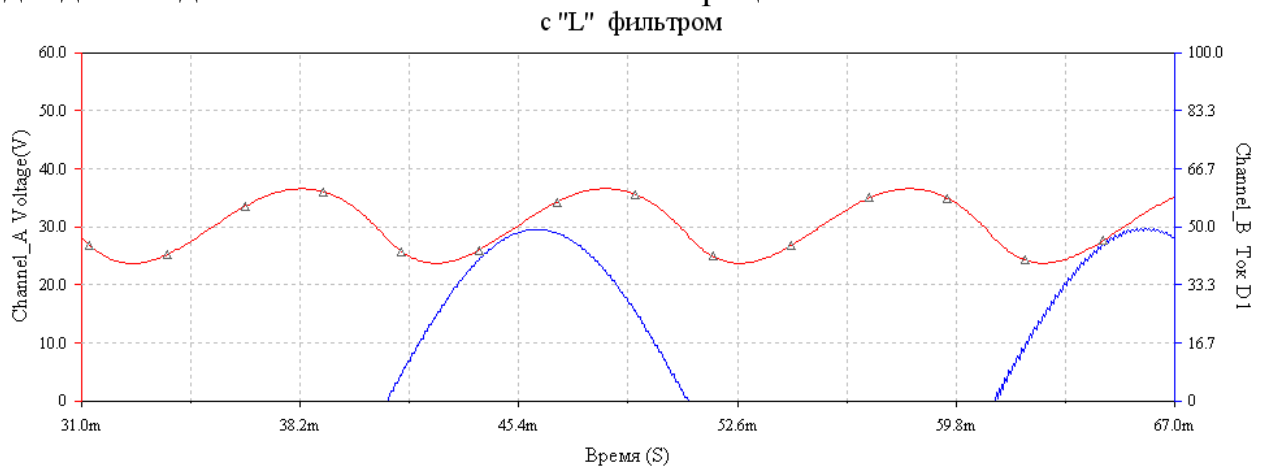


Рис. 2.5. Мгновенное значение выпрямленного напряжения ud (красная линия). Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 30,116$ В.

Коэффициент пульсации для кривых выпрямленного напряжения с фильтром, на примере кривой рис. 2.6.

$$K_{\Pi} (\kappa) = \frac{ud_{max} - ud_{min}}{U_d}$$

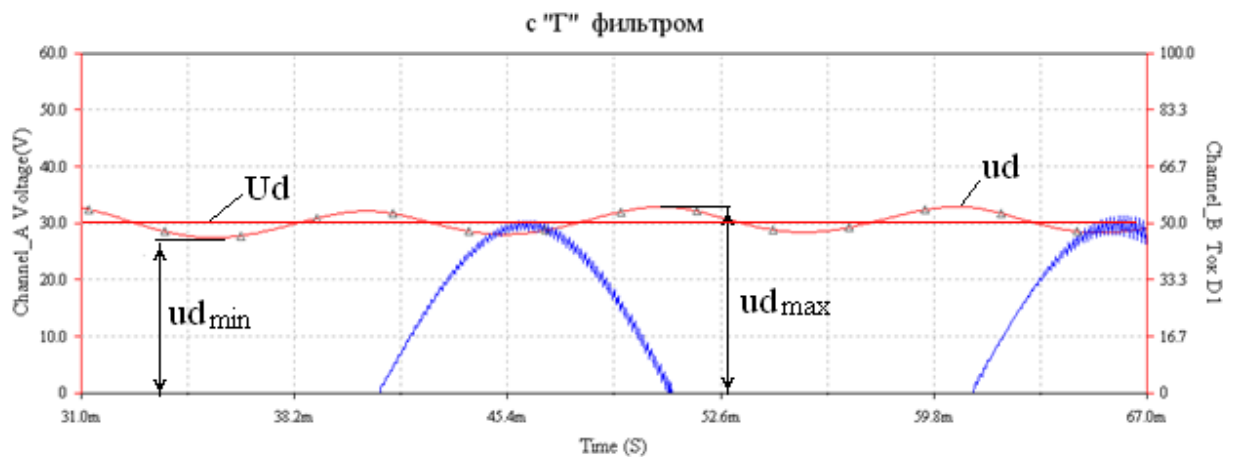


Рис. 2.6. Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d (красная линия). Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 30,720$ В.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (с фильтром) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы

$$K_{п(1)} = 16,28 \approx 16 \%$$

Если сравнить подобные коэффициенты пульсаций нулевой и мостовой однофазных схем выпрямления, то для одинаковых фильтров, они равны между собой (с учетом погрешности измерений).

$$K_{п(1)} = 15,78 \approx 16 \% \text{ (нулевая схема)}$$

Среднее значение выпрямленного тока $I_d = U_d/R_n$.

Максимальное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{2 \text{ обр. max}} = \pi \cdot U_d / 2 = U_{2 \text{ max}}$$

Рассмотренная схема выпрямления широко применяется для нагрузок малой и средней мощности т. к. она лишена недостатков нулевой схемы выпрямления. Схема выпрямления может работать и без трансформатора при согласованных параметрах источника питания и выпрямителя.

Трехфазная нулевая схема выпрямления

На рис. 2.6. представлена *трехфазная нулевая схема выпрямления*, на рис. 2.7. — её аналог в модификации лабораторной установки с учетом Г-образного фильтра в редакторе Multisim 8.

Для схемы (рис. 2.6.). Т - трехфазный трансформатор (U_a, U_b, U_c - напряжения фазные выхода). D_a, D_b, D_c - низкочастотные электропреобразовательные диоды в фазах выходной обмотки трансформатора. R_n - сопротивление нагрузки.

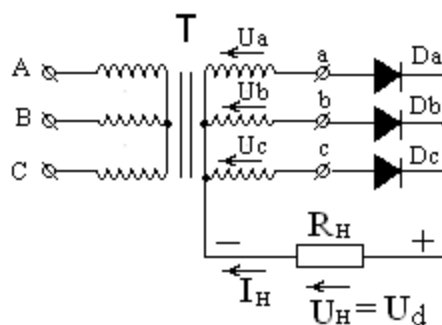


Рис. 2.6.

Ток через вентиль D_a и связанную с ним вторичную обмотку трансформатора будет проходить в течение той трети периода (смотри графики рис. 2.8.), когда напряжение данной фазы больше чем в двух соседних фазах.

Рабочий вентиль прекращает проводить ток тогда, когда потенциал его анода становится ниже общего потенциала катодов. Переход тока от одного вентиля к другому (коммутация тока) происходит в момент пересечения кривых фазных напряжений.

Выпрямленное напряжение u_d представляет собой огибающую кривую вершущих кривых фазных напряжений (рис. 2.8.).

Среднее значение выпрямленного напряжения можно определить из выражения

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{3 \cdot U_{2\phi m}}{2\pi} = 1.17 U_{2\phi}$$

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_d = U_d / R_n.$$

Максимальное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{2 \text{обр. max}} = U_{2 \phi \text{ max}}$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для k -ой гармоники

$$K_{п(k)} = \frac{U_{2m(k)}}{U_d} = \frac{2}{(k^2) \cdot m^2 - 1},$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы

$$K_{п(k)} = \frac{2}{(1^2) \cdot 3^2 - 1} \cdot 100\% = 25\%$$

Достоинством выпрямителя является его высокая надёжность за счёт минимального числа диодов. К недостаткам следует отнести дополнительное подмагничивание магнитопровода трансформатора постоянным током, что снижает КПД.

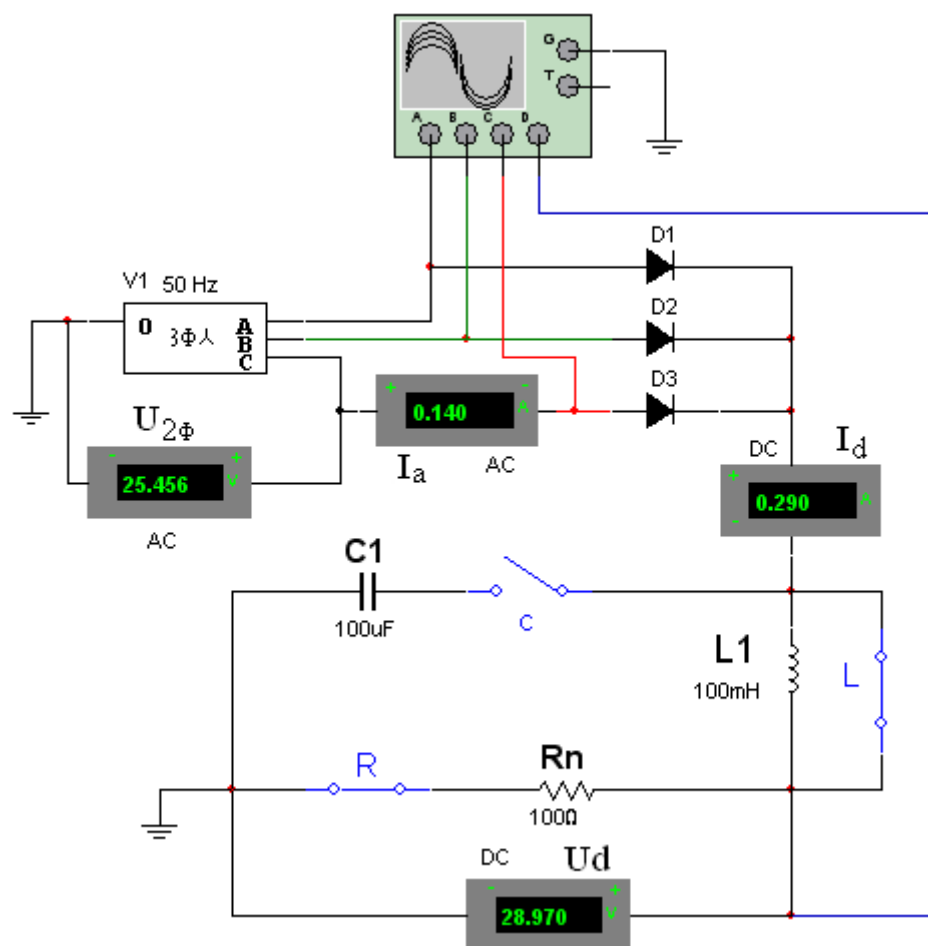


Рис. 2.7.

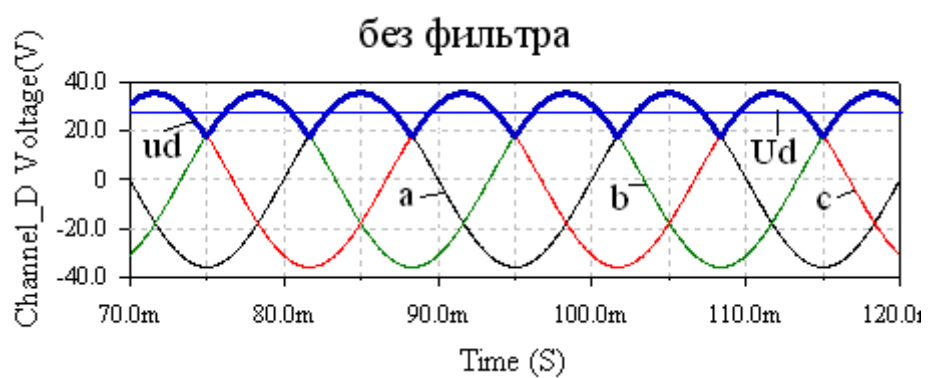


Рис. 2.8.

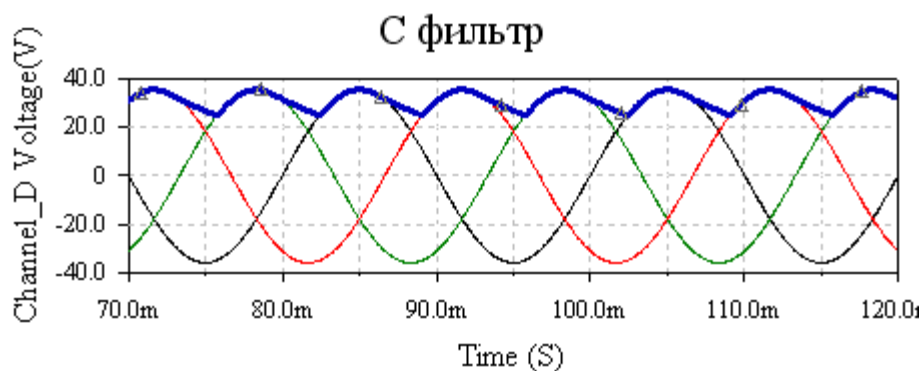


Рис. 2.9.

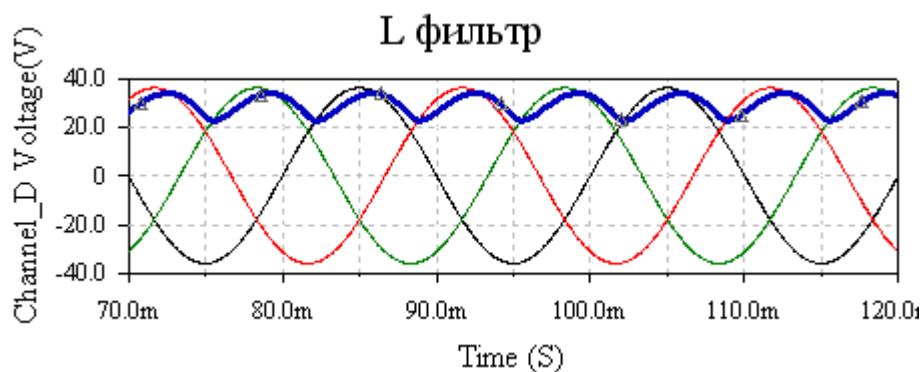


Рис. 2.10.

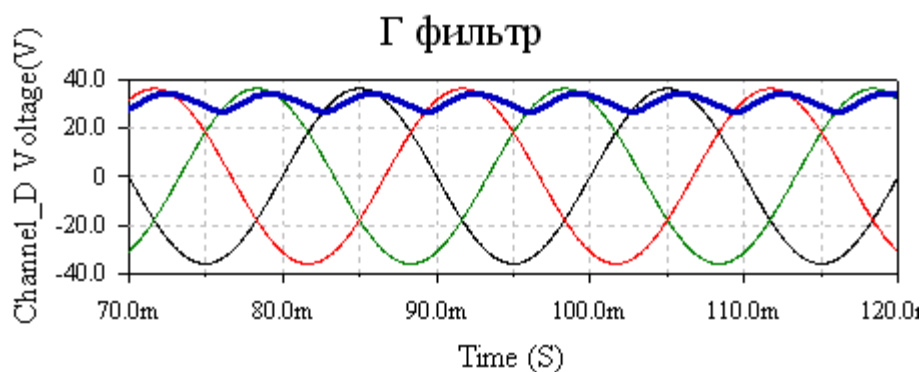


Рис. 2.11.

Трёхфазная мостовая схема выпрямления (Схема Ларионова)

На рис. 2.13. представлена *трехфазная мостовая схема выпрямления*, на рис. 2.14. – её аналог в модификации лабораторной установки с учетом Г-образного фильтра в редакторе Multisim 8.

Для схемы (рис. 2.13.). Т - трехфазный трансформатор (U_a , U_b , U_c - фазные напряжения выхода). $D_1 - D_6$ - низкочастотные электропреобразовательные диоды. R_n - сопротивление нагрузки.

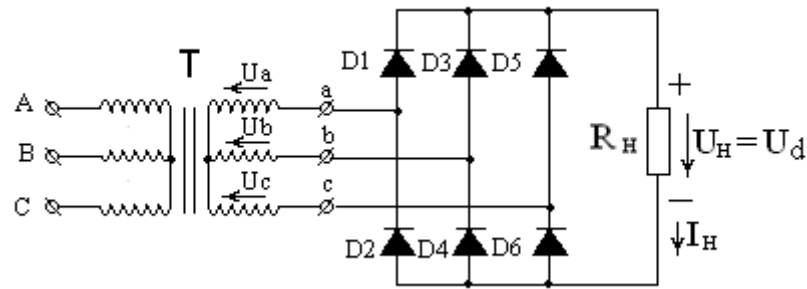


Рис. 2.13.

Выпрямленное напряжение u_d представляет собой огибающую кривую вершушек кривых фазных напряжений для суммарных параметров верхнего (D1, D3, D5) и нижнего (D2, D4, D6) выпрямительных блоков (рис. 2.15.).

Среднее значение выпрямленного напряжения можно определить из выражения

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{3 \cdot U_{2\lambda m}}{\pi} = 2.34 U_{2\phi}$$

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_d = U_d / R_n.$$

Максимальное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{2 \text{ обр. max}} = U_{2 \text{ л max}}$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для k -ой гармоники

$$K_{п(k)} = \frac{U_{2m(k)}}{U_d} = \frac{2}{(k^2) \cdot m^2 - 1},$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (без фильтра) для 1-ой гармоники рассматриваемой схемы

$$K_{п(k)} = \frac{2}{(1^2) \cdot 6^2 - 1} \cdot 100\% = 5,71\%$$

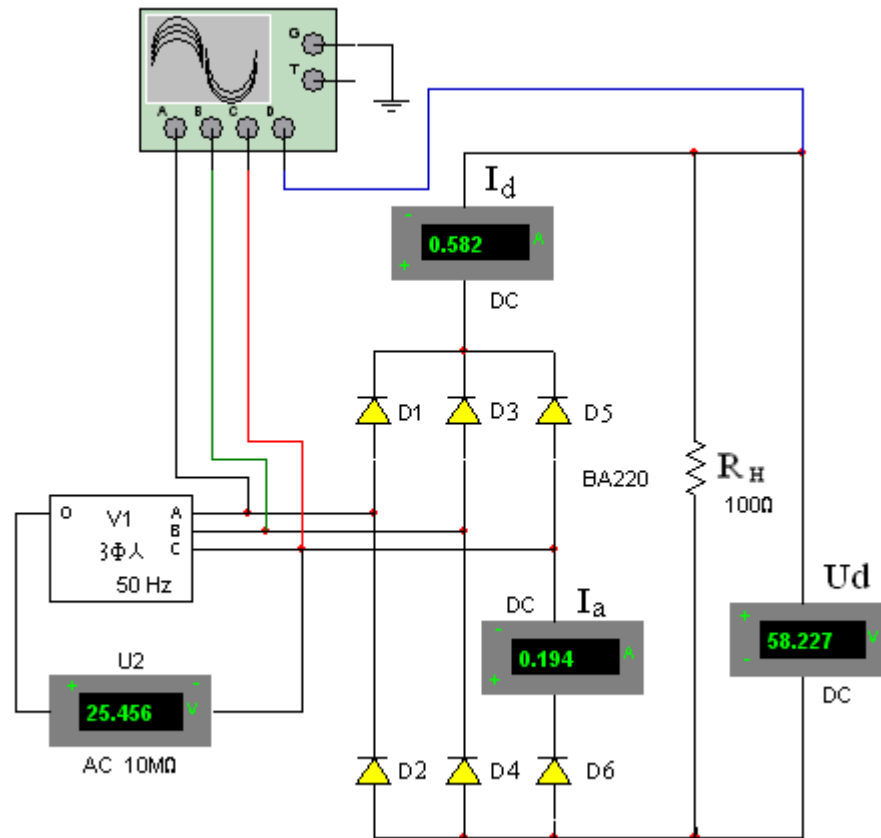


Рис. 2.14.

без фильтра

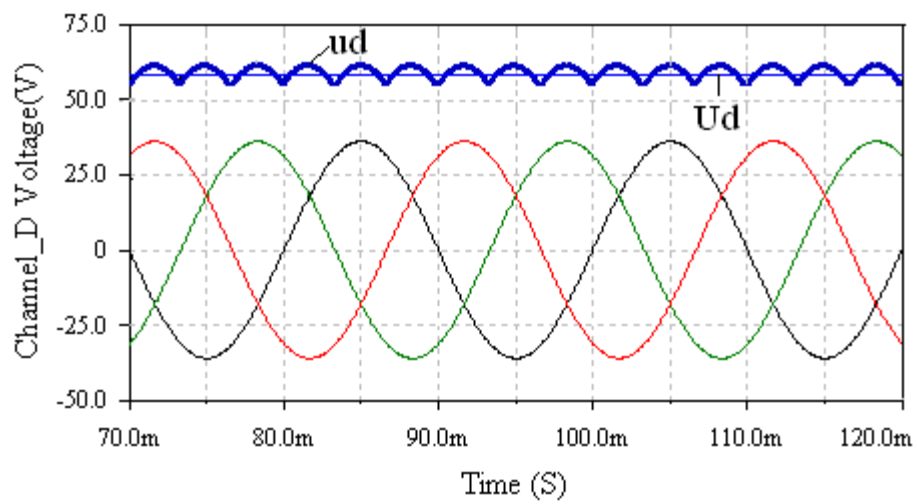


Рис. 2.15.

Форма тока в диоде при активной нагрузке.

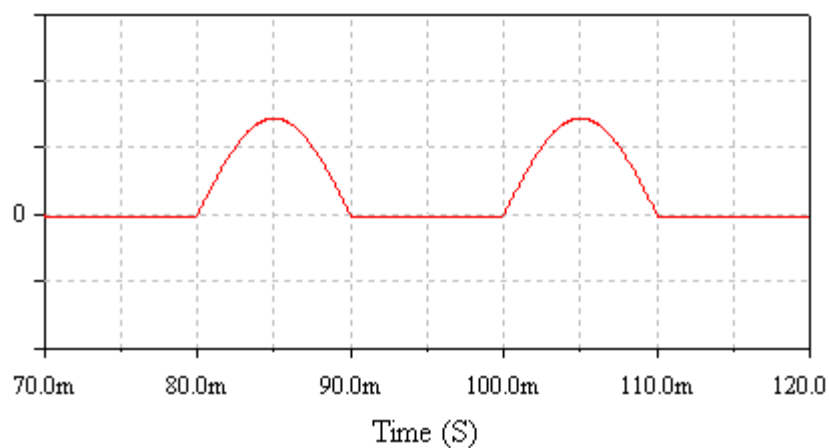


Рис. 2.16.

Трехфазный мостовой выпрямитель по многим показателям превосходит все рассмотренные выпрямители (за исключением числа диодов) и поэтому он имеет широкое распространение в силовой многоамперной электронике и системах электропривода. Схема выпрямления может работать и без трансформатора при согласованных параметрах источника питания и выпрямителя.

Впервые схема этого выпрямителя была предложена в 1923 г. проф. Ларионовым А.Н.