

# Система управления станочным шпинделем

Лашкевич Максим Михайлович  
МОСКВА МЭИ кафедра АЭП 2024

Работа сделана в соавторстве с:  
Шпак Д.М., Анучин А.С., Алямкин Д.И.

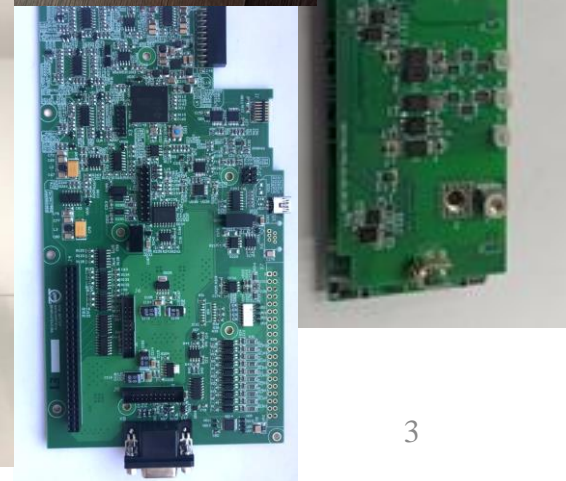
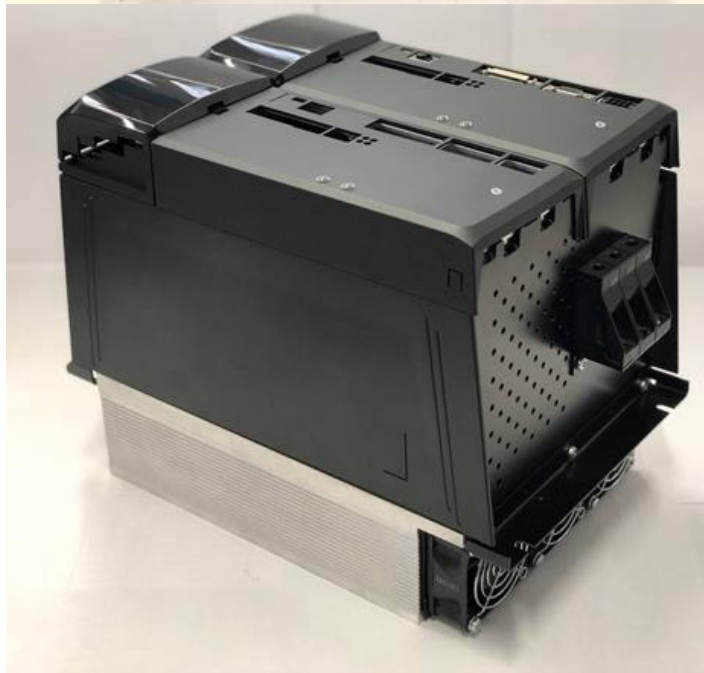
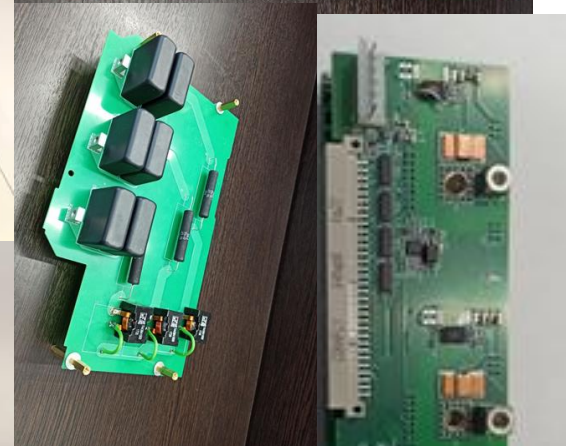
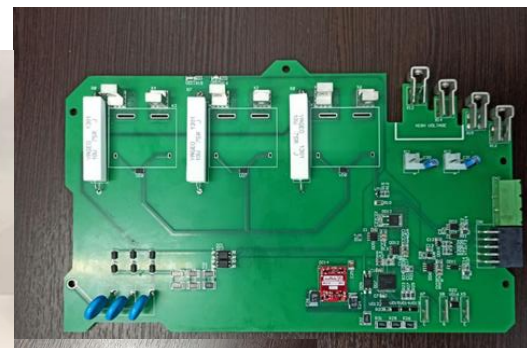
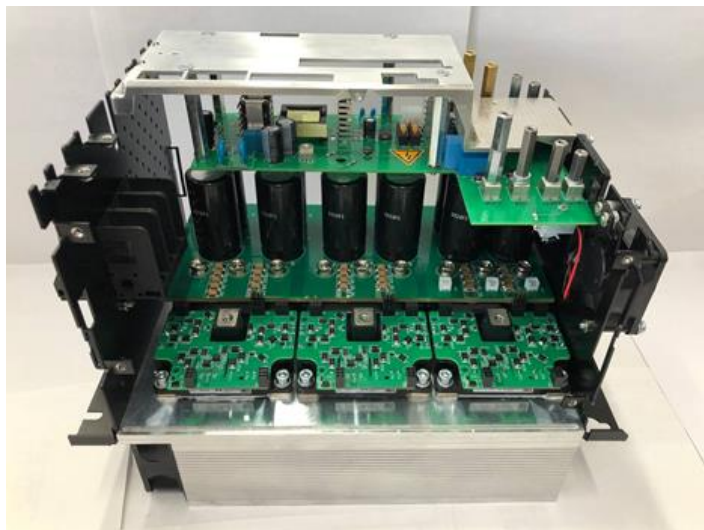
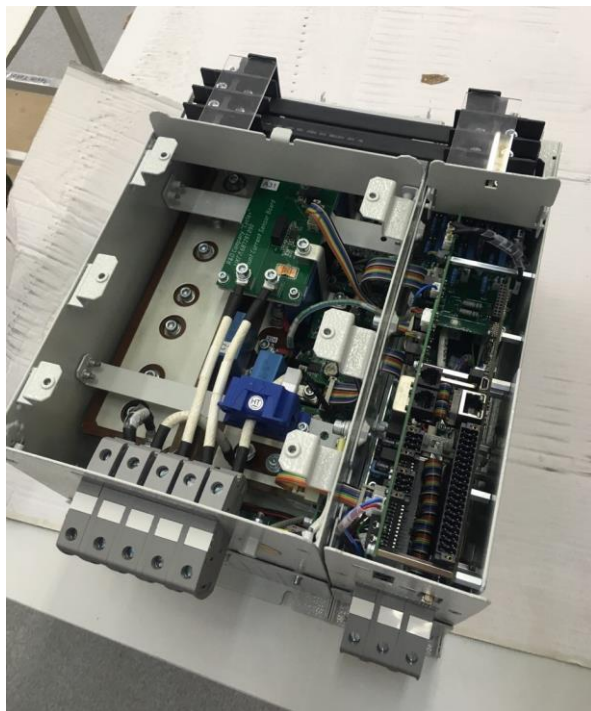
# Работа выполнялась по заказу компании HIWIN в 2015-2020г

## Особые требования к шпиндельному приводу

- Двигатель с инкорпорированным магнитами (IPM) 24кВт **24000** об/мин с датчиком положения
- Глубокое ослабление поля электродвигателя ( $n_{\text{ном}}: n_{\text{макс}} = 1:4$ )
- Обеспечение стабильной работы электропривода с выходной **частотой тока до 1500 Гц**
- поддержание заданной скорости вращения с точностью до **30 об/мин**
- постоянная частота переключения силовых ключей (**16кГц**)
- высокая динамика разгона и торможения (для быстрой смены инструмента) за время **1.5с с нуля до номинала**

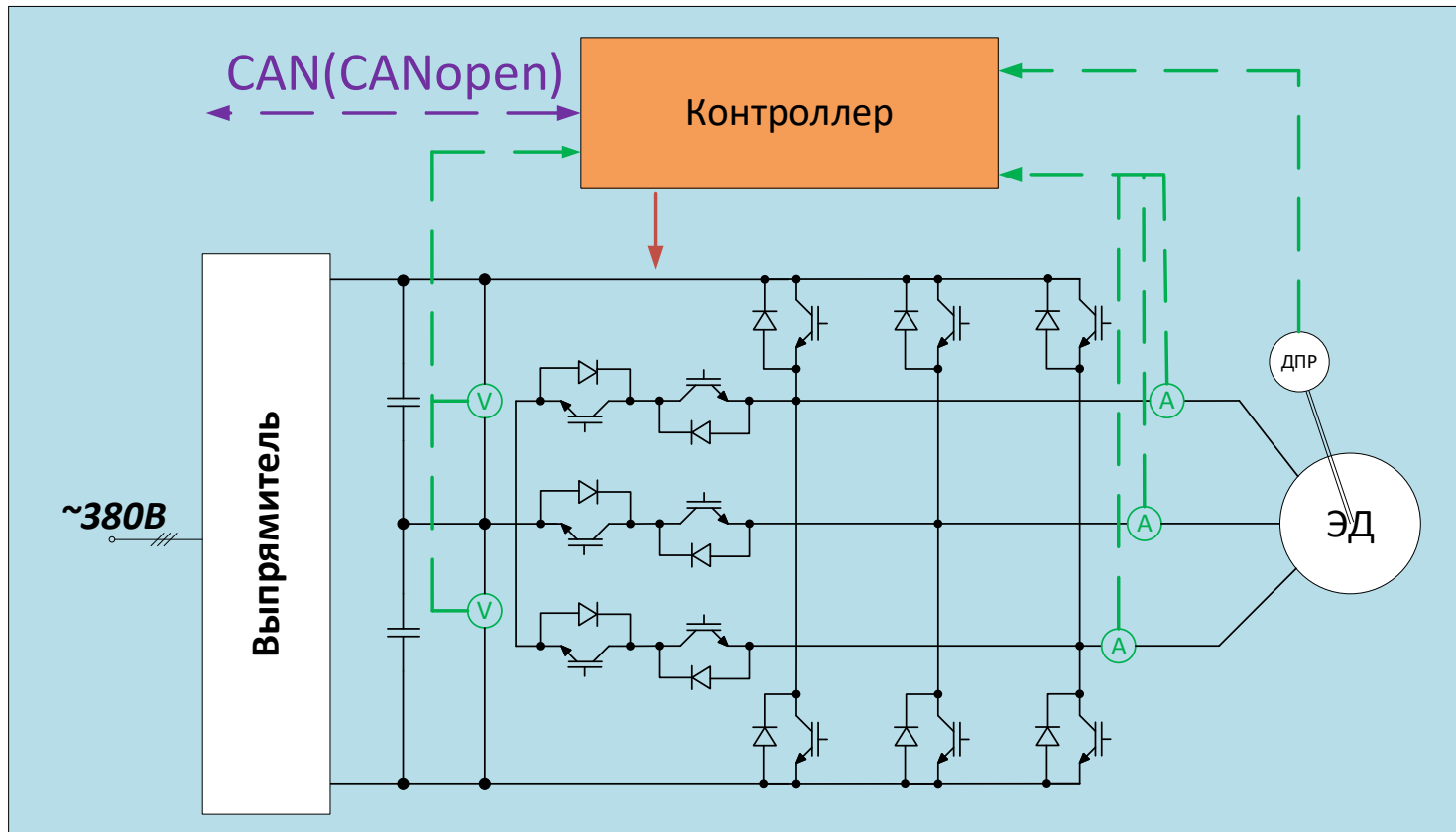
# Разработка инвертора

## Прототип первой версии



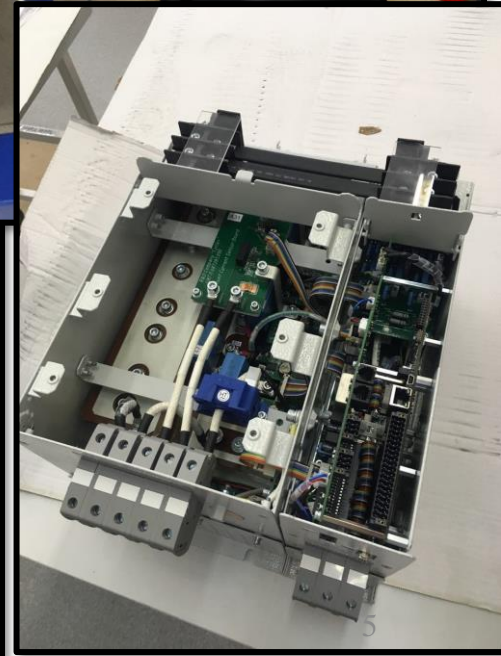
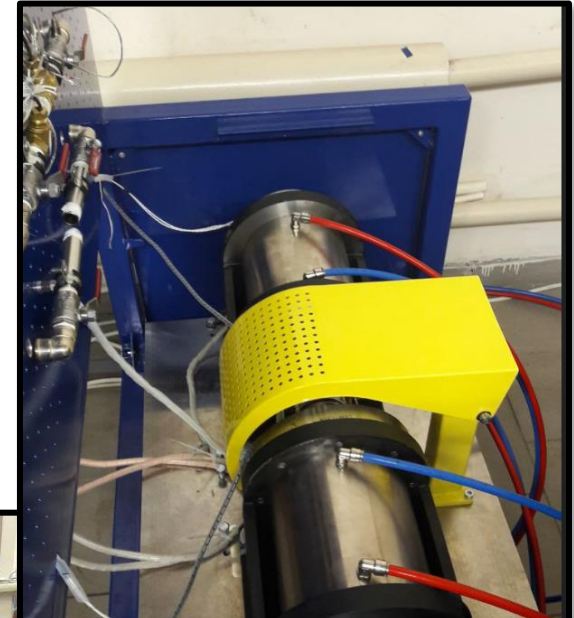
# Технические параметры инвертора

- Силовой модуль трёхуровневый 12го класса CM400ST-24S1
- 380В 70А длительно, 140А пиково
- Мощность 24кВт для электродвигателя IPM, либо 50кВт полная.
- Частота ШИМ 16кГц
- Балансировка конденсаторов звена постоянного тока программная
- Микроконтроллер Texas Instruments TMS320F28377D
- Датчики тока шунтовые в фазах на sigma-delta модуляторах AMC1306



# Испытательный стенд

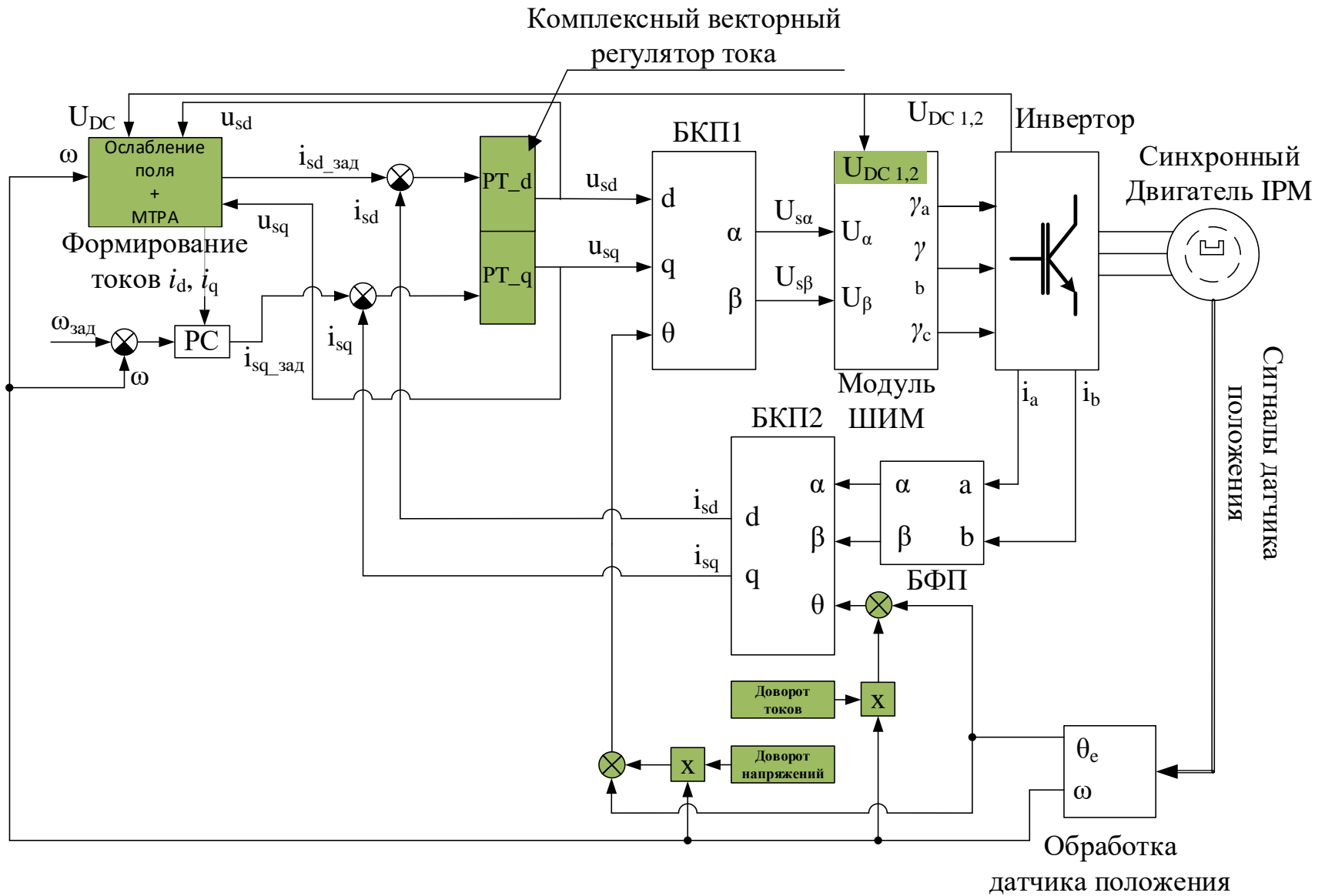
- Двигатели IPM Siemens Sinamics 120S
- Мощность: 20 кВт
- Ток номинальный: 45А (RMS)
- Скорость номинальная: 6800 об/мин
- Скорость максимальная: 24000 об/мин
- Питание от разработанного инвертора напряжения
- Два смуфтированных двигателя, два инвертора объединенных по звену постоянного тока. Из сети потребляются только потери.



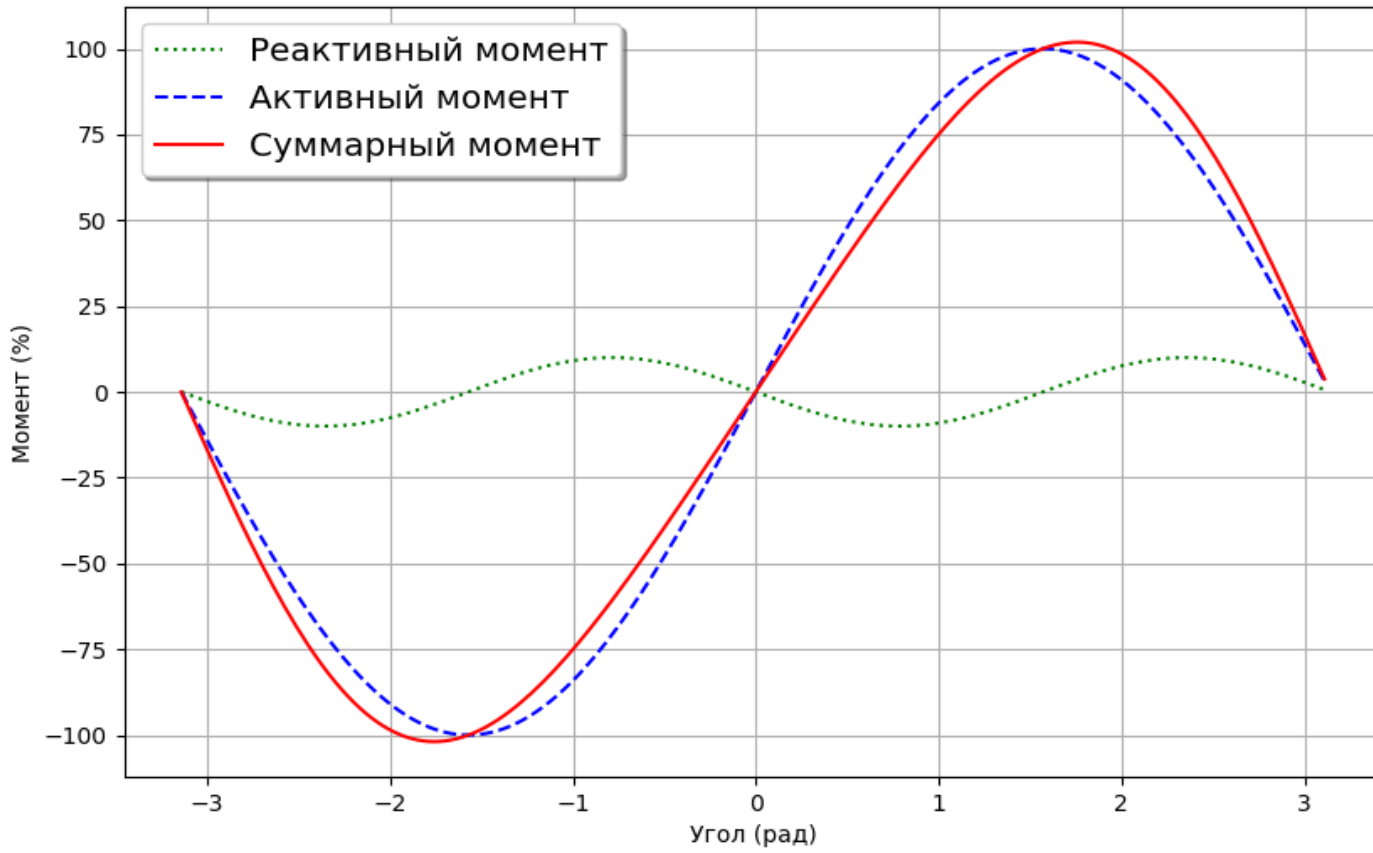
# Особенности системы управления

- Для высокой частоты тока требуется компенсировать задержку измерения тока и выдачи напряжения на инвертор – иначе теряется устойчивость
- Для обеспечения быстродействия регуляторов тока на высокой частоте тока обязательно требуется качественный модуль компенсации перекрестных связей осей  $d$ ,  $q$
- Для работы в зоне нехватки напряжения инвертора требуется модуль ослабления поля (“размагничивания” осью  $d$ ) с высоким быстродействием для динамичной работы
- Для трёхуровневого инвертора с «плавающими» конденсаторами звена постоянного тока требуется специальный модуль ШИМ с программной балансировкой
- Для двигателя IPM требуется МТРА – чтобы обеспечить наибольший момент при наименьшем токе
- Индуктивность двигателя сильно изменяется от тока – необходимо делать адаптивные коэффициенты регуляторов тока

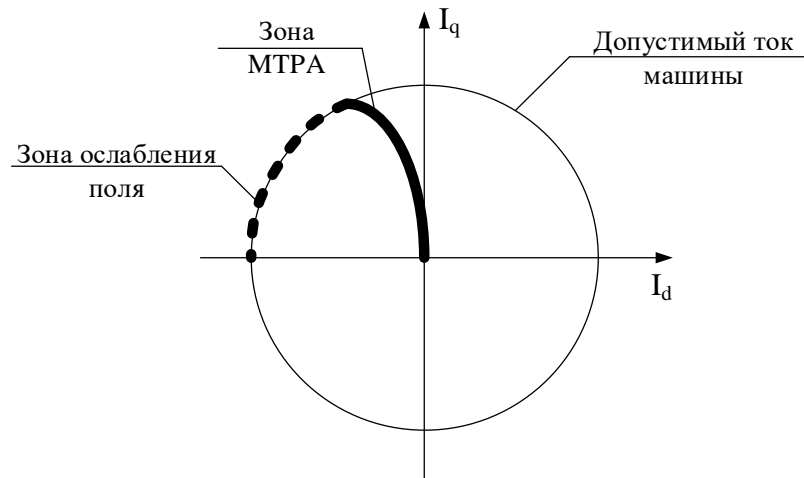
# Структурная схема векторного управления



Момент явнополюсной IPM машины



Годограф тока при управлении по алгоритму МТРА



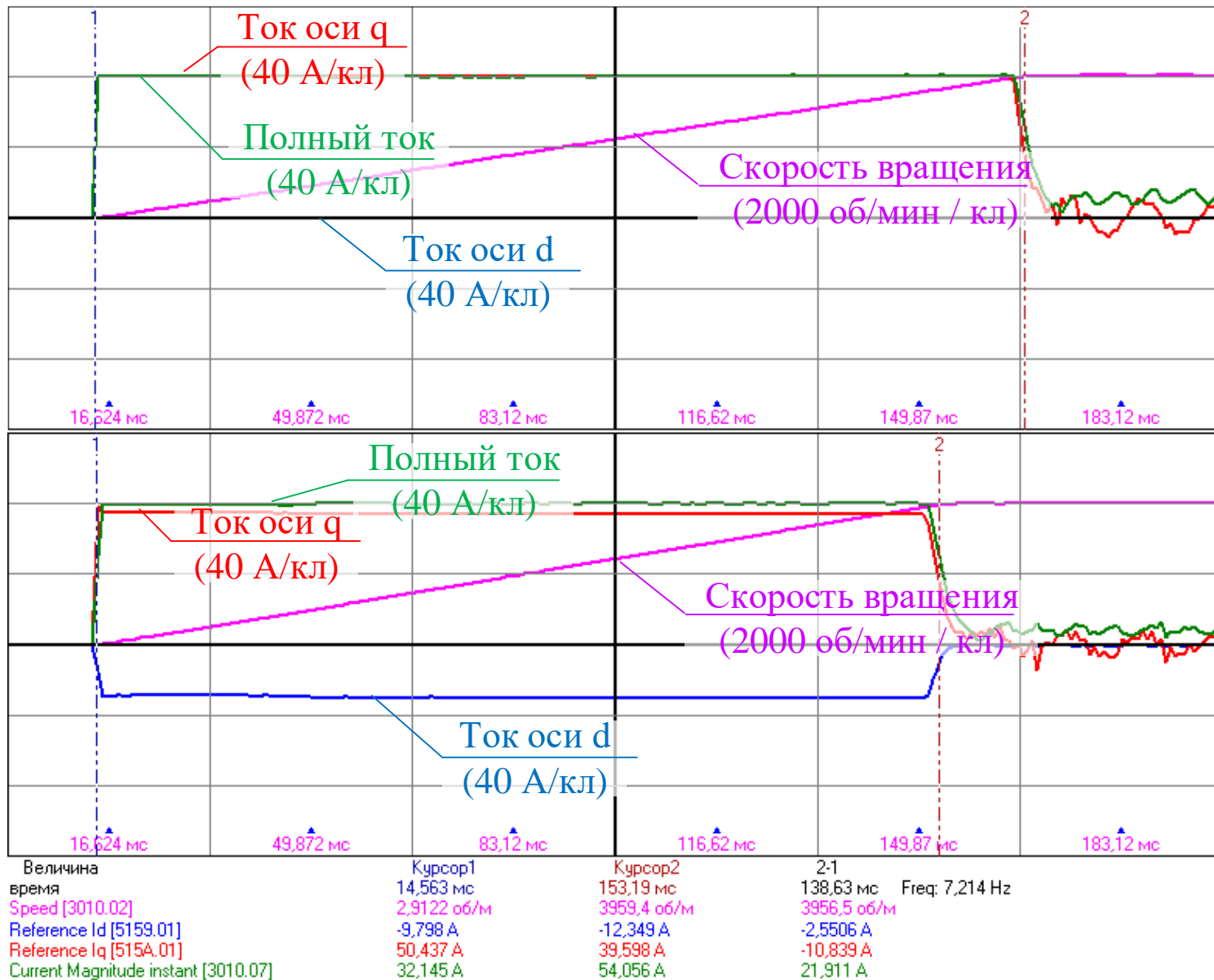
Алгоритм формирования тока оси d для МТРА табличный. Таблица заполняется либо расчётно, либо опытным путём.



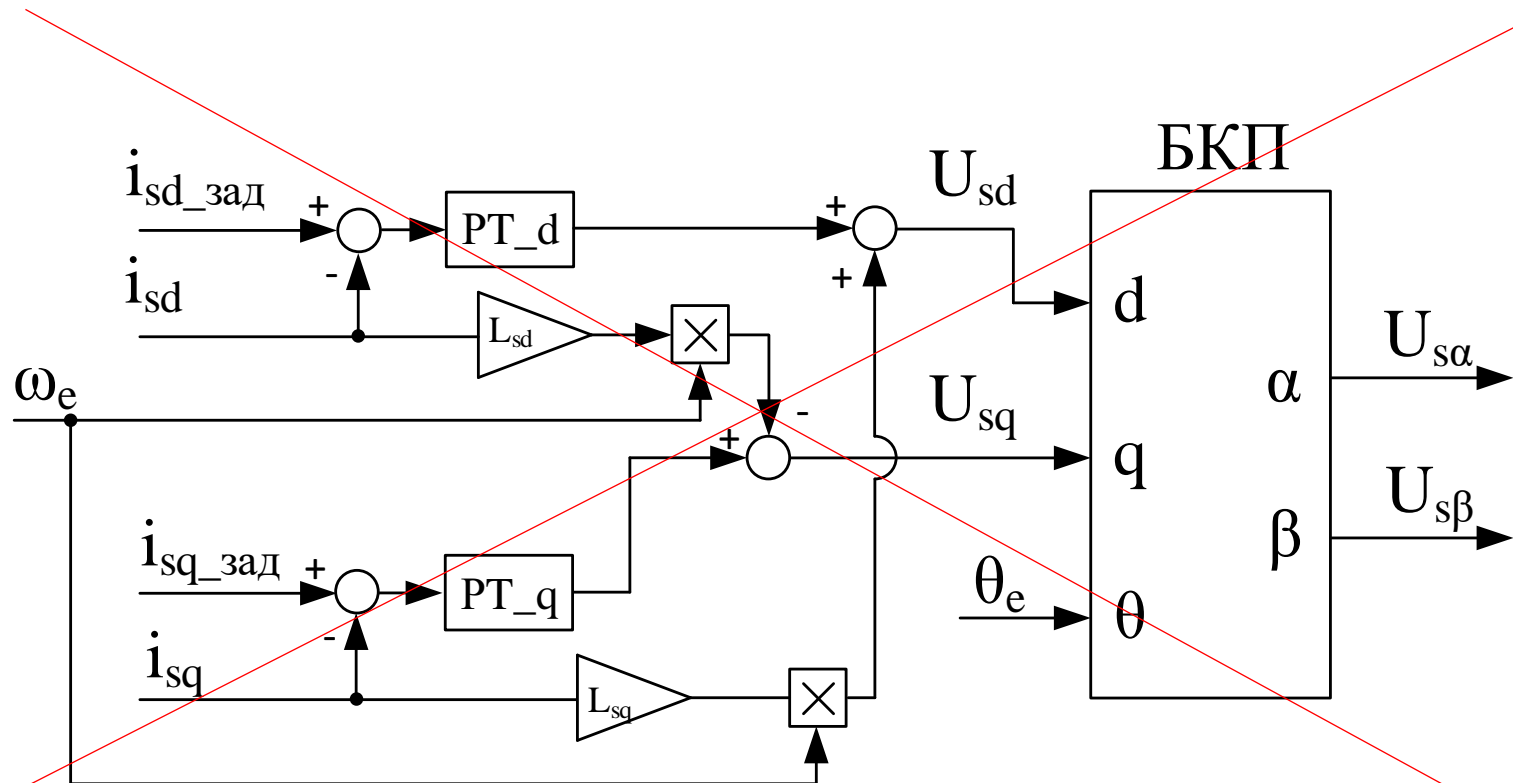
# Максимальный момент на ампер (МТРА)

Без МТРА

С МТРА



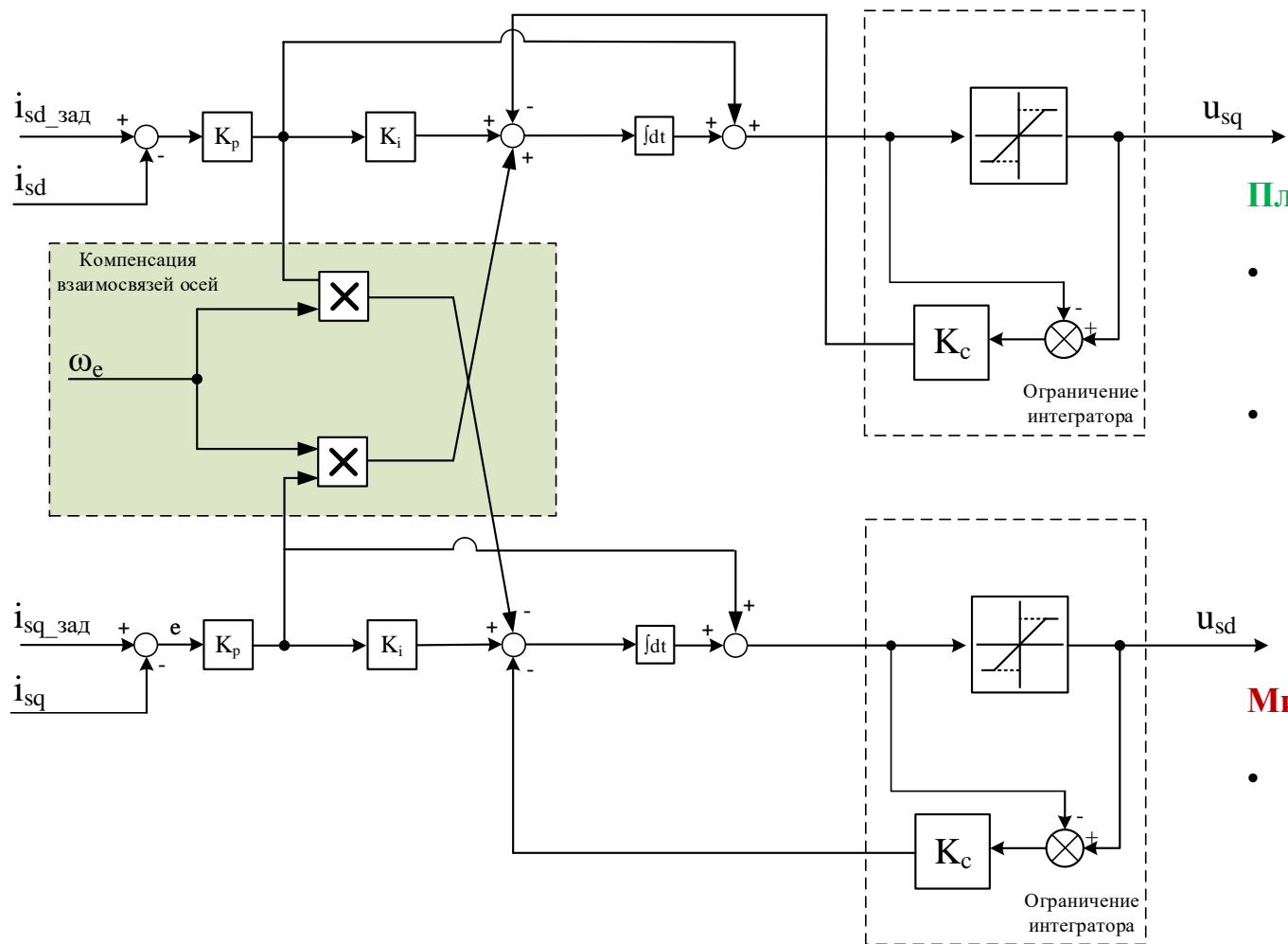
# Компенсация взаимных связей осей прямым добавлением возмущающих составляющих



**Не работает** при больших задержках измерения тока и выдачи напряжения.

Требует точного знания индуктивностей по осям d, q, которые по факту изменяются в функции тока.

# Комплексный векторный регулятор тока с компенсацией перекрестных связей



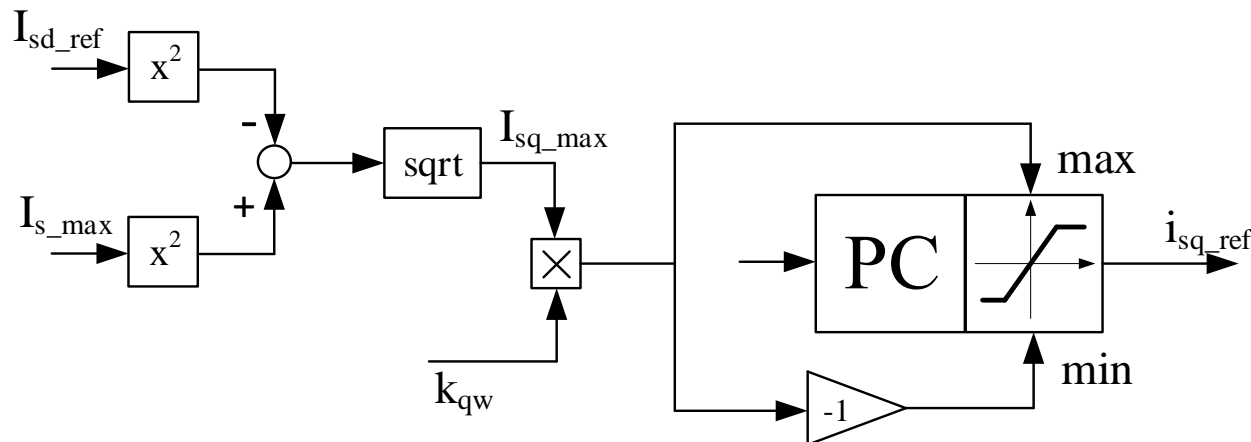
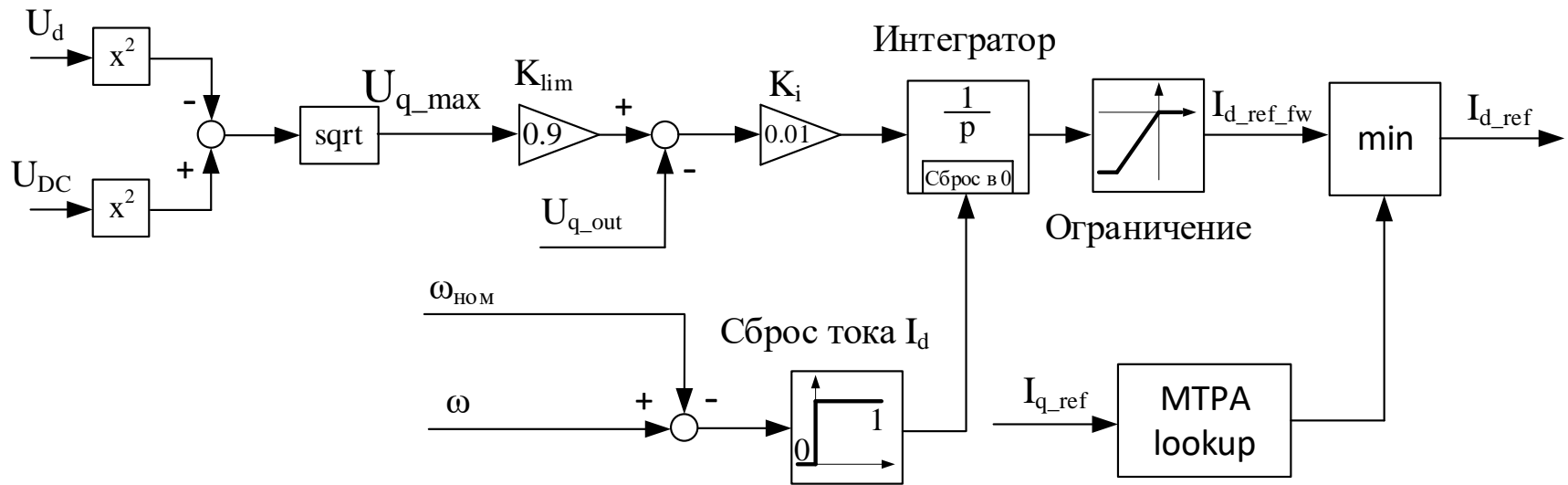
## Плюсы:

- Не требует знания индуктивностей машины
- Не чувствителен к задержкам системы управления

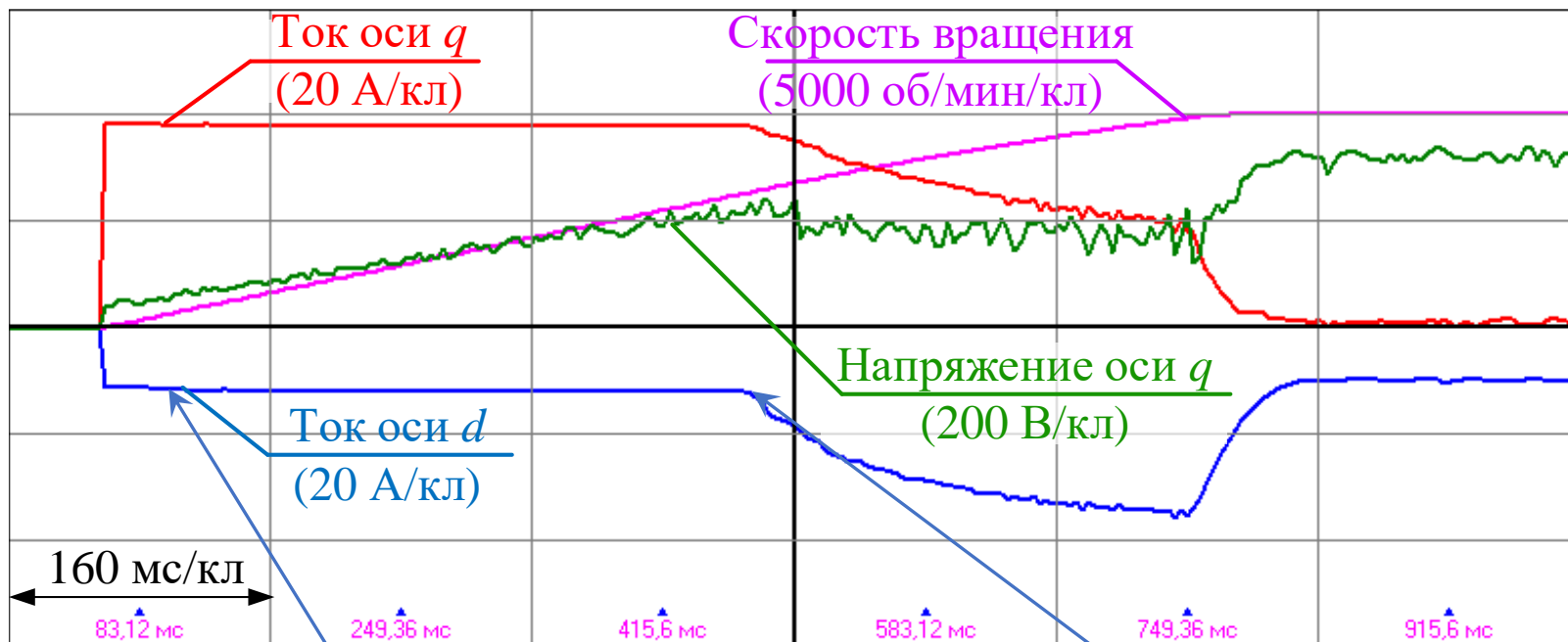
## Минусы:

- Начинает качаться, если выходы регуляторов касаются ограничений

# Структурная схема ослабления поля осью d и ограничения тока Iq



# Разгон синхронной машины в системе векторного управления



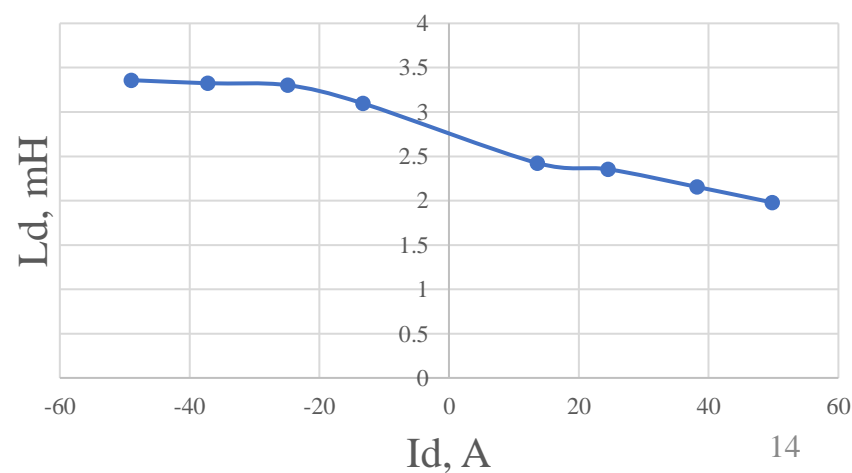
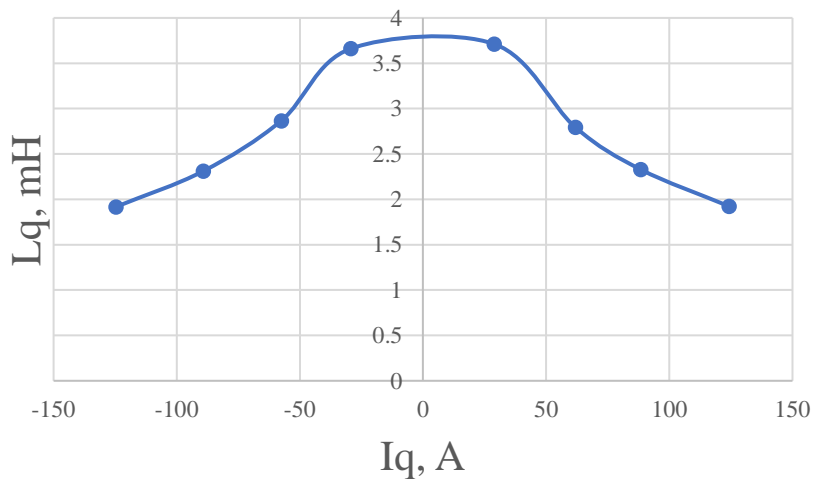
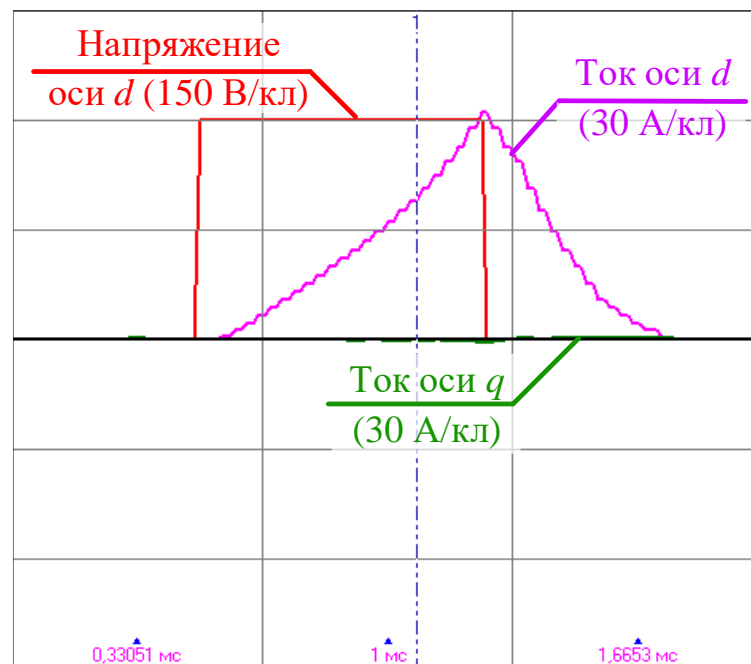
Начало ослабления поля

Задание тока оси  $d$  для реализации алгоритма МТРА

# Определение нелинейной индуктивности двигателя

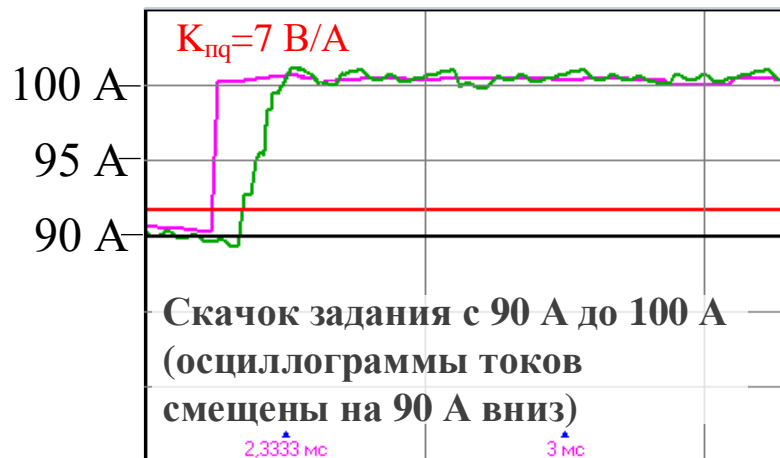
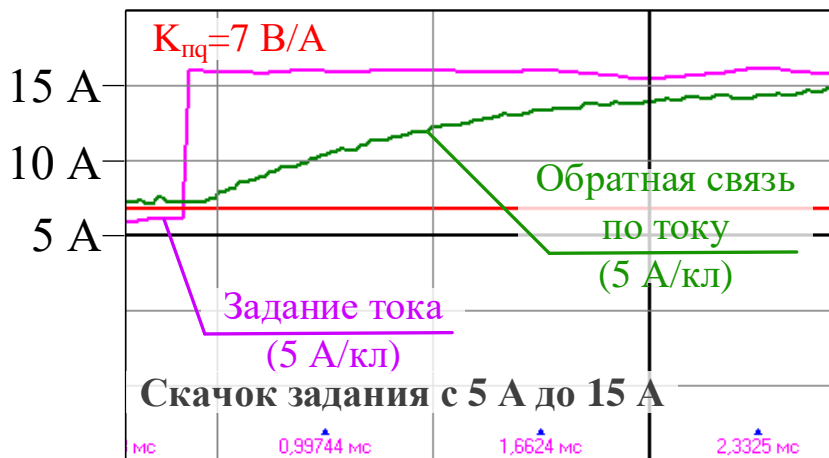
Индуктивность в виде функции от величины тока определяется в эксперименте с приложением номинального напряжения к фазе и измерением времени нарастания тока фазы до определённых уровней.

Для синхронной машины типа IPM отдельно определяются индуктивности по осям  $d$  и  $q$ .

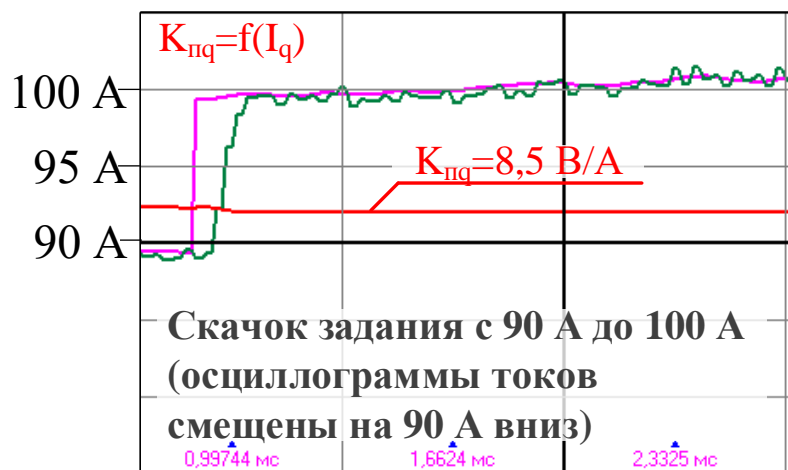
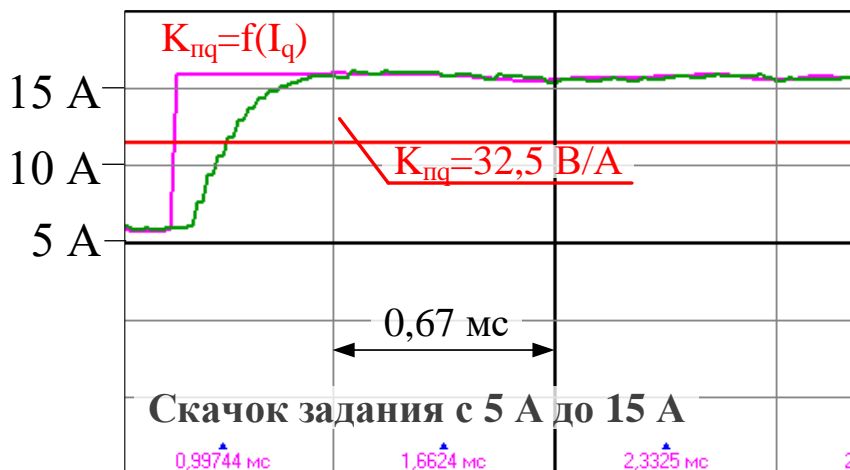


# Отработка задания тока

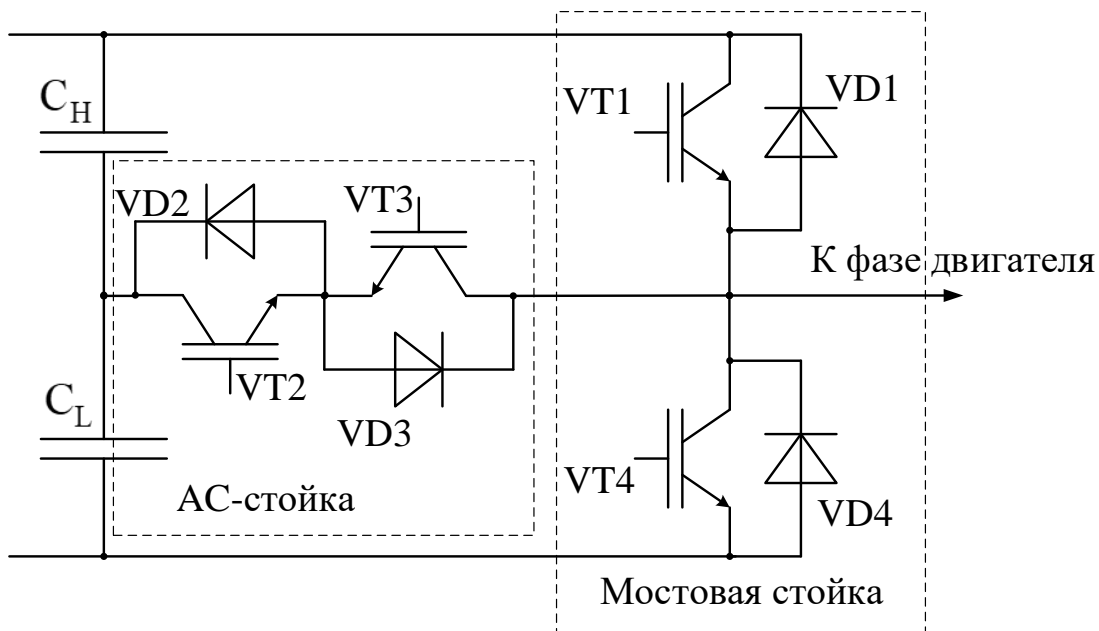
## Постоянные коэффициенты регуляторов



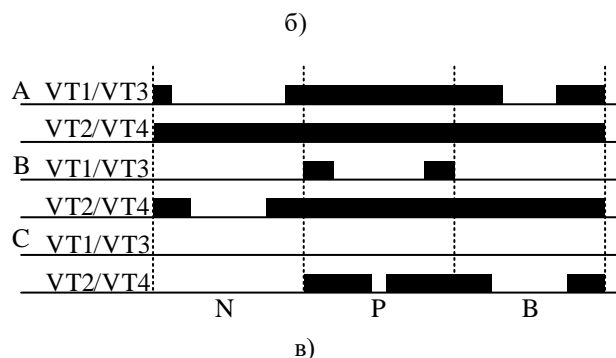
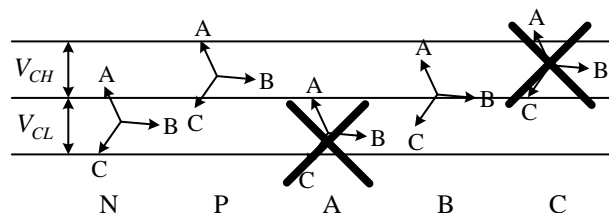
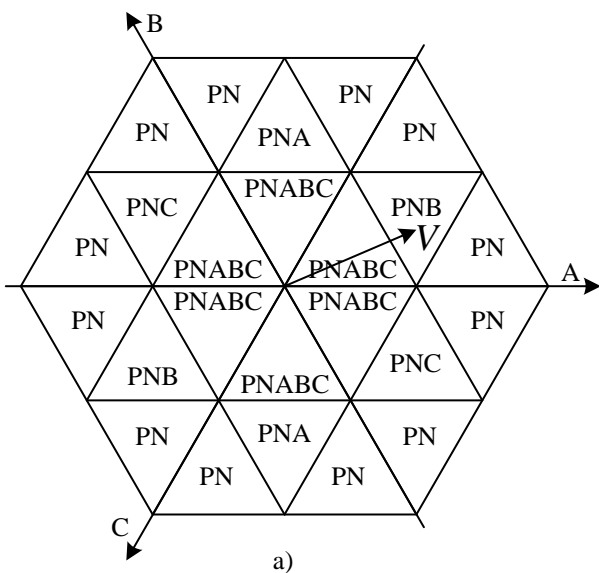
## Коэффициенты регуляторов, зависящие от величины тока



# Балансировка напряжений на конденсаторах инвертора



Стойка трёхуровневого инвертора с топологией Т-образного полумоста



Варианты ШИМ для трехуровневого инвертора



## Алгоритм трёхуровневого ШИМ методом реализации мгновенных фазных потенциалов с балансировкой напряжения на конденсаторах $C_H$ $C_L$

1. Рассчитать выход модуля компенсации  $disbalanceComp\_out$  пропорциональный текущему перекосу напряжений на конденсаторах и текущей активной мощности
2. Ограничить задания напряжений  $U_{alpha}$   $U_{beta}$  вписыванием в окружность, определяемую текущим суммарным напряжением на ЗПТ
3. Перевести задания напряжения по двухфазным осям  $U_{alpha}$   $U_{beta}$  в трёхфазные задания  $U_a$   $U_b$   $U_c$ .
4. Найти минимум  $U_{min}$  и максимум  $U_{max}$  из трёх заданных напряжений  $U_a$   $U_b$   $U_c$ .
5. Рассчитать уставку сдвига потенциалов  $df_i$  по формуле:  
$$df_i = udcFull * 0.5 - (U_{max} - U_{min}) * 0.5 - U_{min} - disbalanceComp\_out;$$
Здесь  $udcFull$  суммарное напряжение на ЗПТ,  $disbalanceComp$  добавка модуля балансировки напряжений конденсаторов
6. Рассчитать потенциалы для каждой фазы  $fiA$   $fiB$   $fiC$  инвертора путем сложения задания напряжения  $U_a$   $U_b$   $U_c$  и рассчитанной уставки смещения  $df_i$ .
7. Сравнить потенциалы для каждой фазы  $fiA$   $fiB$   $fiC$  инвертора с напряжением нижнего конденсатора. Если потенциал меньше, то включить ШИМ нижнего конденсатора, если выше – то верхнего.

# Алгоритм трёхуровневого ШИМ методом реализации мгновенных фазных потенциалов с балансировкой напряжения на конденсаторах $C_H$ $C_L$

```
//сдвиг среднего потенциала для балансировки потребления мощности с конденсаторов
disbalanceComp_out = (udcHigh - udcLow)*Power*BalanceGain;
//ограничение Ualpha Ubeta
...

//перевод из двухфазных заданий в трёхфазные
Ua = Ualpha;
Ub = -0.5 * Ualpha + FLOAT_05_SQRT_3 * Ubeta;
Uc = - Ua - Ub;

//поиск минимального и максимального напряжений
Umax = findMax(Ua, Ub, Uc);
Umin = findMin(Ua, Ub, Uc);

//средняя точка всех потенциалов должна быть посередине ЗПТ со сдвигом только на балансировку
dfi = (udcFull * 0.5 - (Umax - Umin) * 0.5 - Umin) - disbalanceComp_out;

//расчёт потенциала каждой фазы инвертора
fiA = Ua + dfi;
fiB = Ub + dfi;
fiC = Uc + dfi;

//расчёт уставок сравнения для фазы А
if (fiA > udcLow) { //потенциал фазы выше напряжения нижнего конденсатора
    gammaAH = saturation((fiA - udcLow) / udcHigh, 1.0, 0.0); //ШИМ с верхнего конденсатора
    gammaAL = 1.0;
} else {
    gammaAH = 0;
    gammaAL = saturation(fiA / udcLow, 1.0, 0.0); //ШИМ с нижнего конденсатора
}

//присваивание уставок сравнения таймерам ШИМ
EPwm1Regs.CMPA.bit.CMPA = tbprd * (1.0 - gammaAH);
EPwm10Regs.CMPA.bit.CMPA = tbprd * (1.0 - gammaAL);

//расчёт уставок сравнения для фазы В
if (fiB > udcLow) {
    ...
}
```

# Итог работы

1. Спроектирована силовая часть – инвертор и контроллер, пройдены испытания на мощность до 50кВт
2. Написана программа системы управления для шпиндельного синхронного электродвигателя с инкорпорированными магнитами
3. Проведены испытания в различных лабораториях, подтверждающие требования ТЗ на шпиндельный привод
4. Привод проверен на реальном станке ЧПУ при фрезеровке металла
5. В ПО реализованы сервисные функции шпиндельного привода – управление по CANOpen, EtherCAT протоколам, режим позиционирования, автоматическая настройка на двигатель (идентификация параметров), расширенная диагностика и т.п.

Замеченные проблемы в ходе проекта:

1. Отсутствие аппаратной балансировки конденсаторов трёхуровневого инвертора – ошибка. При холостом ходе часто случается авария разбалансировки конденсаторов.
2. Инкрементальный датчик положения часто даёт сбой из-за помех. Самые частые отказы происходят из-за него. Необходим бездатчиковый алгоритм управления.<sup>19</sup>

# Реверс двигателя

Реверс с  $-24000$  об/мин до  $+24000$  об/мин за  $4,8$  с

