

Учебное пособие для инженера-электрика

Тема: Генераторы индукционного нагрева

Курс 1. Основы теории параллельного инвертора тока

Курс рассчитан на инженера электрика с высшим образованием и предназначен для повторения некоторых основ силовой электроники, а также для получения специальных знаний по генераторам индукционного нагрева.

1. Основные понятия

Основные понятия здесь приводятся, чтобы освежить курс математики в части операций с интегралами на примерах вывода среднего и действующего значений переменного тока.

Среднее значение произвольного сигнала $x(t)$ за интервал времени T вычисляется по формуле:

$$X = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Для примера запишем эту формулу применительно к синусоидальному току:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin(\omega t) dt$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{1}{T}$$

где I – среднее значение тока в амперах (A);

I_m – амплитуда тока в амперах (A);

ω – угловая частота в радианах в секунду (rad/s);

f – частота в герцах (Hz);

T – период в секундах (s);

В формуле выше можно сделать замену переменных:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m \sin(x) dx,$$

где $x = \omega t$ – это угол, который можно выражать в радианах или электрических градусах. Для вычисления данного интеграла можно использовать из курса математики формулу вычисления определенного интеграла:

$$\int_a^b \sin(x) dx = \cos(a) - \cos(b),$$

на основании этой формулы получим:

$$I = \frac{1}{2\pi} I_m [\cos(0) - \cos(2\pi)] = 0$$

Как и следовало ожидать, среднее значение синусоидального тока за период равно нулю. Однако, если синусоида выпрямленная, частота тока станет удвоенной, и среднее значение уже не равно нулю:

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin(x) dx$$

$$I = \frac{1}{\pi} I_m [\cos(0) - \cos(\pi)]$$

$$I = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m$$

Если воспользоваться свойствами симметрии синусоиды и брать интеграл за четверть периода, получим то же самое среднее значение:

$$I = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} I_m \sin(x) dx$$

$$I = \frac{2}{\pi} I_m \left[\cos(0) - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$I = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m$$

Рассмотрим действующее значение тока, его также часто называют эффективным значением. Чтобы подчеркнуть физический смысл величины, иногда используют сокращение: эфф. (или eff). Допустим, в цепь тока включим последовательно достаточно маленькое активное сопротивление r , которое не повлияет на величину тока. В этом сопротивлении будет выделяться мощность, которая будет пропорциональна квадрату эффективного (действующего) значения тока $P = r \cdot I_{eff}^2$. Такая же мощность выделится в сопротивлении r , если в цепи протекает постоянный ток I_{eff} . Следовательно, эффективное значение тока можно найти через энергию, выделяемую в активном сопротивлении.

Вычислим эффективное значение синусоидального тока через энергию, выделяемую в сопротивлении r на четверти периода:

$$\frac{\pi}{2} r \cdot I_{eff}^2 = \int_0^{\pi/2} r \cdot (I_m \sin(x))^2 dx$$

сопротивление r можно сократить

$$\frac{\pi}{2} I_{eff}^2 = I_m^2 \int_0^{\pi/2} \sin(x)^2 dx$$

Из курса математики

$$\int_0^{\pi/2} \sin(x)^2 dx = \frac{\pi}{4},$$

следовательно

$$\frac{\pi}{2} I_{eff}^2 = I_m^2 \frac{\pi}{4}$$

$$I_{eff}^2 = I_m^2 \frac{1}{2}$$

$$I_{eff} = I_m \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m = 0.707 I_m$$

Такое же значение получим, если будем брать интеграл за полупериод π или за полный период 2π . Очевидно, эффективное значение не зависит от того, выпрямленный ток или не выпрямленный.

Из вышесказанного следует, что среднее за период значение выпрямленного синусоидального тока не равно эффективному значению. Найдём их отношение:

$$\frac{\frac{2}{\pi} I_m}{\frac{\sqrt{2}}{2} I_m} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} = 0.9003$$

Для решения задач из задачника, прилагаемого к данному учебнику, следует пользоваться стандартным приложением Mathcad (Маткад). Во-первых, Маткад – это очень мощное эффективное и простое в изучении средство вычислений и графического отображения переменных величин. Во-вторых, это приложение все равно потребует установить на компьютер, т.к. рассмотрение осциллограмм на сайте Интернет Диагностики ТПЧ выполняется с помощью программы Маткад. На данный момент используется версия Маткад 14, которая намного компактнее 15-ой версии. Также в Интернете можно скачать учебники Маткад.

2. Понятие о коммутации в параллельном инверторе

На Рис. 1 показана упрощенная схема инвертора. Мгновенные значения величин обозначаются строчными буквами курсивом. В обозначениях средних или эффективных значений ставятся жирные заглавные буквы без курсива, например: средний ток **I_d** , среднее напряжение противоэдс **E_d** , эффективное напряжение контура **U_e** . В диагонали моста находится колебательный контур, который заменен источником напряжения.

При анализе установившихся режимов чаще всего принимают допущения, которые можно назвать основными, или допущениями по умолчанию:

- напряжение контура синусоидальное $ue(x) = \sqrt{2} U_e \sin(x)$, где $x = \omega \cdot t$;
- тиристоры являются идеальными ключами;
- ток на входе инвертора идеально сглаженный $id = I_d$.

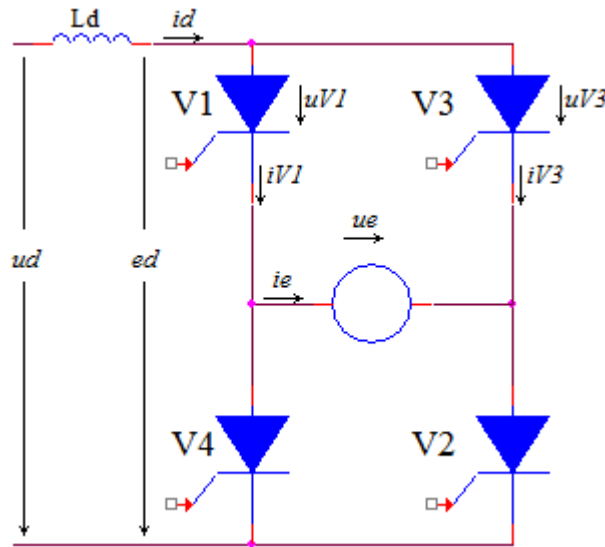


Рис. 1. Упрощенная схема инвертора

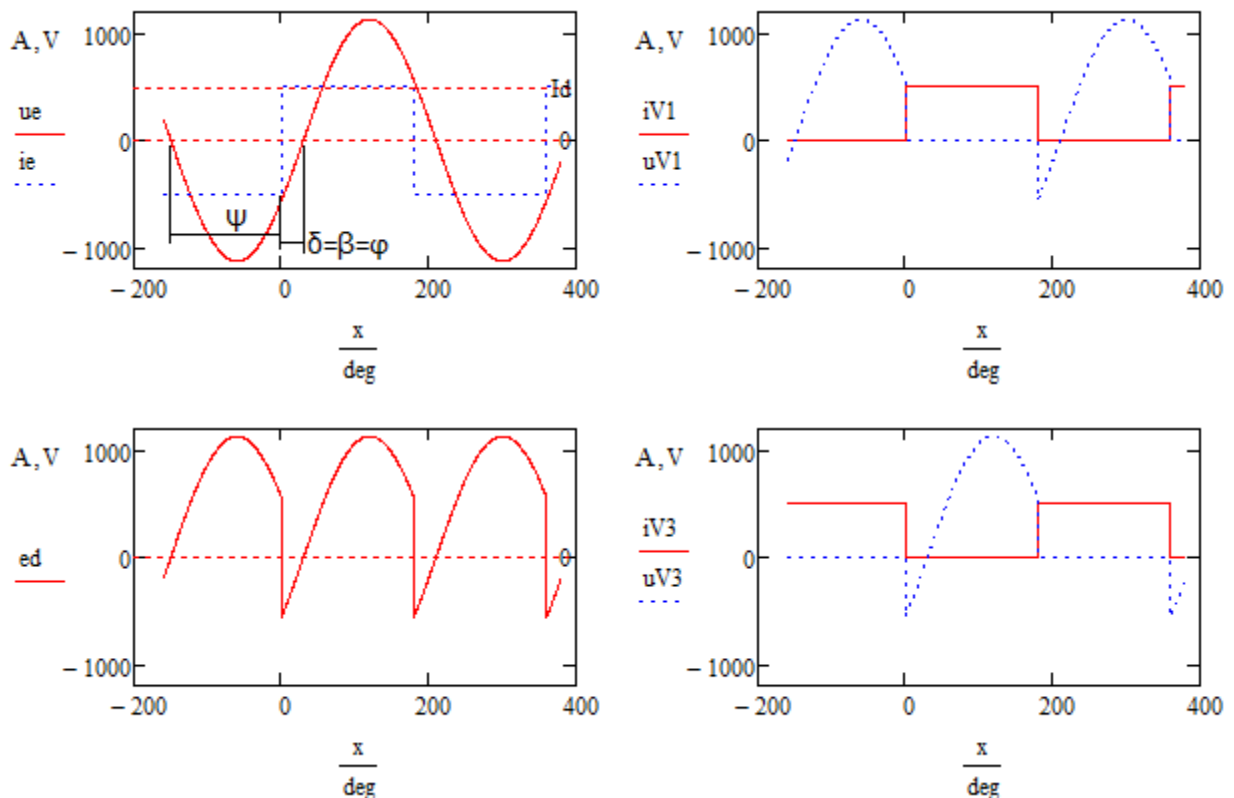


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений инвертора при мгновенной коммутации, $\gamma=0$, $\delta=\beta=\varphi$

Название «инвертор тока» произошло из принципа работы инвертора, в котором диагонали моста переключаются попеременно, в результате чего из постоянного тока id формируется переменный ток ie в диагонали моста:

$$ie = \begin{cases} id, & \text{проводят } V1, V2 \\ -id, & \text{проводят } V3, V4 \end{cases}$$

Вопрос в том, как происходит смена направления тока, т.е. коммутация? Этот вопрос является наиболее сложным для понимания не только для новичков, начинающих осваивать ТПЧ, но также и для сравнительно опытных электриков-эксплуатационников ТПЧ средней квалификации. Математическое описание электрических величин в процессе коммутации, а также расчет длительности интервала коммутации рассмотрен в разделах углубленного изучения инвертора. Здесь рассмотрим процесс коммутации, предполагая, что интервал коммутации сравнительно мал по сравнению с периодом. Такой случай условно называют мгновенной коммутацией. Математическое допущение о мгновенной коммутации упрощает многие формулы.

На Рис. 2 показаны напряжение ue и ток ie на выходе инвертора, ток ie опережает напряжение ue на угол δ (дельта). На оси абсцисс отмечены эл. градусы. В момент $x=0$ проводят тиристоры $V3, V4$, т.е. имеем начальное условие $ie=-id$, см. Рис. 2.

В момент $x=0$ поступили импульсы управления на тиристоры $V1, V2$. В это время тиристоры $V3, V4$ продолжают проводить, т.е. на короткое время все 4 тиристора включены. Этот интервал называют интервалом коммутации, или интервалом перекрытия. Второе название предпочтительнее для понимания физического смысла, т.к. подчеркивается, что все 4 тиристора включены.

На Рис. 1 стрелками отмечено принятое положительным направления тока ie и напряжения ue . Принятому направлению стрелок, слева направо, соответствует осциллограмма на Рис. 2. Стрелка показывает направление от плюса к минусу. Например, если на осциллограмме на Рис. 2 в какой-то момент напряжение ue положительное, то это означает, что в этот же момент слева от «кружочка» ue на Рис. 1 будет плюс, а справа – минус.

В момент $x=0$ на Рис. 2 видим отрицательное напряжение ue , следовательно, на Рис. 1 слева, на катоде $V1$ будет минус, а справа, на катоде $V3$ будет плюс. На интервале перекрытия, когда все 4 тиристора замкнуты, получилось два короткозамкнутых контура. При обходе от плюса к минусу получим первый контур $V3_V1_ue$, второй контур $V2_V4_ue$.

В короткозамкнутых контурах можно выделить понятие т.н. контурного тока, который возбуждается источником напряжения ue и течет от плюса источника к его минусу. Скорость роста контурного тока ограничивается внутриконтурной индуктивностью, называемой индуктивностью коммутации (см. на Рис. 3 индуктивность Lk). Ток в тиристоре $V1$ совпадает по направлению с контурным током. Следовательно, ток $V1$ будет увеличиваться, т.к. прибавляется величина контурного тока. Ток в тиристоре $V3$ противоположен по направлению с контурным током. Следовательно, ток $V3$ будет уменьшаться – вычитается величина контурного тока. Процесс закончится, когда ток $V3$ уменьшится до нуля и короткозамкнутый контур разорвется, т.к. тиристор $V3$ выключится (перестанет быть проводником тока).

Пока ток $V3$ уменьшается к нулю, в это же время ток $V1$ растет с той же скоростью. Следовательно, когда ток $V3$ изменился от id до нуля, в это время ток $V1$ вырос от нуля до id – это и есть конец коммутации.

Аналогично для второго контура: для $V2$ направление тока совпадает с направлением контурного тока, а для $V4$ – направление встречное. Следовательно, ток в тиристоре $V4$ исчезнет (был id , станет 0), а в тиристоре $V2$, наоборот, ток появится (был 0, станет id).

Оба контурных тока равны друг другу, т.к. условия их возбуждения совершенно одинаковые. В диагонали суммируются оба контурных тока, поэтому приращение тока ie будет удвоенным $2*id$, изменение от $-id$ к $+id$. Т.е. ток диагонали поменяет направление. Тиристоры $V1, V2$ останутся замкнутыми ключами, а тиристоры $V3, V4$ превратятся в разомкнутые ключи, что называется переключением проводящей диагонали.

Поскольку к индуктивности коммутации Lk прикладывается только одно напряжение ue , то скорость изменения тока диагонали подчиняется простой формуле:

$$Lk \frac{die}{dt} = -ue$$

Скорость изменения тока в тиристорах вдвое медленнее. Если индуктивность L_k стремится к нулю (индуктивности L_k нет на Рис. 1), то скорость изменения тока стремится к бесконечности, что приведет к мгновенной коммутации.

Из вышесказанного делаем вывод: источник u_e в короткозамкнутом контуре возбуждает контурный ток от плюса источника к его минусу, что вызывает смену проводящих диагоналей моста. По схеме видно, что контурный ток совпадает по направлению с одной парой тиристорov (включаемая диагональ) и противоположен другой паре тиристорov (выключаемая диагональ), это принуждает выключаемую диагональ прекратить проводящее состояние, а включаемую диагональ – оставить проводящее состояние.

Когда в тиристоре прекратилось проводящее состояние (ток спал к нулю), это не значит, что тиристор окончательно потерял способность проводить ток и стал разомкнутым ключом. В тиристоре еще остались заряженные частицы, способные проводить ток. Чтобы тиристор окончательно превратился в разомкнутый ключ, нужно некоторое время для «рассасывания» остаточного заряда. В это время надо держать на тиристоре отрицательное напряжение, иначе при появлении положительного напряжения ток снова стал бы нарастать. В принципе допускается вместо отрицательного приложить нулевое напряжение, но тогда время «рассасывания» потребует значительно больше. В каталожных данных считается, что отрицательное напряжение должно быть не менее 50В. Минимальное время приложенного обратного напряжения называется временем выключения тиристора, после которого тиристор становится по-настоящему разомкнутым ключом, что называется восстановлением запирающих свойств. После восстановления тиристор можно включить только импульсом управления. Если же время приложенного обратного напряжения недостаточное, то в тиристоре вернется проводящее состояние при появлении положительного напряжения, что называется самовключением тиристора.

Токи и напряжения в тиристорах (при мгновенной коммутации) показаны на Рис. 2. Там же показан интервал δ , который наступает сразу после окончания коммутации. На этом интервале к выключившимся тиристорам (V_3 , V_4) приложено отрицательное напряжение u_e . Напряжение u_e прикладывается к выключенному тиристору через проводящий тиристор, см. Рис. 1. Как уже сказано выше, отрицательное напряжение необходимо для восстановления запирающих свойств тиристорov. Момент подачи управляющих импульсов выбирается так, чтобы хватило время на интервал перекрытия (коммутации) и на восстановление запирающих свойств тиристора. Двигая момент подачи импульсов, можно отрегулировать время, предоставляемое для восстановления (чаще говорят – для выключения) тиристора, равным каталожному (паспортному) времени выключения плюс некоторый запас (на ошибку управления и другие случайности).

Ток диагонали i_e должен всегда опережать напряжение u_e по фазе (Рис. 2) – только тогда предоставляется отрицательное напряжение для выключения тиристора. В идеале фаза опережения невелика, тогда ток и напряжение почти совпадут по фазе, т.е. косинус инвертора приблизится к единице и к максимальным энергетическим показателям.

Классическая схема генератора индукционного нагрева на основе параллельного инвертора приведена на Рис. 3. Между трехфазным выпрямителем и инвертором располагается сглаживающий дроссель L_d . При средних частотах порядка 1kHz ток i_e в диагонали почти прямоугольный (как на Рис. 2), при высокой частоте – трапецеидальный. Скорость переключения тока i_e из одной полярности в другую ограничивается индуктивностью коммутации L_k . В диагонали моста располагается колебательный контур $C_e L_e R_e$. Реактивная мощность потребителя электрической энергии $L_e R_e$ скомпенсирована параллельной конденсаторной батареей C_e , откуда и произошло название «параллельный инвертор».

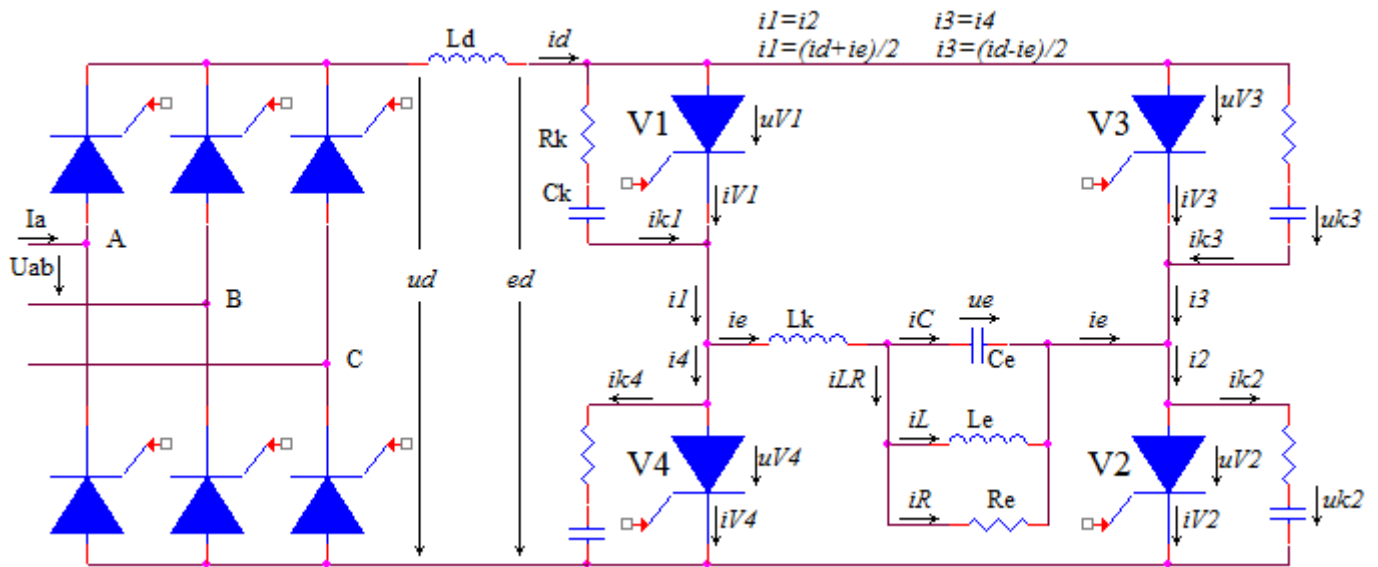


Рис. 3. Классическая схема параллельного инвертора тока

3. Определения угловых параметров параллельного инвертора

В схеме должно предоставляться тиристоры отрицательное напряжение на некоторое время для восстановления его запирающих свойств. Это время называется схемным временем выключения или предоставляемым временем выключения, обозначается $tq1$. Предоставляемое время выключения $tq1$ больше или равно паспортному времени выключения тиристоров tq . Разница $tq1 - tq$ – это запас регулировки схемы инвертора. Передвигая по фазе импульсы управления, можно увеличивать или уменьшать запас, изменяя тем самым режим работы инвертора. Регулировка инвертора исчерпывается, когда запас устанавливается нулевым: $tq1 = tq$. Угол, который соответствует интервалу времени $tq1$, называется углом выключения (Рис. 2):

$$\delta = \omega tq1$$

откуда можно сделать обратное преобразование

$$tq1 = \frac{\delta}{\omega}$$

$$\omega = 2\pi f,$$

где f – рабочая частота инвертора. Угол выключения δ включает в себя паспортное время tq и запас регулировки $tq1 - tq$.

Кроме угла выключения δ еще используется термин – угол управления инвертором β (бета). При мгновенной коммутации эти два угла равны $\beta = \delta$ (см. Рис. 2), что поясняется ниже. Система управления инвертора (СУИ) посылает на тиристоры отпирающие импульсы управления (ИУ). СУИ отсчитывает от начала синусоиды некоторый угол Ψ (см. Рис. 2), где наступает момент формирования ИУ, остаток полупериода называется углом управления:

$$\beta = \pi - \Psi$$

СУИ может влиять только на угол Ψ (пси), но в конечном итоге влияет на угол β . Например, СУИ формирует угол $\Psi = 150^\circ$, в результате получается угол $\beta = 180^\circ - \Psi = 30^\circ$. Несмотря на то, что управляющим воздействием является угол Ψ , углом управления принято называть угол β , т.к. он удобен для подстановки в математические формулы. Если коммутация не мгновенная, то $\beta > \delta$, т.к. после подачи ИУ сначала должен закончиться угол коммутации γ (гамма), потом появляется угол выключения δ . Таким образом, угол управления β включает в себя угол выключения δ и угол коммутации γ :

$$\beta = \delta + \gamma$$

а угол выключения – это результат, который будем наблюдать после подачи ИУ:

$$\delta = \beta - \gamma$$

Если СУИ уменьшает угол управления β , то одновременно уменьшается угол выключения δ , уменьшается предоставляемое время выключения $tq1$ и запас $tq1 - tq$. Если запас исчерпывается до нуля ($tq1 = tq$), то дальнейшее уменьшение β должно быть запрещено, иначе тиристоры не восстановятся, произойдет срыв коммутаций. На границе нулевого запаса ($tq1 = tq$) имеем граничный режим: $\beta = \beta_{min}$, $\delta = \delta_{min}$, $\Psi = \Psi_{max}$.

Ток диагонали переходит через ноль приблизительно в середине угла коммутации, поэтому первая гармоника тока сдвинута относительно напряжения на угол φ (фи), который приблизительно вычисляется по формуле:

$$\varphi = \delta + \frac{\gamma}{2}$$

или

$$\varphi = \beta - \frac{\gamma}{2}$$

т.е. угол φ находится примерно посередине между двумя углами β и δ . Для анализа токов в ветвях контура часто используют метод первой гармоники. В этом случае трапецеидальный ток на выходе инвертора заменяют первой гармоникой, сдвинутой относительно напряжения на угол φ . Если коммутация мгновенная, то три угла равны между собой (Рис. 2):

$$\varphi = \beta = \delta$$

4. Мощность инвертора

Мощность на выходе инвертора вычисляется как интеграл от произведения тока на напряжение:

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_e(x) u_e(x) dx$$

При мгновенной коммутации $\varphi = \beta = \delta$, тогда

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_d \sqrt{2} U_e \sin(x - \varphi) dx$$

$$P_e = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d U_e \cos(\varphi)$$

$$P_e = 0.9003 I_d U_e \cos(\varphi)$$

$$P_e = 0.9 I_d U_e \cos(\varphi)$$

Среднее значение противоэдс вычисляется по формуле:

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_e(x) dx$$

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_e \sin(x - \varphi) dx$$

$$E_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_e \cos(\varphi),$$

$$E_d = 0.9 U_e \cos(\varphi),$$

Подставляя E_d в формулу выше для мощности, выводим альтернативный вид формулы мощности:

$$P_e = I_d E_d$$

Из двух формул для мощности следует, что мощности на входе и выходе инвертора равны, что и должно быть по закону сохранения энергии.

Мощность в контуре пропорциональна квадрату напряжения, откуда следует главная формула параллельного инвертора, которая называется формулой баланса мощностей:

$$\frac{U_e^2}{R_e} = I_d E_d$$

Формулу баланса мощностей можно также назвать формулой «Золотого ключика», поскольку она открывает возможность рассчитать любые режимы параллельного инвертора во всех зонах регулирования.

5. Расчет выходного напряжения выпрямителя

Схема генератора с выпрямителем показана на Рис. 3, отдельно выпрямитель – на Рис. 4. Напряжение на выходе выпрямителя ud формируется из 6-ти линейных напряжений $uab, -uca, ubc, -uab, uca, -ubc$. Угол управления выпрямителем обозначается буквой α (альфа). При $\alpha=0^\circ$ тиристорный выпрямитель работает как диодный выпрямитель (Рис. 4).

Коммутация тиристоров выпрямителя считается мгновенной, если это не оговаривается особо. Тиристоры на Рис. 4 слева пронумерованы согласно последовательности их работы. Например, когда на выходе выпрямителя напряжение $ud=uab$, в это время работают тиристоры 6 и 1 – смотрите надписи uab и 61 на Рис. 4 справа. Далее тиристор 6 выключается, а тиристор 2 включается, на выходе напряжение $ud=-uca$, проводящая пара 12 и т.д. Проводимость каждого тиристора 120 градусов.

На Рис. 5 показана форма выходного напряжения ud для шести углов управления $\alpha=0; 15; 30; 60; 90; 120^\circ$. При угле $\alpha=90^\circ$ среднее напряжение ud равно нулю. А при угле $\alpha=120^\circ$ напряжение ud вообще отрицательное. Возможно ли отрицательное напряжение? Да, возможно, только недолгое время, до тех пор, пока ток id в дросселе сохраняет положительное направление. Такой режим называется инверторным режимом выпрямителя. Допустим, в исходном состоянии угол $\alpha=0$ и ток в id дросселе положительный, затем установили угол $\alpha=120^\circ$. С этого момента к дросселю приложилось отрицательное напряжение, и ток id начинает спадать. Если индуктивность дросселя большая, то спад тока id может продолжаться достаточно долго, например 10...20ms. Как только ток id спадет до нуля, последняя проводящая пара тиристоров закроется, и работа выпрямителя прекратится. Инверторный режим выпрямителя используется для защиты ТПЧ в аварийных режимах.

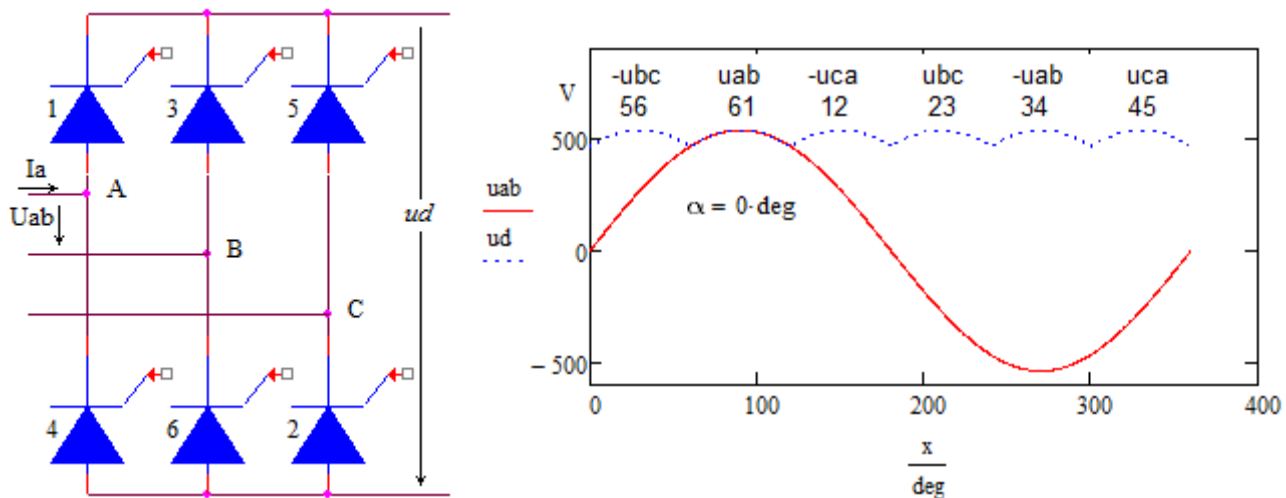


Рис. 4. Формирование выходного напряжения выпрямителя ud из линейных напряжений при угле управления $\alpha=0^\circ$

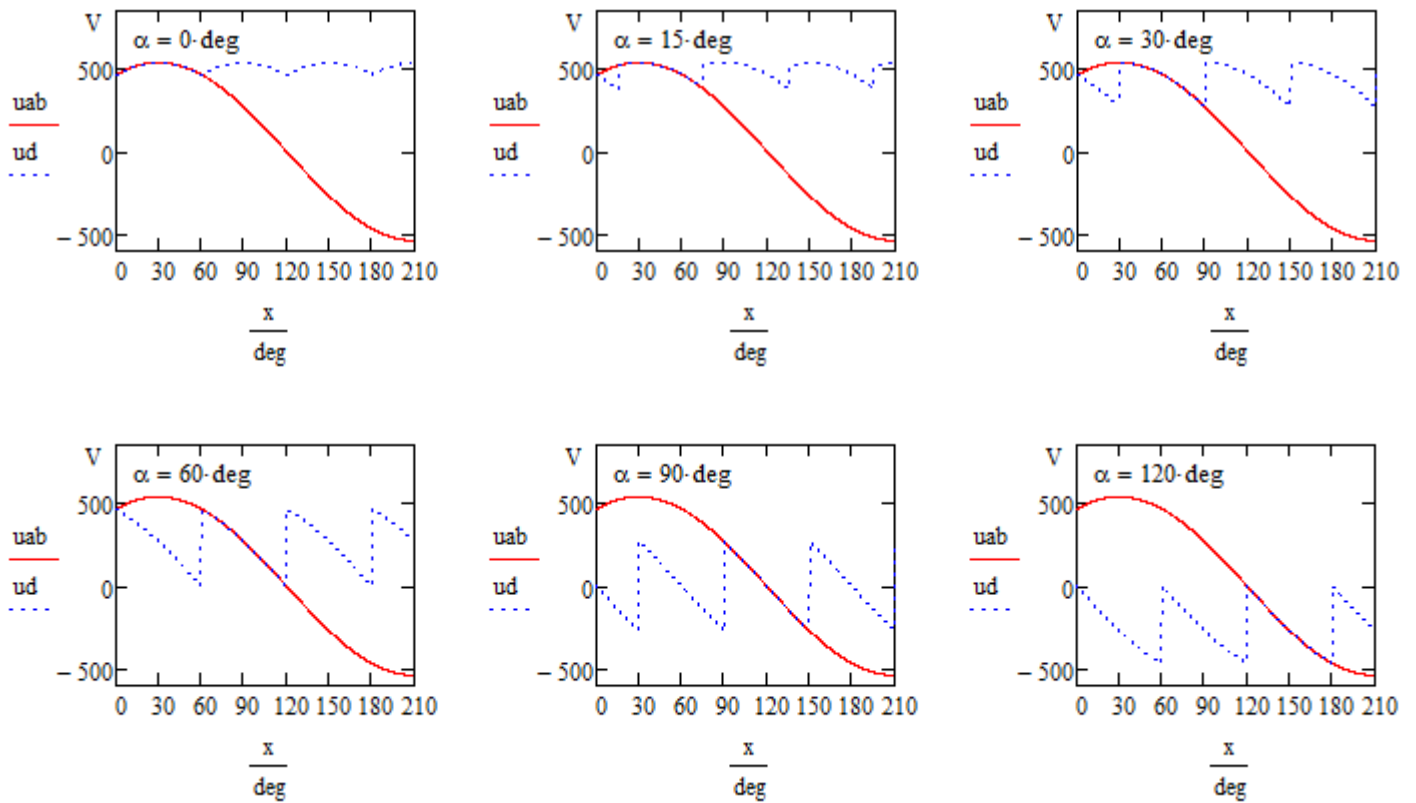


Рис. 5. Линейное напряжение u_{ab} и напряжение на выходе u_d выпрямителя при различных углах управления α

Из формы напряжения u_d на Рис. 5 легко сделать вывод, как можно вычислить среднее напряжение:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} u_{ab}(x) dx$$

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} \sqrt{2} U_{ab} \sin(x) dx$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{ab} \cos(\alpha)$$

$$U_d = 1.3505 U_{ab} \cos(\alpha)$$

$$U_d = 1.35 U_{ab} \cos(\alpha)$$

При допущении об отсутствии активных потерь в сглаживающем дросселе, средние значения напряжений выпрямителя и противоэдс инвертора равны:

$$U_d = E_d,$$

хотя форма мгновенных значений напряжений u_d и e_d совершенно разная. Частота пульсаций напряжения выпрямителя u_d равна 6-кратной частоте питающей сети – 300Hz. Частота пульсаций напряжения противоэдс e_d равна удвоенной частоте инвертора – см. Рис. 2.

6. Фазные и линейные токи и напряжения выпрямителя

Фазное напряжение u_a отстает от линейного u_{ab} на 30° (Рис. 6), его действующее значение можно определить через линейное напряжение:

$$U_a = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}}$$

Форма фазного тока ia ступенчатая, величина полки равна току id в дросселе. Фаза первой гармоники тока ia при угле управления $\alpha=0^\circ$ совпадает с фазным напряжением ua (Рис. 6). При не нулевом угле управления α сдвиг между первыми гармониками ia и ua равен углу α (Рис. 7, $\alpha=15^\circ$). На тот же угол α сдвинуты первые гармоники фазных токов ib, ic относительно фазных напряжений ub, uc (их нет на рисунках, т.к. изображение аналогично фазе A).

Импульсы управления на периоде 360° подаются на каждый тиристор дважды, первый импульс называется «основной», второй через 60° – «подтверждающий», что можно увидеть по повторению номеров тиристоров на Рис. 4. В принципе, подтверждающий импульс не обязателен, т.к. он поступает на уже включенный тиристор. Однако, если ток в дросселе прервется, то подтверждающий импульс поможет восстановить ток. Хотя на самом деле, режим прерывистого тока в классическом параллельном инверторе не используется, но подтверждающий импульс формируется для дополнительной надежности. Считается достаточной длительность импульса порядка $10...15^\circ$ ($550...800\mu s$). Осциллограммы импульсов управления на все 6 тиристоров здесь не показаны, т.к. этот материал относится к системе управления выпрямителем.

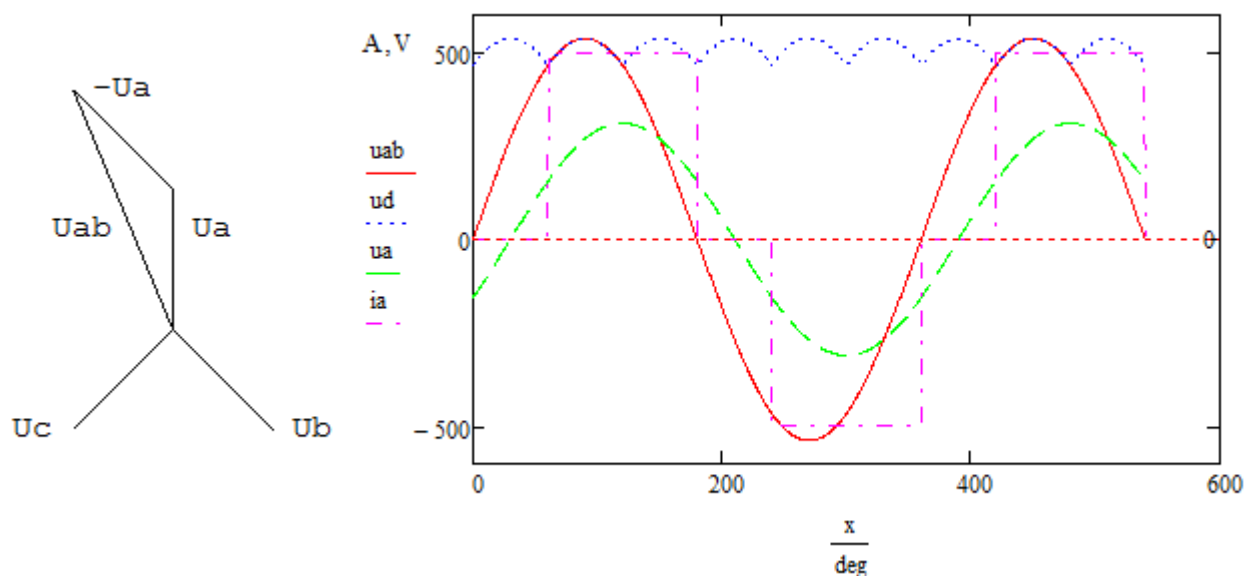


Рис. 6. Векторы фазных и линейных напряжений – слева, формы напряжений и фазного тока – справа при $\alpha=0^\circ$

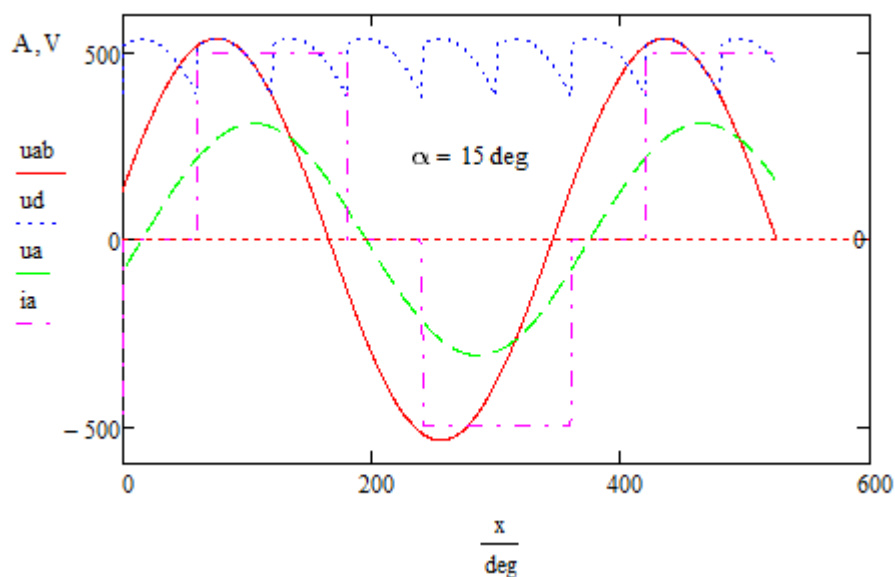


Рис. 7. формы напряжений и фазного тока при угле управления $\alpha=15^\circ$

Действующее значение I_a фазного тока можно вычислить через энергию потерь в условном сопротивлении r , значение которого не играет роли, т.к. сопротивление r сокращается:

$$I_a^2 r = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi ia(x)^2 r dx$$

$$I_a^2 r = \frac{1}{\pi} I_d^2 \frac{2\pi}{3} r$$

$$I_a = I_d \sqrt{2/3}$$

$$I_a = 0.816 I_d$$

7. Схема выпрямителя с нулевым вентилем и имитация нулевого вентиля

При угле $\alpha=90^\circ$ имеем среднее напряжение $U_d = 0$, однако пульсации ud достигают максимальной величины, см. Рис. 5. Для уменьшения пульсаций в некоторых случаях применяют схему выпрямителя с нулевым вентилем, который «отрезает» отрицательную часть выходного напряжения (сравните Рис. 5 и Рис. 8).

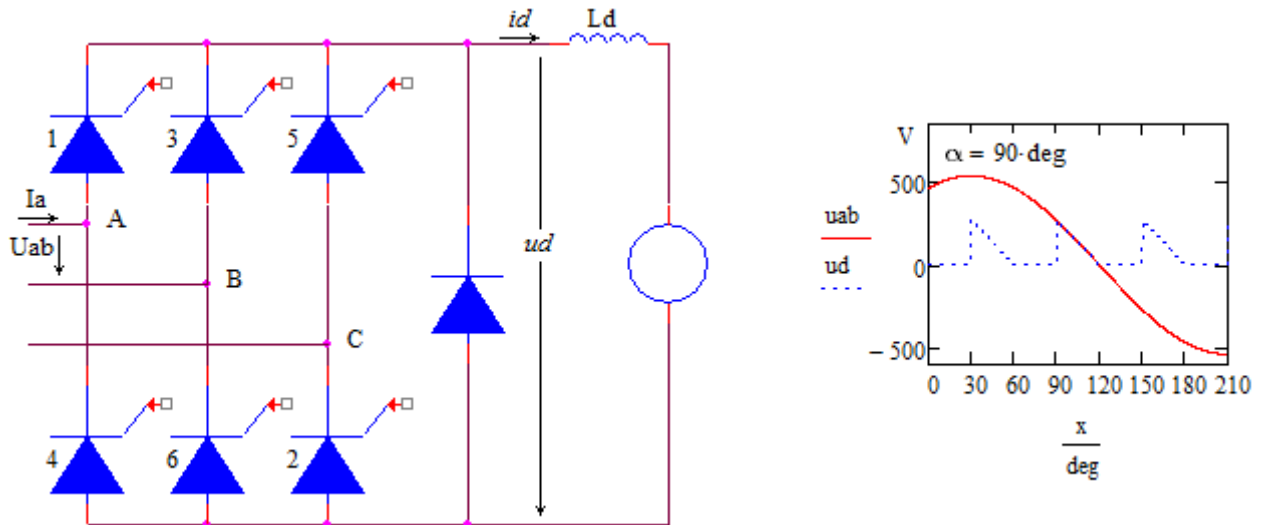


Рис. 8. Схема выпрямителя с нулевым вентилем

Вывод формулы для среднего значения U_d схемы с нулевым вентилем выполняем аналогично классической схеме, изменяем только верхний предел интегрирования $x = \pi$ (точка, после которой «обрезается» отрицательная часть):

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi} u_{ab}(x) dx$$

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_{ab} \sin(x) dx$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{ab} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right)$$

$$U_d = 1.35 U_{ab} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right)$$

Выведенная формула справедлива только при углах $\alpha \geq 60^\circ$. При углах $\alpha \leq 60^\circ$ действительна выведенная в п.5 формула при отсутствии нулевого вентиля:

$$U_d = \begin{cases} 1.35 U_{ab} \cos(\alpha), & \alpha < 60^\circ \\ 1.35 U_{ab} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right), & 60^\circ \leq \alpha < 120^\circ \end{cases}$$

Точка $\alpha=60^\circ$ является граничной, где начинает действовать нулевой вентиль – подрезается отрицательное напряжение. Можно убедиться, что в точке $\alpha=60^\circ$ верхнее и нижнее равенства равны друг другу. Первое равенство нельзя использовать при углах $\alpha > 60^\circ$, а второе равенство нельзя использовать при углах $\alpha < 60^\circ$. Иначе

результат вычислений будет неправильный, однако вполне правдоподобный, особенно в окрестности угла $\alpha=60^\circ$. Поэтому ошибку легко не заметить – надо внимательно контролировать значение угла α .

Начиная с 80-х годов прошлого века, схема выпрямителя с нулевым вентиляем при больших мощностях не используется, т.к. получил распространение способ управления выпрямителем, который называется «Имитация нулевого вентиля». Физически нулевой вентиль не ставится, однако на каждый тиристор, кроме двух штатных импульсов (основной и подтверждающий), подается дополнительный третий импульс управления, т.н. «импульс нулевого вентиля». В результате ток дросселя замыкается по контуру через анодный и катодный тиристоры одной той же фазы, например, ток i_d замыкается через контур фазы А: дроссель L_d – нагрузка – тиристор 4 – тиристор 1 (см. Рис. 8). Подробнее этот вопрос рассматривается при изучении системы управления выпрямителем. Здесь достаточно знать только тот факт, что «отрезается» отрицательная часть выходного напряжения u_d .

Имитация нулевого вентиля обладает таким свойством, что при уменьшении среднего значения U_d одновременно уменьшаются пульсации напряжения u_d . В пределе, когда среднее значение U_d приходит к нулю, пульсации u_d тоже приходят к нулю. Без имитации нулевого вентиля, как уже сказано выше, в точке $U_d = 0$ пульсации u_d максимальны ($\alpha=90^\circ$), что является серьезным недостатком. Поэтому для мощных регулируемых выпрямителей практически всегда используется имитация нулевого вентиля, хотя это несколько усложняет систему управления. Физический (реальный) нулевой вентиль практически не используется, т.к. он помешал бы инверторному режиму выпрямителя и защите в аварийных режимах.

В тех случаях, когда необходимо отличать угол управления классической схемы и угол управления при использовании имитации нулевого вентиля, для последнего вводится знак подчеркивания: α_* . Угол α_* можно вывести путем обратного преобразования из формулы выше:

$$\alpha_* = \begin{cases} \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}}\right), & \alpha_* < 60^\circ \\ \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}} - 1\right) - \frac{\pi}{3}, & 60^\circ \leq \alpha_* < 120^\circ \end{cases}$$

Вначале неизвестно, какая формула действительна, верхняя или нижняя. Можно сначала вычислить верхнюю формулу. Если получено значение $\alpha_* \leq 60^\circ$, то вычисление правильное. В противном случае нужно использовать нижнюю формулу.

Следует помнить, что нулевой вентиль работает только при углах $\alpha > 60^\circ$ – «подрезает» отрицательное напряжение. При углах $\alpha < 60^\circ$ нет отрицательного напряжения, нечего «подрезать», нулевой вентиль не задействован. Соответственно не задействованы формулы, характерные для нулевого вентиля, которые действуют только в диапазоне $\alpha \geq 60^\circ$.

По умолчанию считается, что выпрямитель управляется с имитацией нулевого вентиля, тогда, если это не оговаривается особо, знак подчеркивания в обозначении угла управления можно опустить: просто α .

8. Режимы регулирования

В состав системы управления ТПЧ входит подсистема, которая называется системой автоматического регулирования – САР. Задача САР состоит в том, чтобы двигать углы управления выпрямителем α и инвертором β так, чтобы поддерживать на заданном уровне, главным образом, выходное напряжение ТПЧ. Оператор за пультом устанавливает рукоятку задания выходного напряжения в произвольную точку в предусмотренном диапазоне, например от 20 до 100%. Повернув рукоятку задания, оператор ставит перед САР задачу, а САР должна найти решение, т.е. определить углы управления α и β . Решение не является однозначным, т.к. нагрузка ТПЧ является свободным параметром – индуктор может быть загружен наполовину, полностью или вообще быть пустым. Таким образом, имеются два независимых фактора: свобода выбора положения рукоятки задания и свобода загрузки индуктора. Первый фактор – выходное напряжение U_e , второй фактор – активное сопротивление контура Re . Для пары значений (U_e, Re) САР должна автоматически найти соответствующую пару значений (α, β) .

В одном случае САР ищет углы (α, β) , когда оператор крутит рукоятку задания от минимума до максимума при фиксированной нагрузке: $Re = \text{const}$, $U_e = \text{var}$. В другом случае САР ищет углы (α, β) , когда оператор зафиксировал рукоятку задания в одном положении, но нагрузка меняется в широком диапазоне $Re = \text{var}$, $U_e = \text{const}$.

Возможен случай, когда индуктор перегружен. Например, номинальный режим рассчитан на горячее состояние металла (длительный режим), а по факту металл оказался холодным (кратковременный режим). Чтобы не допустить ток больше номинального значения, должен действовать режим токоограничения $I_d = I_{dmax}$, при этом напряжение U_e не будет слушаться рукоятки задания на повышение. Таким образом, кроме основной задачи САР – поддержание заданного значения U_e , существует дополнительная задача САР: автоматически ограничить напряжение U_e , при котором выполняется условие ограничения тока $I_d = I_{dmax}$.

В режимах регулирования, где двигаются углы α и β , существуют три ограничения. По этим ограничениям определяют названия режимов регулирования: первый, второй, третий. Если действует ограничение $\alpha=0^\circ$, то независимо от каких-либо любых других условий или параметров, такой режим называется режимом 1 – это область работы с открытым выпрямителем. Вторая достаточно широкая область работы, когда инвертор работает на ограничении $\beta = \beta_{min}$. Как только наступает и начинает поддерживаться ограничение $\beta = \beta_{min}$, такой режим автоматически получает название режим 2, независимо от каких-либо любых других условий или параметров. Третье ограничение действует, когда ток удерживается на границе минимально допустимого значения $I_d = I_{dmin}$, чтобы не произошло прерывания тока. Как только наступает и начинает поддерживаться ограничение $I_d = I_{dmin}$, такой режим автоматически получает название режим 3. У него также имеется достаточно широкая область работы.

Примечание. Режим прерывистого тока для классического параллельного инвертора тока не допускается. Если бы ток прервался, то разрыв тока происходит во всей цепи, и в выпрямителе и в инверторе одновременно, что приводит ко многим негативным последствиям. Поэтому прерывание тока должно быть исключено с помощью специального «сверхбыстрого» канала регулирования.

Рассмотрим режимы регулирования подробнее.

Режим 1. Выпрямитель открыт $\alpha=0$, регулировка выходного напряжения ТПЧ осуществляется по углу управления инвертором β . Номинальное напряжение инвертора выбирается равным номинальному напряжению контура, на которое рассчитана конденсаторная батарея и индуктор. Поэтому регулировка напряжения инвертора выше номинального не требуется. При движении напряжения U_e сверху вниз, конец зоны наступает, когда угол инвертора дошел до ограничения $\beta = \beta_{min}$. При изменении нагрузки контура или при изменении питающей сети, стабилизация напряжения в режиме 1 на заданном значении $U_e = ZU$ осуществляется по углу β .

Режим 2. Угол инвертора на ограничении $\beta = \beta_{min}$, регулировка выходного напряжения ТПЧ осуществляется выпрямителем $\alpha > 0$. В режиме 2 стабилизация напряжения на заданном значении $U_e = ZU$ осуществляется по углу α . При движении напряжения U_e сверху вниз (угол α увеличивается), конец зоны наступает, когда среднее значение тока I_d в дросселе доходит до минимально допустимого значения на границе прерывистого режима $I_d = I_{dmin}$. При этом пульсации тока сопоставимы со средним значением тока, поэтому необходимо ограничение, чтобы ток не прервался.

Режим 3. Ток удерживается на границе прерывистого режима $I_d = I_{dmin}$ путем регулировки одновременно двух углов управления $\beta > \beta_{min}$, $\alpha > 0$. Угол β отвечает за удерживание тока на границе $I_d = I_{dmin}$, а по углу α осуществляется стабилизация напряжения на заданном значении $U_e = ZU$.

Табл. 1. Режимы 3-х зонной системы автоматического регулирования (САР)

Комментарий	Режимы 3-х зонной САР		
	Первый	Второй	Третий
Наименование режима			
Признак режима (условие существования)	$\alpha=0^\circ$	$\beta=\beta_{min}$	$I_d=I_{dmin}$
Вытекающие следствия	$\beta>\beta_{min}$, $I_d>I_{dmin}$	$\alpha>0^\circ$, $I_d>I_{dmin}$	$\alpha>0^\circ$, $\beta>\beta_{min}$
Функция канала α	<u>Быстрый канал:</u> Поддержание ограничения $\alpha=0^\circ$	<u>Медленный канал:</u> Поддержание заданного значения $U_e = ZU$; или верхнее ограничение по току $I_d=I_{dmax}$	<u>Медленный канал:</u> Поддержание заданного значения $U_e = ZU$
Функция канала β	<u>Медленный канал:</u> Поддержание	<u>Сверхбыстрый канал мгновенного действия,</u>	<u>Сверхбыстрый канал мгновенного действия,</u>

	заданного значения $U_e = ZU$; или верхнее ограничение по току $I_d = I_{dmax}$	<u>работает по прогнозу:</u> Поддержание ограничения $\beta = \beta_{min}$	<u>работает по прогнозу:</u> Поддержание ограничения $I_d = I_{dmin}$
Расчет углов управления α и β при условии поддержания напряжения на заданном уровне $U_e = ZU$	$U_d = 1.35 U_{ab}$ $\alpha = 0^\circ$ $\beta = \arccos\left(\frac{U_d}{0.9 U_e}\right)$	$U_d = 0.9 U_e \cos(\beta_{min})$ $\alpha = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}}\right)$ $\alpha_- = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}} - 1\right) - \frac{\pi}{3}$ $\beta = \beta_{min}$	$U_d = \frac{U_e^2}{Re I_{dmin}}$ $\alpha = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}}\right)$ $\alpha_- = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}} - 1\right) - \frac{\pi}{3}$ $\beta = \arccos\left(\frac{U_d}{0.9 U_e}\right)$

Система автоматического регулирования с тремя режимами называется 3-х зонной САР. В Табл.1 приводится строгое определение каждого режима (признак, условие существования), показаны вытекающие следствия, описаны функции каналов управления α и β , даны формулы для вычисления углов α и β при допущении о мгновенной коммутации.

Расчет всех режимов 1,2,3 основывается на одной и той же формуле баланса мощностей (формуле «Золотого ключика»), которая выведена выше. Чтобы показать, как используется эта формула в каждом конкретном случае, приведем решение конкретной задачи.

Допущения:

Напряжение контура синусоидальное, коммутация выпрямителя и инвертора мгновенная, $\gamma = 0$, $\delta = \beta = \varphi$;

Ток в дросселе идеально сглажен, $i_d = I_d$, нет активных потерь, $E_d = U_d$.

Исходные данные:

Паспортное время выключения $t_q = 63 \mu s$; минимальный угол выключения δ_{min} находить из расчета $f = 1 kHz$;

Линейное напряжение сети $U_{ab} = 380 V$;

Номинальный режим: $\alpha = 0$, $U_e = 800 V$, $I_d = 1000 A$;

Ограничение тока в режиме 3: $I_{dmin} = 100 A$.

Найти:

а) Нижнюю границу регулирования в режиме 1, искомые параметры U_{e1} , I_{d1} , P_1 ;

б) Нижнюю границу регулирования в режиме 2, искомые параметры U_{e2} , I_{d2} , P_2 , углы выпрямителя без имитации α_2 и с имитацией α_{2-} нулевого вентиля; расчеты повторить при номинальном и удвоенном сопротивлениях Re ;

в) Параметры в режиме 3: U_{d3} , P_3 , углы β_3 , α_3 , α_{3-} ; эти параметры надо найти также при двух значениях сопротивления Re (номинальном и удвоенном), в обоих случаях задать нижнюю границу регулирования $U_{e3} = U_{min}$; обычно нижняя граница регулирования принимается равной $U_{min} = 100 V$.

Решение.

Напряжение открытого выпрямителя при $\alpha = 0$:

$$U_d = 1.35 U_{ab} \cos(\alpha) = 513 V$$

Мощность P , активное сопротивление Re и угол управления инвертором β в номинальном режиме:

$$P = I_d U_d = 513 kW$$

$$Re = \frac{U_e^2}{P} = 1.25 \Omega$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{U_d}{0.9 U_e}\right) = 45^\circ$$

Минимальный угол β_{min} :

$$\beta_{min} = \delta_{min} = \omega t_q = 2\pi f t_q = 23^\circ$$

Граница регулирования в режиме 1:

$$U_{e1} = \frac{U_d}{0.9 \cos(\beta_{min})} = 618V$$

Исходя из формулы баланса мощностей:

$$P_1 = \frac{U_{e1}^2}{R_e} = 306kW$$

$$I_{d1} = \frac{P_1}{U_d} = 596A$$

Получили диапазон регулирования в режиме 1:

- при любом R_e имеем $\beta=45...23^\circ$, $\alpha=0$, $U_d=513V$, $U_e=800...618V$;

- при номинальном сопротивлении $R_e=1.25\Omega$ имеем $I_d=1000...596A$.

В режиме 1 ток I_d изменяется в большей степени, чем напряжение U_e , поскольку при изменении β ток I_d меняется пропорционально квадрату U_e^2 . Этот вывод нам понадобится в дальнейшем: регулировка β воздействует на ток I_d сильнее, чем на напряжение U_e .

Найдем в режиме 2 нижнюю границу регулирования опять же на основе формулы баланса мощностей:

$$\frac{U_{e2}^2}{R_e} = I_{dmin} U_{d2}$$

$$\frac{U_{e2}^2}{R_e} = I_{dmin} 0.9 U_{e2} \cos(\beta_{min})$$

Значения в скобках в правой части формул приводятся для двух значений сопротивления $R_e = (1.25\Omega; 2.5\Omega)$:

$$U_{e2} = R_e I_{dmin} 0.9 \cos(\beta_{min}) = (104V; 207V)$$

$$U_{d2} = 0.9 U_{e2} \cos(\beta_{min}) = (86V; 172V)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{U_{d2}}{1.35 U_{ab}}\right) = (80^\circ; 70^\circ)$$

При управлении с имитацией нулевого вентиля:

$$\alpha_{2-} = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}} - 1\right) - \frac{\pi}{3} = (86^\circ; 72^\circ)$$

Получили диапазон регулирования в режиме 2:

- при любом R_e имеем $\beta=\beta_{min}=23^\circ$;

- при $R_e=1.25\Omega$ имеем $U_e=618...104V$, $U_d=513...86V$, $I_d=596...100A$, $\alpha=0...80^\circ$, или $\alpha_-=0...86^\circ$.

- при $R_e=2.5\Omega$ имеем $U_e=618...207V$, $U_d=513...172V$, $I_d=298...100A$, $\alpha=0...70^\circ$, или $\alpha_-=0...72^\circ$.

В режиме 2 при регулировке по каналу α изменение тока I_d происходит в такой же степени, как изменение напряжения U_e , что принципиально отличается от регулировки по каналу β в режиме 1 (см. выше).

Найдем параметры U_{d3} , P_3 , β_3 , α_3 , α_{3-} в режиме 3 при заданном значении $U_{e3}=100V$ на основе все той же формулы баланса мощностей:

$$\frac{U_{e3}^2}{R_e} = I_{dmin} U_{d3}$$

$$U_{d3} = \frac{U_{e3}^2}{R_e I_{dmin}} = (80V; 40V)$$

$$P_3 = I_{dmin} U_{d3} = (8kW; 4kW)$$

$$\beta_3 = \arccos\left(\frac{U_{d3}}{0.9 U_{e3}}\right) = (27^\circ; 64^\circ)$$

$$\alpha_3 = \arccos\left(\frac{U_{d3}}{1.35 U_{ab}}\right) = (81^\circ; 86^\circ)$$

При управлении с имитацией нулевого вентиля:

$$\alpha_{3_} = \arccos\left(\frac{U_d}{1.35 U_{ab}} - 1\right) - \frac{\pi}{3} = (88^\circ; 97^\circ)$$

Как сказано выше, ток **Id** чувствительнее к изменению β , чем напряжение **Ue**. Именно поэтому удается по каналу β удерживать ток на границе **Id=Idmin** и одновременно по каналу α стабилизировать напряжение **Ue**.

Поясним стабилизацию на примере. Допустим, имели режим $R_e=1.25\Omega$, $U_d=80V$, $U_e=100V$, $I_d=100A$, $\beta=27^\circ$, $\alpha_{3_}=88^\circ$, затем увеличили сопротивление в 2 раза: $R_e=2.5\Omega$. Если углы оставить без изменения $\beta=27^\circ$, $\alpha_{3_}=88^\circ$, ток упадет в 2 раза: $I_d=50A$. Если поднять только угол инвертора $\beta = 27^\circ \rightarrow 64^\circ$, то поднимутся ток **Id** и напряжение **Ue**, но ток – в большей степени. Далее увеличим угол выпрямителя $\alpha_{3_} = 88^\circ \rightarrow 97^\circ$, тогда в одинаковой степени уменьшатся ток **Id** и напряжение **Ue**. Но теперь уже ток будет выше начального значения 50A, т.е. ток установится к 100A, а напряжение вернется к 100V.

Режим 3 значительно расширяет диапазон регулирования ТПЧ, т.к. позволяет стабилизировать достаточно низкое значение выходного напряжения (**Umin** = 100V) в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки R_e .

9. Зоны регулирования

С теми же исходными данными, указанными выше, на Рис. 9 построены в координатах (R_e ; **Ue**) три области (зоны) регулирования: четырехугольник « $\alpha=0$ », треугольник « $\beta = \beta_{min}$ », многоугольник «**Id=Idmin**». Вертикальная линия R_{e12} проходит через точку, где сходятся границы этих зон. Расположение границ:

- В зоне режима 1 имеем $\alpha = 0$, $\beta > \beta_{min}$, **Id** > **Idmin**, граница снизу $\beta = \beta_{min}$, граница справа **Id = Idmin**;
- В зоне режима 2 имеем $\alpha > 0$, $\beta = \beta_{min}$, **Id** > **Idmin**, граница сверху $\alpha = 0$, граница справа **Id = Idmin**;
- В зоне режима 3 имеем $\alpha > 0$, $\beta > \beta_{min}$, **Id = Idmin**, граница 1: $\alpha > 0$, $\beta = \beta_{min}$, граница 2: $\alpha = 0$, $\beta > \beta_{min}$.

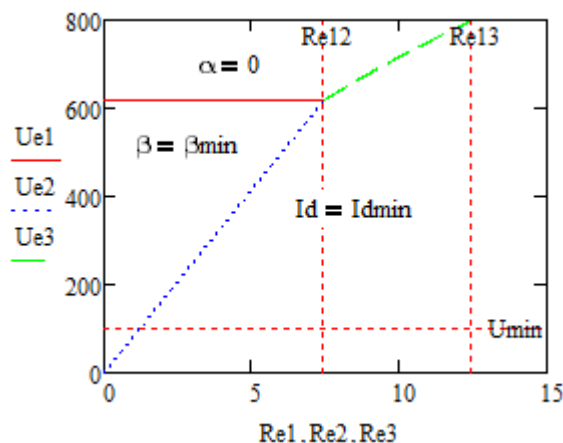


Рис. 9. Зоны регулирования: режим 1 ($\alpha=0$); режим 2 ($\beta=\beta_{min}$); режим 3 ($I_d=I_{dmin}$)

В точке R_{e12} , где соединяются все три зоны, имеем: $\alpha = 0$, $\beta = \beta_{min}$, $I_d = I_{dmin}$. Напряжение в этой точке:

$$U_{e1} = \frac{U_d}{0.9 \cos(\beta_{min})} = 618V,$$

далее искомое значение R_{e12} выводится всё из той же формулы баланса мощностей:

$$R_{e12} = \frac{U_{e1}^2}{I_{dmin} U_d} = 7.44\Omega$$

В точке R_{e13} , где напряжение в режиме 3 достигает номинального значения, имеем $U_e = 800V$, $\alpha = 0$, $U_d = 513V$, **Id= Idmin**, откуда, как всегда, из формулы баланса мощностей находим:

$$R_{e13} = \frac{U_e^2}{I_{dmin} U_d} = 12.5\Omega$$

В полном диапазоне регулирования $U_e=100\dots800V$ существуют следующие режимы (см. Рис. 9):

- в зоне $R_e > R_{e13}$ существует только один режим 3;
- в зоне $R_{e12} < R_e < R_{e13}$ существует два режима 1 и 3;
- в зоне $R_e < R_{e12}$ существует три режима 1, 2, 3.

Например, при номинальном сопротивлении $R_e=1.25\Omega$ при движении рукоятки задания, когда напряжение U_e двигается сверху вниз, мы проходим последовательно три зоны, которые уже вычислены выше: $U_e=800...618V$; $U_e=618...104V$; $U_e=104...100V$. При том же движении рукоятки задания сверху вниз, но при другом значении сопротивления, например, $R_e=10\Omega$, мы проходим только две зоны. Или вообще можем оставаться всегда в одной зоне режима 3, если, например, $R_e=15\Omega$.

В тех случаях, когда осуществляется стабилизация напряжения при зафиксированном положении рукоятки задания $U_e = ZU$, движение на Рис. 9 происходит вследствие изменения нагрузки по горизонтальной прямой $R_e=var$, при этом последовательно проходим две зоны: режимы 1 и 3, или режимы 2 и 3.