

Лекция

**Системы управления
регулируемого электропривода
на основе преобразователей
частоты**

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

- **Классификация и принципы построения скалярных преобразователей частоты**
- Преобразователи частоты (ПЧ) предназначены для преобразования переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты.
- Преобразователи частоты по построению разделяются на два типа:
- а) двухзвенные преобразователи частоты (ДПЧ);
- б) непосредственные преобразователи частоты (НПЧ).

Классификация и принципы построения преобразователей частоты

- В ДПЧ первое звено представляет собой выпрямитель (управляемый или неуправляемый) с фильтром на выходе, а второе - автономный инвертор.
- Таким образом, нагрузка связана с сетью через два звена, поэтому происходит двойное преобразование энергии.
- Второе звено в ДПЧ может быть выполнено как на основе автономного инвертора напряжения (АИН), так и на основе автономного инвертора тока (АИТ).

Классификация и принципы построения преобразователей частоты

- ДПЧ позволяют получить на выходе частоты как меньшие, так и большие входных. Их недостаток – двойное преобразование энергии, ведущее к увеличению потерь.
 - НПЧ выполняются на основе реверсивных преобразователей. Однофазный НПЧ представляет собой двухкомплектный реверсивный преобразователь, на выходе которого подключена нагрузка. Каждый комплект вентиля пропускает одну полуволну тока. Трехфазный НПЧ представляет собой три реверсивных преобразователя, каждый из которых питает одну фазу нагрузки.
 - НПЧ позволяют получить на выходе частоты, только меньшие входных.
- В НПЧ происходит однократное преобразование энергии.**

Классификация и принципы построения преобразователей частоты

- **Двухзвенные преобразователи частоты**

Двухзвенный преобразователь частоты на основе АИН содержит выпрямитель, сглаживающий фильтр и АИН (рис. 1).

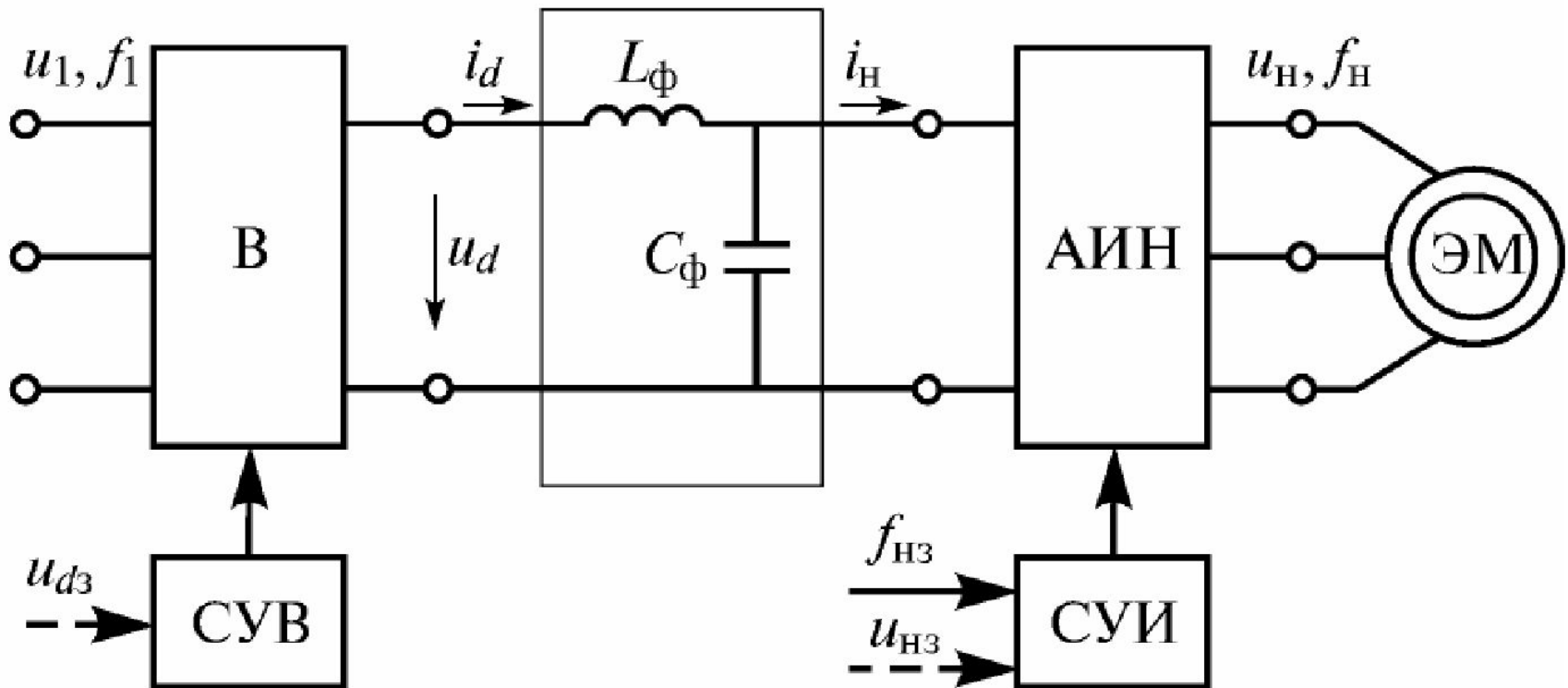
Рис. 1. Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты на основе АИН, работающего на двигатель переменного тока

(В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения;

ЭМ – электрическая машина; СУВ, СУИ – системы управления выпрямителем и автономным инвертором

(Штриховой линией показаны воздействия и связи, которые могут отсутствовать)

Двухзвенные преобразователи частоты (рис.1)



Двухзвенные преобразователи частоты

- Сглаживающий фильтр обычно представляет собой Г-образный LC-фильтр.
- Выпрямитель может быть управляемым и неуправляемым, если функции регулирования напряжения возлагаются на АИН. Если требуется рекуперация энергии в питающую сеть, то выпрямитель превращается в двухкомплектный реверсивный преобразователь, обеспечивающий двухсторонний энергообмен.

Двухзвенные преобразователи частоты

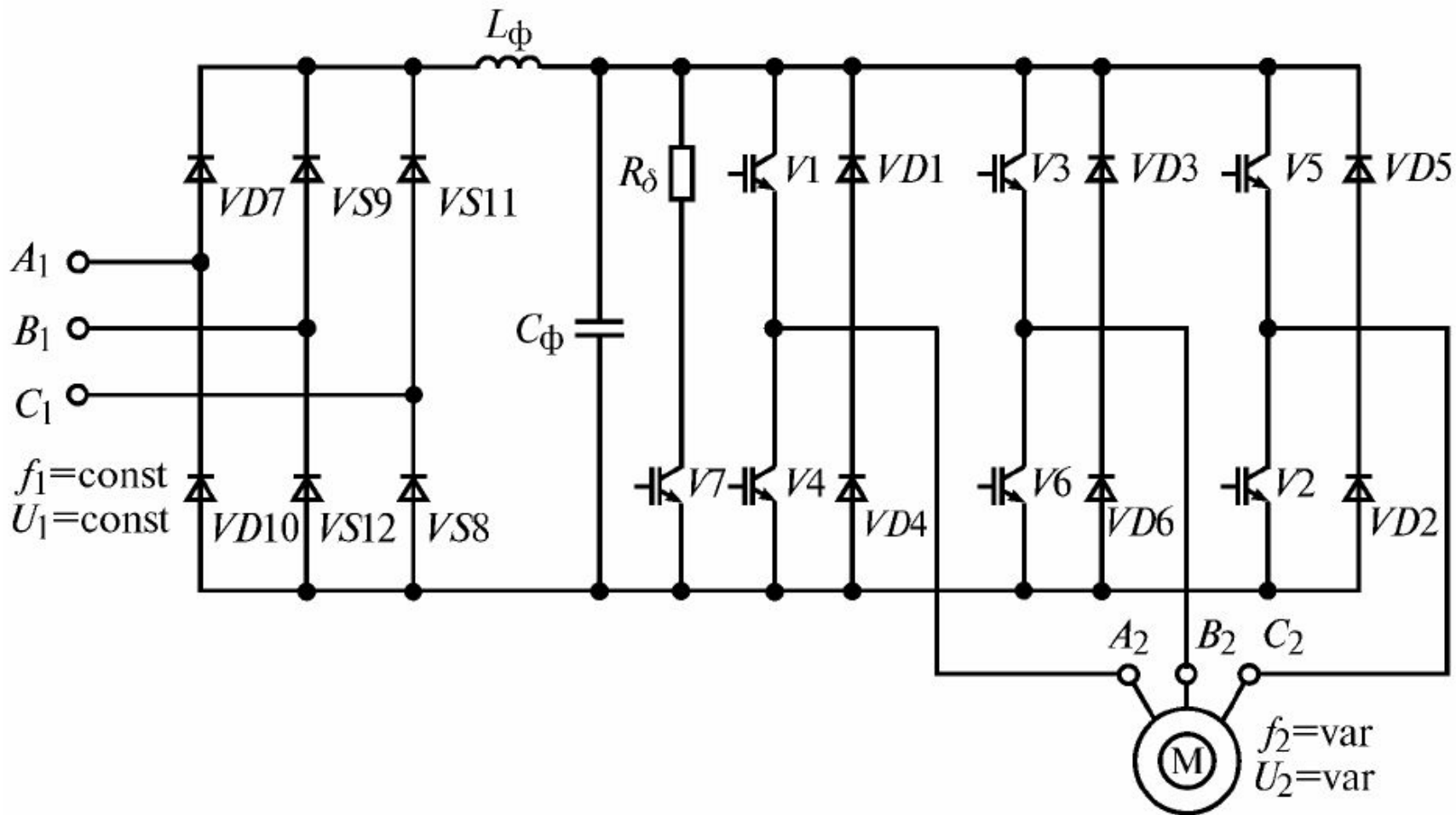
- Регулирование напряжения на выходе ПЧ на основе АИН может осуществляться как с помощью управляемого выпрямителя, так и с помощью АИН с импульсной модуляцией.
- Из импульсных методов регулирования выходного напряжения наибольшее распространение получили широтно-импульсное регулирование (ШИР) и широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Частота модуляции должна быть хотя бы на порядок выше, чем наибольшая частота выходного напряжения.

Частота выходного напряжения задается системой управления.

ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН сШИМ

- На рис. 2 приведена схема двухзвенного преобразователя частоты для питания асинхронного двигателя. Он состоит из неуправляемого выпрямителя (В), автономного инвертора (АИН), сглаживающего фильтра (СФ) и блока тормозного резистора (БТР), применяемого при торможении.

ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ (рис.2)



ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ

- Неуправляемый выпрямитель выполнен на диодах $VD7 - VD12$, автономный инвертор на транзисторах $VT1 - VT6$, шунтированных диодами $VD1 - VD6$. Диоды служат для пропускания тока при выключении транзисторов. Одновременно они играют роль обратного выпрямителя при торможении двигателя. Фильтр $L\phi C\phi$ служит для сглаживания напряжения выпрямителя. За счет применения ШИМ осуществляется регулирование напряжения на выходе ПЧ и приближение его формы к синусоидальной.

ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ

- Торможение обеспечивается переводом АИН в режим управляемого выпрямителя напряжения, обеспечивающего повышение напряжения на конденсаторе фильтра, несмотря на уменьшение скорости вращения двигателя.
- Роль фазных индуктивностей при этом выполняют индуктивности рассеяния фаз двигателя. При превышении напряжением на конденсаторе заданного значения транзистор V_{T7} включается и энергия, передаваемая от электрической машины, рассеивается в тормозном резисторе

ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ

- Описанное торможение получило в литературе название **инверторного торможения**, хотя очевидно, что при этом торможении не происходит инвертирования.
- В настоящее время в таких ПЧ обычно применяются силовые модули, содержащие один или несколько ключей, выполненных на IGBT, шунтированных диодами.
- Недостаток такого ПЧ – невозможность рекуперации энергии в сеть при торможении.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

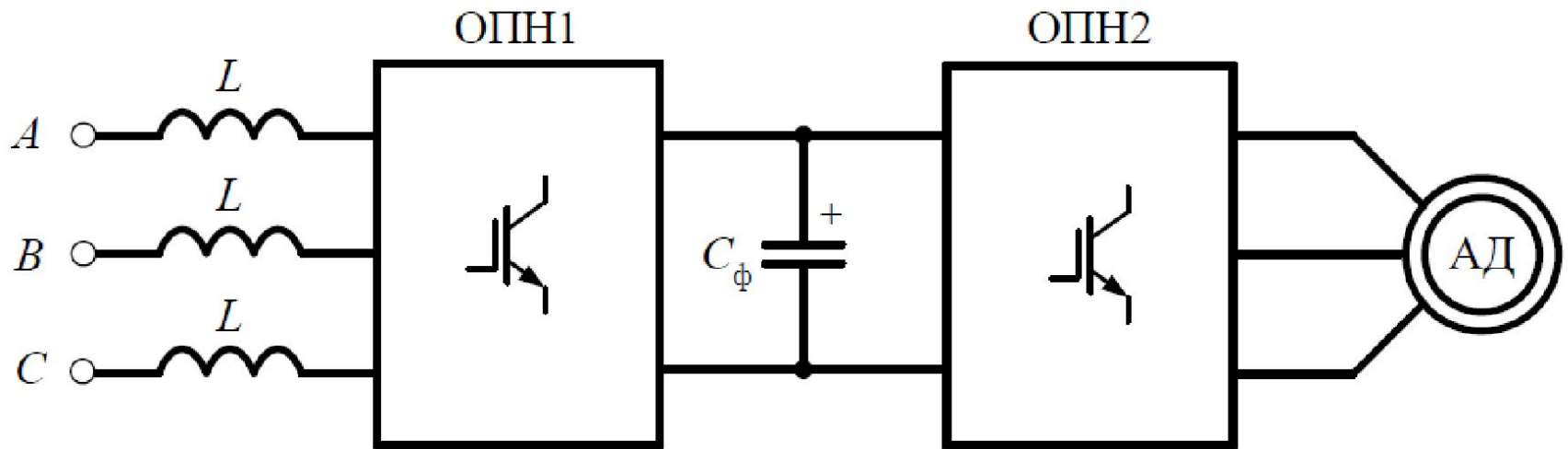
- На рис. 3 приведена схема **ДПЧ, обеспечивающего передачу энергии в обоих направлениях** – от питающей сети к двигателю и от электрической машины в генераторном режиме в сеть. Такие ДПЧ получили название **четырёхквadrантных**, так как их внешние характеристики расположены во всех квадрантах.
- Схема содержит два обратимых преобразователя напряжения (ОПН).
- ОПН1 на стороне сети в основном работает в выпрямительном режиме, когда энергия из сети через второй ОПН, работающий в инверторном режиме, передается к двигателю.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

- При торможении ОПН2, подключенный к двигателю переходит в выпрямительный режим, а ОПН1, подключенный к сети, в инверторный режим. При этом происходит рекуперация энергии в сеть.

Если задать схеме управления на входе $\cos\varphi = \pm 1$, то во всех режимах при регулировании и торможении двигателя из сети будет потребляться или в сеть будет отдаваться практически только активная мощность, а ток будет практически синусоидален, что определяет минимальное вредное влияние на питающую сеть.

СХЕМА ПЧ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ (Рис.3)



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

- На рис. 13.6 приведена функциональная схема рекуперирующего ДПЧ с регулируемым коэффициентом мощности.
- В схеме имеются следующие элементы:
ОПН1, подключенный к сети,
- ОПН2, подключенный к двигателю, датчики тока и напряжения ДТ1 и ДН1
- на стороне сети и ДТ2 и ДН2 на стороне постоянного напряжения.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

- Требуе-
- мая мощность на стороне постоянного тока определяется измерением сред-
- них значений U_d и I_d , а затем и мощности P_d с помощью вычислителя ВМ,
- куда поступают сигналы с ДН2 и ДТ2 через фильтр Ф. По действующему
- значению напряжения сети U_1 , определенному с помощью вычислителя на-
- пряжения ВН, и с учетом заданного угла φ_1 определяется ток $I_{1\text{зад}}$, обеспе-
- чивающий заданную мощность.

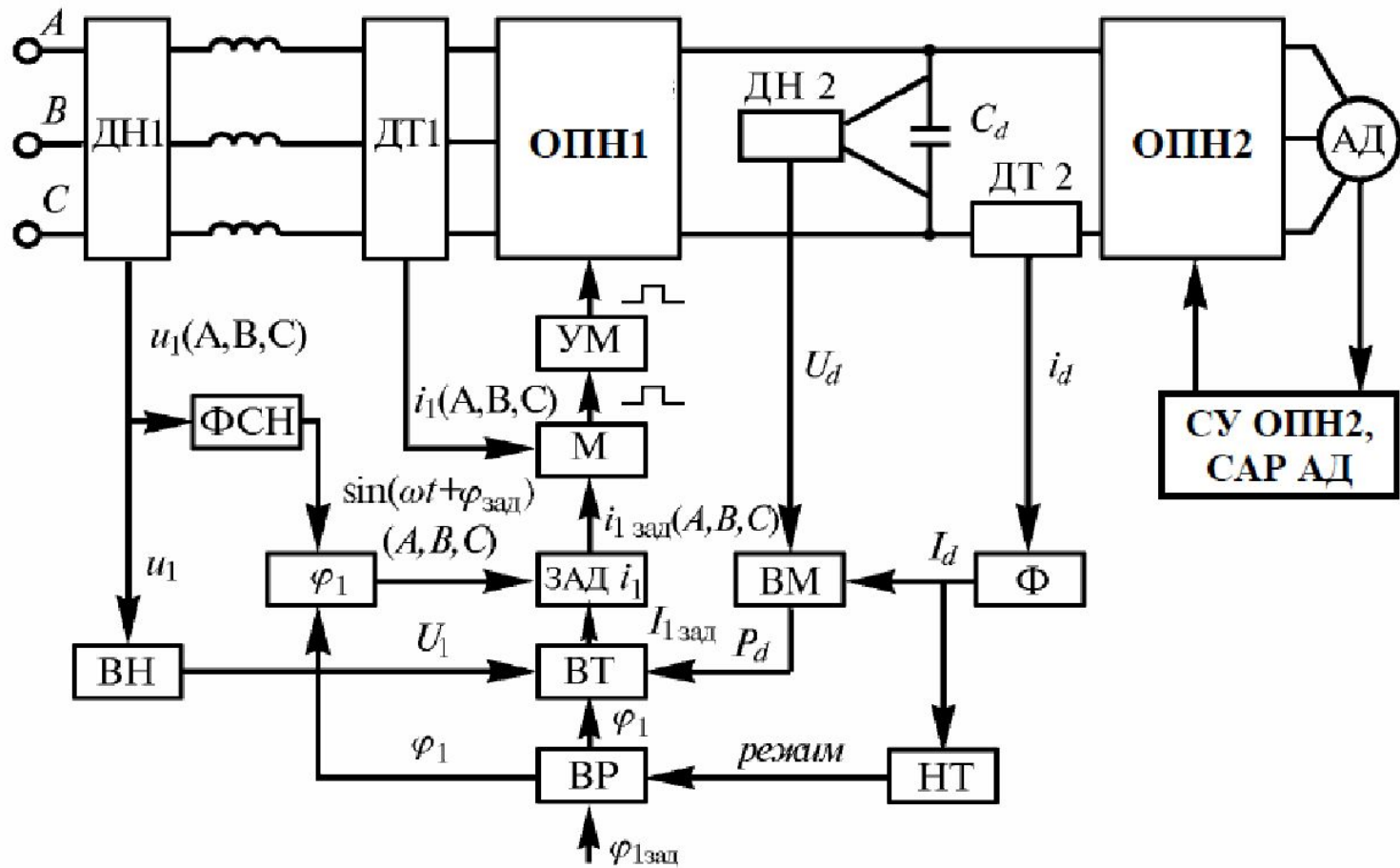
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

- Блок ФСН формирует синусоидальное напряжение, повторяющее напряжение сети, а блок « $\varphi 1$ » формирует заданную синусоиду с учетом фазового сдвига $\varphi 1$. В блоке «ЗАД i_1 » формируется заданная синусоида тока. В модуляторе М она сравнивается с сигналом датчика тока ДТ1 i_1 , и формируются управляющие импульсы, которые через усилитель мощности УМ поступают на транзисторы.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

- Блок НТ определяет
- 310
- направление тока (выпрямительный или инверторный режим). Блок выбора
- режима ВР в соответствии с сигналом от НТ задает угол φ_1 .

Функциональная схема рекуперирующего ДПЧ с регулируемым коэффициентом мощности

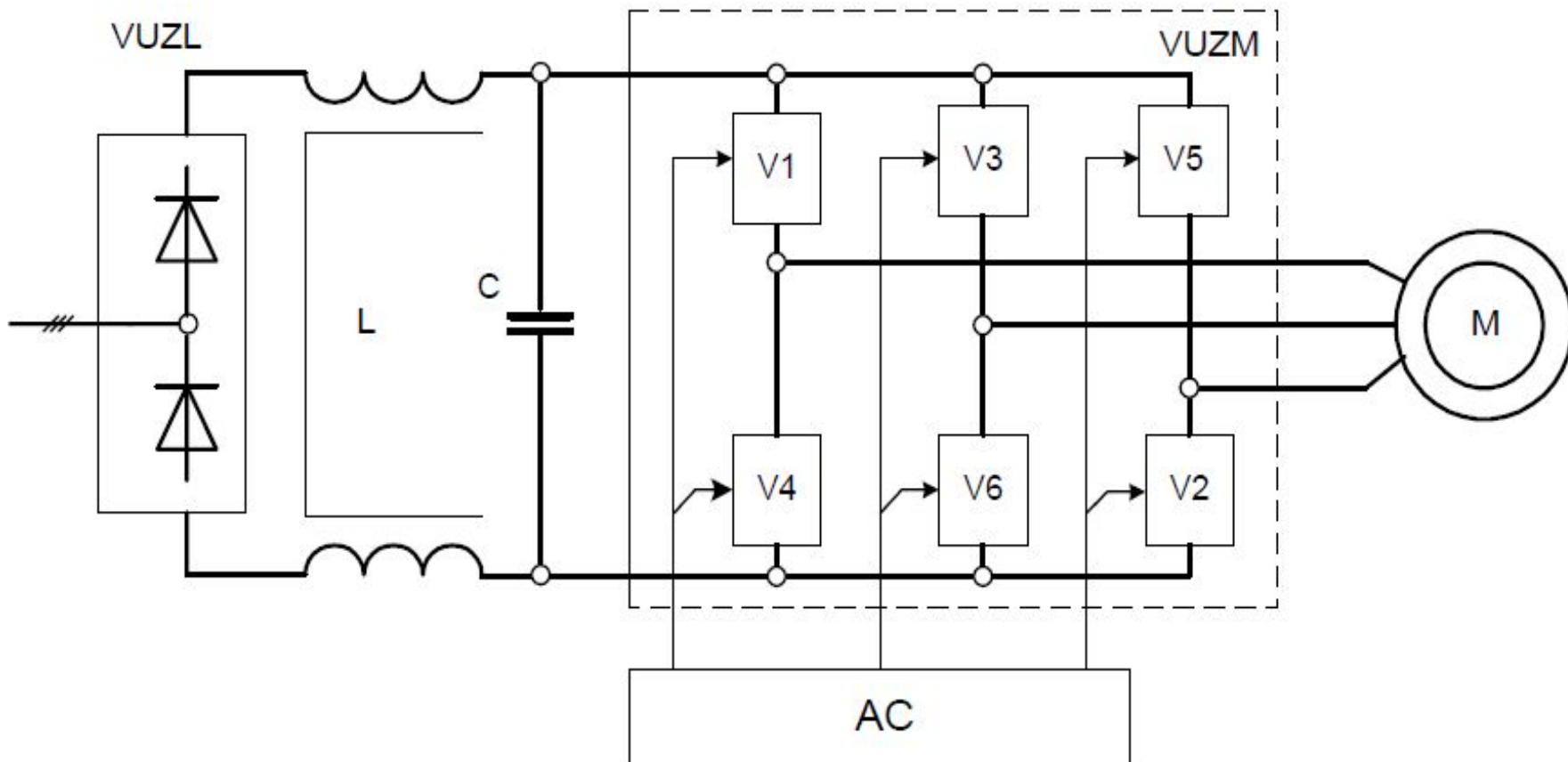


ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ

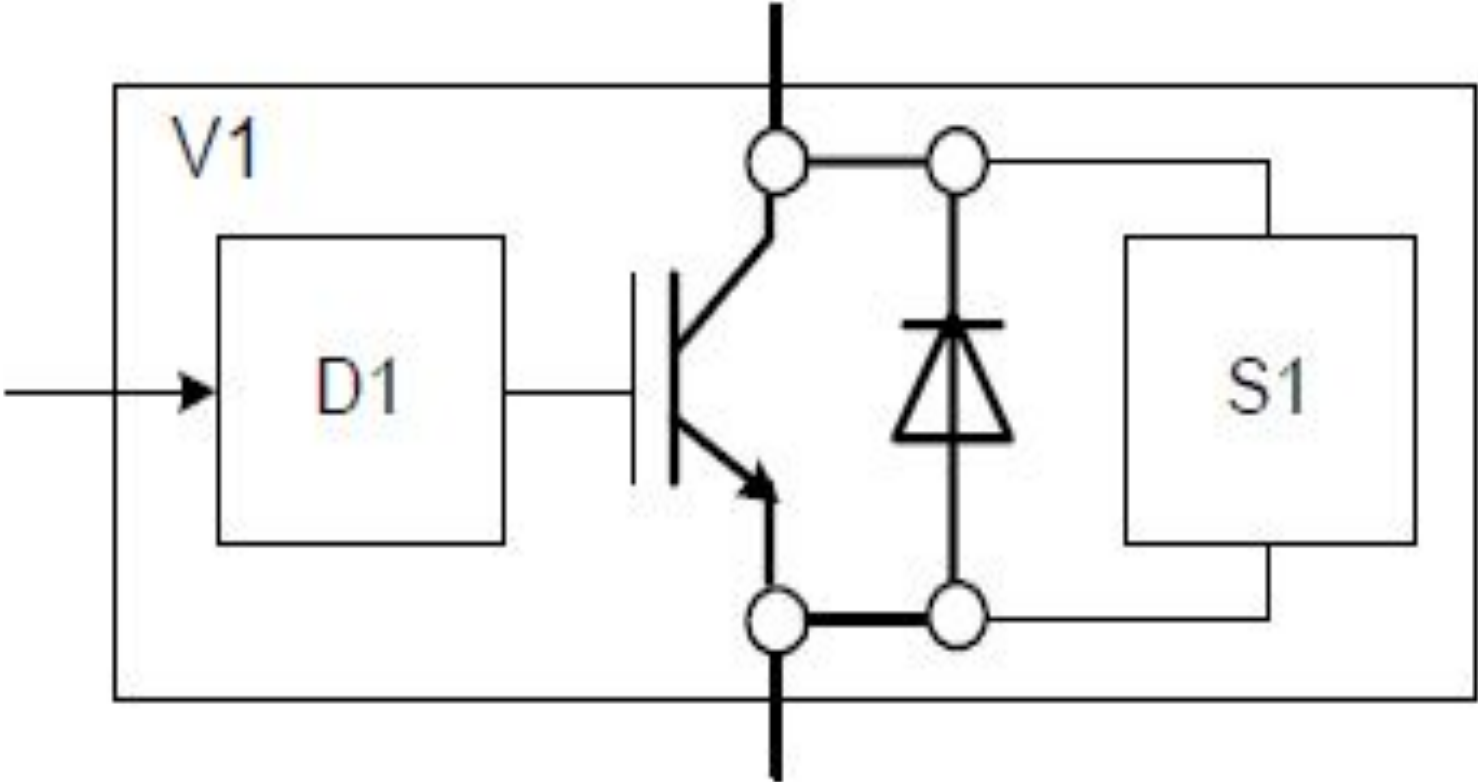
- ***Схема главных цепей***
- Главная цепь (рис. 4.1) содержит:
 - • выпрямитель UZL , обычно диодный;
 - • реактор фильтра L ;
 - • конденсатор фильтра C ;
 - • инвертор напряжения UZM .
- Выпрямитель обычно подключён к сети через трансформатор или
- токоограничивающий реактор, не показанный на схеме.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ (рис.4.1)

CONTROLLED ASYNCHRONOUS DRIVE ON THE BASE OF PWM VSI



**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ
ИНВЕРТОРА
НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ (рис.4.1)**



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ (рис.4.2)

4.2. Принцип ШИМ

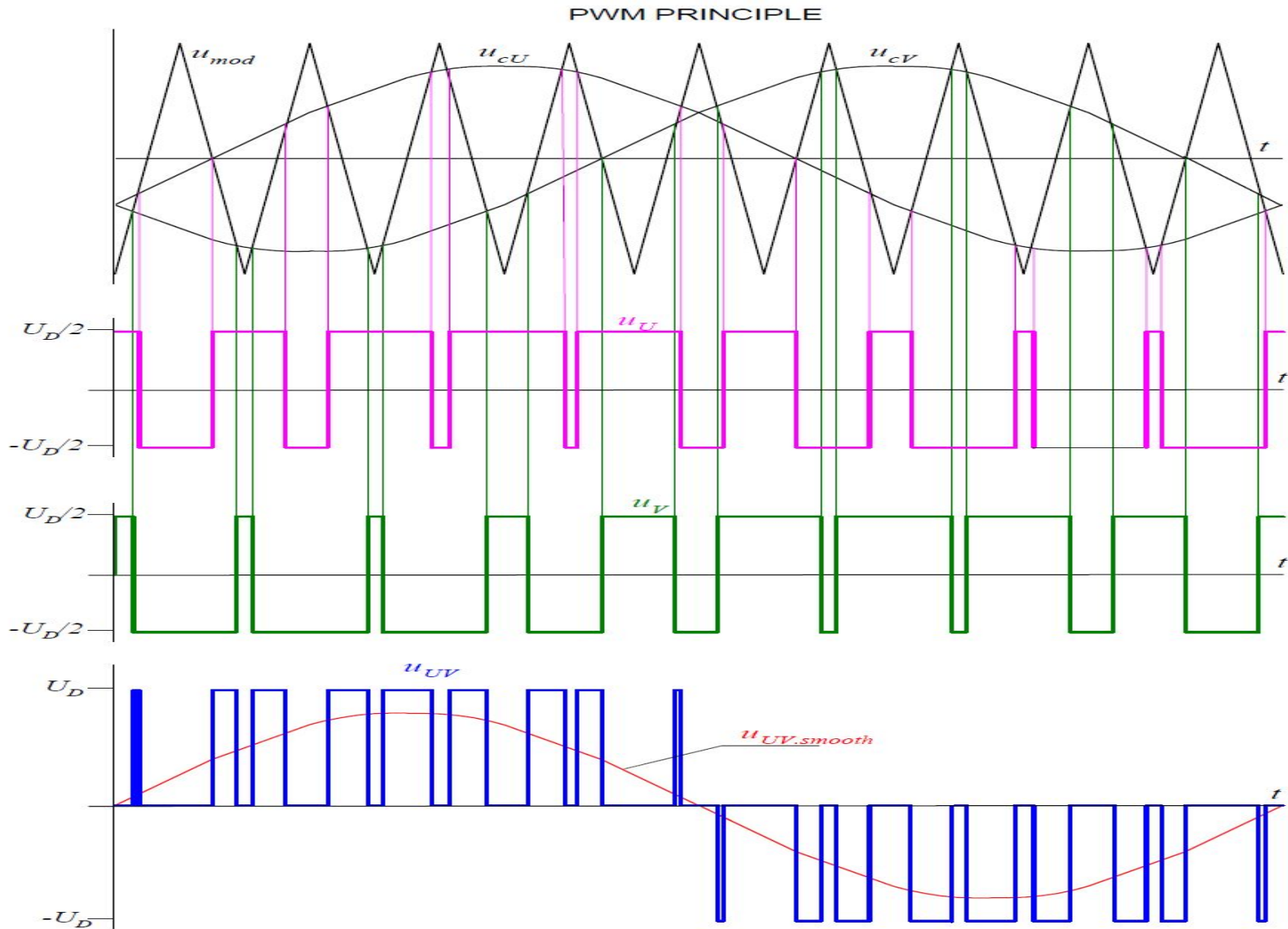


Рис. 4.2. Принцип ШИМ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ

- Инвертор содержит шесть полупроводниковых ключей. Каждый ключ содержит полностью управляемый полупроводниковый элемент, в настоящее время IGBT, и обратный диод. Каждый IGBT управляется драйвером (D1 - D6). Драйвер:
 - усиливает и формирует импульсы управления для IGBT;
 - формирует диагностические сигналы для устройства автоматического управления;
 - гальванически изолирует цепи управления полупроводниковым элементом от устройства управления приводом (обычно через оптоканалы).

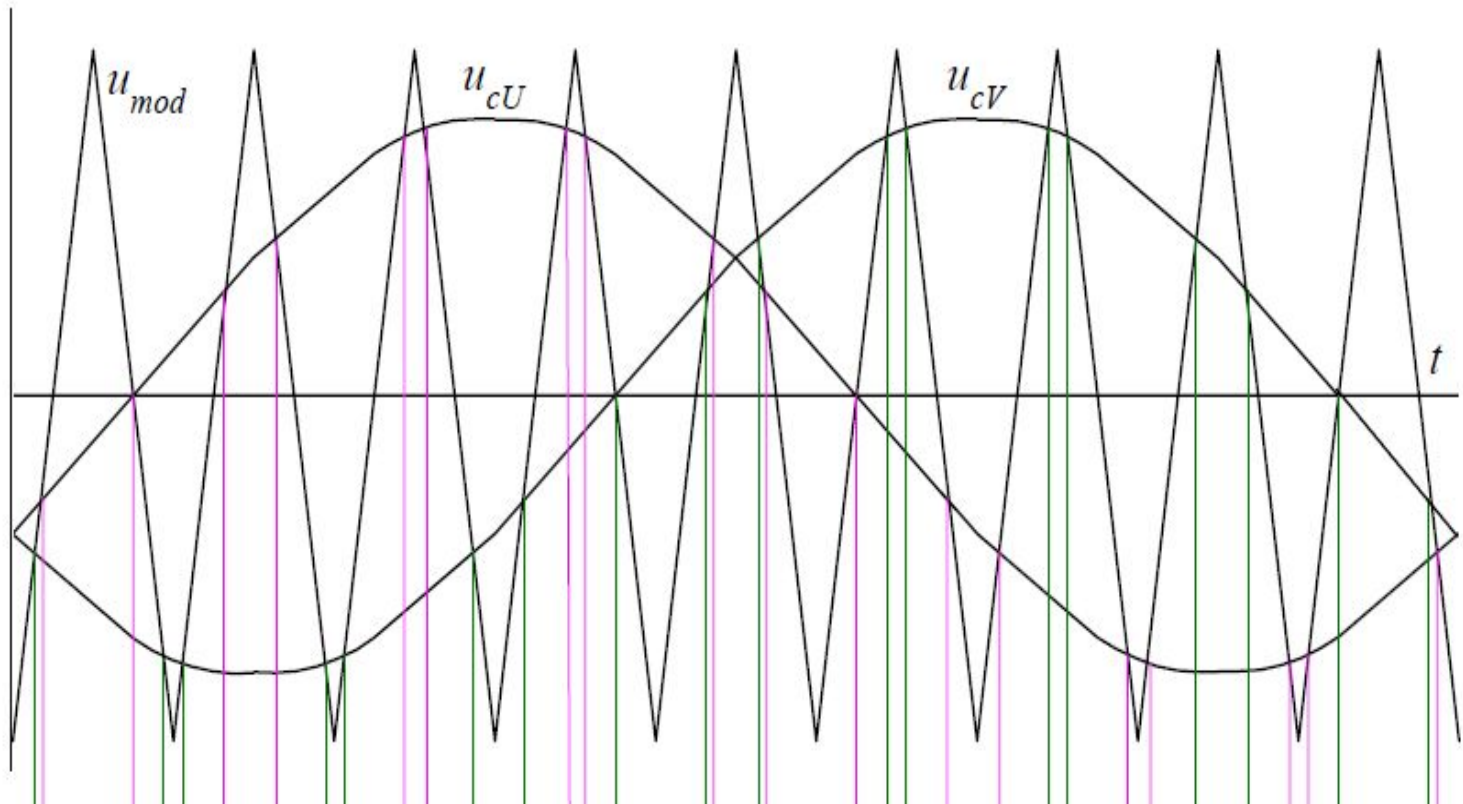
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ

- **Ключи в каждой паре, например $V1$ и $V4$, переключаются с определённой частотой – частотой модуляции.**
- **Чем большую часть периода модуляции открыт ключ $V1$, тем выше среднее значение потенциала точки U за период модуляции (рис. 3.2).**
- **Частота модуляции для современных IGBT – 1-20 кГц.**

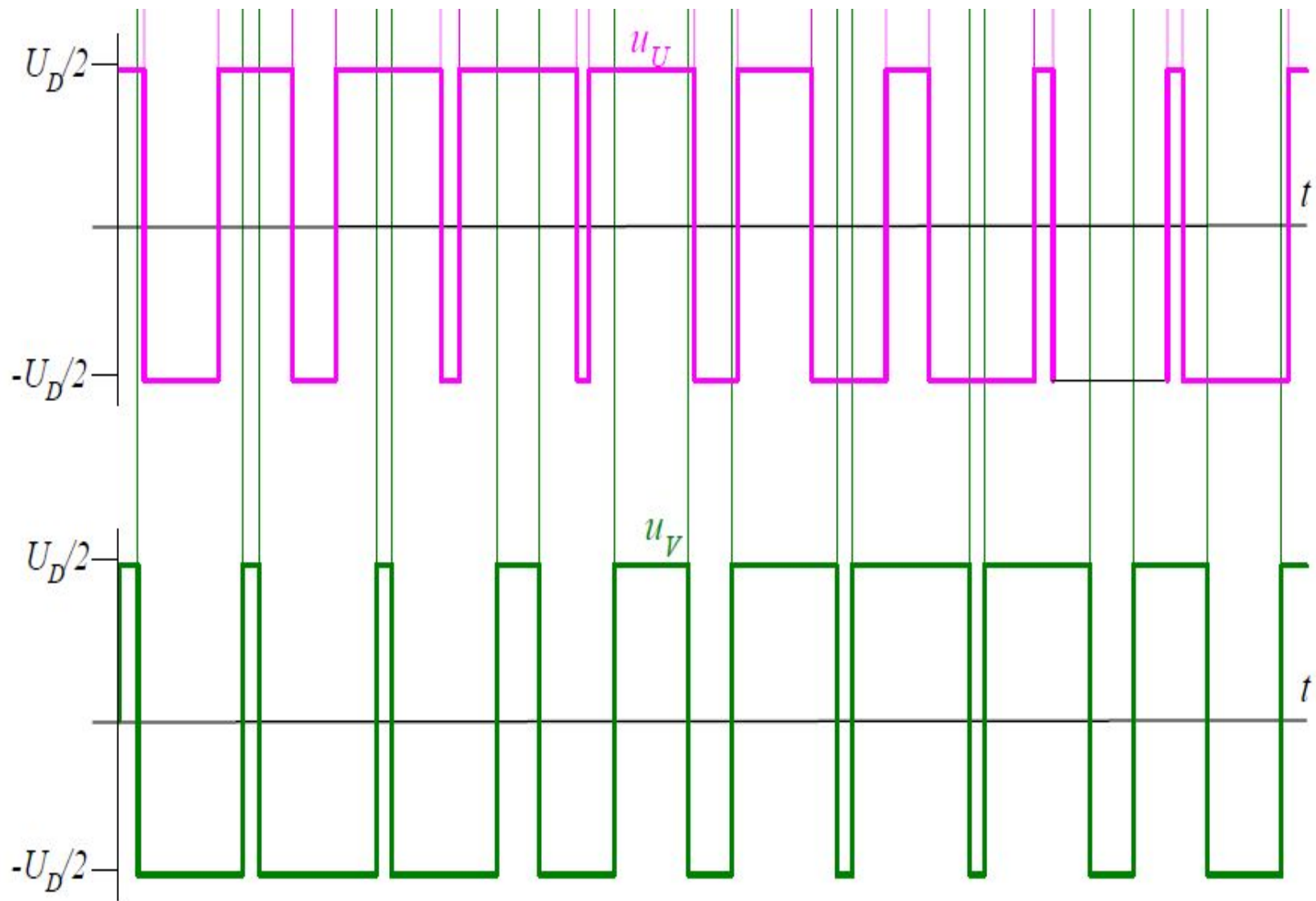
ПРИНЦИП ШИМ

4.2. Принцип ШИМ

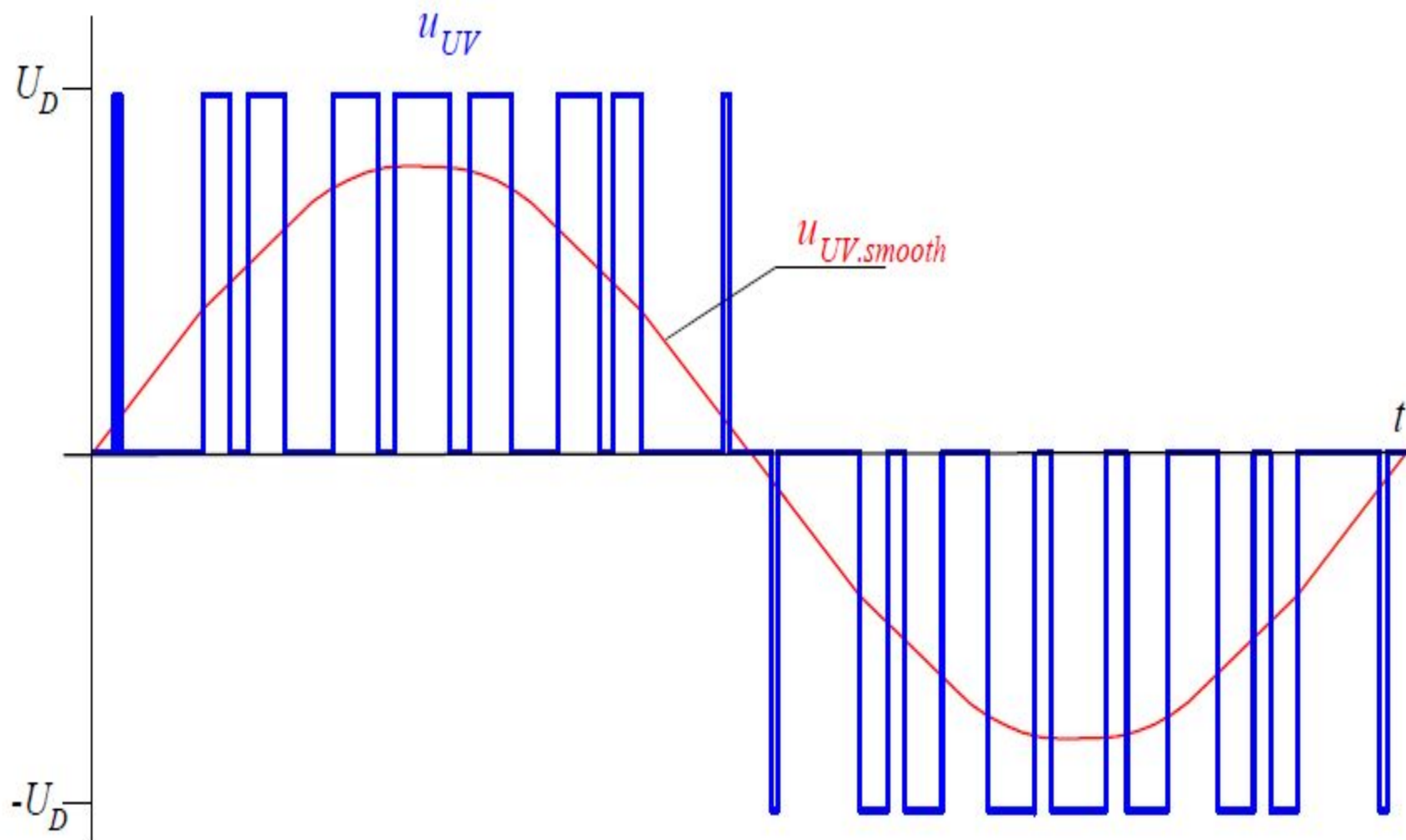
PWM PRINCIPLE



ПРИНЦИП ШИМ



ПРИНЦИП ШИМ



ПРИНЦИП ШИМ

- В большинстве случаев переключение ключей осуществляется путём сравнения управляющего сигнала (ucU в нашем случае) с периодическим модулирующим сигналом (в нашем примере – треугольной пилой).

Сглаженная составляющая потенциала

- точки U оказывается пропорциональной управляющему сигналу ucU .

ПРИНЦИП ШИМ

- Кроме сглаженных составляющих, линейные напряжения статора содержат также пульсации.
- При высокой частоте модуляции пульсации токов статора оказываются несущественными (из-за индуктивностей статора).

ПРИНЦИП ШИМ

- Однако пульсации напряжения с крутыми перепадами оказывают негативное влияние
- на изоляцию обмоток статора. Поэтому данный вид ПЧ нельзя использовать непосредственно для серийных высоковольтных двигателей. Ситуация более благоприятна в многоуровневых инверторах напряжения с ШИМ.
- В таких инверторах потенциал каждого выходного зажима переключается не между максимальным и минимальным уровнями, а между промежуточными уровнями.

Торможение в электроприводах на основе ИН с ШИМ

- Диодный выпрямитель не может передавать энергию в питающую цепь. Энергия, рекуперируемая электроприводом, может только повышать напряжение и энергию конденсатора фильтра.
- Для рекуперации энергии требуется дополнительное оборудование.
- Простейший вариант торможения – резистор, подключаемый параллельно конденсатору фильтра через автоматически управляемый транзисторный ключ. В этом варианте энергия от тормозных режимов электропривода преобразуется в тепло.

Торможение в электроприводах на основе ИН с ШИМ

- Если эта энергия достаточно велика, такой вариант невыгоден. В этом случае используется дополнительное устройство для рекуперации энергии в сеть (дополнительный ИН с ШИМ или реверсивный тиристорный выпрямитель вместо диодного выпрямителя).

Процессы при включении питания главных цепей

- При включении питания в схеме рис. 4.1 напряжение конденсатора устанавливается со значительным перерегулированием, максимальное напряжение в этом процессе может почти вдвое превышать номинальное значение. Чтобы избежать этого, используют дополнительные средства.
- В некоторых случаях выполняется предварительное включение питания через резисторы.

Процессы при включении питания главных цепей

- Более радикальное решение – регулируемый тиристорный выпрямитель. Регулирование выполняется таким образом, чтобы уменьшить максимальный ток от сети и максимальное напряжение конденсатора в процессе включения питания.

По окончании процесса заряда выпрямитель полностью открывается и работает как диодный выпрямитель.

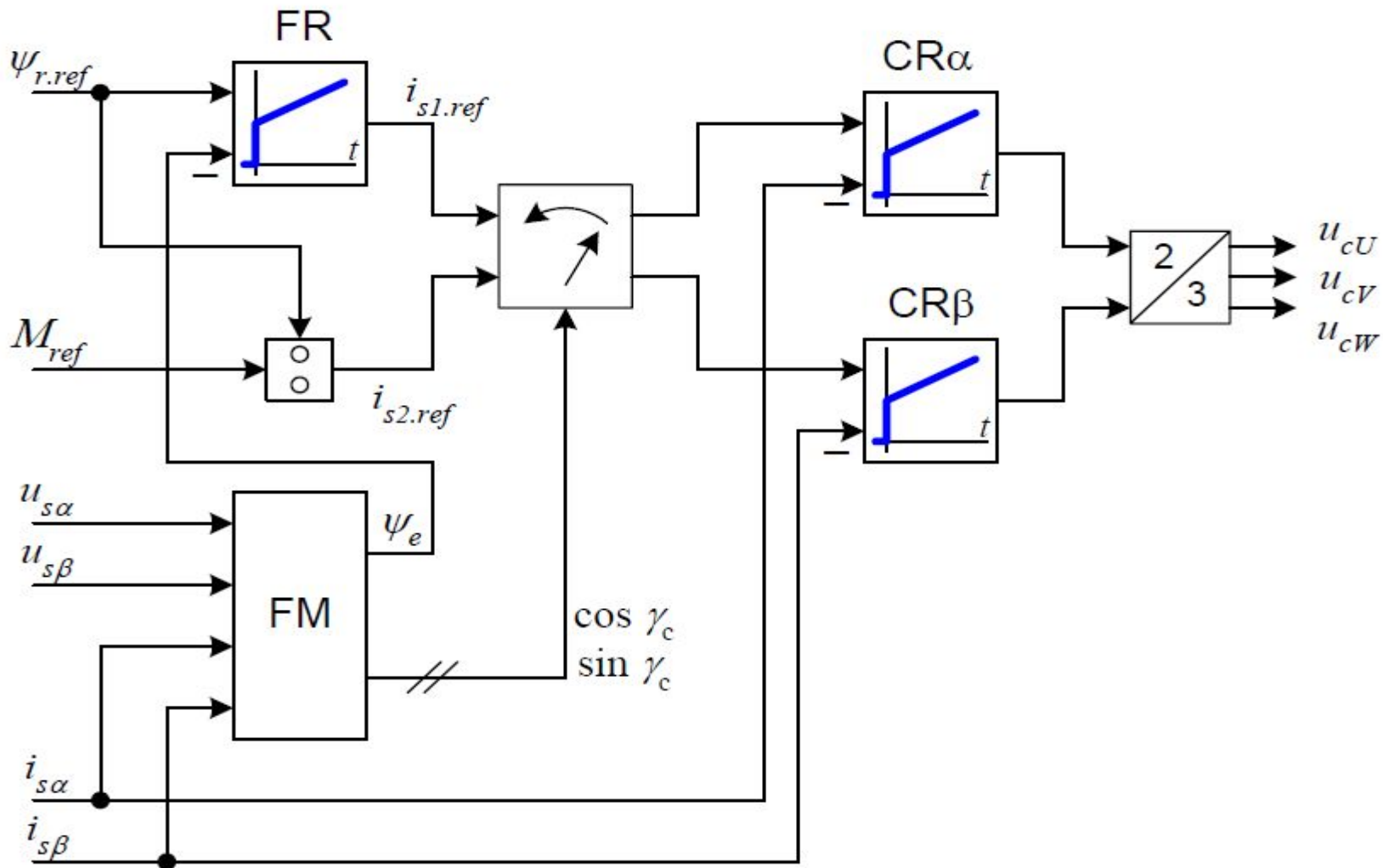
- Наиболее совершенным вариантом является симметричный ИН с ШИМ (4.6).

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Формирование компонент тока

- Принцип действия асинхронного электропривода с векторным управлением, ориентированным по полю, состоит в том, что формируются компоненты вектора токов статора i_s (рис. 2.6): компонента i_{s1} для необходимого поля двигателя и компонента i_{s2} для необходимого момента.
- Этот принцип реализуется, например, в функциональной схеме рис. 7.1.

Рис. 7.1. Простой пример системы векторного управления асинхронного ЭП



Векторное управление асинхронным ЭП

Важной частью системы является измеритель ФМ вектора эквивалентного магнитного потока ротора ψ_r – его модуля ψ_r и функций его аргумента (угла) $\cos \gamma_c$, $\sin \gamma_c$.

Задание намагничивающей компоненты тока $i_{s1.ref}$ либо вводится непосредственно, либо формируется регулятором магнитного потока FR. В последнем случае задание $i_{s1.ref}$ формируется в зависимости от разности заданного потока $\psi_{e.ref}$ и измеренного потока.

Задание моментной компоненты тока $i_{s2.ref}$ формируется в зависимости от задания момента M_{ref} .

$$i_{s2.ref} = M_{ref} / \psi_{e.ref}.$$

Векторное управление асинхронным ЭП

Таким путём формируется задание вектора токов статора $\mathbf{i}_{s.ref}$ – задаются его проекции во вращающихся координатах $1, 2$, связанных с вектором магнитного потока ротора.

Далее эти проекции преобразуются к координатам статора преобразователем поворота вектора. Поворотом управляют функции угла поворота $\cos \gamma_c, \sin \gamma_c$. Преобразование

Векторное управление асинхронным ЭП

поворота выражается соотношением:

$$i_{s\alpha.ref} = \cos \gamma_c * i_{s1.ref} - \sin \gamma_c * i_{s2.ref},$$

$$i_{s\beta.ref} = \sin \gamma_c * i_{s1.ref} + \cos \gamma_c * i_{s2.ref}.$$

Задания $i_{s\alpha.ref}$, $i_{s\beta.ref}$ являются входами регуляторов тока CR_α , CR_β .

Векторное управление асинхронным ЭП

Задания $i_{s\alpha.ref}$, $i_{s\beta.ref}$ являются входами регуляторов тока CR_α , CR_β . Сигналами обратной связи для этих регуляторов являются измеренные токи $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$. Выходные сигналы регуляторов тока преобразуются к фазным координатам, и результатом этого преобразования являются сигналы управления фазными ШИМ: u_{cU} , u_{cV} , u_{cW} .

Векторное управление ЭП

Регуляторы тока в данном варианте должны иметь высокое быстродействие. При этом условия фактические токи близки к заданиям, в результате обеспечиваются необходимый поток и необходимый момент.

Важно отметить, что при векторном управлении задаются мгновенные значения токов для каждого момента времени, а не частота и амплитуда напряжений. Частота определяется фактической скоростью ротора и скольжением.

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

7.2. Оптимизация режимов

В данном пункте рассматривается оптимизация установившихся режимов.

Оптимизацию возможно выполнить по функционалу эквивалентных потерь ΔP_e , учитывающему мощность потерь в двигателе, преобразователе частоты (ПЧ) и сети, а также ущерб от реактивной мощности, потребляемой от сети. Приблизённо этот функционал выражается в следующей форме:

$$\Delta P_e = (R_{se} + R_r) \left(M / \Psi_r \right)^2 + \left(R_{se} / L_m^2 + Gv^{3/2} \right) \Psi_r^2.$$

Здесь M – электромагнитный момент двигателя, v – скорость, Ψ_r – магнитный поток ротора, пропорциональный эквивалентному потоку по (2.4), G – параметр, учитывающий потери в магнитопроводе двигателя, R_r – сопротивление ротора, R_{se} – эквивалентный параметр, учитывающий потери в статоре двигателя, в ПЧ и сети, а также ущерб от потребляемой реактивной мощности.

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Минимум функционала ΔP_e достигается при следующей приближённой зависимости потока от момента и скорости:

$$\Psi_{r.opt} = \left(\frac{R_{se} + R_r}{R_{se} / L_m^2 + Gv^{3/2}} \right)^{1/4} M^{1/2}. \quad (7.1)$$

На рис. 7.2 представлены характеристики для конкретного примера. Здесь показаны:

- оптимальный поток $\Psi_{r.opt(v=0.5)}$ при скорости $v = 0.5$;
- оптимальный поток $\Psi_{r.opt(v=1)}$ при скорости $v = 1$;
- оптимальный поток собственно двигателя $\Psi_{rM.opt(v=1)}$ при скорости $v = 1$.

Векторное управление

Характеристики рассчитаны при усреднённых параметрах: $R_r = 0.0125$, $R_s = 0.0125$, $R_{se} = 0.035$, $G = 0.02$, $L_m = 3$. Формула (9.1) не учитывает насыщение магнитопровода двигателя. Поэтому характеристики справедливы для сравнительно невысоких значений магнитного потока.

Векторное управление

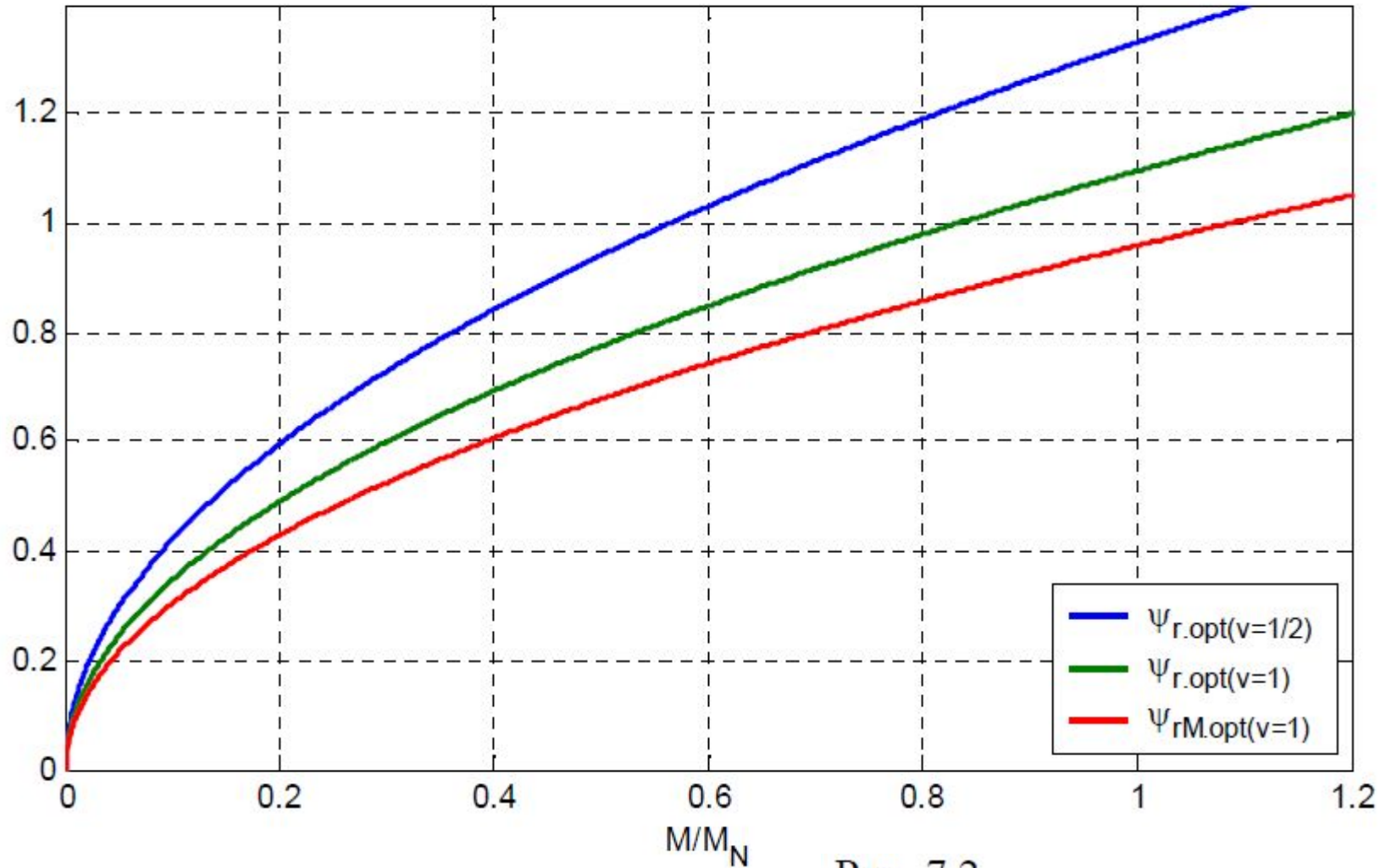


Рис. 7.2

Векторное управление

Отметим следующие особенности характеристик:

- Зависимость оптимального потока от момента при неизменной скорости – функция квадратного корня.
- Оптимальный поток возрастает при снижении скорости.
- Оптимальный поток в регулируемом электроприводе выше, чем оптимальный поток собственно двигателя – играют роль дополнительные потери от тока в ПЧ и питающей сети.

Оптимальный поток при нулевом моменте – также нулевой. Такой режим не используется в реальных электроприводах. Либо магнитный поток ограничивают снизу, либо приближённо аппроксимируют функцию оптимального потока, например, используют линейную зависимость потока от момента, близкую к теоретической характеристике в зоне номинального момента.

Векторное управление

Поток также приходится ограничивать сверху. Игрют роль следующие условия:

- ограниченное выходное напряжение ПЧ;
- насыщение магнитопровода двигателя.

Векторное управление

7.3. Измерение вектора магнитного потока

Обычно используется косвенное измерение потока. Непосредственно измеряются только напряжения и токи. Можно сформировать компоненты вектора потокосцеплений статора интегрированием противо-ЭДС:

$$\psi_{s\alpha} = (\omega_b/p)(u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}), \quad \psi_{s\beta} = (\omega_b/p)(u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}).$$

Затем формируются компоненты вектора потока ротора:

$$\psi_{e\alpha} = \psi_{s\alpha} - L_\sigma i_{s\alpha}, \quad \psi_{e\beta} = \psi_{s\beta} - L_\sigma i_{s\beta}.$$

Функциональная схема показана на рис. 7.3.

Принцип измерения вектора магнитного потока

- проблема – сложная. Имеют место серьёзные трудности, особенно в приводах без датчика скорости, когда необходимо измерять также и скорость:
- • температурные изменения сопротивления статора;
- • необходимость фильтрации измеренных компонент потока;
- • невозможность использования интегрирования в чистом виде из-за накопления погрешностей.
- Необходимо отметить, что точность измерения понижена при низких скоростях электропривода.

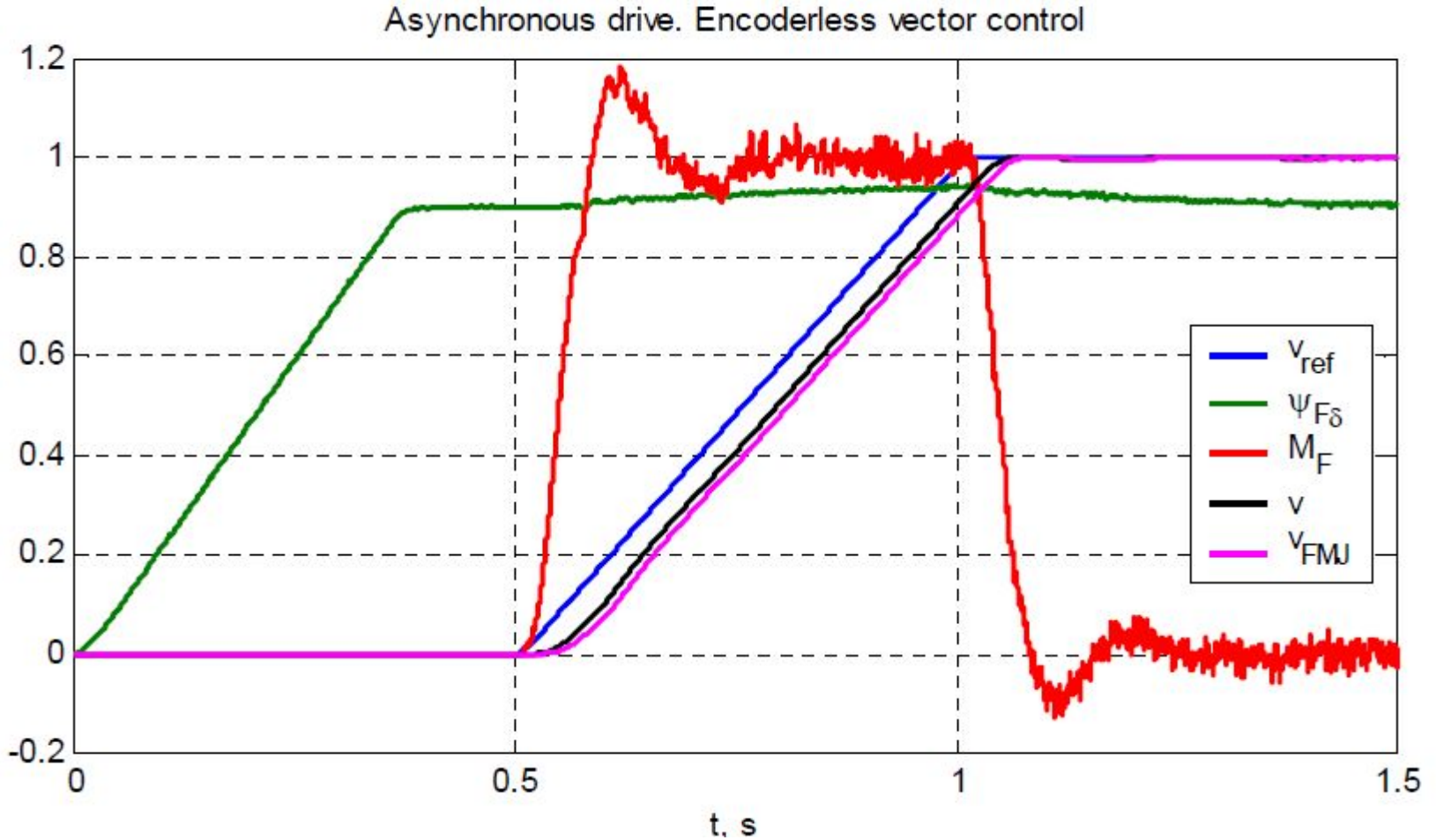
Процессы электропривода с векторным управлением

- Пример процессов показан на рис. 7.4.
- Показаны следующие переменные:
 - основной магнитный поток $\psi_{\delta F}$ (сигнал фильтрован, полоса пропускания фильтра 1000 рад/с);
 - электромагнитный момент M_F (сигнал фильтрован аналогичным фильтром);
 - задание скорости v_{ref} ;
 - скорость v ;
 - сигнал обратной связи по скорости (от косвенного измерителя) v_{FMJ} ;
 - составляющие тока статора i_{s1} , i_{s2} (фильтрованные сигналы);
 - ток одной из фаз статора i_{sU} .

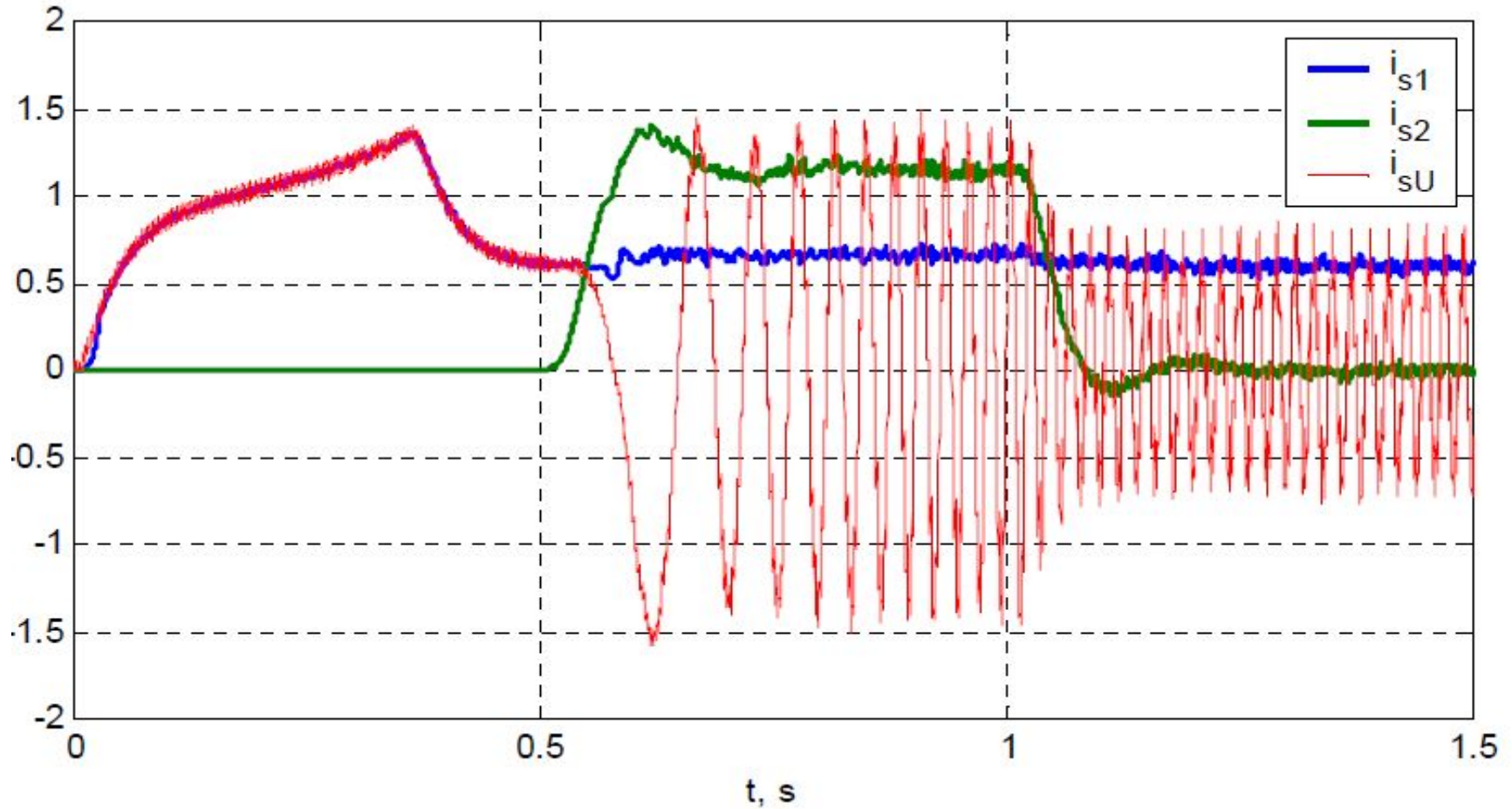
Процессы ЭП с векторным управлением

- Показаны два этапа, проходящие последовательно во времени:
 - подготовка электропривода к работе – включение команды магнитного потока и нарастание потока до заданного значения;
 - собственно работа электропривода – в данном случае разгон до заданной скорости.

Процессы при векторном управлении



Процессы при векторном управлении



Процессы при векторном управлении

- На подготовительном этапе магнитный поток нарастает с заданным темпом; для этого соответствующим образом изменяется компонента тока статора i_{s1} .
- Эта компонента в процессе нарастания потока значительно превышает установившееся значение.
- Именно превышение обеспечивает ускоренное нарастание потока. После нарастания потока возникает установившийся режим, в котором фазные токи статора – постоянные токи.

Процессы при векторном управлении

- В процессе работы компонента тока i_{s1} практически не изменяется, необходимый момент обеспечивается компонентой тока статора i_{s2} . Разгон осуществляется с заданным темпом. Частота токов статора нарастает по мере разгона двигателя.
- Амплитуда токов статора несколько превышает значение i_{s2} за счёт компоненты i_{s1} .
- Процессы изменения скорости близки к типовым процессам электропривода с ПИ регулятором скорости.

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

- *Выводы*
- **1. Многие рабочие машины предъявляют серьёзные требования к регулируемому электроприводу. Только электроприводы с замкнутой системой автоматического управления могут удовлетворять таким требованиям.**
- **2. Общепринятый метод управления асинхронными электроприводами – векторное управление с ориентацией по полю; этот метод обеспечивает быстроедействие и достаточно точное регулирование магнитного потока и момента АД.**