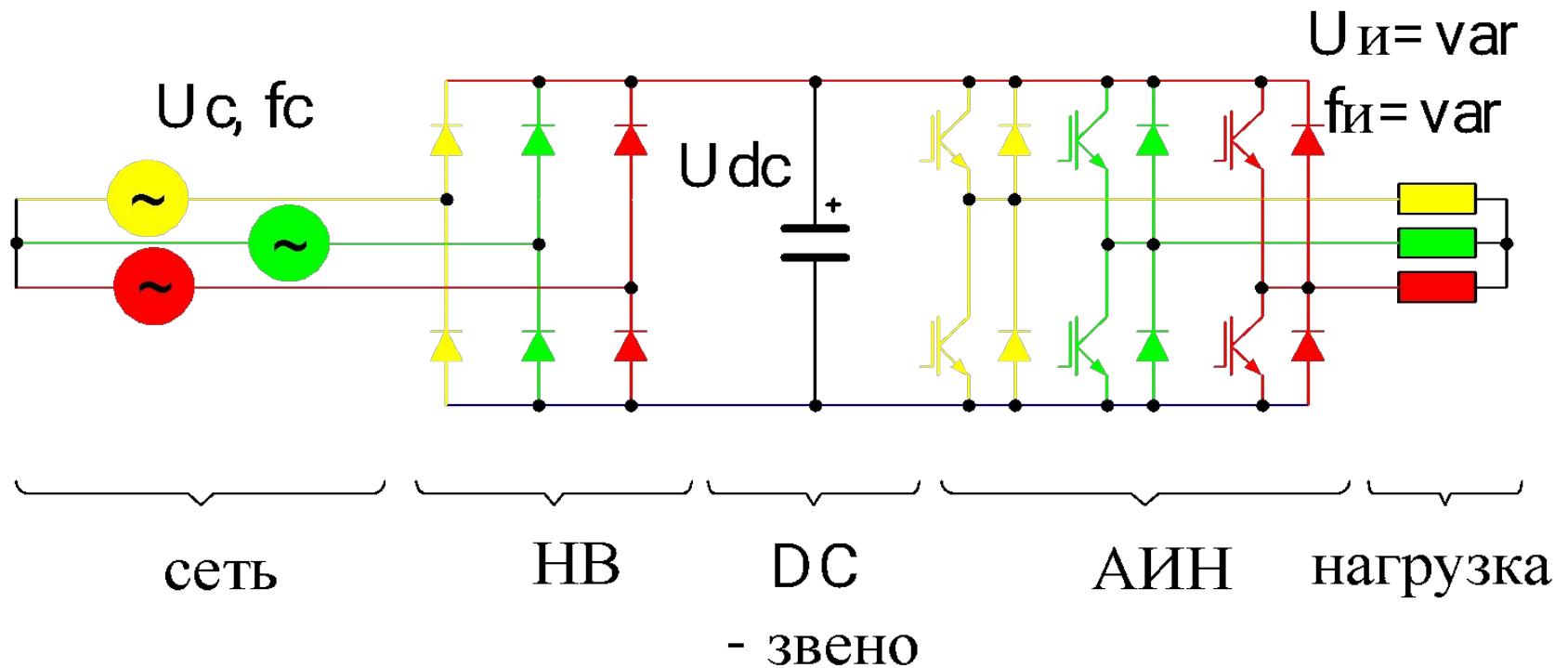


Преобразователи частоты

AFE – выпрямитель
(АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ)

Построение преобразователя частоты АИН с ШИМ



Активный выпрямитель выполняется на основе полностью управляемых ключей, как правило, IGBT – транзисторов, что позволяет реализовать следующие *преимущества*:

- **Регулируемая координата** (напряжение или ток) может быть реализована посредством ШИМ с небольшим составом гармоник;
- **COS (фи)** может быть регулируемым и даже опережающим;
- Выпрямитель может быть построен как **АИН** или **АИТ**;
- Активный выпрямитель позволяет использовать только *один мост* для получения двунаправленного режима работы.

Для *стабильного* функционирования AFE – выпрямителя в обязательном порядке необходимо *подключение входной индуктивности* (как в чистом виде, так и в сочетании с LC – фильтром).

Активный выпрямитель, наиболее широко применяемый на практике, выполняется как **АИН с ШИМ**, поэтому и будет рассмотрен более детально.

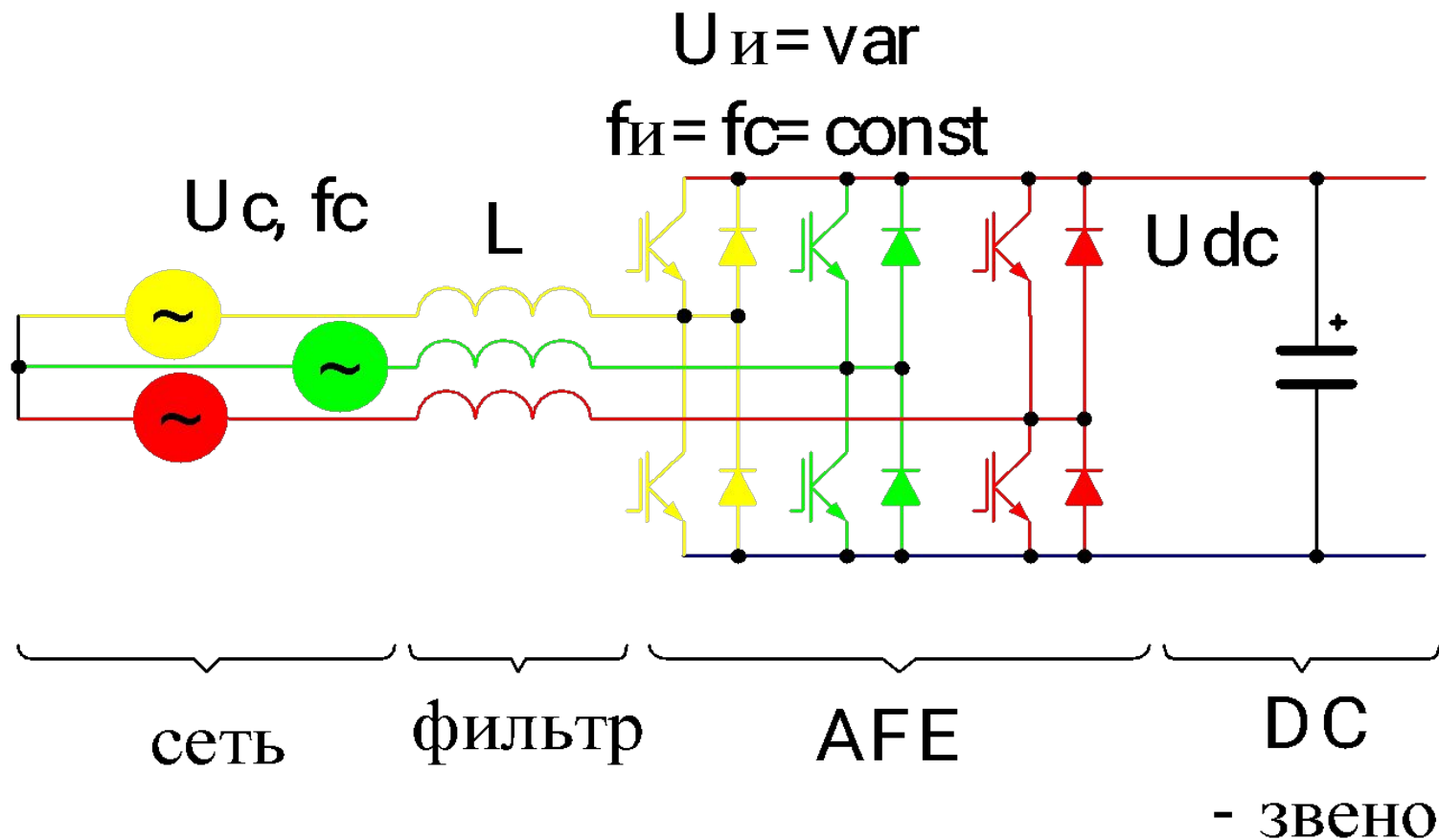


Схема включения AFE – выпрямителя как АИН с ШИМ



При помощи системы управления AFE могут решаться следующие **задачи**:

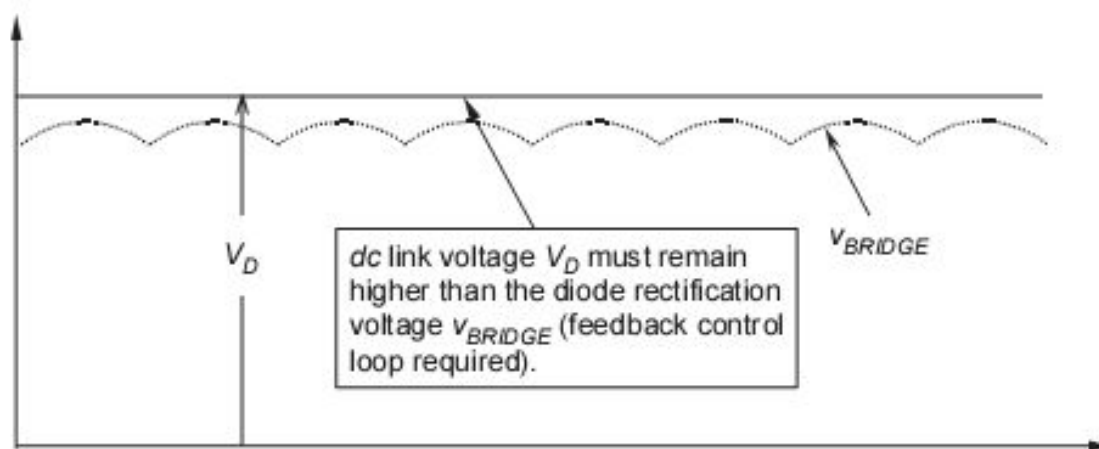
Стабилизация выпрямленного напряжения на заданном уровне путем воздействия на амплитуду заданных фазных токов сети;

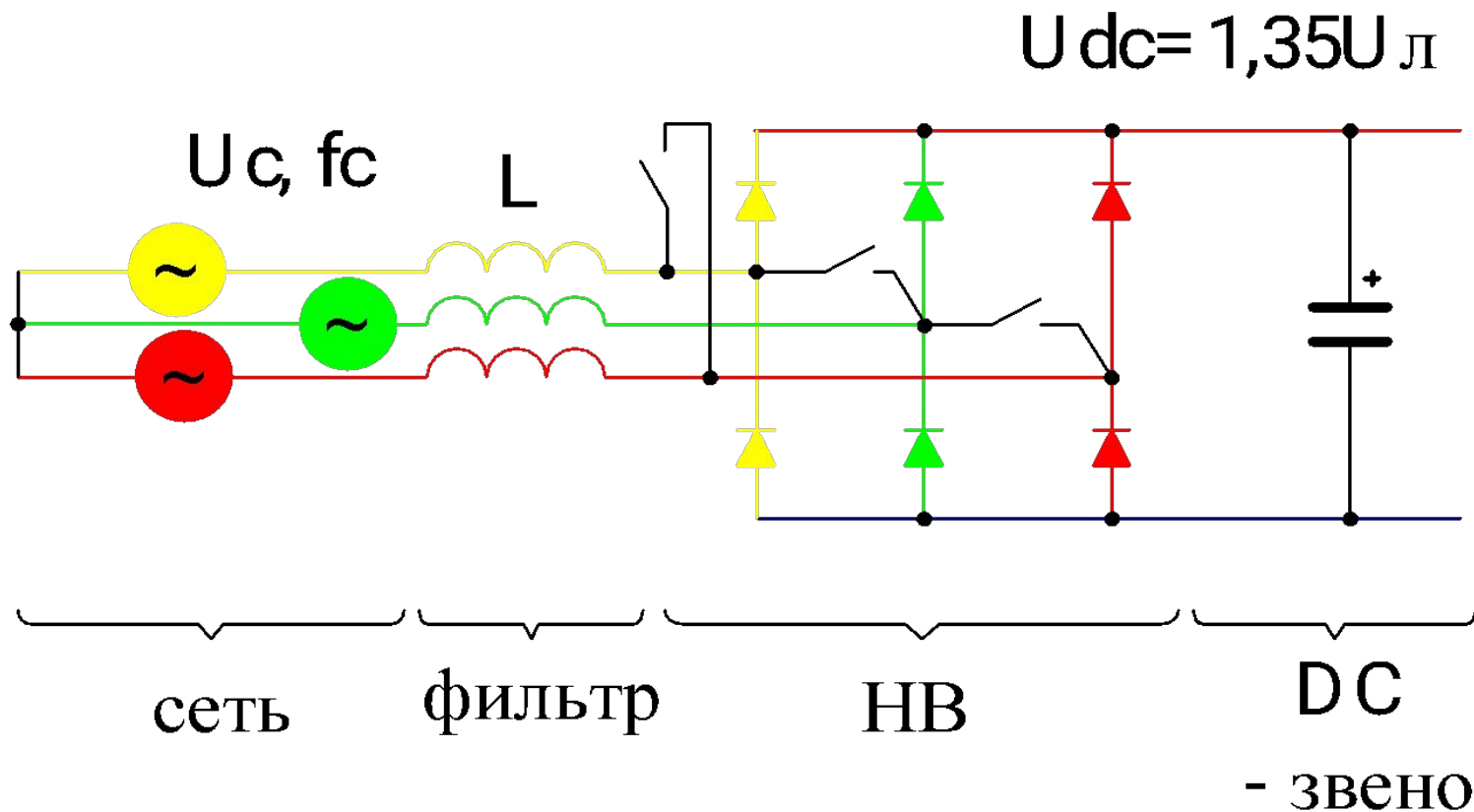
Формирование фазных **токов сети**, близких по форме к **синусоиде** путем воздействия на напряжение управления;

Поддержание **заданного коэффициента мощности** сети (индуктивного, емкостного или равного единице) путем воздействия на напряжение управления;

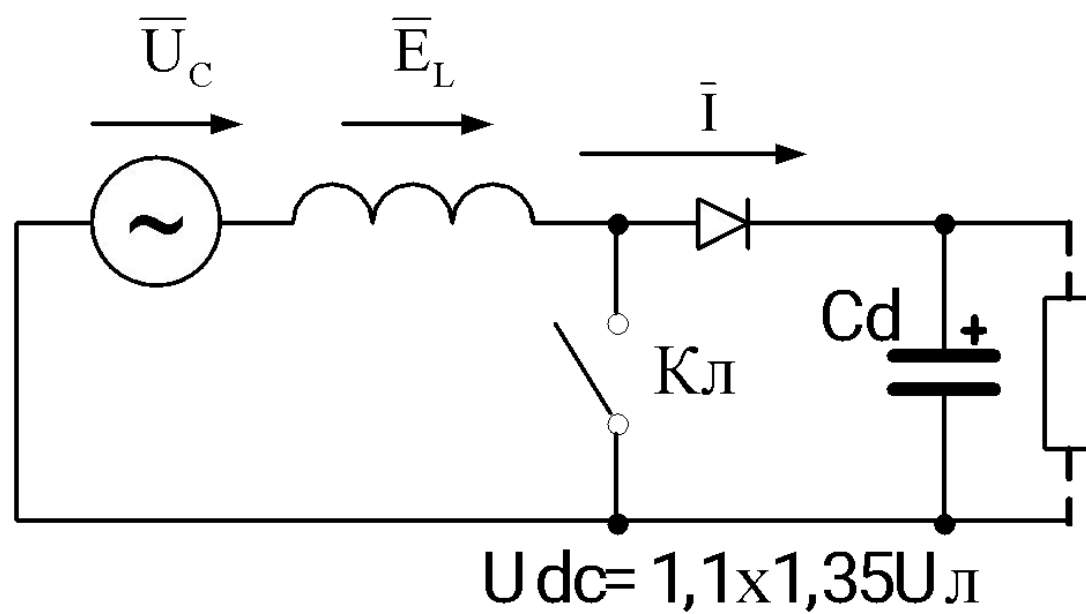
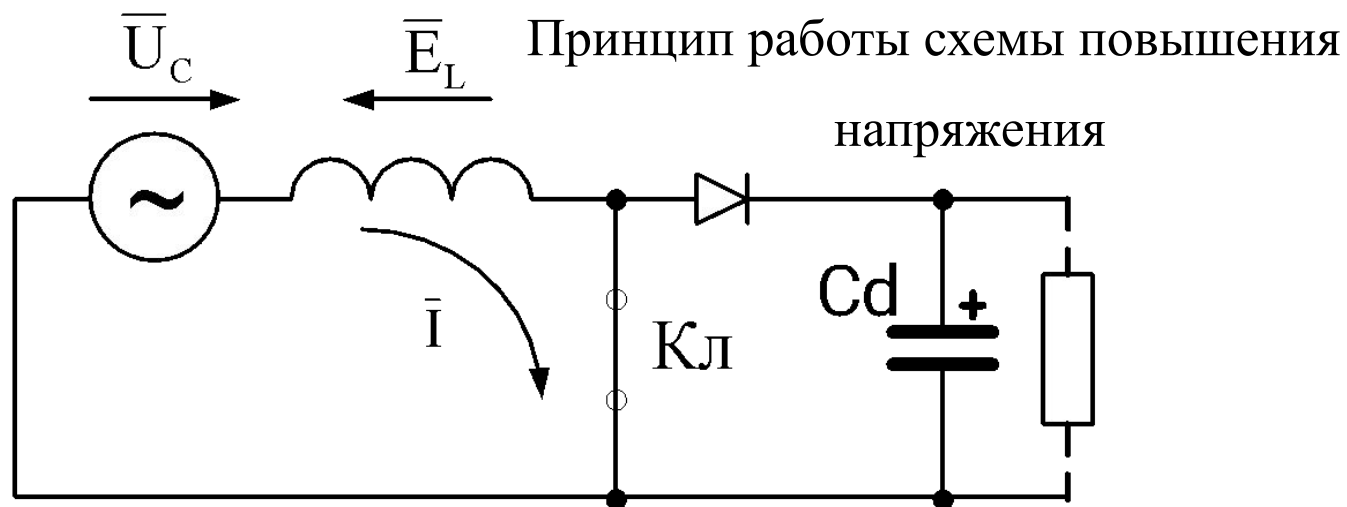
Передача **энергии** из сети переменного напряжения в цепь постоянного напряжения и в противоположном направлении.

Для *полного управления* работой преобразователя, *все шесть диодов* должны быть **закрыты** при любой величине напряжения питающей сети. В противном случае диоды будут проводить ток, и ШИМ преобразователь будет работать как обычный выпрямительный мост. Для надежного запираания диодов необходимо, чтобы напряжение в DC звене было **больше** амплитудного значения напряжения питающей сети (превышение напряжения на 10%). В этом случае диоды будут заперты и смогут проводить ток, только при работе транзисторов. Для обеспечения этого условия необходимо применение замкнутой системы регулирования (например, регулятор напряжения DC звена).

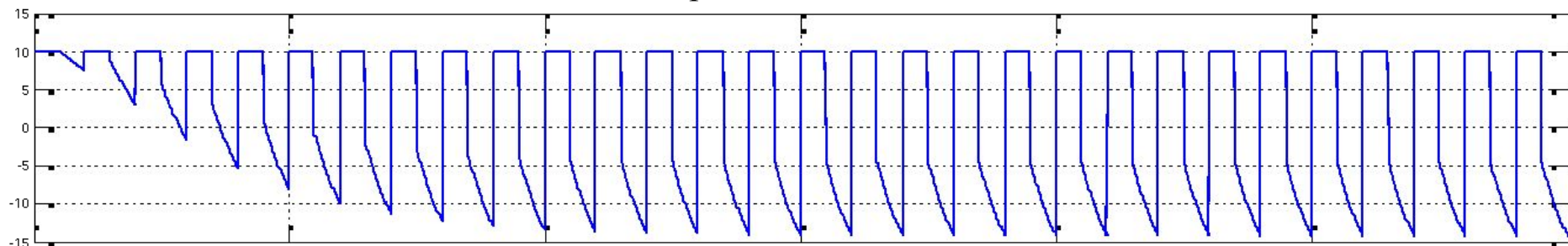




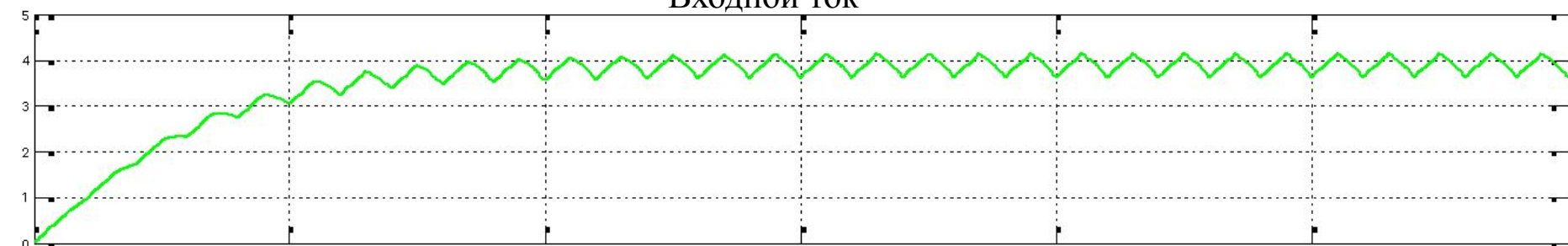
Для **повышения** напряжения в DC – звене, применяется повышающая схема выпрямления (т.н. «Boost converter»)



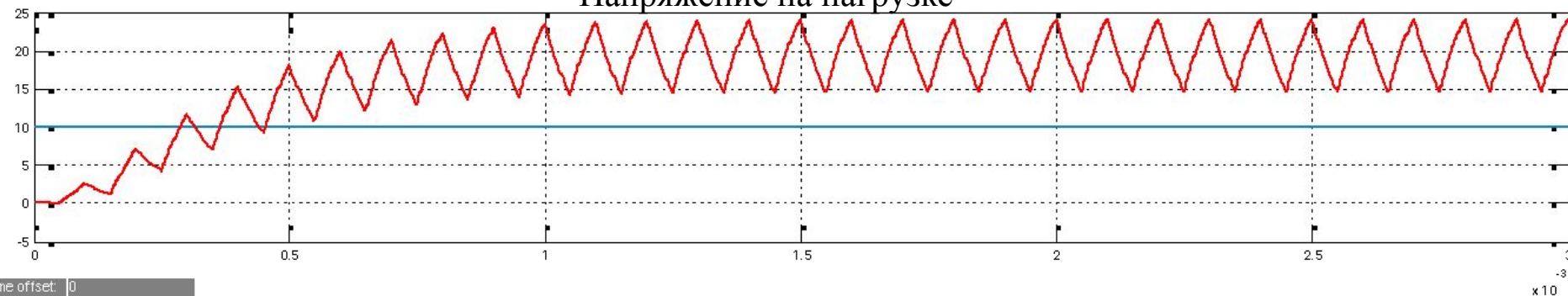
Напряжение на L



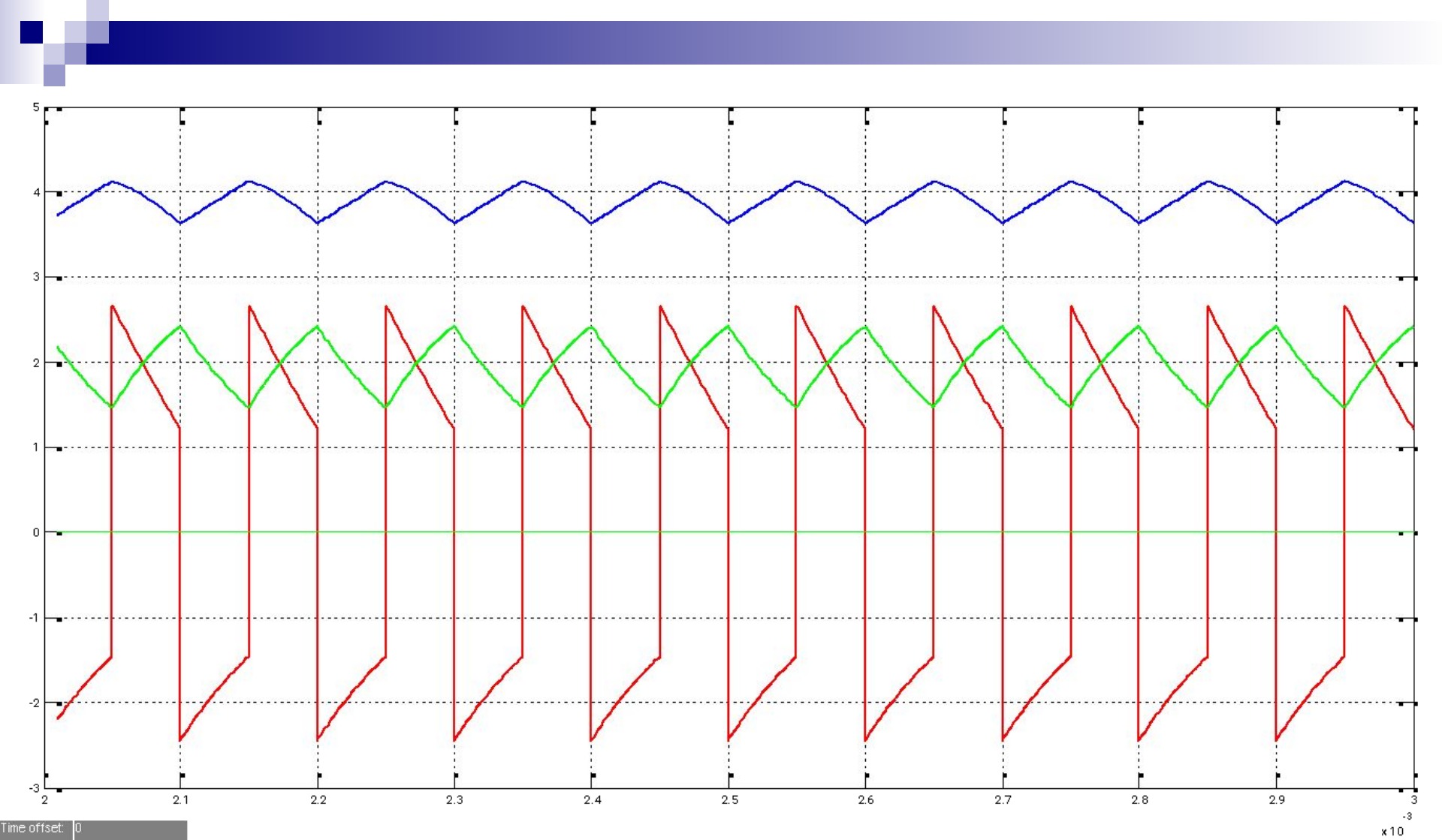
Входной ток



Напряжение на нагрузке



Результаты моделирования: $U_d = 10\text{В}$; $L = 1\text{мГн}$; $C = 10\text{ мкФ}$; $R = 10\text{ Ом}$, $f = 10\text{ кГц}$



Эпюры токов на входе RC - звена, в конденсаторе и R —нагрузки

ШИМ регулирование позволяет генерировать не только *активную*, но и *реактивную* мощность, что позволяет использовать такие выпрямители для *регулирования $\cos(\phi)$* . В этом случае ток сети переменного тока имеет практически *синусоидальную* форму, что обеспечивает снижение гармоник, генерируемых в питающую сеть.

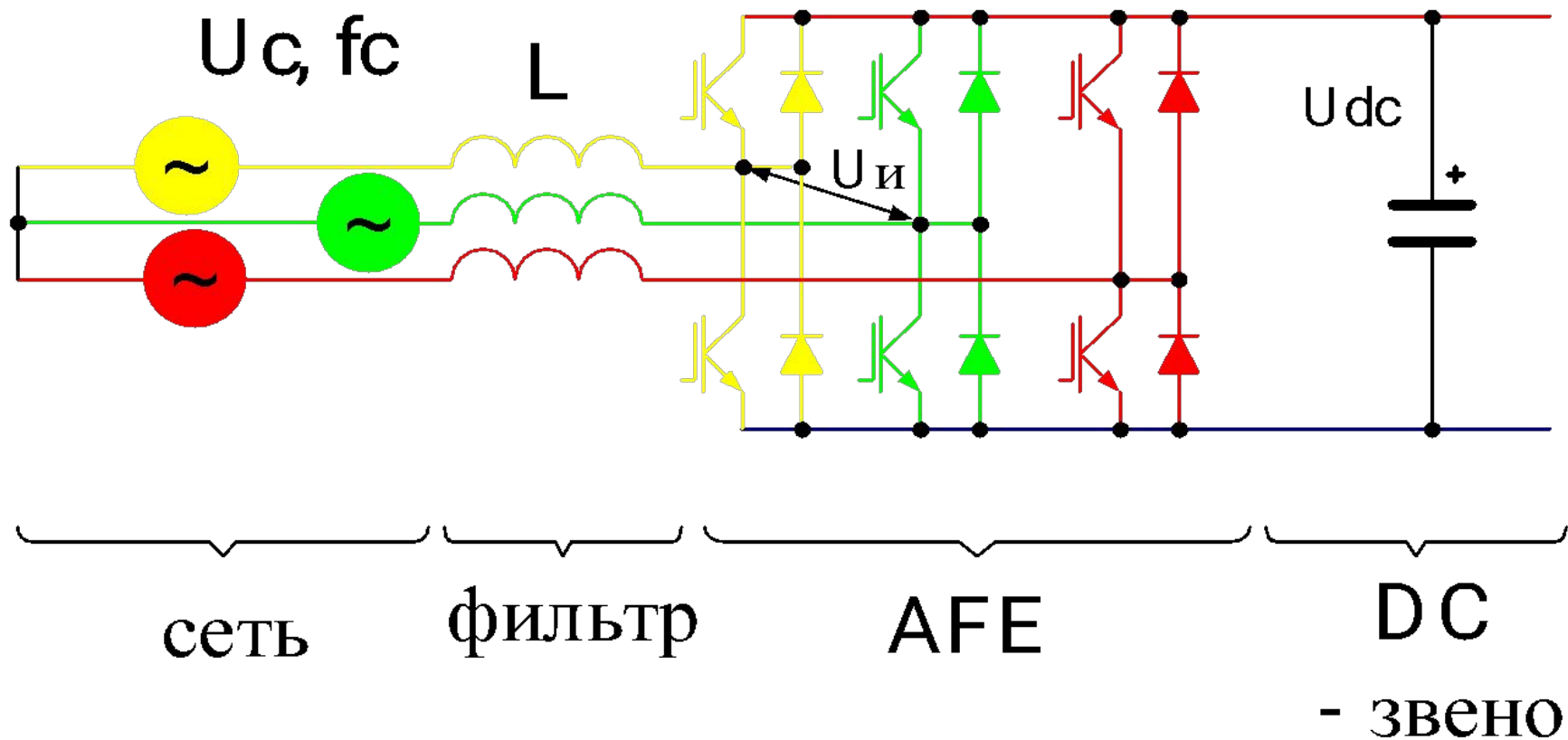
Для обеспечения нормальной работы преобразователя, необходимо, чтобы частота модулируемого (генерируемого) напряжения AFE U_i , была *равна* частоте питающей сети.

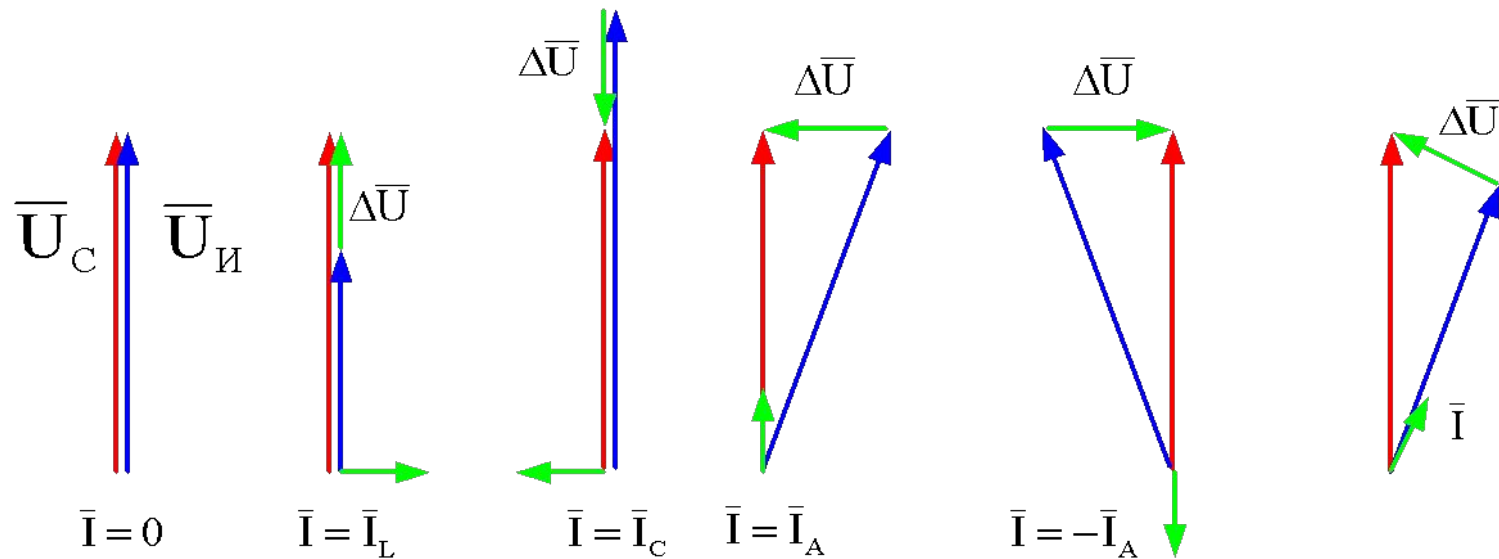
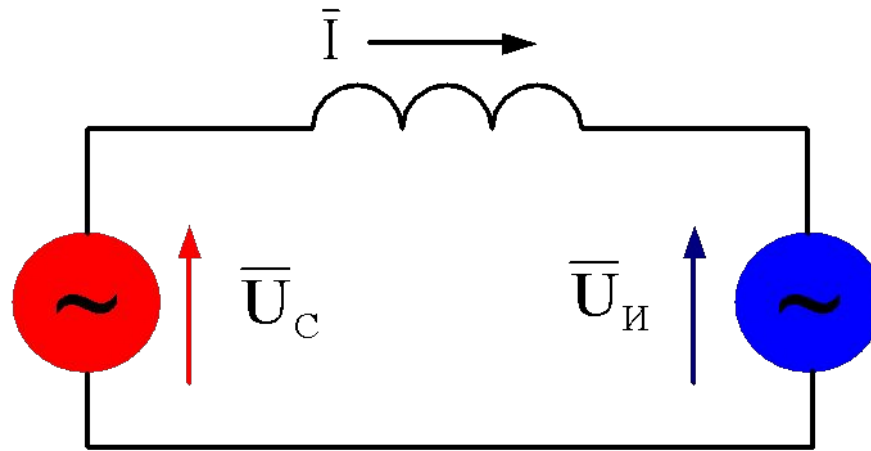
Изменяя *амплитуду и фазу* модулированного напряжения AFE (гладкой составляющей) по отношению к напряжению питающей сети, можно обеспечить *работу AFE в 4-х квадрантах*:

опережающим и отстающим $\cos(\phi)$ в выпрямительном режиме,
опережающим и отстающим $\cos(\phi)$ в инверторном режиме.

$$U_H = \text{var} \quad \varphi = \text{var}$$

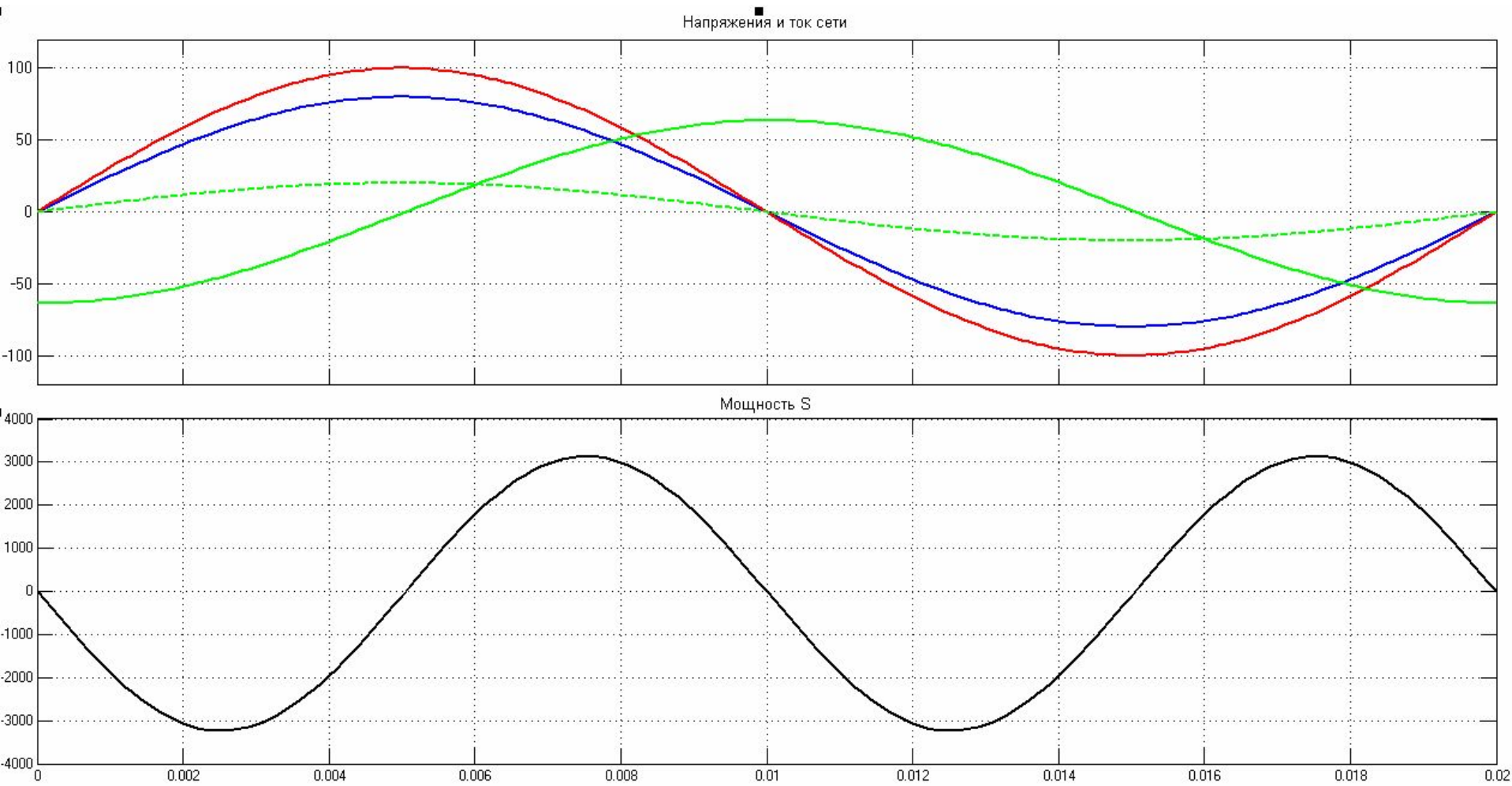
$$f_H = f_c = \text{const}$$



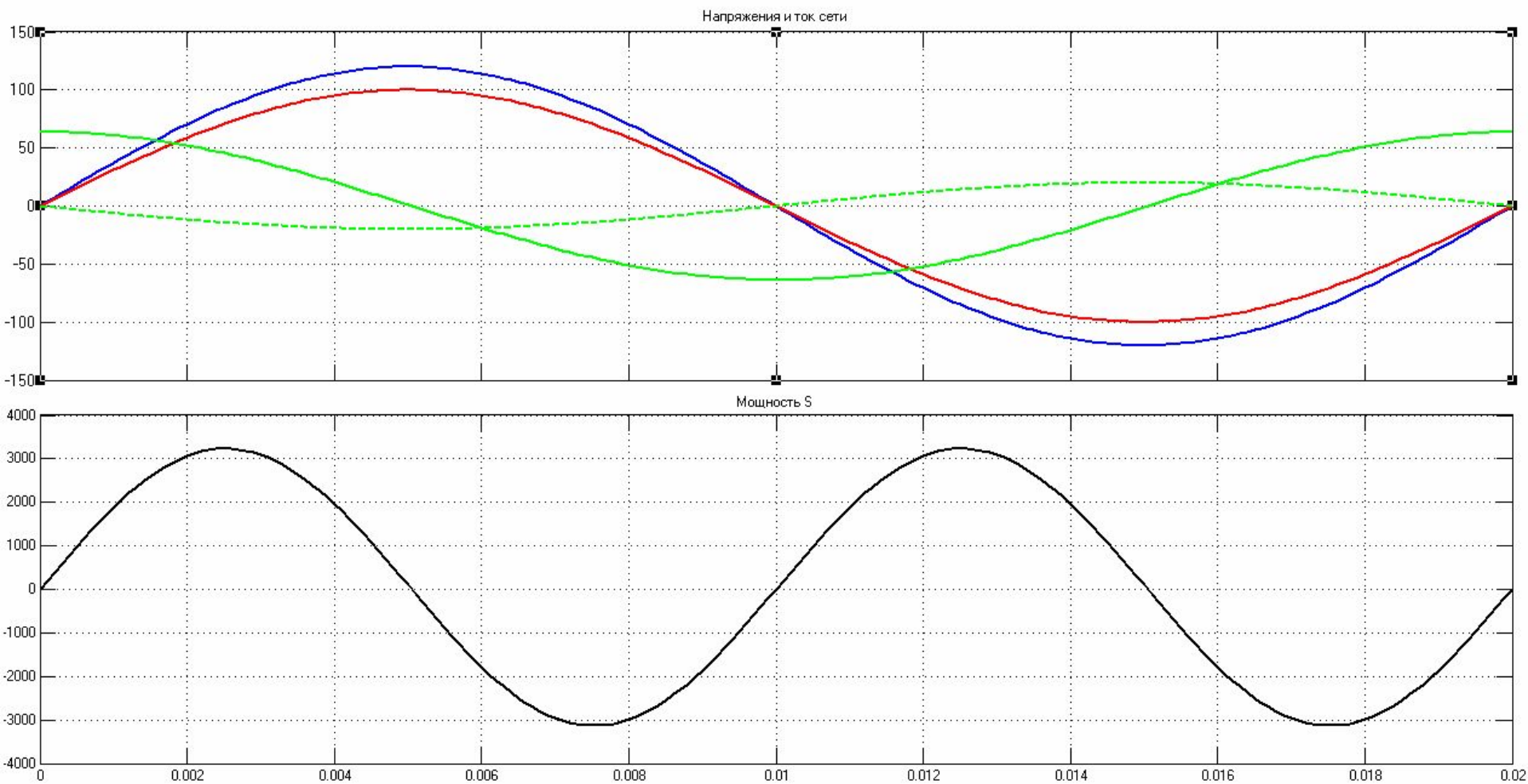


Векторные диаграммы, поясняющие принцип работы AFE выпрямителя

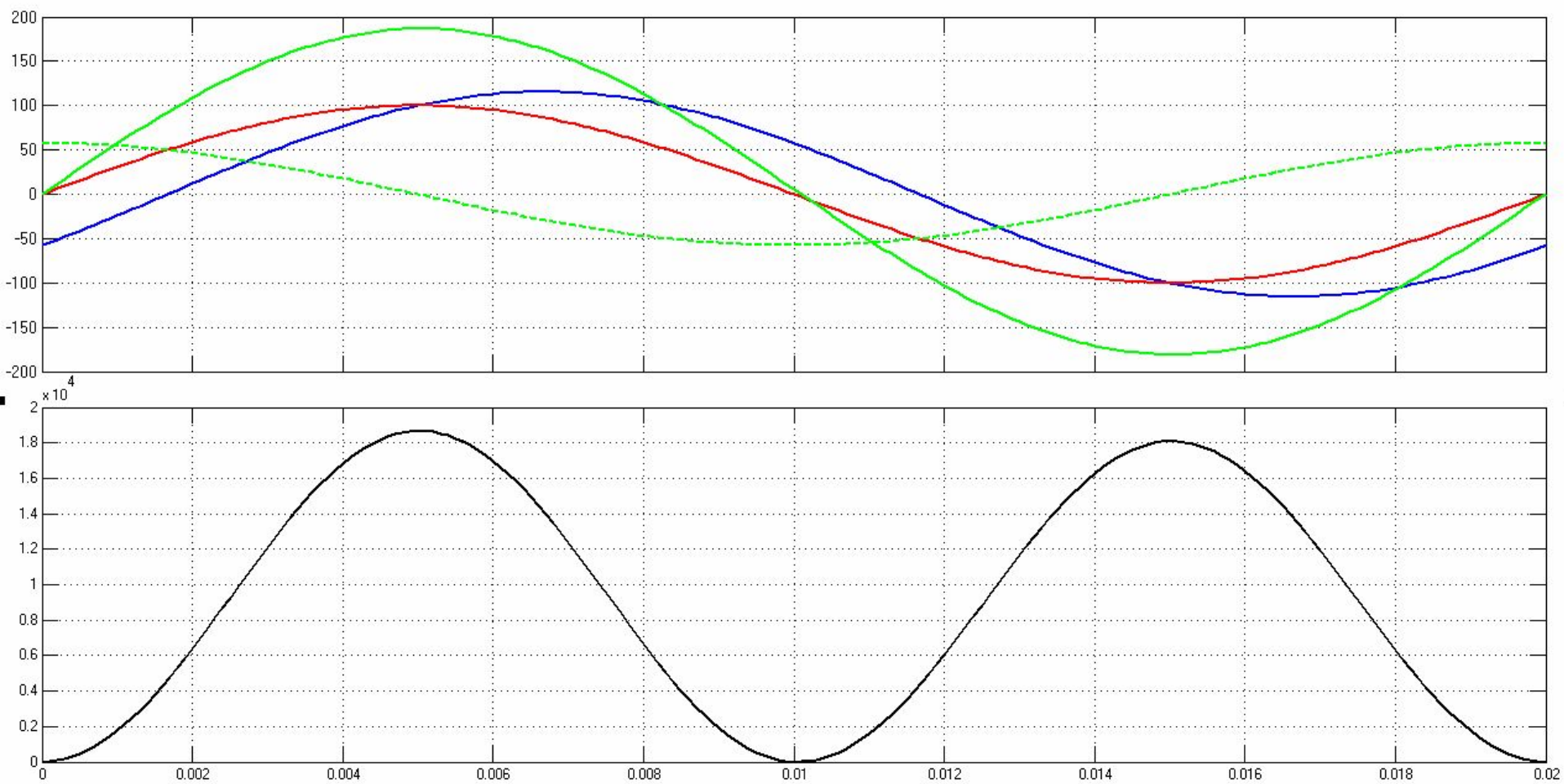
Работа при индуктивном токе сети (AFE для сети – индуктивность)



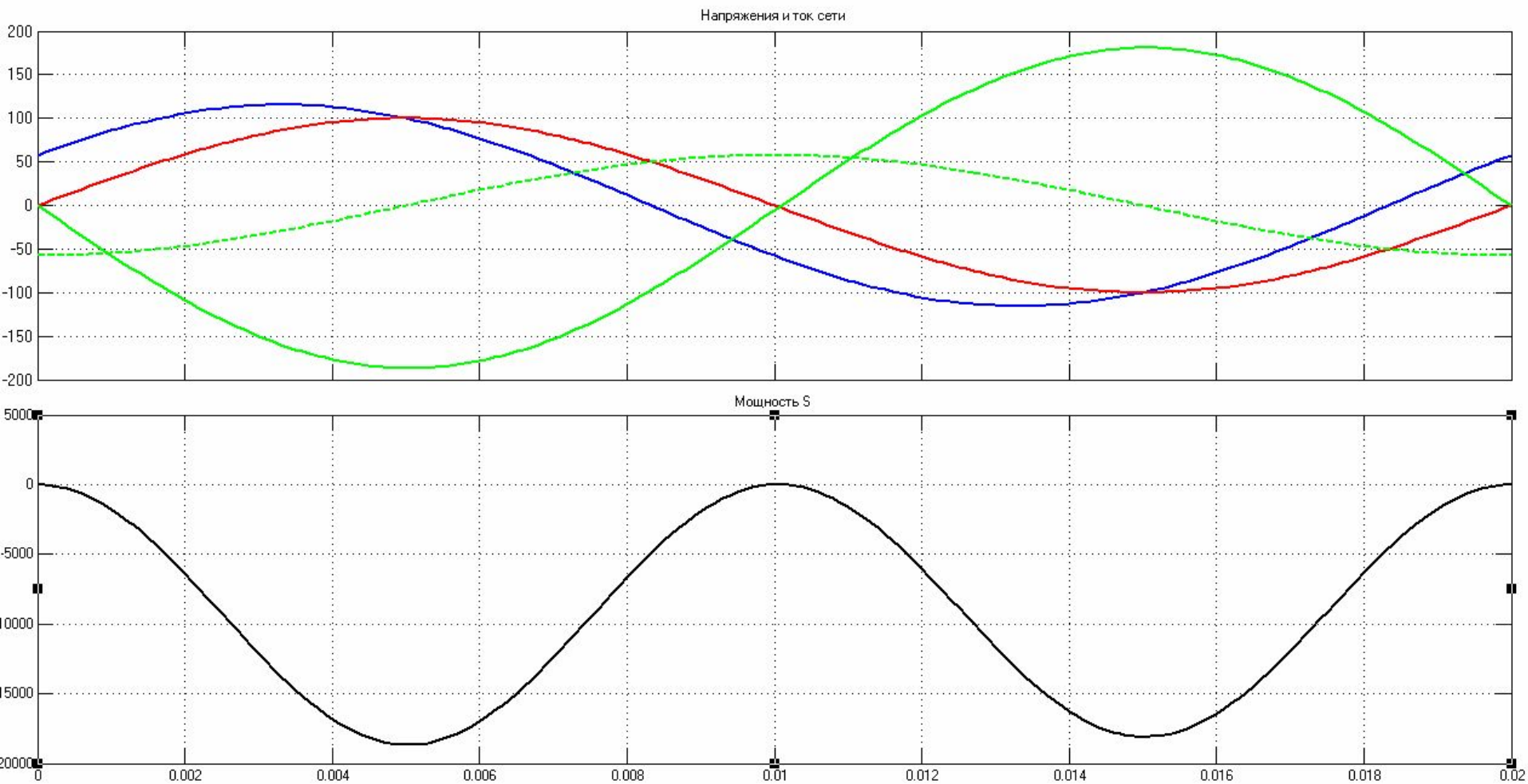
Работа при емкостном токе сети (AFE для сети – конденсатор)



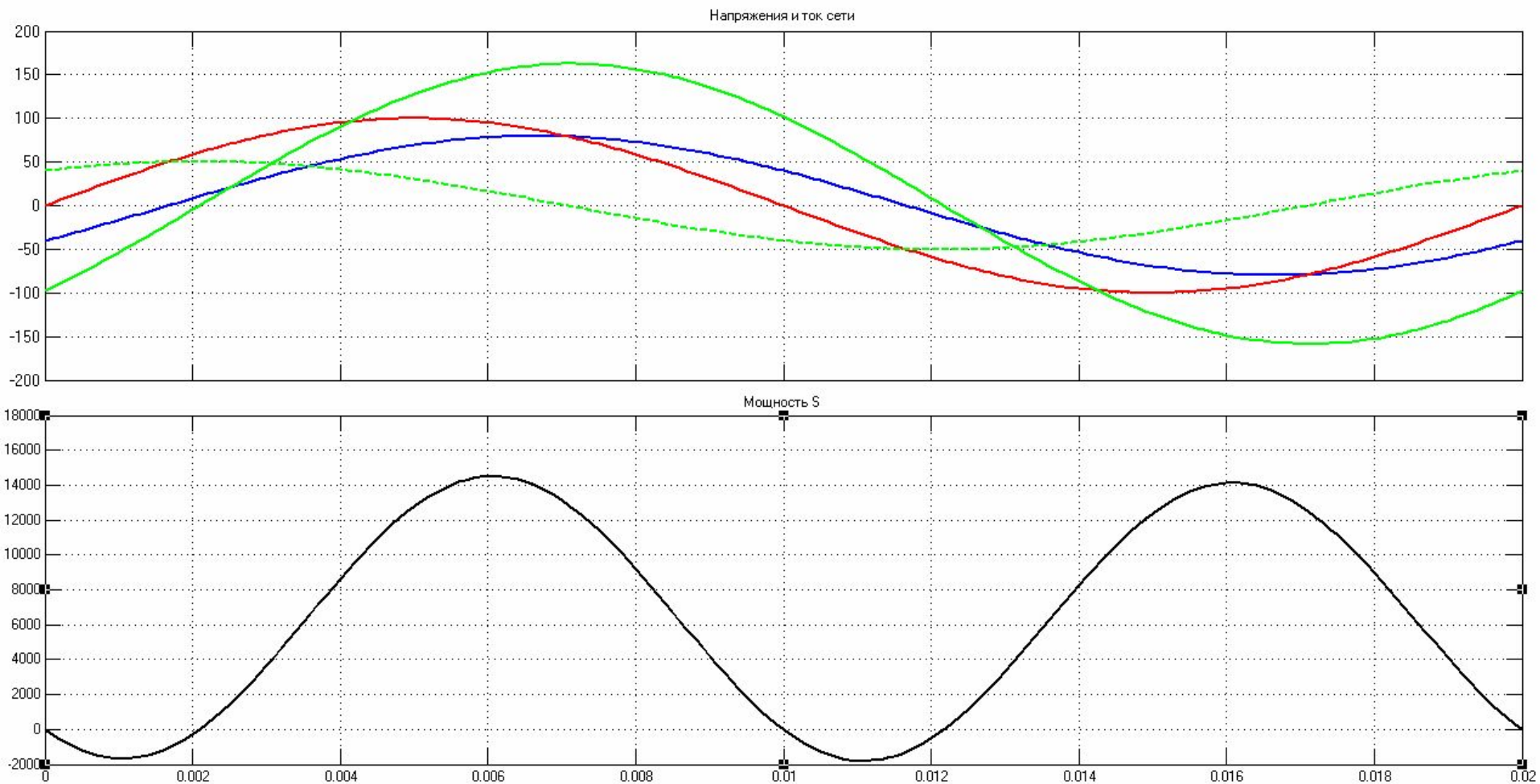
Потребление из сети активного тока ($\cos\varphi = 1$)

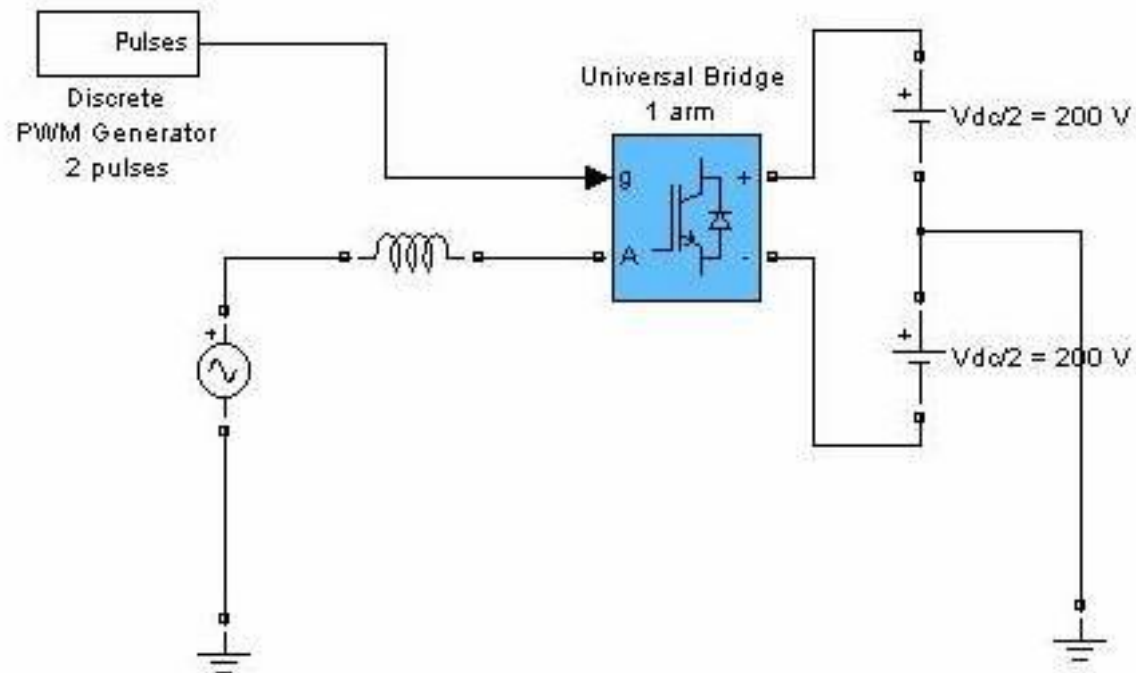


Возврат в сеть активного тока ($\cos\varphi = -1$)

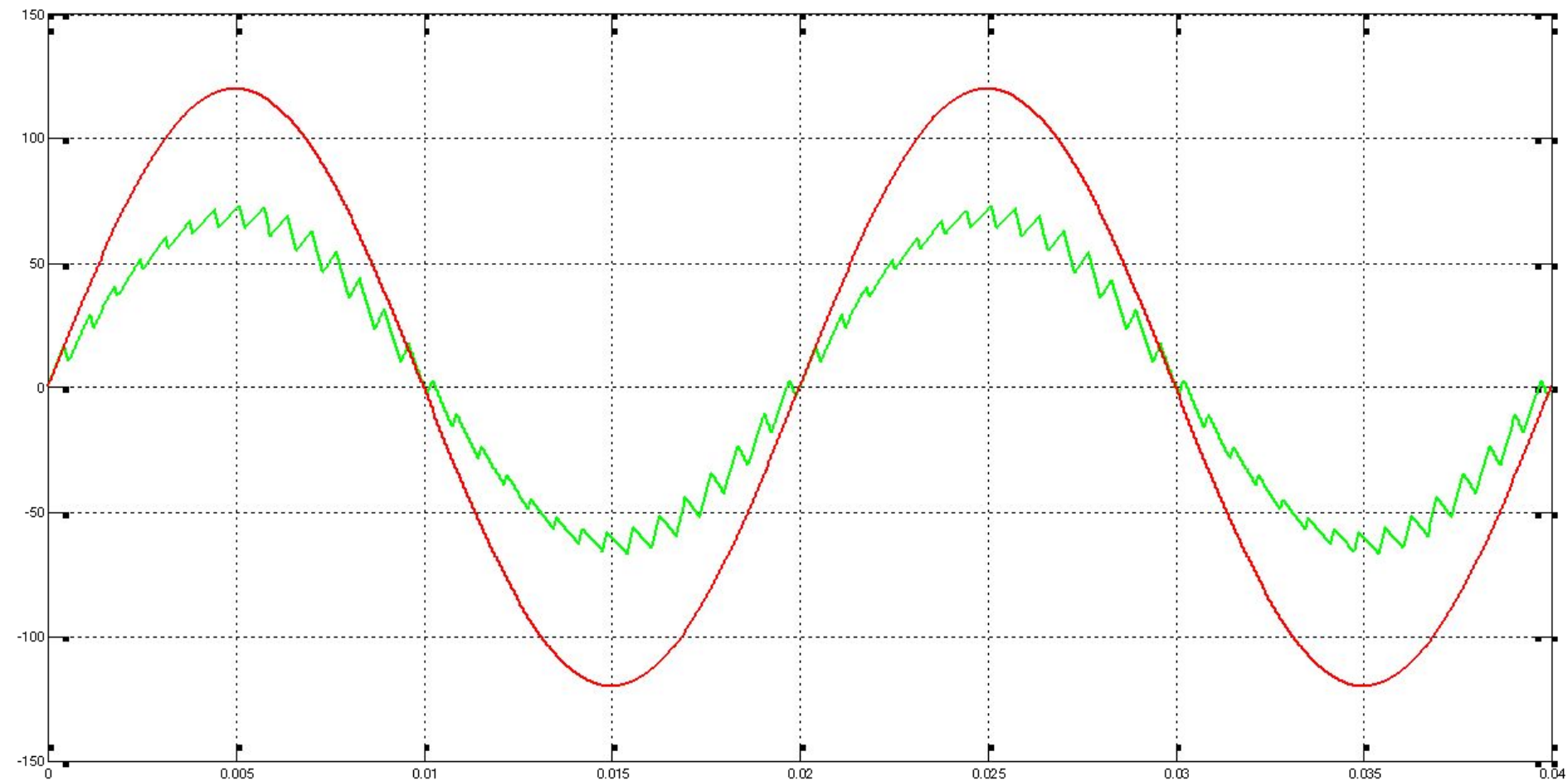


Работа с отстающим $\cos\varphi$ (AFE для сети – RL- нагрузка)

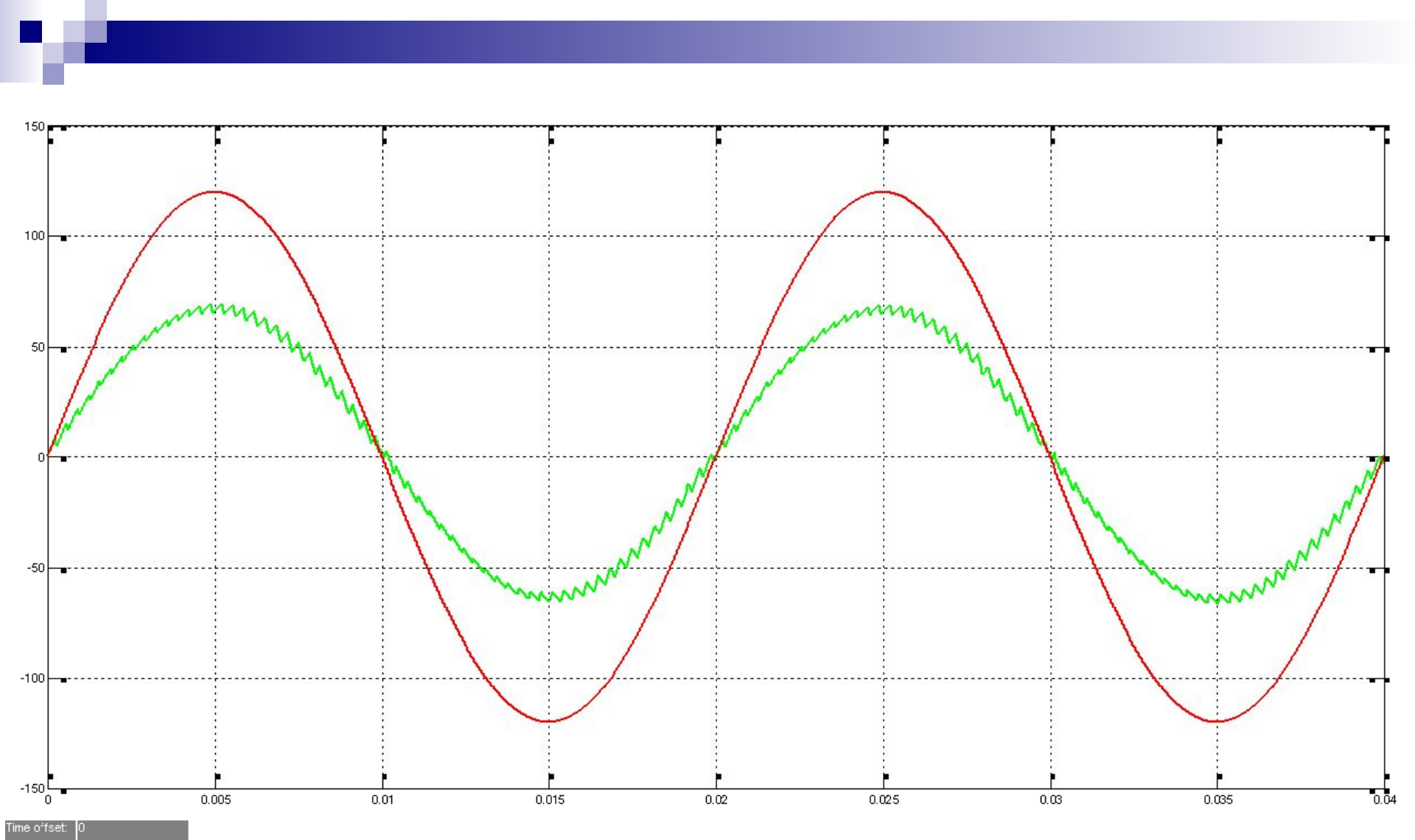




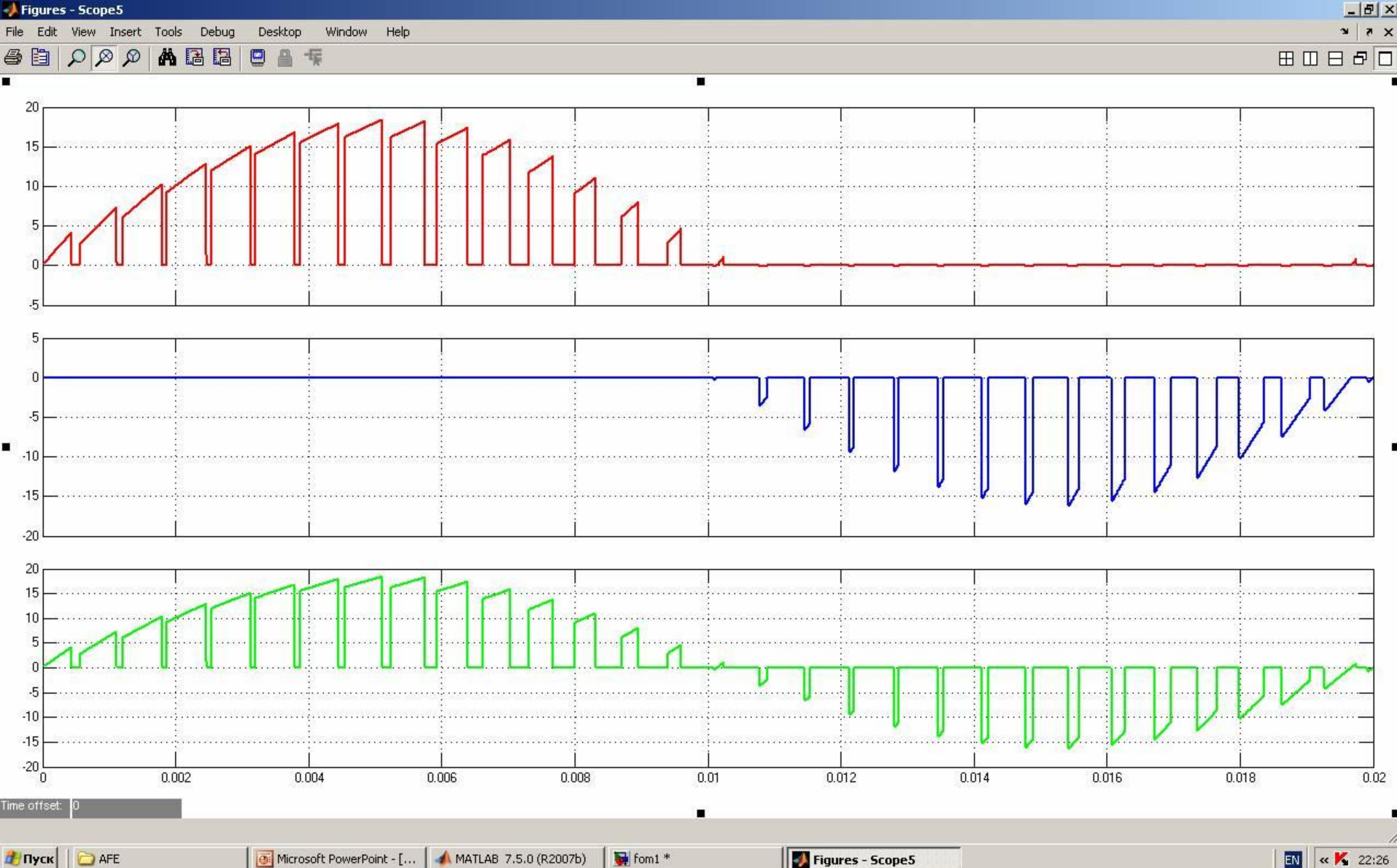
Модель однофазного AFE- выпрямителя



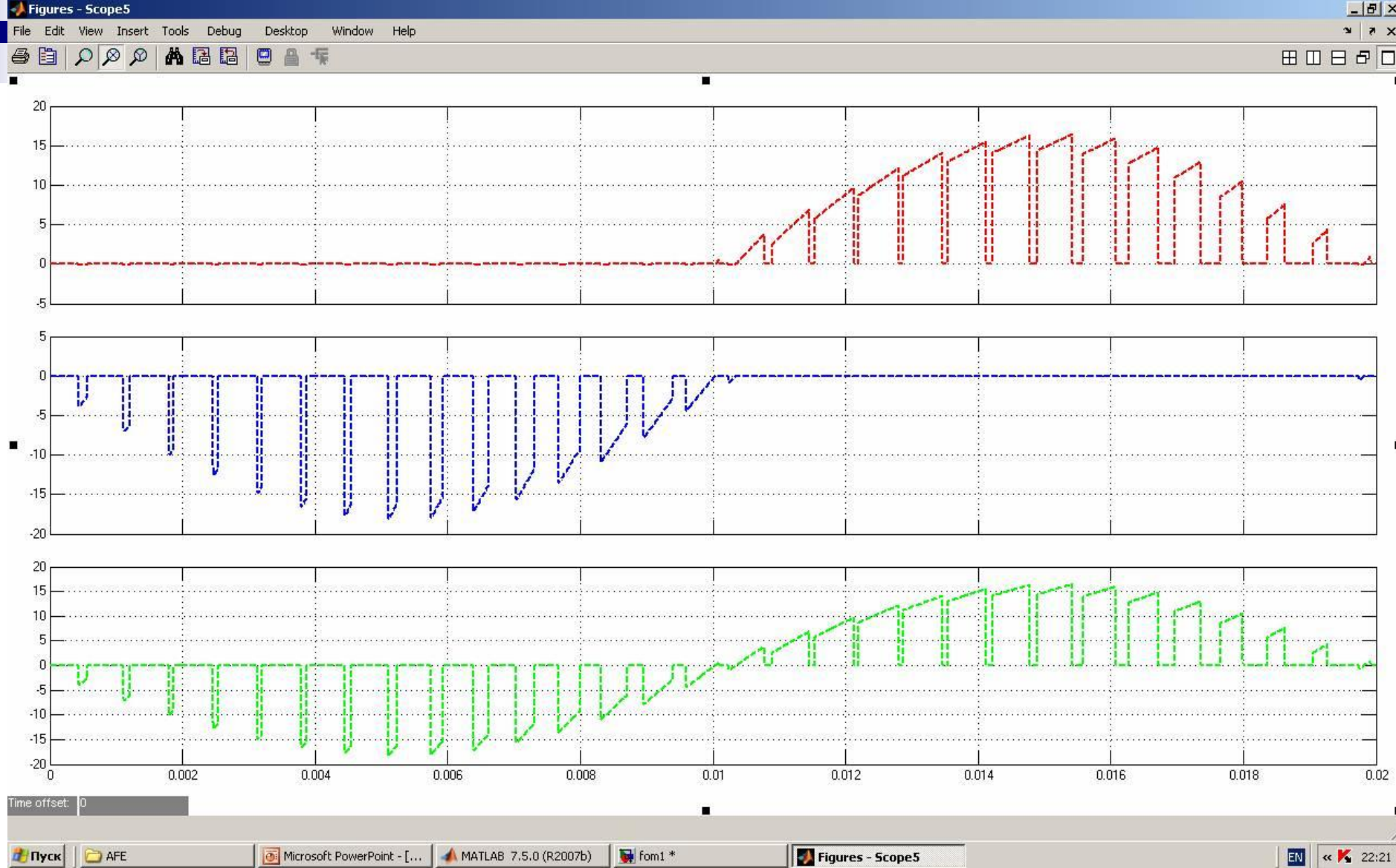
Результаты моделирования АФЕ выпрямителя с $\cos(\phi)=1$, несущая частота 1500 Гц



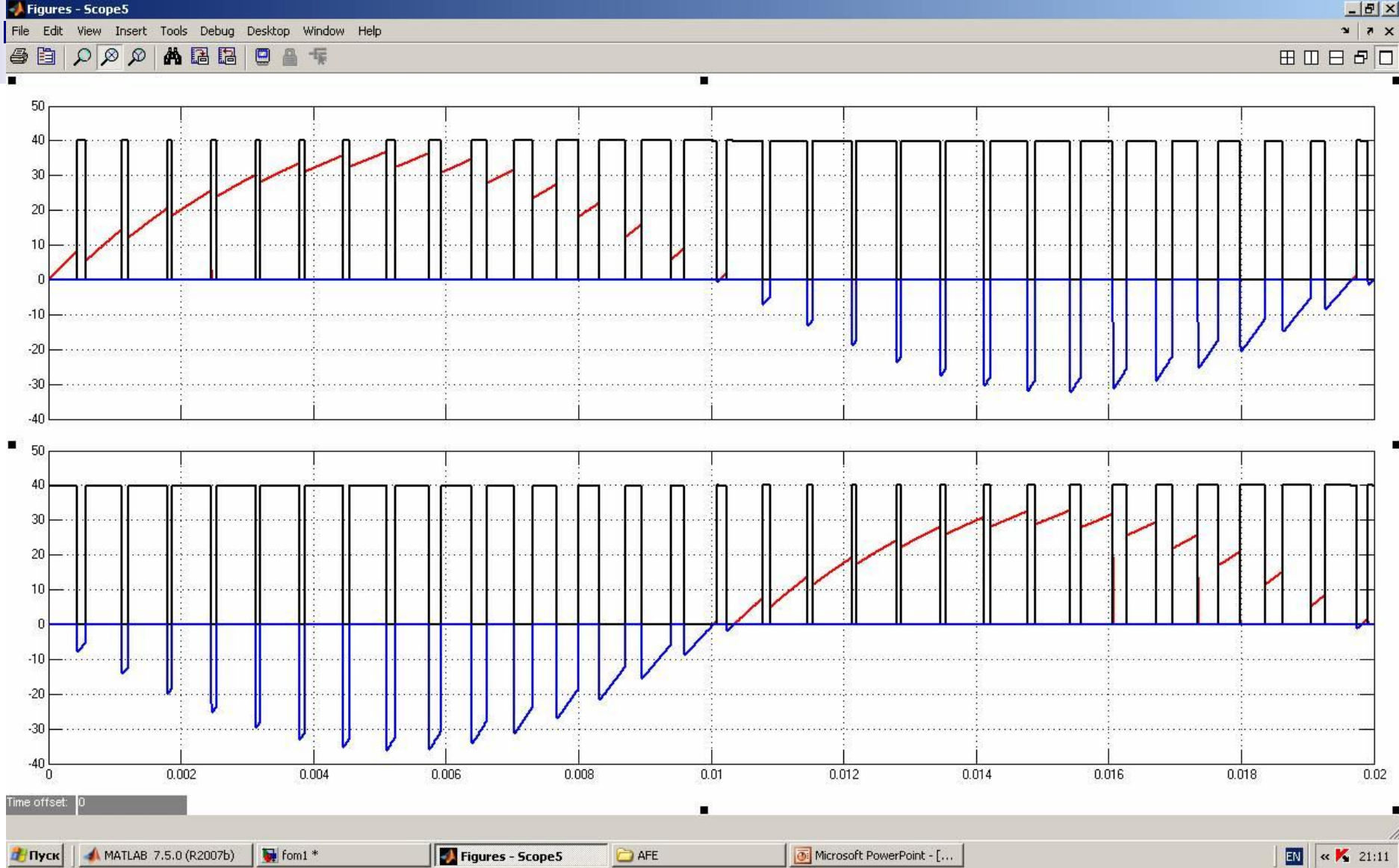
Результаты моделирования АФЕ выпрямителя с $\cos(\phi)=1$, несущая частота
3000 Гц



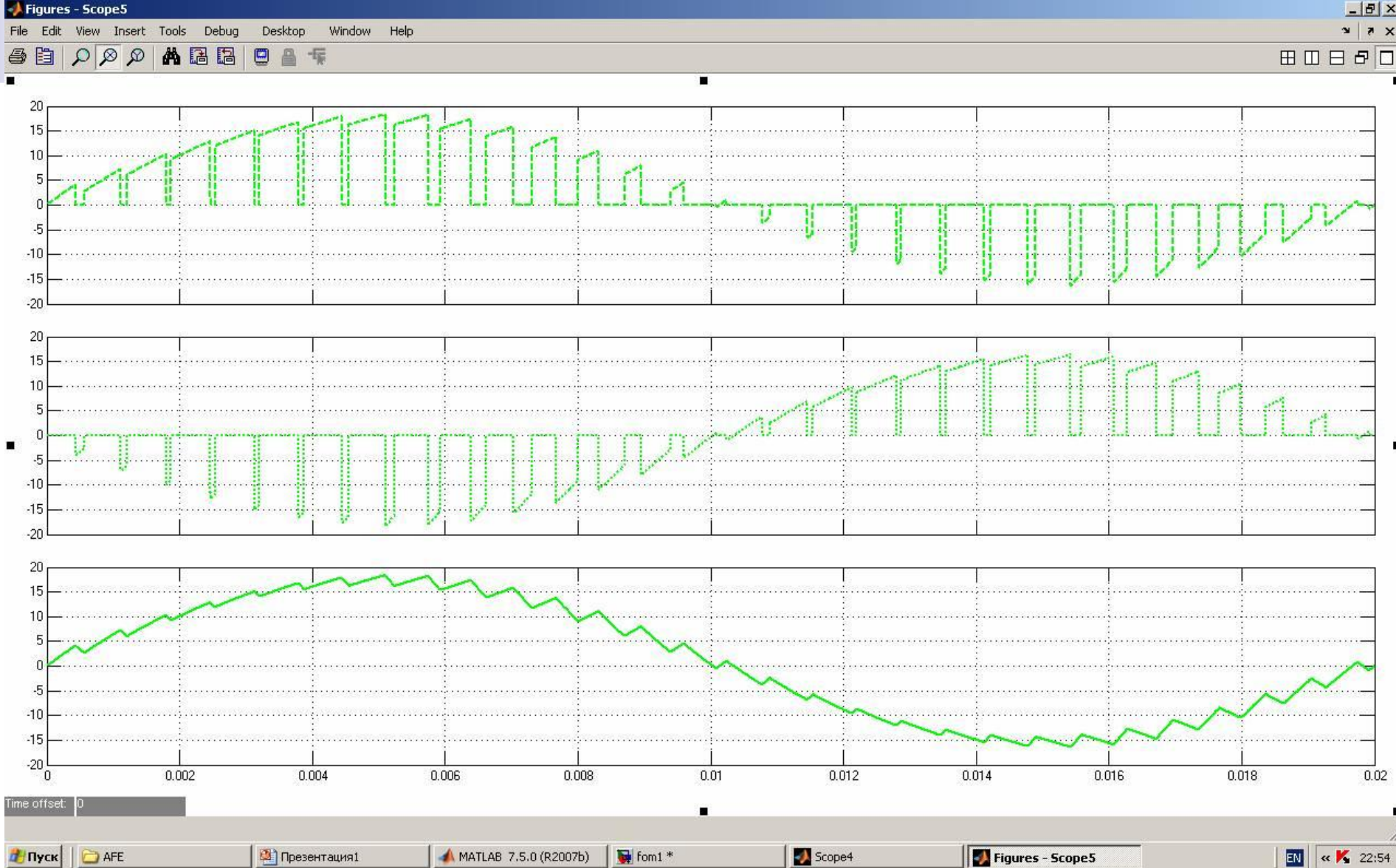
Токи верхнего транзистора, обратного диода и суммарный (входной)



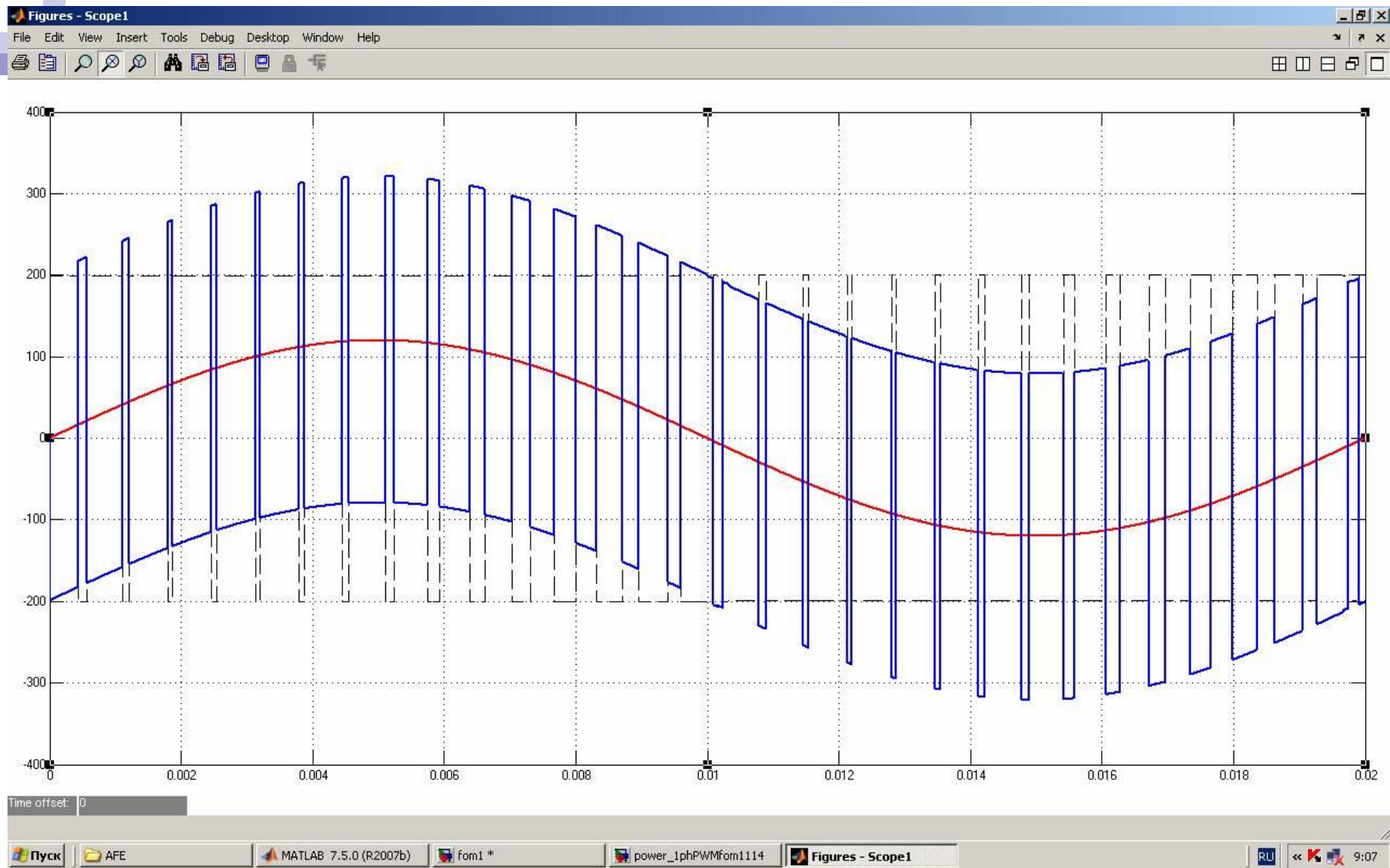
Токи нижнего транзистора, обратного диода и суммарный (входной)



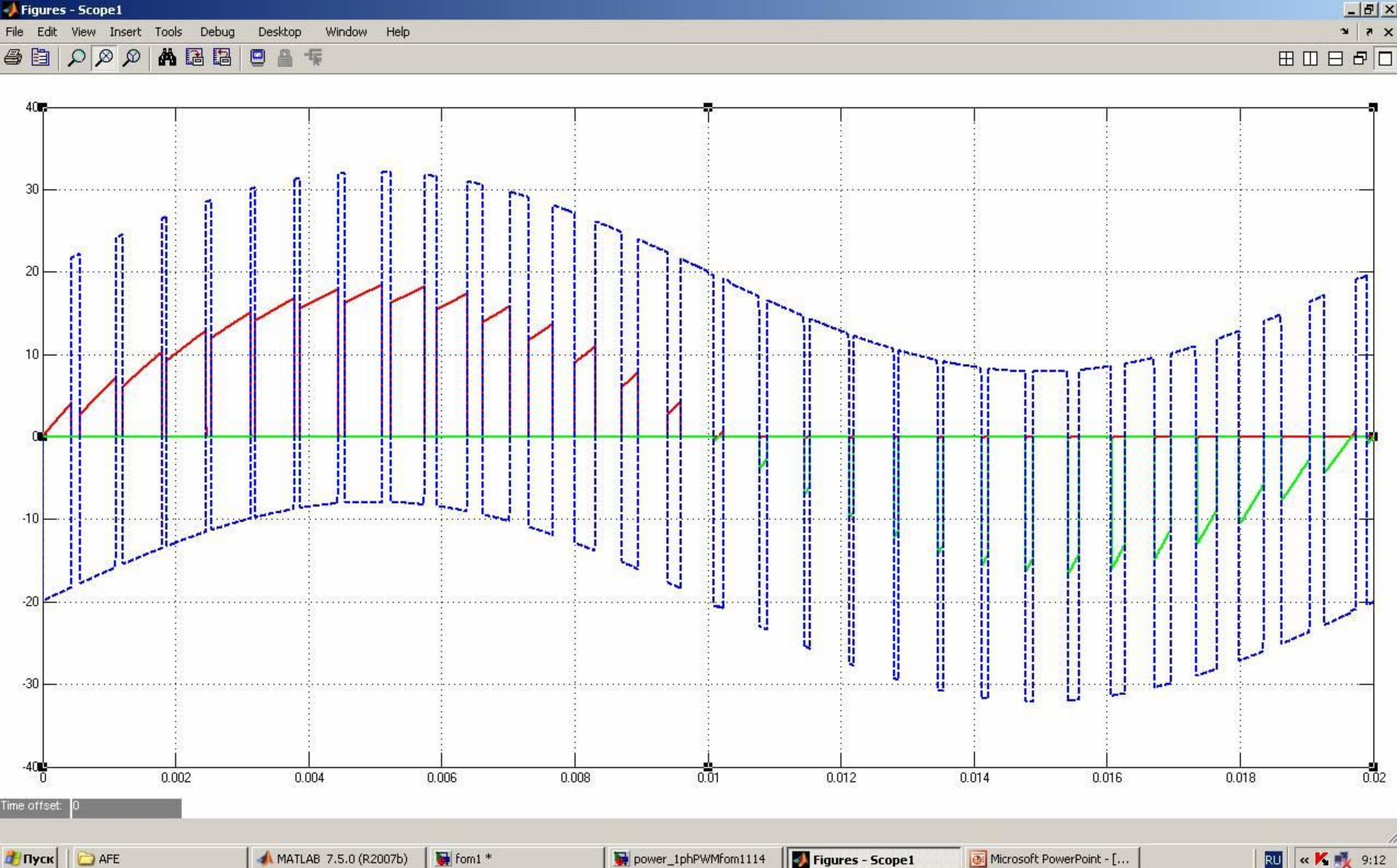
Напряжение на коллекторе, токи транзистора и обратного диода



Токи верхней ветви, нижней и в сети



Напряжение сети, AFE инвертора и на индуктивности L



Напряжение на индуктивности, токи верхнего транзистора и обратного диода

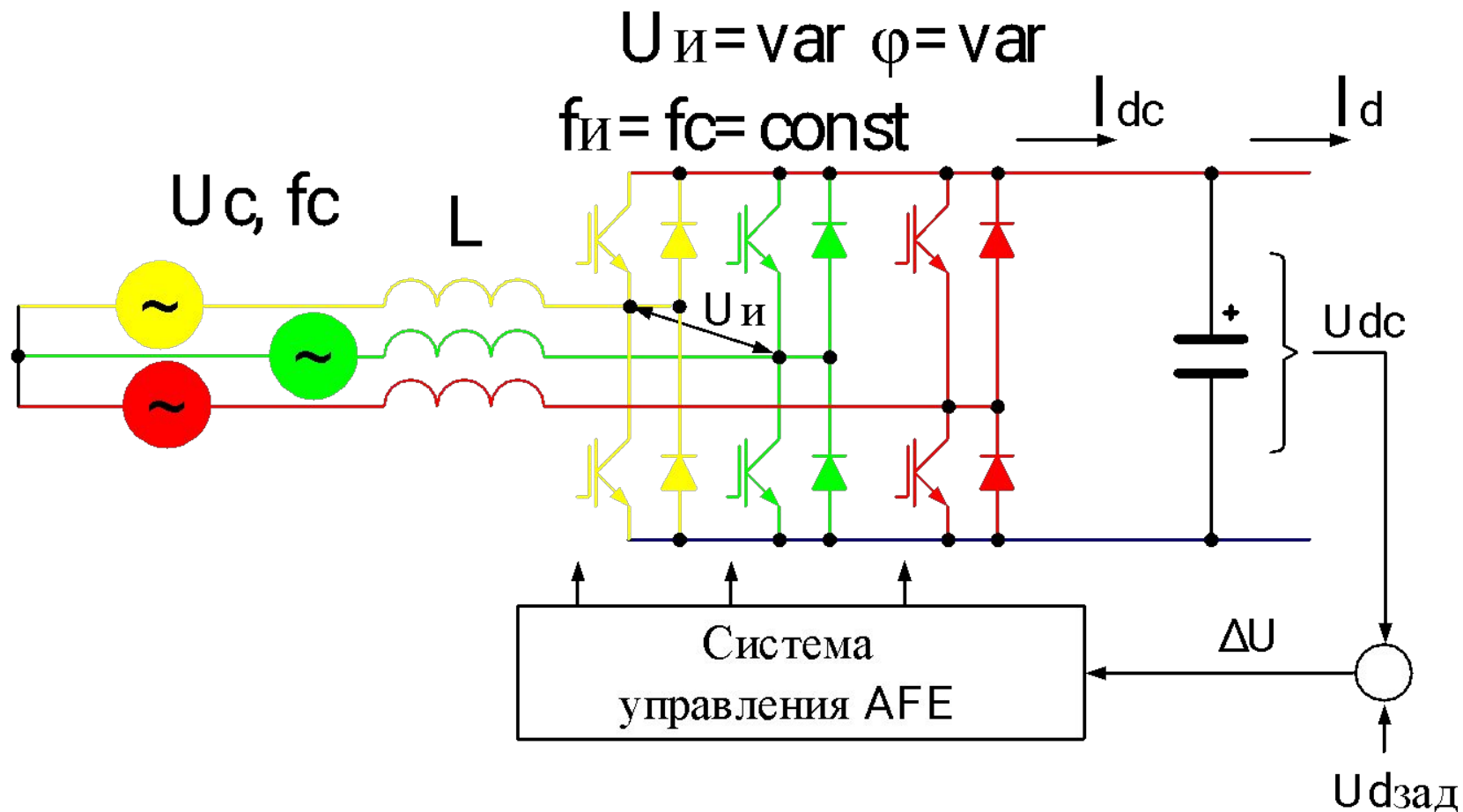


Схема стабилизации напряжения в DC - звене

Для *стабилизации напряжения* в звене постоянного тока, измеренное значение напряжения в звене постоянного тока сравнивается с заданной величиной и сигнал ошибки ΔU вызывает переключение ключей AFE, в результате чего энергия может потребляться из сети или возвращаться в сеть переменного тока для обеспечения заданного значения напряжения в звене постоянного тока.

Когда ток I_d *положительный* (выпрямительный режим) конденсатор C_d *разряжается* и сигнал ошибки на входе СУ AFE приводит к возрастанию потребляемой из сети мощности. СУ увеличивает потребляемую из сети мощность за счет ШИМ AFE. Т. о. из сети *возрастает* потребление тока и происходит *восстановление напряжения* на конденсаторе C_d . В режиме инвертирования, когда ток становится *отрицательным*, напряжение на C_d увеличивается, сигнал ошибки изменяет свой знак и СУ *разряжает* конденсатор, *возвращая энергию* в сеть переменного тока.

Регулирование напряжения в звене постоянного тока реализуется двумя способами:

- 1 – АИН с ШИМ, *управляемый током*;
- 2 – АИН с ШИМ, *управляемый напряжением*.

В *первом методе регулируется входной ток*, во втором – *регулируется напряжение и фаза* модулируемого напряжения AFE. Первый метод наиболее прост и более стабилен.

В первом способе регулирование заключается в *измерении мгновенного фазного тока* и *усиления* его для получения синусоидального заданного значения тока.

Амплитудное значение заданного тока может быть рассчитано по следующей зависимости:

$$I_{\text{MAX}} = W(p)\Delta U = W(p)(U_{\text{зад}} - U_{\text{dc}})$$

где $W(p)$ - передаточная функция регулятора (П, ПИ, фаззи и др.)

$$U_a = U_m \sin \omega t$$

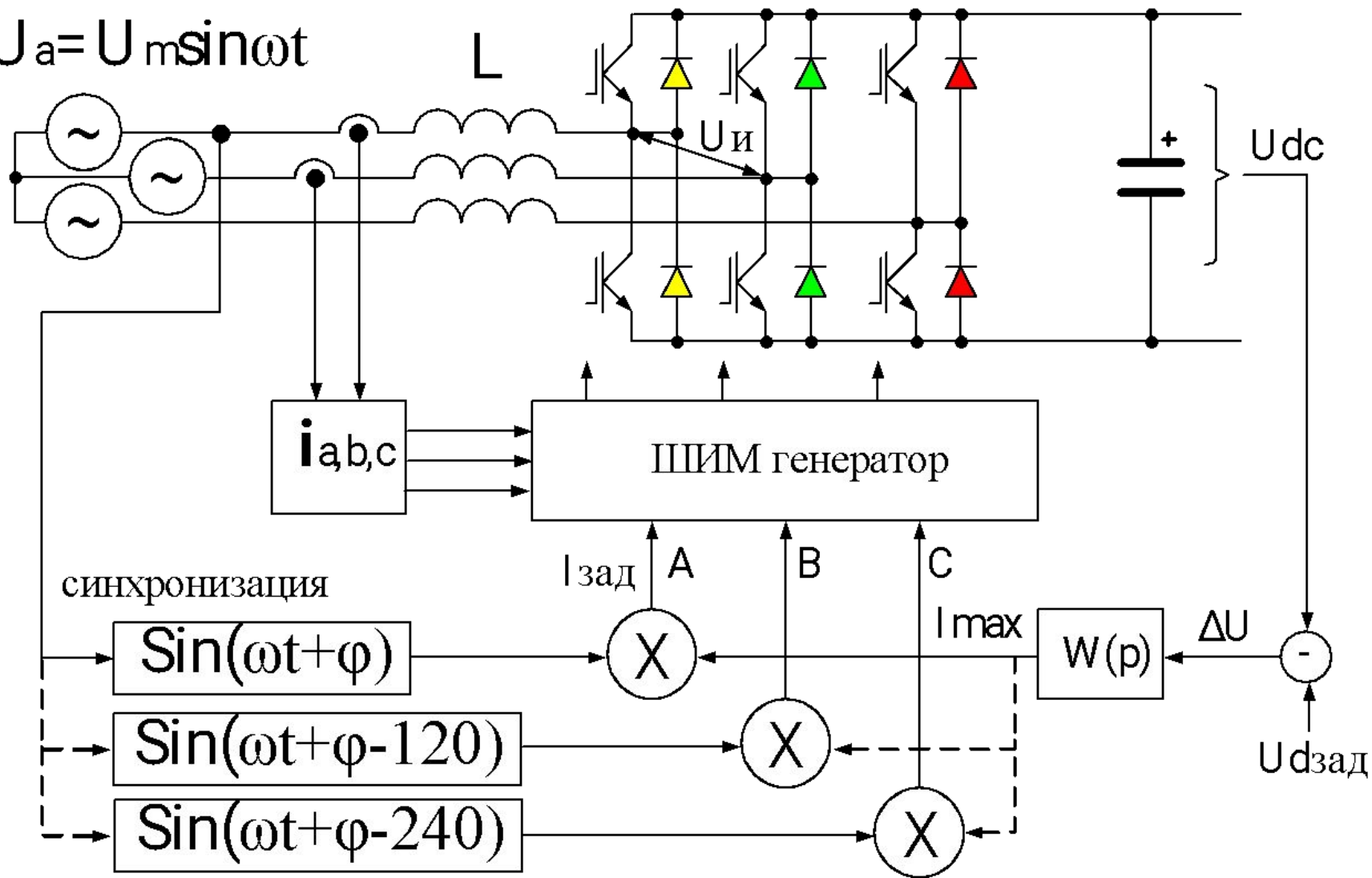
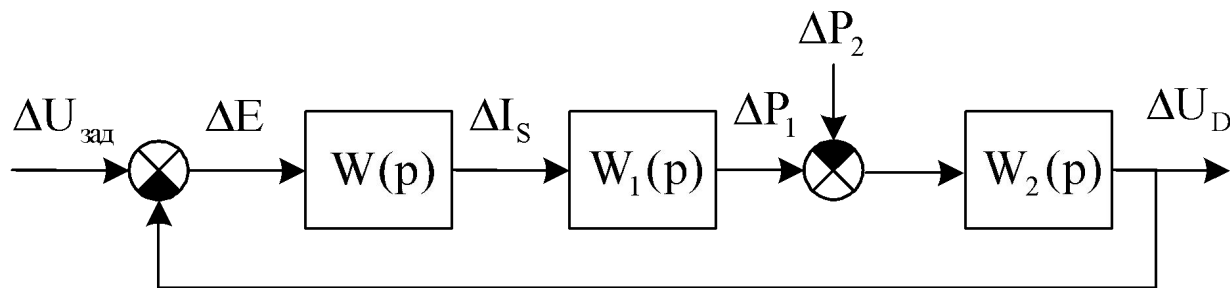


Схема АИН с ШИМ, управляемым током

Синусоидальная форма заданного тока получается перемножением **$I_{\max}$** с **синусной функцией** с той же частотой, что и частота питающей сети, и требуемым **углом** сдвига по фазе φ . Затем задающий сигнал должен быть **синхронизирован** с питающим напряжением (источником мощности). После чего заданный сигнал готов для формирования **задания ШИМ**.

Однако **система с обратной связью по напряжению может быть неустойчивой**. Это необходимо учитывать при реализации регулятора. При реализации обратной связи и регулятора контур регулирования может быть представлен структурной схемой, линеаризованной в приращениях при действующем значении входного тока сети ΔI_s .



где $W_1(p)$ - передаточная функция АИН, $W_2(p)$ - передаточная функция ДС-звена (конденсатора).

$$W_1(p) = \frac{\Delta P_1(p)}{\Delta I_s(p)} = 3(U \cos(\varphi) - 2I_s R - L_s I_s p)$$

$$W_2(p) = \frac{\Delta U_D(p)}{\Delta P_1(p) - \Delta P_2(p)} = \frac{1}{U_D C_D p}$$

где ΔP_1 и ΔP_2 – входная и выходная **мощности** преобразователя;

U – действующее значение фазного **напряжения** сети,

I_s – входной **ток**,

L_s – входная **индуктивность**, R – **сопротивление** между сетью и AFE.

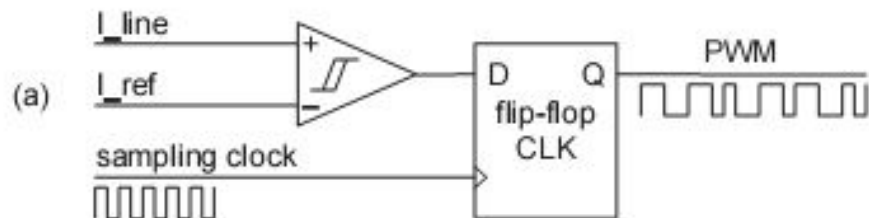
Исходя из **условия выполнения устойчивости** и применении ПИ регулятора можно получить следующие соотношения:

$$I_s \leq \frac{C_D U_D}{3K_p L_s} \qquad I_s \leq \frac{K_p U \cos \varphi}{2RK_p + L_s K_I}$$

Эти два выражения применяются при реализации преобразователя, управляемого током. Из этих уравнений можно определить **коэффициент пропорциональной и интегральной составляющих регулятора**. Эти выражения справедливы для **выпрямительного** режима работы, т.к. отрицательный ток всегда удовлетворяет условию соотношений.

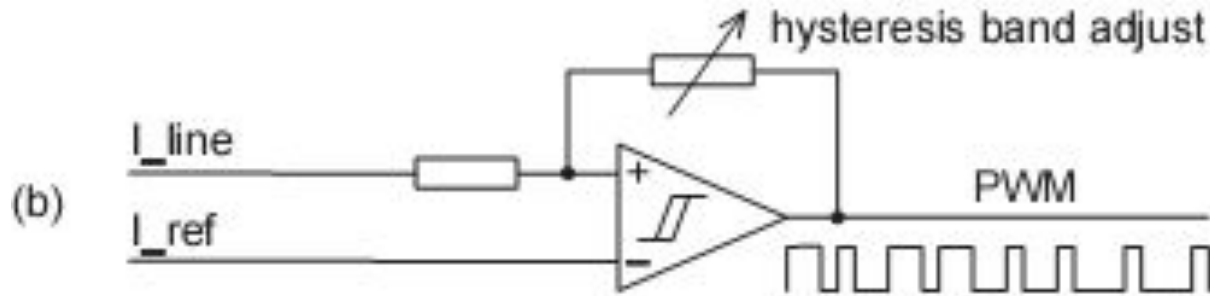
При выполнении этих двух условий устойчивости, AFE будет поддерживать напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне (с ПИ регулятором) во всех режимах работы (выпрямительном и инверторном).

На практике используют *три* основных метода формирования задания для АИН с ШИМ, управляемых током.



В *первом* случае используют прямоугольные тактовые импульсы с постоянной частотой, ошибка между заданным и действительным значениями линейного тока, промодулированная частой тактовых импульсов формирует задание для ШИМ модуляции AFE.

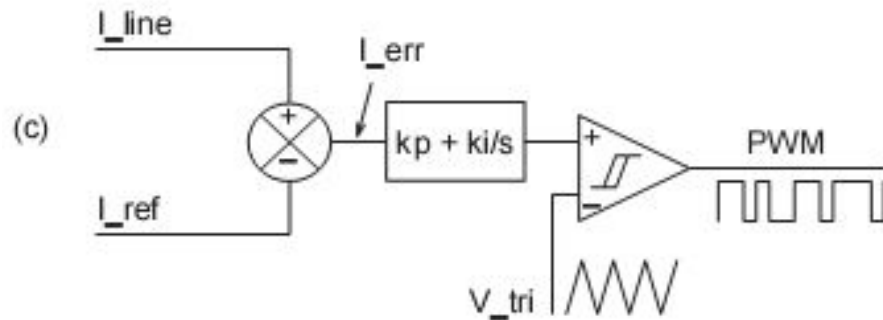
Данный метод управления наиболее *прост*, т.к. необходимы только компаратор и D – триггер на каждую фазу. Главным *преимуществом* данного метода является *минимальное время между переключением транзисторов*, которое ограничивается частотой тактовых импульсов. Эта характеристика и ограничивает максимальную частоту преобразователя.



Во *втором* методе применяют регулятор с *петлей гистерезиса*, переключение ключей происходит в том случае, когда ошибка по току превышает фиксированное значение – полосу гистерезиса. В этом случае необходим *один компаратор с петлей гистерезиса* на одну фазу, тогда частота переключения ключей не ограничена, однако на практике максимальное значение частоты рассчитывается по формуле:

$$f_S^{\max} = \frac{U_D}{4hL_S}$$

где h – полоса гистерезиса



В **третьем** методе ошибка по току сравнивается с опорным напряжением треугольной формы, которое имеет постоянную амплитуду и частоту. Ошибка проходит через ПИ – регулятор, а затем сравнивается с опорным треугольным напряжением. Как видно из рисунка, данный метод наиболее **сложный**, по сравнению с двумя предыдущими. Значения **K_p** и **K_i** ограничивают быстродействие и ошибку системы регулирования. Для их определения применяют следующие эмпирические формулы, позволяющие получить хорошие динамические свойства системы в различных режимах работы:

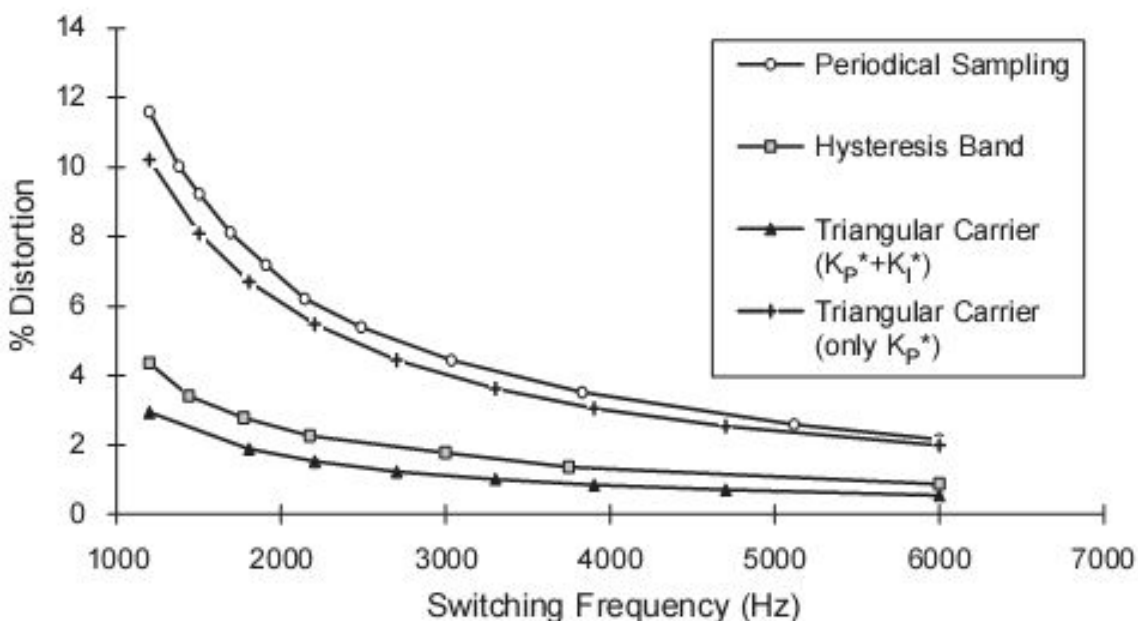
$$K_p = \frac{L_s \omega_c}{2U_D} \qquad K_i = \omega_c K_p$$

где ω_c - частота **опорного** напряжения.

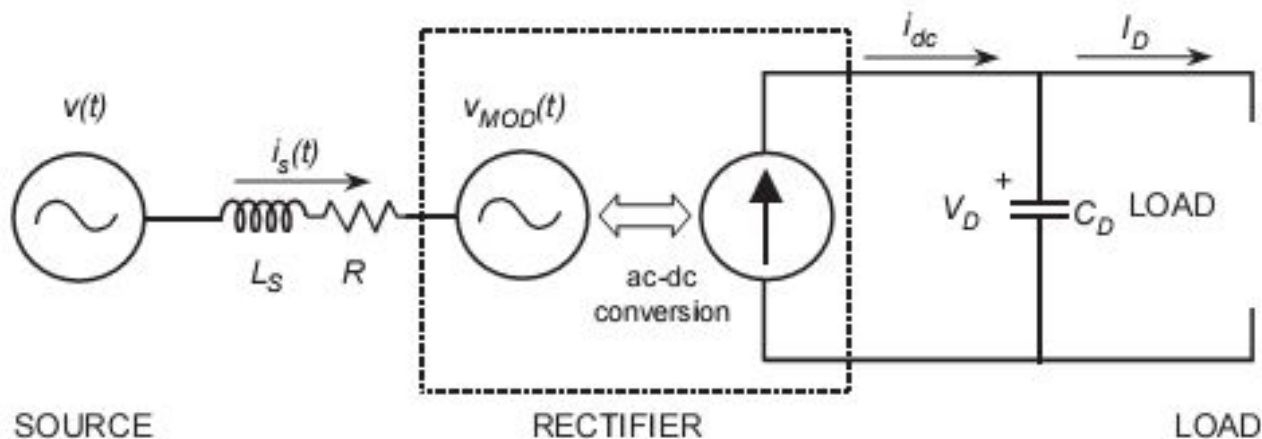
Для расчета уровня искажений (уровня генерируемых гармоник) применяют следующее уравнение:

$$\%Dist = \frac{100}{I_{rms}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_T (I_{line} - I_{ref})^2 dt}$$

где I_{rms} -эффективное значение заданного тока.



На рисунке показана зависимость коэффициента искажений при различных методах АИН с ШИМ в зависимости от частоты коммутации ключей. При частоте коммутации 6 кГц все три метода имеют минимальные искажения и выбор метода не имеет решающего значения.



На рисунке показана однофазная схема, по которой строится система АИН с *управлением напряжением*. Эта схема соответствует *основной гармонике* звена переменного и постоянного тока. Управление реализуется формированием *синусоидального заданного* (модулированного) напряжения АФЕ, изменяемого по амплитуде и фазе относительно напряжения питающей сети. В этом случае *регулирование тока происходит без его измерения*.

Модулированное напряжение AFE задается на основании дифференциальных уравнений:

$$u(t) = L_s \frac{di_s}{dt} + Ri_s + u_{\text{mod}}(t)$$

Так как $u(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t)$,

то определив значение тока сети, можно определить *задание* модулированного напряжения AFE, для обеспечения работы преобразователя с *постоянным значением* $\cos(\phi)$: $i_s(t) = I_{\text{MAX}}(t) \sin(\omega t + \phi)$

Эти уравнения являются функциями времени, на основании которых можно определить уравнение для модулированного напряжения AFE по амплитуде и фазе, для *работы преобразователя с заданным $\cos(\phi)$* .

$$u_{\text{mod}}(t) = \left[U\sqrt{2} + X_S I_{\text{MAX}} \sin \varphi - (R I_{\text{MAX}} + L_S \frac{dI_{\text{MAX}}}{dt}) \cos \varphi \right] \sin(\omega t) - \left[X_S I_{\text{MAX}} \cos \varphi + (R I_{\text{MAX}} + L_S \frac{dI_{\text{MAX}}}{dt}) \sin \varphi \right] \cos(\omega t)$$

Последнее уравнение описывает *задание* модулированного напряжения AFE, которое задается изменением амплитуды входного тока **I_{max}**. Если $\cos(\varphi) = 1$, то уравнение примет вид:

$$u_{\text{mod}}(t) = \left[U\sqrt{2} - (R I_{\text{MAX}} + L_S \frac{dI_{\text{MAX}}}{dt}) \right] \sin(\omega t) - [X_S I_{\text{MAX}}] \cos(\omega t)$$

На основании последнего уравнения может быть реализован преобразователь с $\cos(\varphi) = 1$.

Из последних двух уравнений видно, что имеются две составляющих: *совпадающая* с напряжением питающей сети- $\sin(\omega t)$ и *перпендикулярная* ей $-\cos(\omega t)$. Эти две составляющих позволяют задавать модулированное напряжение AFE, изменяя амплитуду и фазу которого можно обеспечить $\cos(\varphi) = 1$.

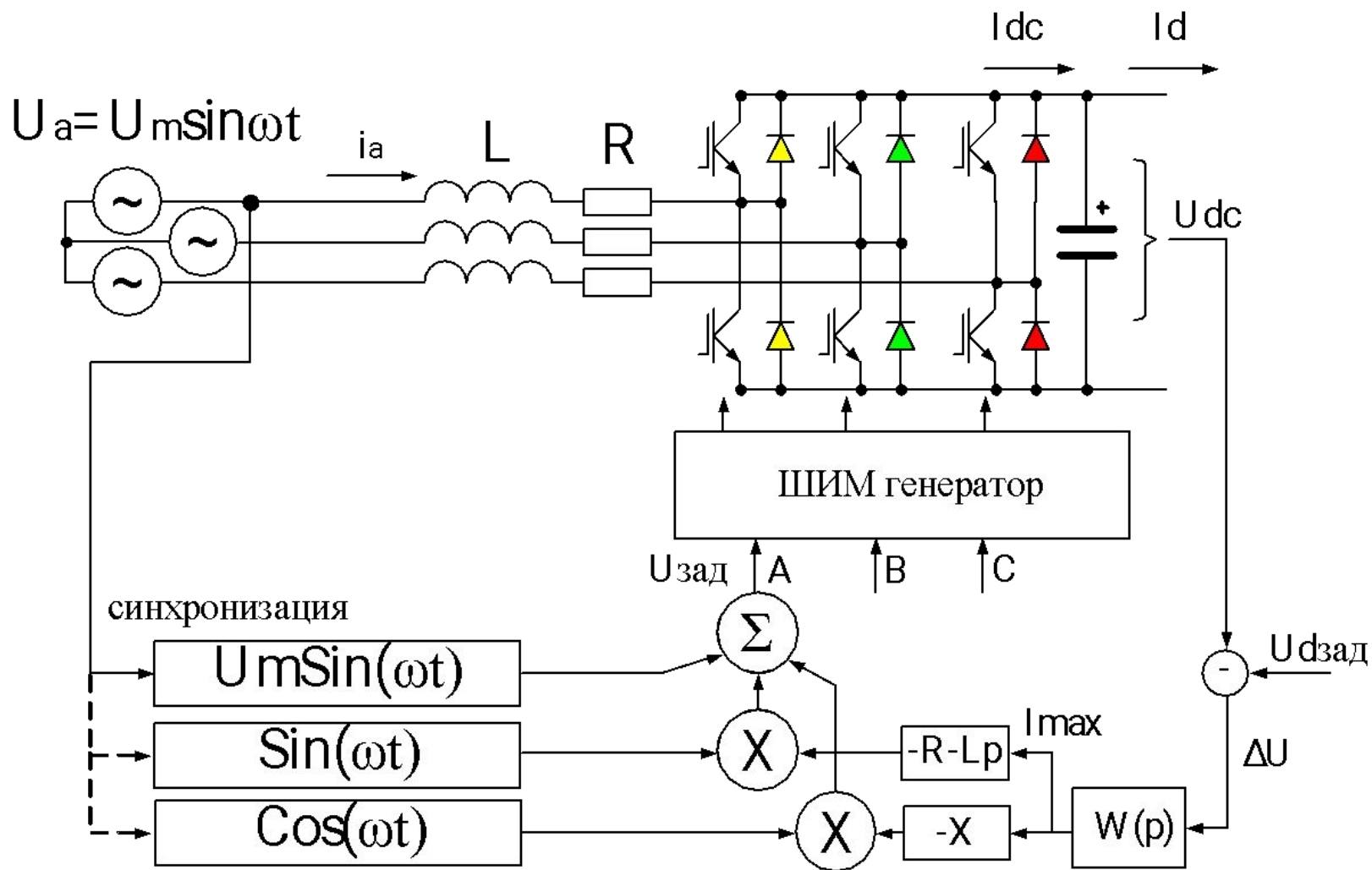
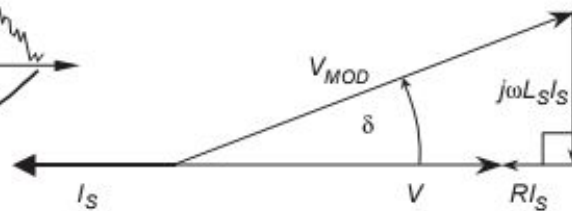
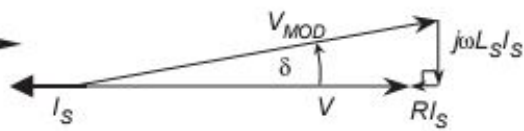
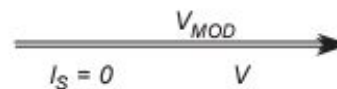
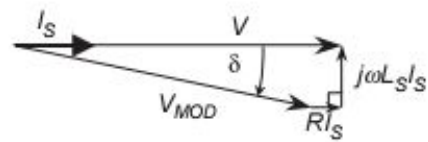
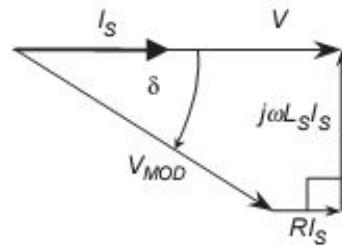
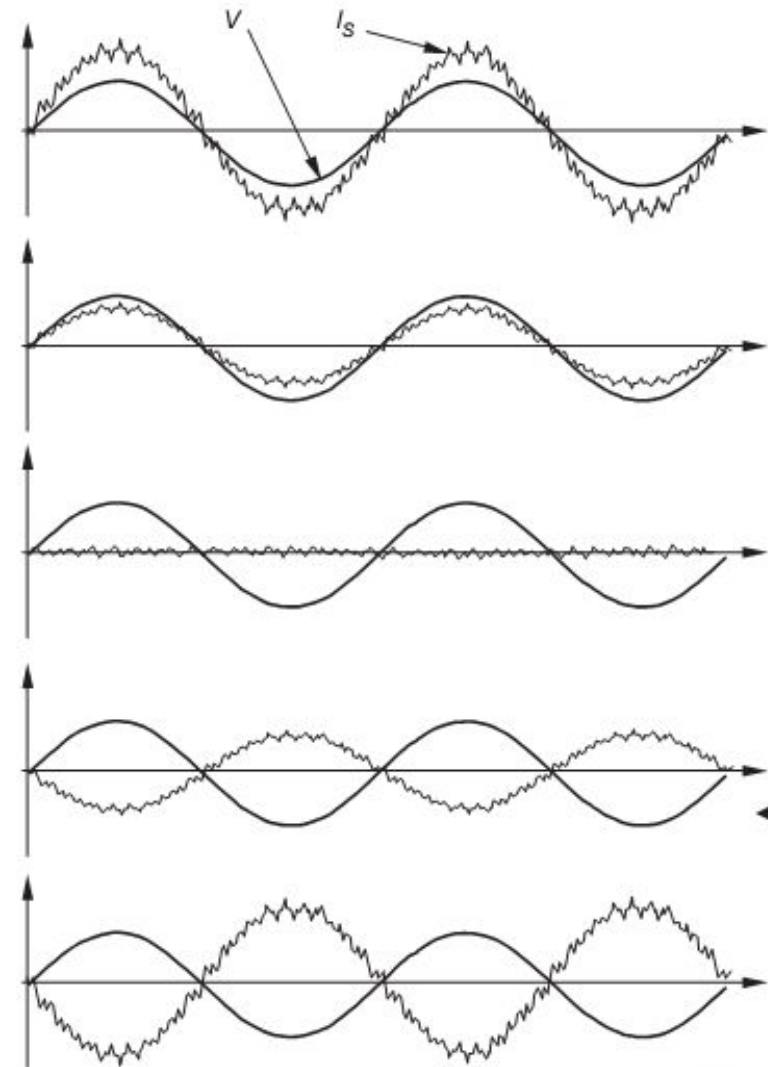


Схема АИН с ШИМ, управляемым напряжением, с $\cos(\phi)=1$



В установившемся режиме работы величина **$I_{\max}$ остается постоянной**, что позволяет записать уравнение в векторной форме:

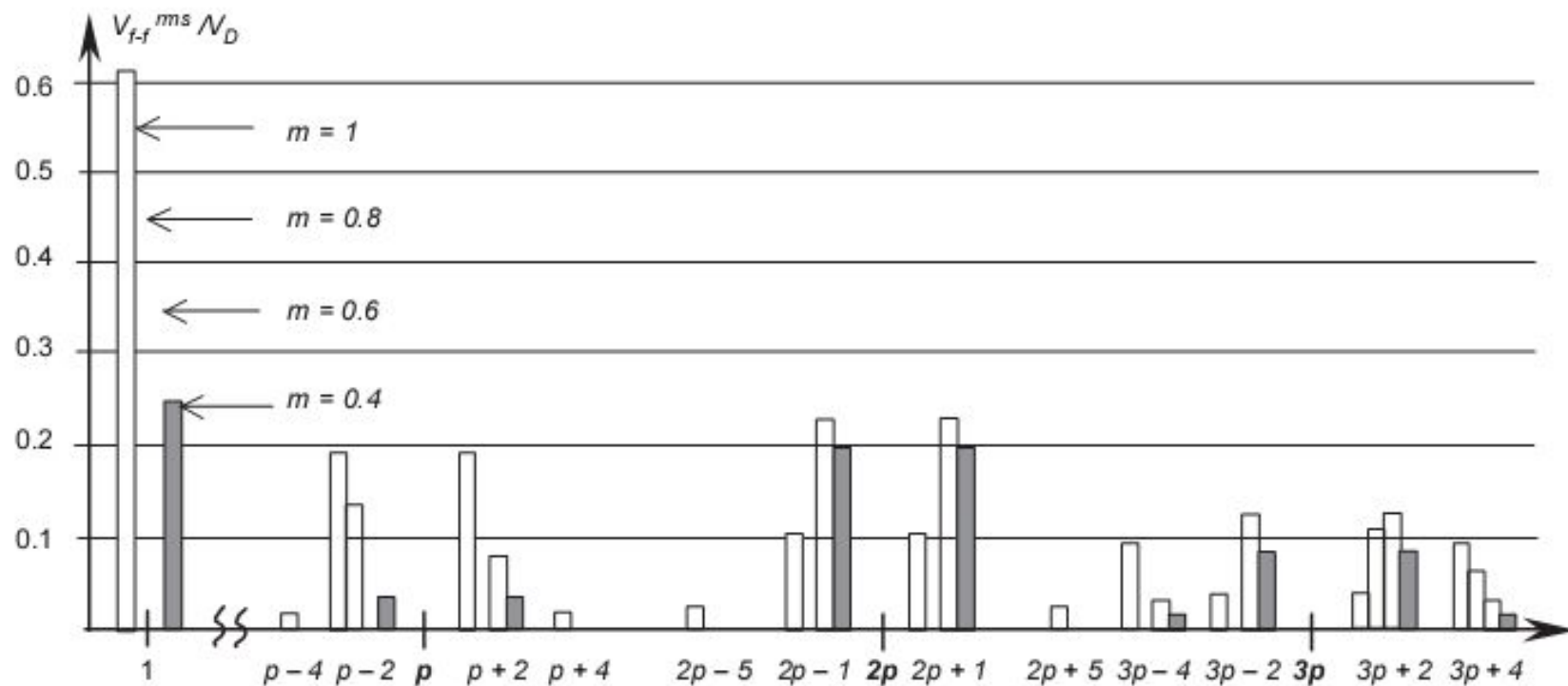
$$\bar{U}_{\text{MOD}} = \bar{U} - R\bar{I}_S - jX_S\bar{I}_S$$

На рисунке показаны соответствующие векторные диаграммы.

Сравнивая АИН, управляемый током и АИН, управляемый напряжением, видно, что в последнем случае нет необходимости в измерении тока. Однако, в схеме АИН, управляемым напряжением, необходимо **точно знать** величины **X_s , L_s и R** . Эти параметры не являются постоянными, что делает данную схему менее стабильной, чем схему АИН, управляемого током.

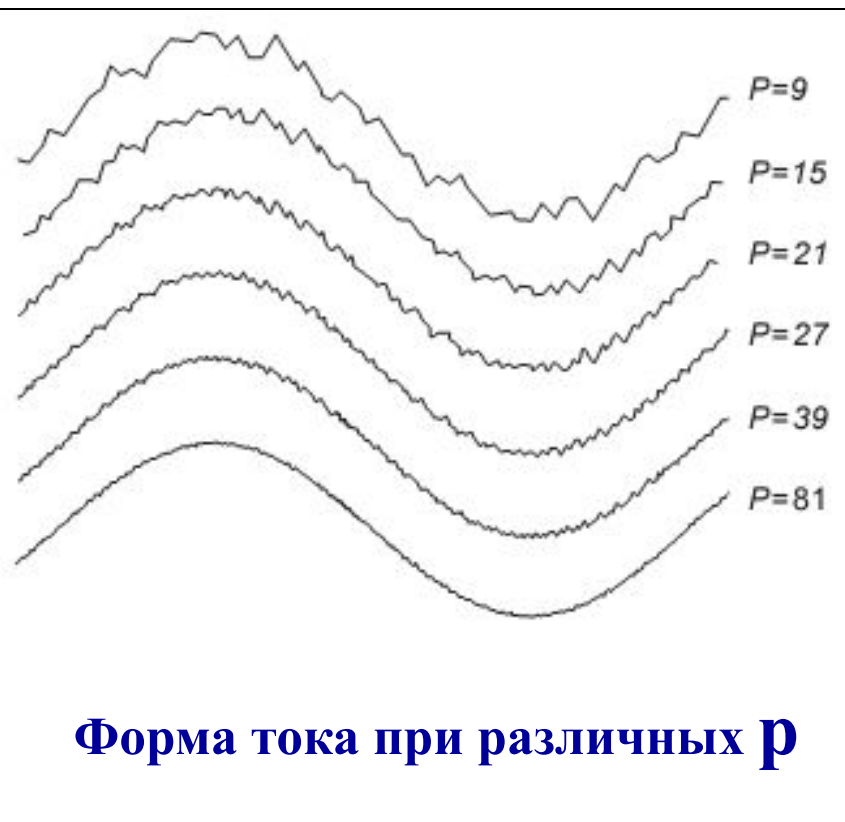
На практике для АИН, управляемым напряжением, применяют **синусоидальную** ШИМ, которая характеризуется **коэффициентом модуляции** (m) и **коэффициентом частоты** (p).

Гармонический состав при данном типе модуляции зависит от m и p . **Рекомендовано** для данного метода ШИМ, чтобы **$p < 21$** , а для снижения гармоник, **p** должно быть **целым числом**. Если **p кратно 3**, то ШИМ модуляция во всех трех фазах будет одинаковой.



Гармонический спектр синусоидальной ШИМ для $r=3k$

При увеличении m , амплитуда основной гармоники напряжения АФЕ увеличивается, но при этом возрастают и некоторые гармоники. При перемодуляции $m > 1$, основная гармоника напряжения изменяется нелинейно и появляется больше гармоник.



На рисунке показана форма тока, где большее значение p обеспечивает более «чистый» ток. Кривые получены для преобразователя с $U_d = 450$ В, $U_{\text{вых}} = 220$ В, $L_s = 2$ мГн, входной ток $I_s = 80$ А. Из кривых видно, что при $p > 21$ коэффициент искажений мал. При $p = 81$ и частоте коммутации 4050 Гц (базовая частота 50 Гц) получается практически синусоидальная форма кривой тока.

Простой метод регулирования для электроприводов *малой мощности* (10 – 20 кВт) основан на *прямом регулировании тока* DC звена

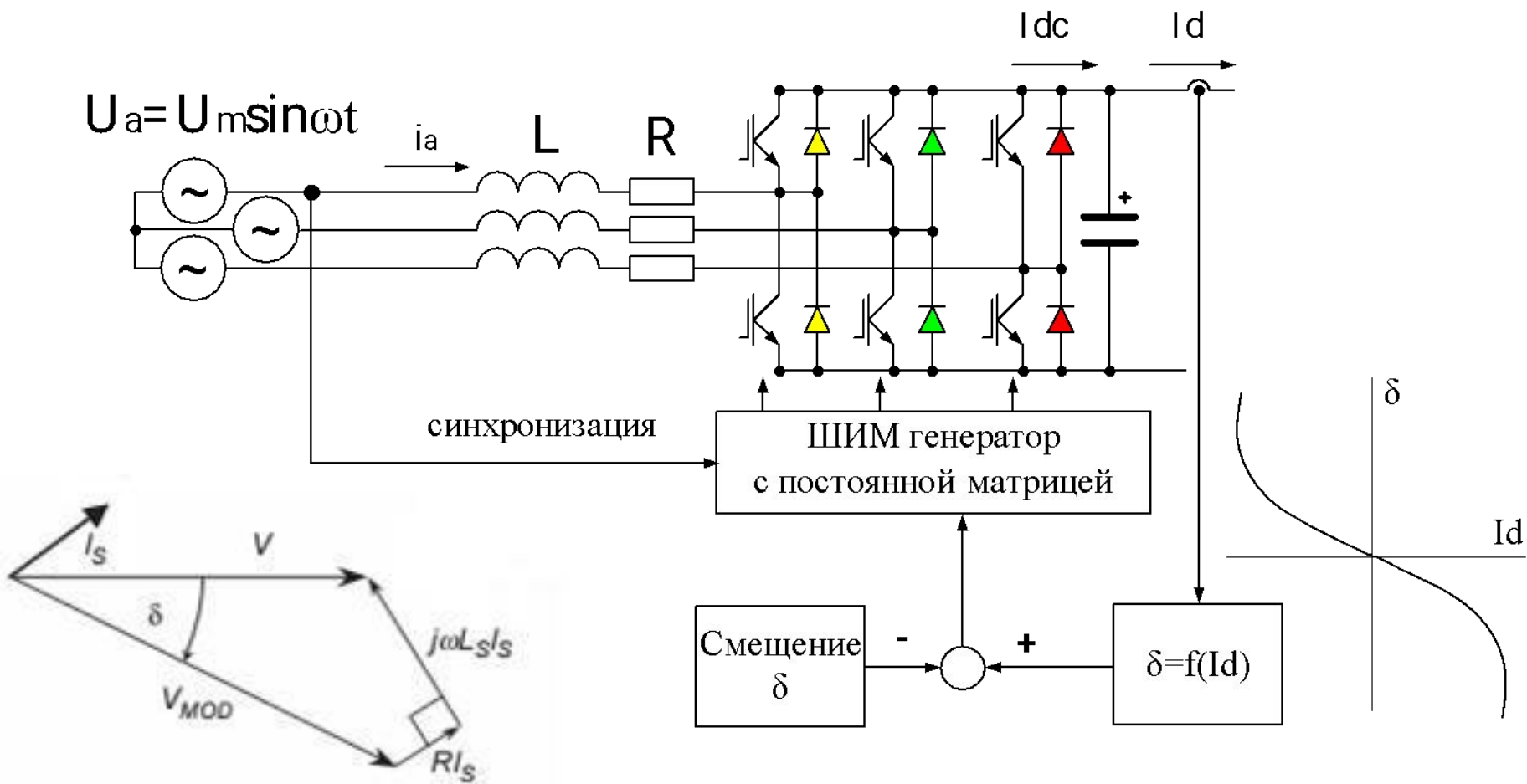


Схема АИН с ШИМ, управляемым нагрузкой

Основная гармоника напряжения, модулируемого преобразователем, создается фиксированным заданием ШИМ, которое выбирается исходя из снижения гармоник, поэтому задание ШИМ может быть прошито в ПЗУ.

Регулирование основано на **изменении угла мощности** между напряжением питающей сети и модулированного напряжения АФЕ. При **изменении угла изменяется и мощность**, передаваемая из сети переменного тока в сеть постоянного тока. При отрицательном значении угла, направление потока мощности из сети переменного тока – в сеть постоянного тока. Угол может регулироваться через ток в нагрузке I_d . Напряжение U_d не нуждается в измерении, т.к. данное регулирование основано на стабилизации напряжения U_d при любом угле δ и токе I_{dc} . При этих условиях можно найти соотношение между I_d и δ так, чтобы получить **постоянное напряжение звена постоянного тока при всех нагрузках**. Данное соотношение представлено ниже:

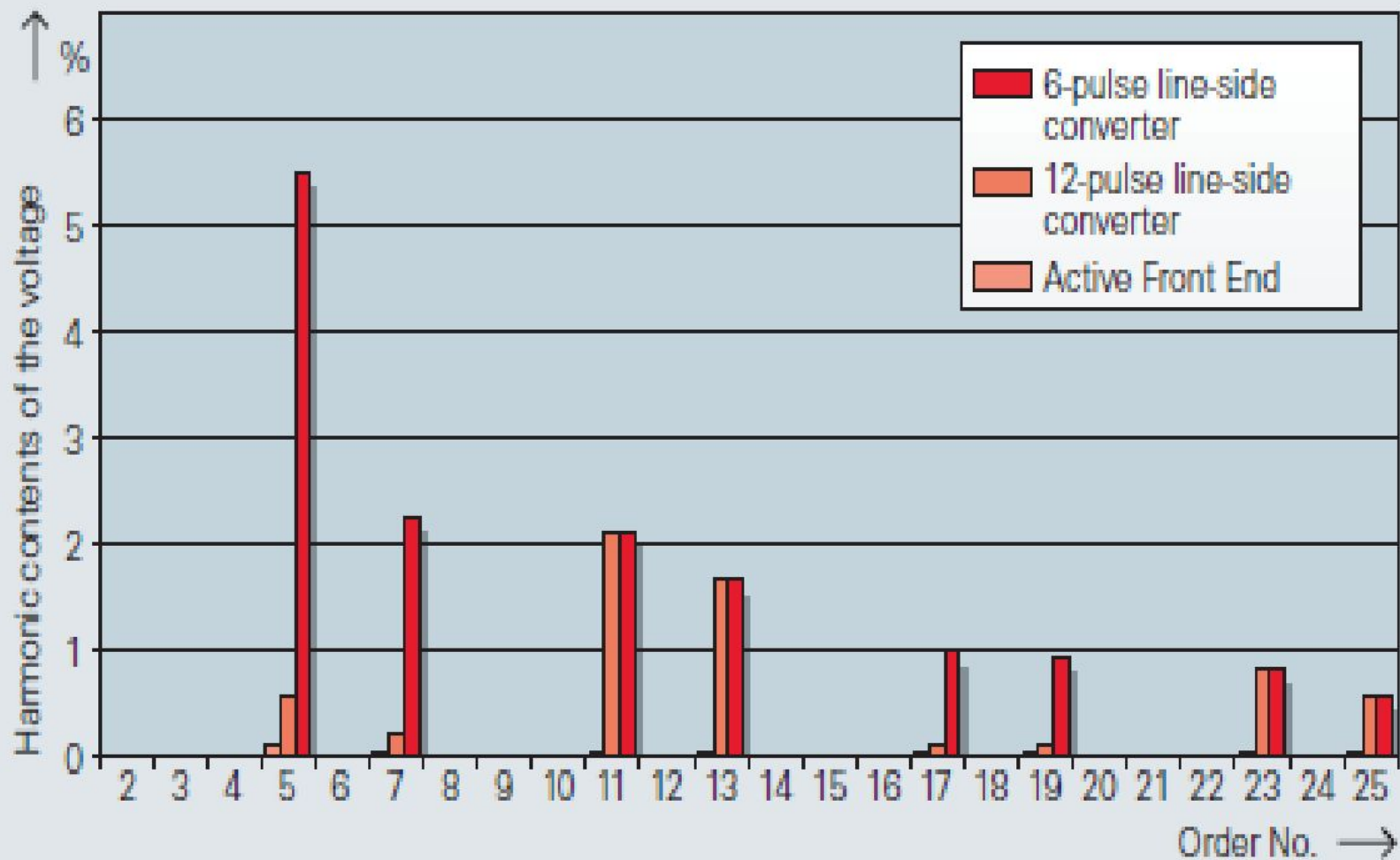
$$I_D = f(\delta) = \frac{U(\cos \delta - \frac{\omega L_s}{R} \sin \delta - 1)}{R(1 + \left(\frac{\omega L_s}{R}\right)^2)}$$

Из последнего выражения можно построить зависимость $\delta = f(I_D)$ для регулирования преобразователя. Это позволяет обеспечить опережающий $\cos(\phi)$ при нулевом регулировании (отсутствии регулирования).

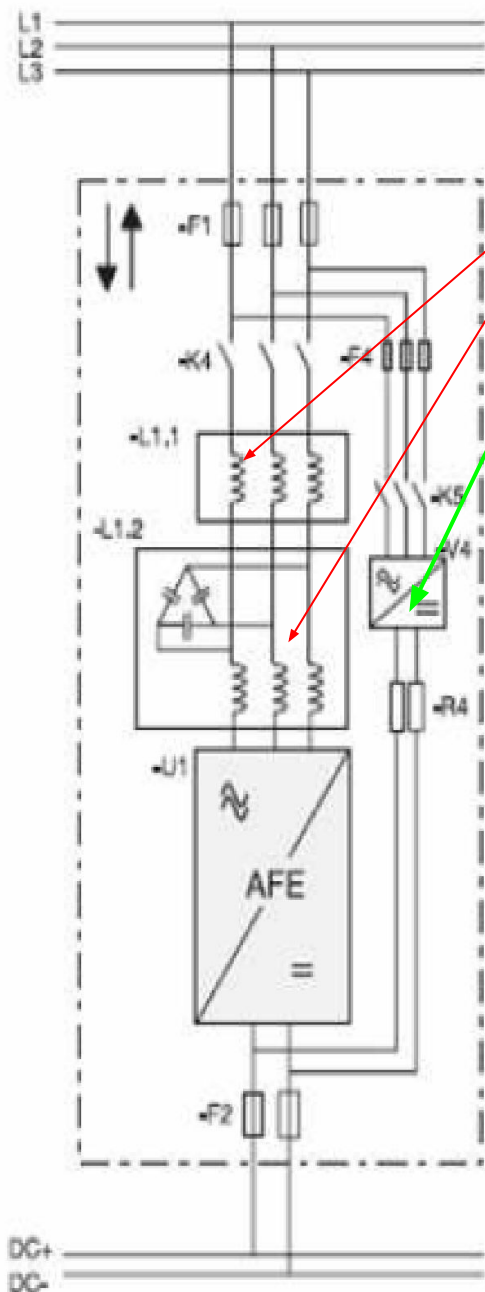
Данная схема обладает следующими *свойствами*:

- Нет необходимости в измерении входного тока и напряжения в DC звене;
- Работает при фиксированном неизменном задании ШИМ;
- Отличается хорошей стабильностью;
- Данная стабильность не ограничивается величиной емкости конденсатора;
- Может работать с опережающим $\cos \phi$ при различных нагрузках;
- Может работать при нулевом регулировании по последней формуле.

Недостатком является то, что при малых R в выражении невозможно определить точку устойчивой работы. Поэтому данный способ регулирования не применим при больших мощностях.

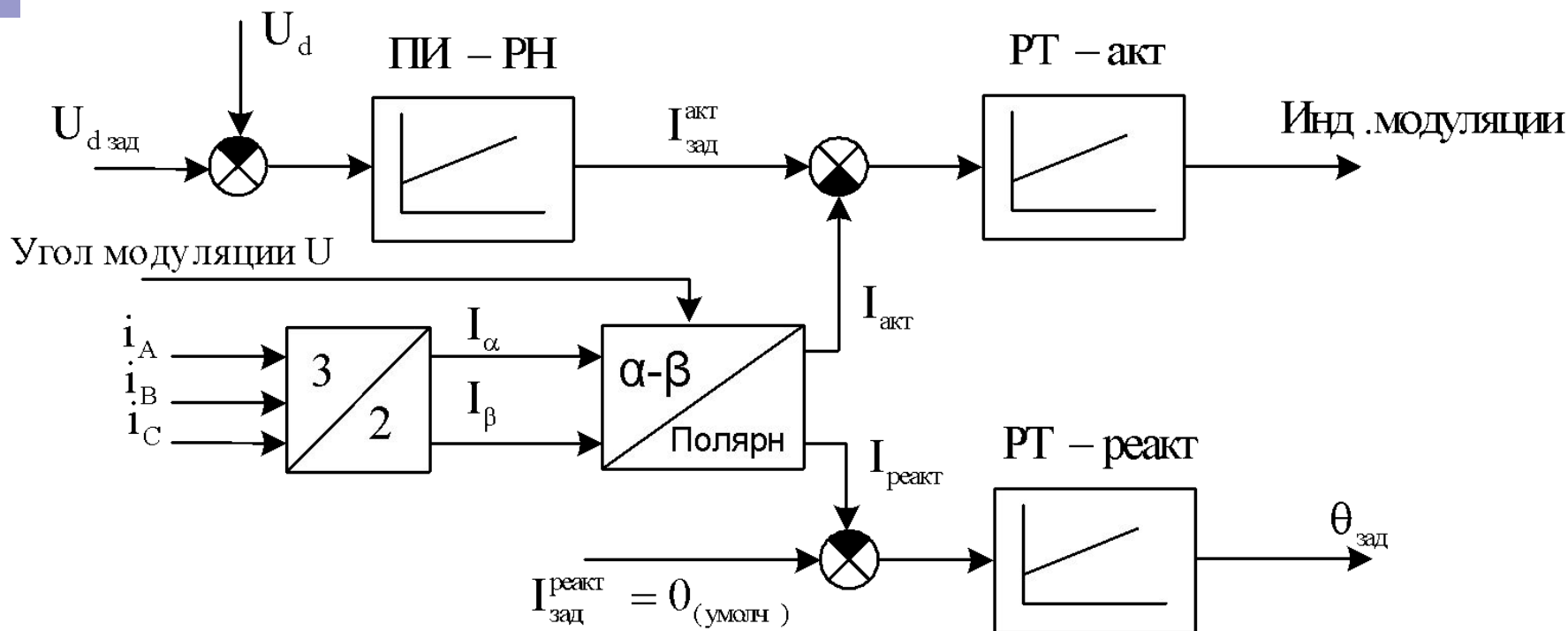


Сравнительный гармонический состав схем выпрямления



Для работы AFE необходимо подключение внешнего L(CL) фильтра и цепи предварительного заряда конденсаторов в цепи постоянного тока. Базовая конфигурация вход/выход для AFE состоит из опционных плат OPT-A1 и OPT-A2. При необходимости дополнительных цифровых входов применяется плата OPT-B5. Необходимо применение платы управления 561 или 661 как в LV7000-3.

Схема включения AFE LV7000-6



Структурная схема системы регулирования AFE выпрямителя LV7000-6

Значения коэффициентов ПИ – регулятора напряжения, установленные по умолчанию, соответствуют стандартному LCL фильтру и не нуждаются в изменении.



На основании измеренных токов в двух входных фазах, рассчитываются токи фаз I_a , I_b , I_c , затем осуществляется переход к двухфазной системе координат α - β и вычисляются активный и реактивный токи, подаваемые на входы соответствующих регуляторов тока.

На входе ПИ регулятора напряжения сравнивается заданное значение величины напряжения в звене постоянного тока с действительной величиной напряжения DC – звена. На основании вычисленной ошибки, рассчитывается заданное значение активного тока, подаваемого на вход регулятора активного тока. На выходе регулятора активного тока формируется величина задания индекса модуляции на входе блока управления преобразователем частоты (формируется амплитуда выходного напряжения).

На вход регулятора реактивного тока по умолчанию задается нулевое значение реактивного тока, что определяет работу AFE выпрямителя с $\cos(\phi)=1$. На выходе регулятора реактивного тока формируется задание угла сдвига модулированного напряжения AFE относительно напряжения питающей сети.