

Подведём краткие итоги.

Мы занимаемся статическими преобразователями в противовес электромашинным. Статические преобразователи управляются ключами. Диод, вообще говоря, имеет управление по силовой цепи: в тот момент когда ток спадает до 0, диод выключается. Диод управляется полярностью сети. Для тиристоров лучше употреблять термин "запираемый" или "незапираемый" а не управляемый.

Кроме "классических" приборов существуют модули, в которых несколько приборов интегрированы в одном корпусе.

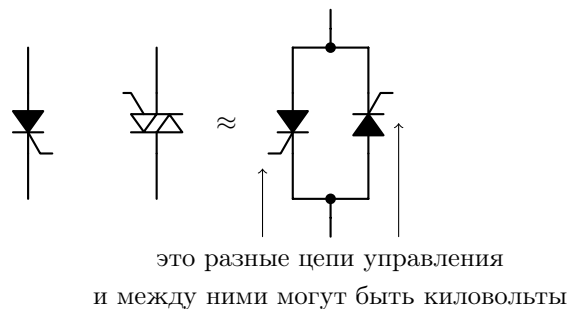


Рис. 1: Семистор

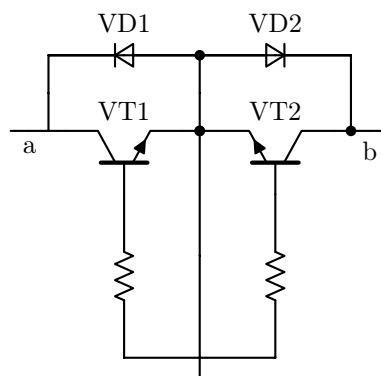


Рис. 2: аналог запираемого тиристора

Диоды $VD1$ и $VD2$ шунтируют транзисторы. Если к концу a приложен положительный потенциал, а к концу b приложен отрицательный, то ток идет по цепи $VT1 - VD2$. При противоположной полярности ток идет по цепи $VT2 - VD1$.

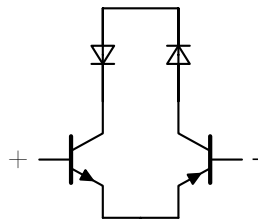


Рис. 3:

Диоды параллельны. Чтобы открыть транзисторы нужно подать разнополярные сигналы. Но можно схитрить:

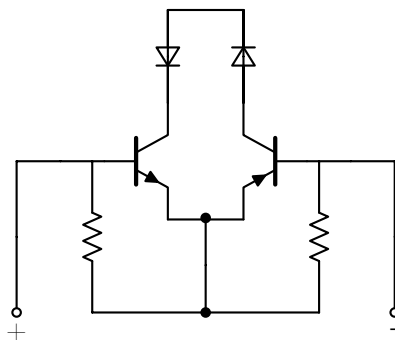


Рис. 4:

В этой схеме оба транзистора открыты. При противоположной полярности – закрыты.

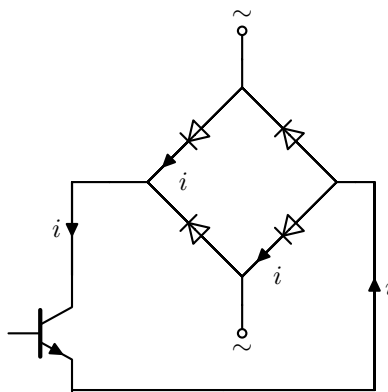


Рис. 5:

На этой схеме используется биполярный транзистор, но можно использовать MOSFET, IGBT, рпр. Недостаток: ток всегда будет протекать по трем приборам. В предыдущей схеме ток протекал по двум приборам. А в случае двух встечных запираемых тиристорах – один (правда пятислойный).

Самым распространённым типом преобразовательного прибора является выпрямитель. Затем по распространённости следуют НПЧ, тиристорный регулятор переменного напряжения.

Силовую структуру выпрямителя мы уже знаем. Далее идёт информационная электроника.

Фильтр - как правило, используется индуктивный фильтр и комбинации LC , CL , CLC , резонансные фильтры.

Трансформаторы - схемы включения Δ, Δ, Z и обратные Y, ∇, Z , в которых соединение концов обмоток поменяно местами по сравнению с прямой конфигурацией. Такие же схемы соединения обмоток используются и на первичной стороне.

Трансформатор, вентильная группа, фильтр. Фильтр, как правило, индуктивный фильтр. Конденсаторы не любят быстроменяющегося напряжения. Емкость эффективна при холостом ходе и малых токах. Конденсаторы используются в звене постоянного тока. В инверторах напряжения используется конденсатор, если инвертор тока - индуктивность. Кроме C -фильтра могут быть CL и CLC фильтры.

Основные схемы - "нулевые". Если "нуль" не выведен, то можно восстановить "искусственный нуль".

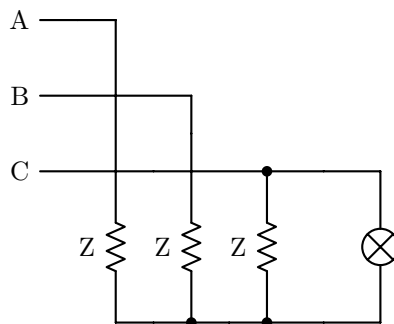


Рис. 6: схема восстановления искусственного нуля

При линейном напряжении между фазами 380V получаем напряжение на лампе 220V. Активное сопротивление Z должно быть на порядок, или хотя бы в несколько раз меньше сопротивления нагрузки R_n . Использовать R вместо L или - глупость.

0.1 нулевые схемы выпрямителей

0.1.1 Однофазная нулевая схема

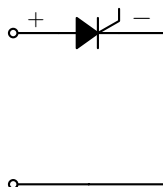


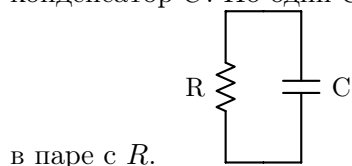
Рис. 7: однофазная нулевая схема

Подавать на тиристор управляющий сигнал, когда на тиристоре обратное напряжение крайне нежелательно.

При $U_{VS} < 0$ и $|I_S| \approx I_{упр}$ возникает так называемый транзисторный эффект тиристора, который приводит к нагреву тиристора. Эти токи имеют порядок $10^{-2} \dots 10^{-1} A$ при температуре около 40° , но могут достигать $1-2 A$ при низких температурах $\approx -40^\circ$. Потому тиристорные(транзисторные) преобразователи требуют подогрева при низких температурах. Максимальный управляющий ток при нормальных условиях достигает $600 mA$. К чему приводит $I_{упр} = 10^{-2}$, а $U = 1000V$? Тиристор рассеивает сотни ватт, а к ним добавится полкиловатта. А если в схеме 6-12 тириستоров? Поэтому при отрицательном напряжении на тиристоре управляющий сигнал не подают.

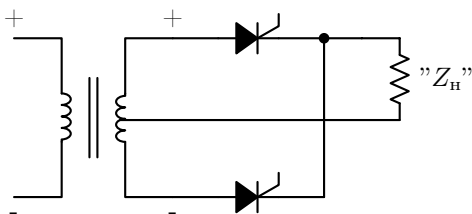
Электрохимическая нагрузка эквивалентна аккумулятору–встречной ЭДС. В нагрузке обязательно бывает L . e_n , полярность может быть согласна, а может быть противоположна приложенному напряжению.

В частном случае роль E может выполнять конденсатор C . Но один C быть не может, он обязательно должен быть

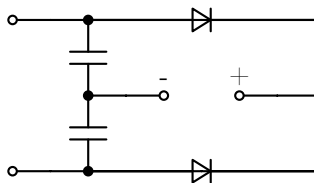


в паре с R .

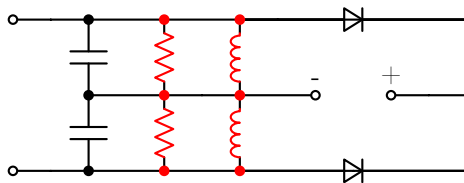
0.1.2 симметричная двухфазная схема



0.1.3 Двухполупериодная однофазная нулевая схема

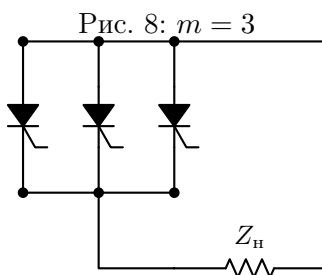


Потечет ли ток? Ток не потечёт, поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток. По “нулевому” проводу должен протекать постоянный ток. Создадим искусственный ток:

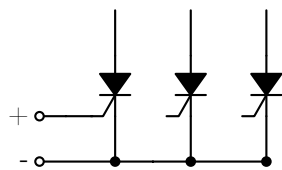


Для постоянного тока Z не может быть емкостным. “ Z ” должен проводить постоянный ток.

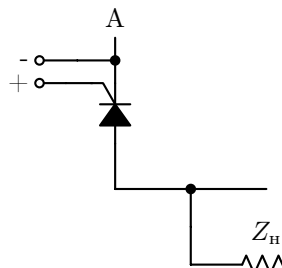
В “нулевых” схемах число вентилей равно числу фаз.



В Z_n должны быть учтены параметры провода. “Искусственный ноль” должен пропускать постоянный ток и Z_n должен быть на порядок больше Z от “искусственного ноля”



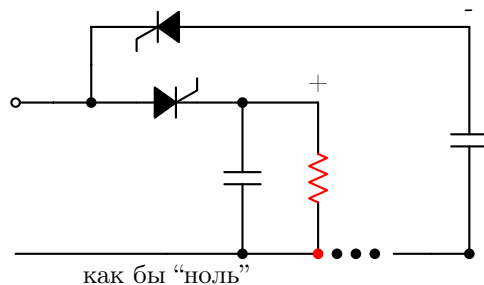
$U_{\text{управления}} \approx 10V$, может быть 5-8-10, max 15



В этой схеме сигнал управления подается относительно фазы A . Это означает, что сигналы управления нужно развязывать, например, посредством импульсного трансформатора.

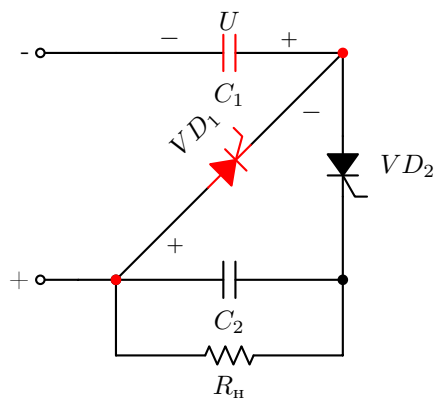
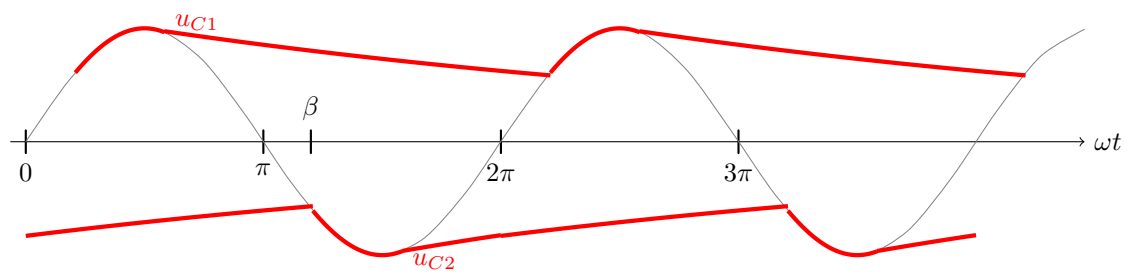
6-фазная схема $m = 6$, забирать будем с таких обмоток Y, A , рисовать не буду

мостовая схема – это объединение двух нулевых. Ток будет протекать в два раза дольше. Если это трансформатор, то обмотка лучше используется. Для того чтобы идти дальше, вернемся к частному случаю. Нулевая однополупериодная схема.

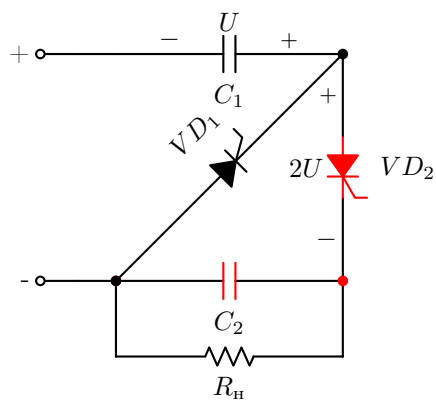
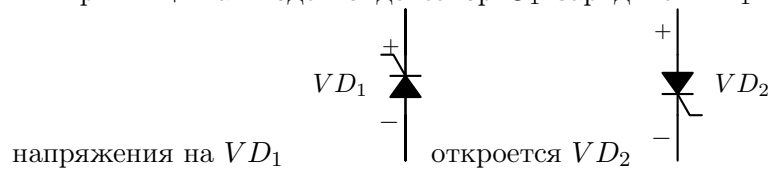


Напряжение между $(+)$ и $(-)$ равно удвоенному напряжению на конденсаторе. u_{d1} поставлена маленькими, поскольку это функция времени. Сумма $u_{d1} + u_{d2}$. По среднему значению будет в два раза больше чем U . Это схема удвоения, $2U$ – это напряжения на двух конденсаторах. Эта схема Латура. Однофазная мостовая – это схема Греса. Трехфазная мостовая – Ларионова. Имена возвращаются.

Рассмотрим еще одну схему удвоения:

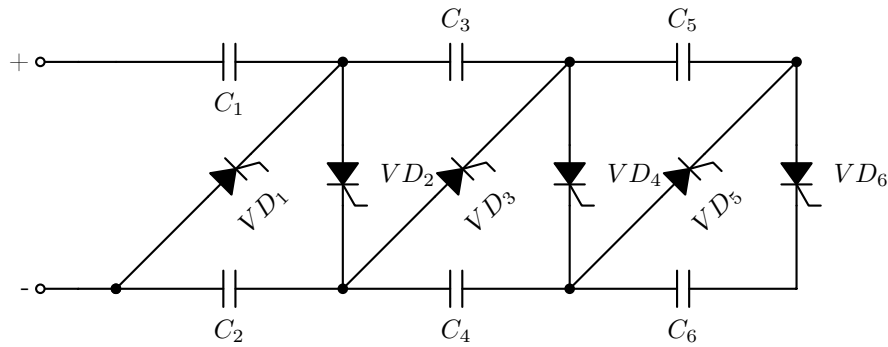


При $- +$ на входе конденсатор C_1 зарядится $- +$. При подаче



За несколько периодов напряжения сети если пренебрегать R_n конденсатор C_1 зарядится до амплитуды U , а конденсатор C_2 до двух амплитуд $2U$.

0.1.4 вариант схема умножения



Конденсатор C_1 заряжается на положительных полупериодах порциями. На верхних конденсаторах C_1, C_3, C_5, \dots нечётные напряжения $U, 3U, 5U$. На нижних конденсаторах C_2, C_4, C_6, \dots нечётные напряжения $2U, 4U, 6U$. Таким способом в середине прошлого века получали напряжение в 1 миллион вольт, полтора миллиона вольт. Получали 2 миллиона – была построена линия постоянного тока Экибастуз-Москва. Несколько миллионов можно было получить.

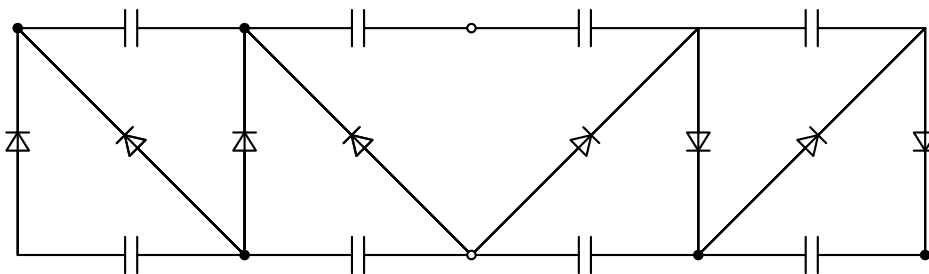
В первых цветных телевизорах напряжение анод-катод было 25kV. Получали это напряжение выпрямлением на электровакуумном приборе. Для этого применялся импульсный трансформатор строчной развертки. Горели строчные трансформаторы из-за межвитковых замыканий. Перешли на схему Латура – пожары прекратились.

Требуется высокое напряжение и малый ток. Газоочистка в трубах требует высокое напряжение. Сажа притягивается как лохмотья бумажки притягиваются к расчётке.

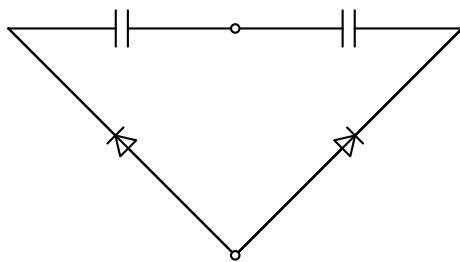
Пример практического применения выпрямителей.

$$7 \times \underbrace{220}_{283} \cdot \sqrt{2} \approx 1700, 1800V \quad 10 \times 283 = 2830V$$

Можно ещё одну схему нарисовать. Её почему-то в учебниках не приводят

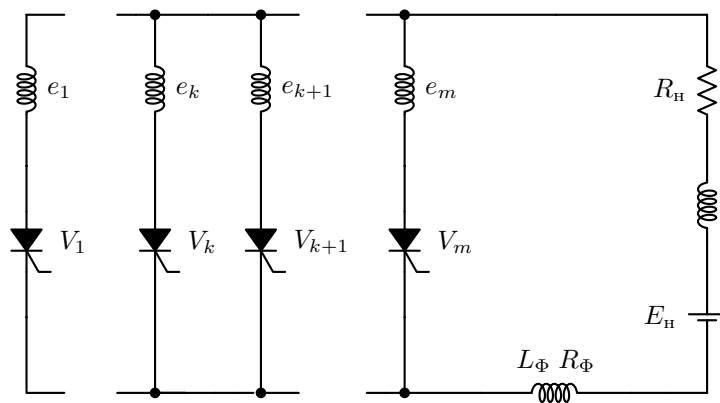


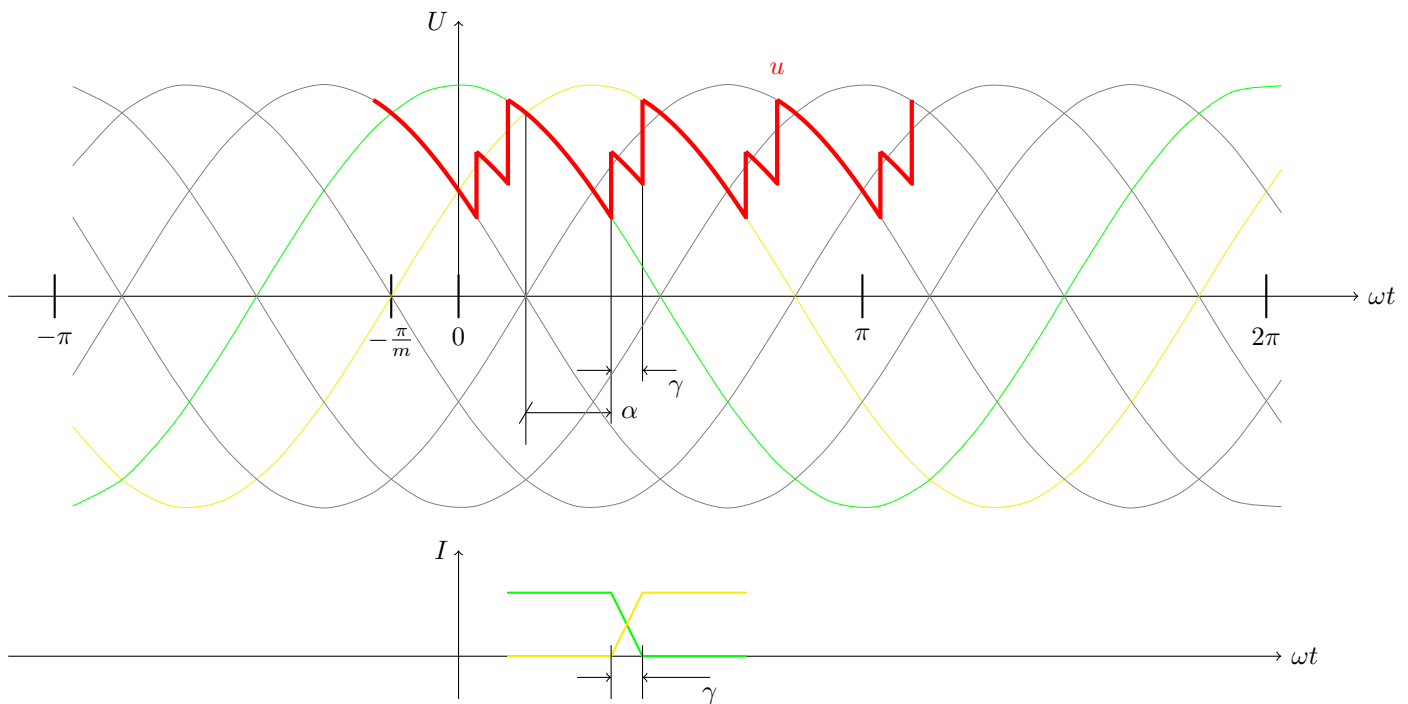
Эта схема как бы двухполупериодная. Частота пульсаций 100Гц, а не 50Гц.



Получили схему Латура.

До сих пор не писали математических соотношений. В качестве основной схемы рассмотрим m -фазную “нулевую” схему. Минимум $m = 2$. Всегда должна быть предыдущая и последующая фазы. Также всегда должны быть первая и последняя фазы.





В e_k содержатся $(E_{2m\phi}, L_\phi, r_\phi)$. Где L_ϕ – эквивалентная индуктивность приведенная ко вторичной обмотке. Как определить параметры? Из опыта к.з. Есть измеренные U, I, Z, P . Из $I^2 R = P$ определим $L_{\text{фазы}}$

$$X_{\text{фазы}}, \omega L_{\text{фазы}} = 2\pi f L_\phi.$$

U_0 – как бы встречная ЭДС.

$U = U_0 + R_D \cdot I$, где R_D – динамическое сопротивление.

Принимаем допущение $i_d \approx I_d$ – пренебрегаем пульсациями. Еще одно допущение $m \geq 2$. Неуправляемые диоды проходили бы по максимуму волн. Обозначим e_1 . На периоде 2π имеем m пульсаций. Предположим, что тиристоры имеют задержку отпирания на угол α (угол регулирования)

Кривая выпрямленного напряжения (рис). Не спешите делать его жирным, мы будем его поправлять.

Ток через фильтр $L \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial t}$. На постоянном токе $i_d \approx I_d$ пульсациями пренебрегаем. U_d – подлежит определению! Предполагаем, что до k -й фазы всё включалось.

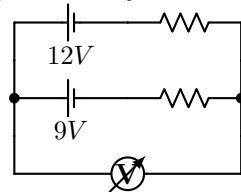
Рисуем токи i_k, i_{k+1} , рисуем графики $I_d = i + d, \dots i_k$ изменяются мгновенно? Да, если пренебречь индуктивностью... А наши обмотки имеют индуктивность. Мгновенно этот процесс не может завершиться. Индуктивность $L_{\phi k}$ не хочет отдавать ток, а индуктивность $L_{\phi(k+1)}$ – принимать. Что заставляет обмотки обмениваться током – разность эдс $e_k - e_{k+1}$. Обе обмотки начинают проводить ток. Получается к.з. Если не пренебрегать сопротивлением, то на малое сопротивление. есть два эдс и два L . $e_{k+1} - e_k$ упадет на внутреннем сопротивлении по закону Кирхгофа. i_R ,

$$i_R, L \frac{\partial i}{\partial t}, L \frac{\partial i}{\partial t}.$$

Переход тока с одной фазы преобразователя на другую называется процессом коммутации.

Время коммутации определяется разностью ЭДС и суммы активно-индуктивных сопротивлений коммутируемых (коммутирующих) фаз. Время процесса (время коммутации), а соответствующий угол принято обозначать γ . $-e_k + -e_{k+1}$, но у e_{k+1} плюс больше! В k -й фазе протекал ток. Из него вычитается ток к.з. Течёт прямой ток, навстречу ток к.з. Когда ток i вентиля становится равным нулю вентиль выключается.

Какое напряжение будет на нагрузке-лампочке, когда к ней приложаться



разные ЭДС.

Что покажет вольтметр? Если не указано внутреннее сопротивление, то неизвестно. Если одинаковые внутренние сопротивления, то вольтметр покажет полусумму напряжений. Разность напряжений упадет на этих сопротивлениях. Поняв эту детскую задачу двинемся дальше. Теряется заштрихованная площадка из-за коммутации на индуктивностях.

Нужно взять интеграл. Площадь считаем в угловых единицах.

$$u_d = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} \left(u_\phi - \underbrace{\Delta u_{V_S}}_{\text{падение на фильтре}} - \underbrace{\Delta u_\phi}_{\text{падение на фильтре}} \right) d\omega t =$$

где

$$u_\phi = e_\phi - i_\phi - L_\phi \frac{di_\phi}{dt}$$

и $e_\phi = E_k$ — косинусоида.

$$= \frac{m}{2\pi} \underbrace{\int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sqrt{2} E_{2\phi} \cos \omega t d\omega t}_{\text{эквивалентное значение выпрямленной ЭДС}} - \Delta U_d$$

через U_d обозначены все остальные падения напряжения. А если нет никаких падений, то нет и U_d .

m	“1”	2	3	4	6		∞
$\frac{E_{d0}}{E_{2\Phi}}$	0.45	0.9	1.17	1.27	1.35		$\sqrt{2} \approx 1.414$

$$E_d = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{2}E_{2\Phi} \cos \omega t d\omega t = \frac{m}{2\pi} \sqrt{2} \left[\sin\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{m} + \alpha\right) \right]$$

Cos полусуммы на Sin полуразности.

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{2} 2 \cos \alpha = E_{d0} \cos \alpha$$

Что такое E_{d0} – это U_d при $\alpha = 0$ или E_{d0} - выпрямленное ЭДС в случае неуправляемых диодов.

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} E_{2\Phi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (1)$$

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (2)$$

Еще не закончили интегрировать, но отметим важный момент

При ∞ : если количество горбиков возрастает, то в пределе подойдёт к $\sqrt{2}$. Формула верна в предположении, что ток всегда протекает.

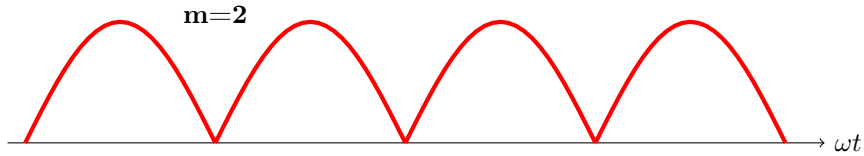


Рис. 9: m=2, E = 0.9

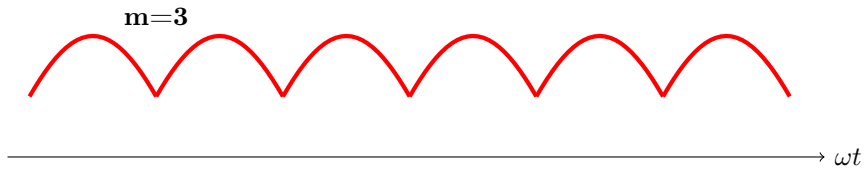


Рис. 10: m=3, E = 0.866

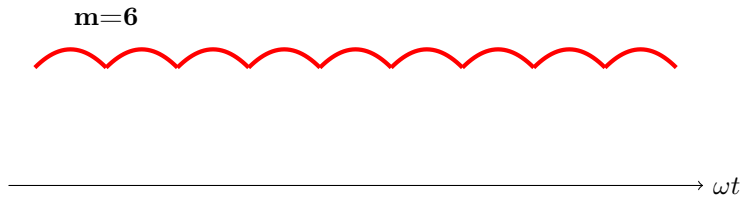


Рис. 11: m=6, E =

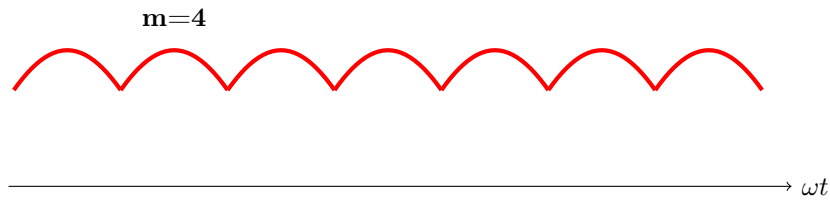


Рис. 12: m=4, $E = \frac{\sqrt{2}}{2}$

Вернулись к однополупериодной схеме

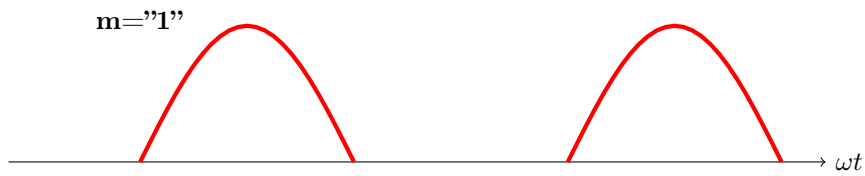


Рис. 13: m="1", E = 0.45

Что осталось? Досчитать ΔU_d

$$\Delta U_d = \frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} L_\phi \frac{di_\phi}{dt} d\omega t + \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} (i_\phi r_\phi + i_\phi R_d + U_0 + I_d R_\Phi) d\omega t \right\} =$$

$$U_\phi = e_\phi - L_\phi \frac{\partial i_\phi}{\partial t} - i_R i_\phi$$

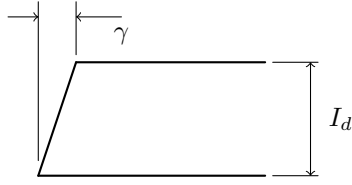
1-й интеграл. смотрим на график i

$$\int_{\frac{\pi}{m} + \alpha \rightarrow \text{в момент включения самой фазы } i}^{\frac{\pi}{m} + \alpha \rightarrow \text{в момент включения следующей фазы}} \omega L_\phi \frac{di_\phi}{d(\omega t)} d\omega t$$

$$\frac{m}{2\pi} \left\{ \underbrace{L_\phi i_\phi \Big|_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}}_{i_\pi = I_d \text{ когда фаза начала включатся}} - \underbrace{L_\phi i_\phi \Big|_{\frac{\pi}{m} + \alpha}}_{= 0 \text{ когда фаза включилась}} \right\}$$

Делаем допущение: i_ϕ – меньше чем площадь прямоугольника (приближённо на всём промежутка равно I_d)

$$\begin{aligned} & \int i_\phi (r_\phi + R_D) d\omega t + \frac{m}{2\pi} (U_0 + I_d R_\Phi) \int d\omega t = \\ & = \frac{m}{2\pi} I_d X_\Phi + \underbrace{\int i_\phi (r_\phi + R_D) d\omega t}_{\text{это возьмём приближённо}} + (U_0 + I_d R_\Phi) = \end{aligned}$$



$$\frac{m}{2\pi}$$

Площадь трапеции равна $I_d \left(2\pi m - \frac{\gamma}{2} \right)$

$$= \frac{m}{2\pi} I_d \left(\frac{2\pi}{m} - \frac{\gamma}{2} \right) (r_\phi + R_D)$$

$$\Delta U_d = \frac{m}{2\pi} I_d X_\Phi + U_0 + I_d R_\Phi + (r_\phi + R_D) \left(1 - \frac{\gamma m}{4\pi} \right) I_d$$

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_d$$

$$U_d = E_d - U_0 - \frac{m}{2\pi} X_\Phi I_d - I_d \left\{ R_\Phi + (r_\phi + R_D) \left(1 - \frac{\gamma m}{4\pi} \right) \right\} \quad (3)$$

Осталось определить, как γ зависит от тока.