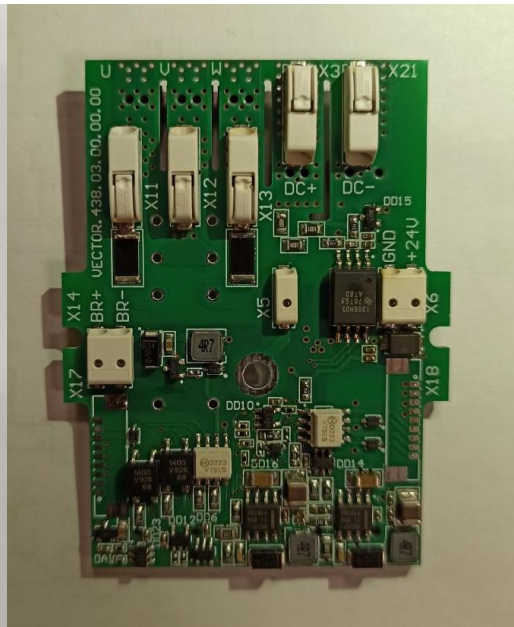
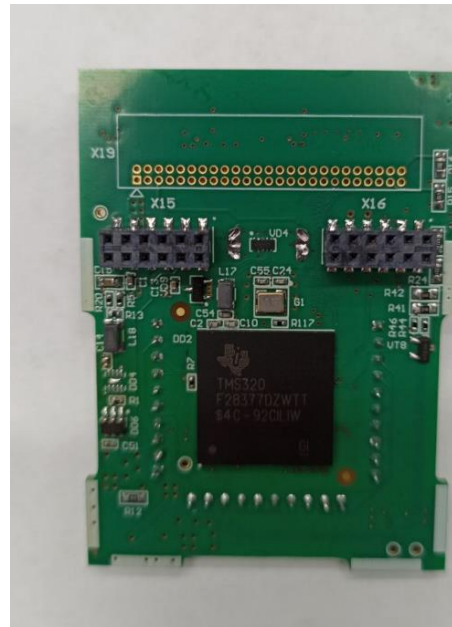
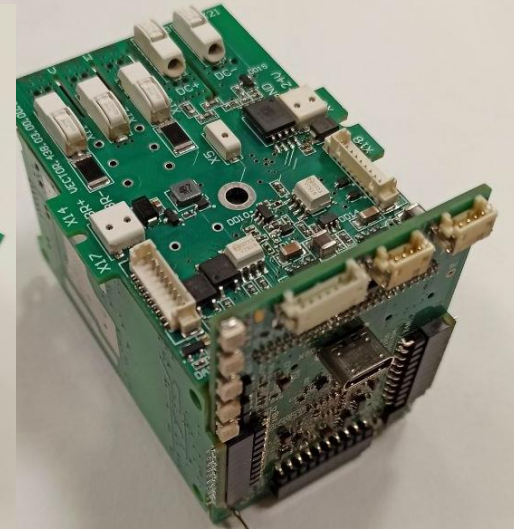
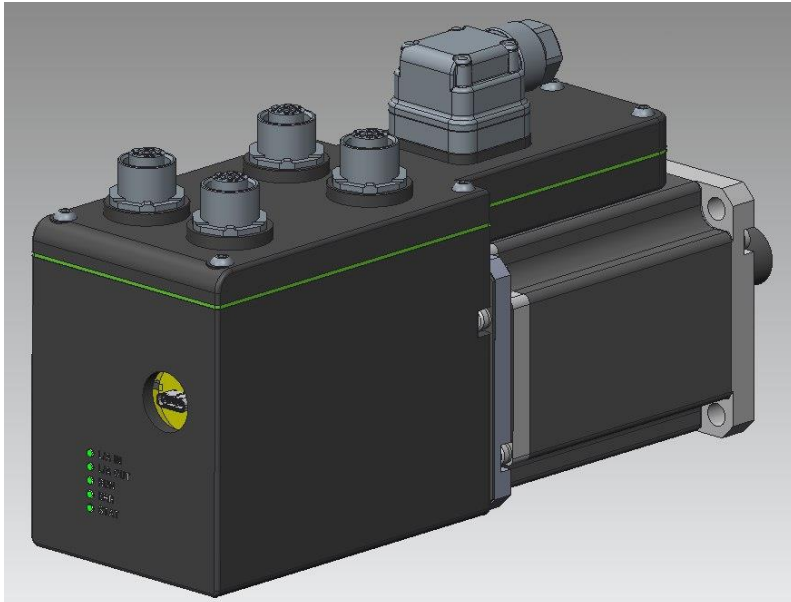


Особенности проектирования системы управления сервоусилителя на базе GaN-транзисторов

Лашкевич Максим Михайлович
МОСКВА МЭИ кафедра АЭП 2024

Работа сделана в соавторстве с:
Шпак Д.М., Анучин А.С., Алямкин Д.И., Столяров Е.О., Каземирова Ю.К.

Работа выполнялась по заказу компании HIWIN в 2019-2020г



Технические параметры инвертора и двигателя

- Интегрированный с двигателем трёхфазный инвертор
- Мощность 400Вт
- Ток 2.5А номинальный / 10А максимальный
- Ключи на базе нитрида галлия Texas Instruments LMG341xR150 600-V, 150-mΩ, GaN
- Напряжение питания инвертора 310В пост. тока
- Микроконтроллер Texas Instruments TMS320F28377D
- Датчики тока: шунтовые в фазах, обработка sigma-delta модуляторами AMC1306
- Двигатель с постоянными магнитами, ЭДС синусоидальная
- Частота вращения двигателя 6000 об/мин
- Датчик положения абсолютный TAMAGAWA SSI 23 бит
- Момент инерции двигателя 0.05 г*м²
- Размер инвертора 60x90x90 мм
- Размер двигателя 60x60x90 мм
- Размер радиатора привода 250 x 250 мм (эквивалент площади корпуса станка)
- Интерфейсы связи: EtherCAT, мксВ, CAN
- Приборное питание инвертора 24В
- Реализация драйвера EtherCAT на чипе Microchip LAN9252 с частотой цикла до 8кГц
- Дискретные входы/выходы для концевых выключателей и тормоза
- Ближайший аналог YASKAWA SGD7S-2R8A00A SGM7J-04A7A2C (не интегр. инвертор)

Особенности системы управления

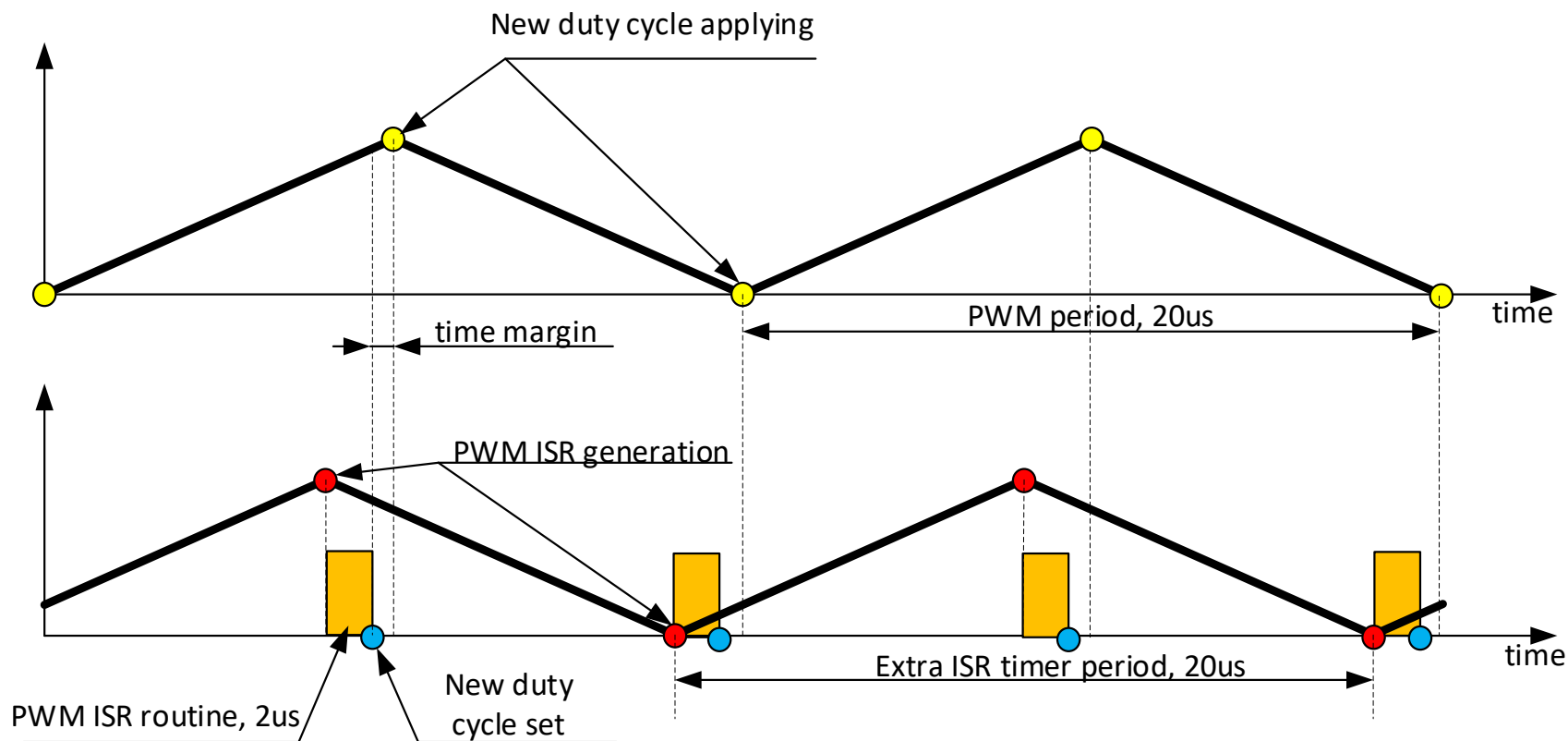
- Частота расчёта контура тока до 160кГц – такие возможности дают GaN ключи инвертора. Для расчёта контуров тока используется сопроцессор CLA. Используется двойная загрузка уставок сравнения на частоте ШИМ.
- Частота расчёта контура скорости 58кГц – ограничена частотой обратной связи SSI энкодера.
- Для высоких полос пропускания по контуру скорости требуется бороться с механическими резонансами – делать полосовые фильтры (notch).
- Микроконтроллер TMS320F28377D двухъядерный – на одном ядре реализована система управления, на втором драйвер EtherCAT.
- Для уменьшения времени позиционирования (Settling time) применялся планировщик движения с предуплавлением (feedforward).

Контур тока с ПИ-регуляторами

Наибольшая задержка контура тока в измерении тока. SDFM модуляторы тактируются с частотой 20МГц, на стоне микроконтроллера используется Sinc3 фильтр с $OSR = 64$.

Задержка измерения $1 / (20\text{MHz} / (64 * 3)) = 10\mu\text{s}$.

Время расчёта контура тока составляет 2мкс и выполняется как можно ближе к событиям периода и нуля таймера ШИМ, чтобы рассчитанное напряжение было реализовано с минимальной задержкой.



См. пример Texas Instruments Fast Current Loop (FCL) на сопроцессоре CLA

Программный код CLA для контура тока

```
__interrupt void Cla1Task1(void) // Current loop from CLARKE to PWM calc
{
    CLARKE_MACRO(TransformsStruct_cla)
    PARKF_MACRO(TransformsStruct_cla)

    cpu02_cla.idReg.fbk = TransformsStruct_cla.de;
    TIREG_MACRO_CLA(cpu02_cla.idReg)

    cpu02_cla.iqReg.fbk = TransformsStruct_cla.qe;
    TIREG_MACRO_CLA(cpu02_cla.iqReg)

    TransformsStruct_cla.de = cpu02_cla.idReg.out;
    TransformsStruct_cla.qe = cpu02_cla.iqReg.out;
    IPARKF_MACRO(TransformsStruct_cla)

    cpu02_cla.pwmf.Ualpha = TransformsStruct_cla.ds;
    cpu02_cla.pwmf.Ubeta  = TransformsStruct_cla.qs;
    if (cpu02_cla.pwmf.settings.UcompensateEn == 1)
    {
        cpu02_cla.pwmf.gamma_scale = SQRT_3/(cpu02_cla.sdfm.Udc.valueInst);
    }
    else
    {
        cpu02_cla.pwmf.gamma_scale = 1;
    }

    TLPWM_CALC_MACRO_CLA(cpu02_cla.pwmf) // PWM calc Ta,b,c

    if (cpu02_cla.pwmf.settings.pwmType==0)
    {
        TLPWM_GAMMA_2_CMP_FLOAT_MACRO_CLA(cpu02_cla.pwmf) // PWM CMP calc var 1
    }
    else
    {
        TLPWM_GAMMA_2_CMP_LINKED_MACRO_CLA(cpu02_cla.pwmf) // PWM CMP calc var 2
    }
}
```

```
#define CLARKE_MACRO(v)
v.ds = v.as;
v.qs = (v.as + (v.bs*2))*FLOAT_1_SQRT_3;
```

```
#define PARKF_MACRO(v)
v.de = v.ds * v.cos_a + v.qs * v.sin_a;
v.qe = -v.ds * v.sin_a + v.qs * v.cos_a;
```

```
#define TIREG_MACRO_CLA(v) \
/* proportional term */ \
v.up = v.kp_kTs* (v.ref - v.fbk); \
/* integral term */ \
v.integr = v.ki_Ts* v.up + v.integr + v.kcor_Ts*v.saterr; \
/* control output */ \
v.uprsat = v.up + v.integr; \
/* limit */ \
v.out = CLA_fsat(v.uprsat, v.max, v.min); \
v.saterr = v.out - v.uprsat;
```

См. Анучин А.С. «ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ МЕТОДОМ РЕАЛИЗАЦИИ МГНОВЕННЫХ ФАЗНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ»

Переходной процесс контура тока на скачок задания, частота ШИМ 80кГц, контура тока 160кГц

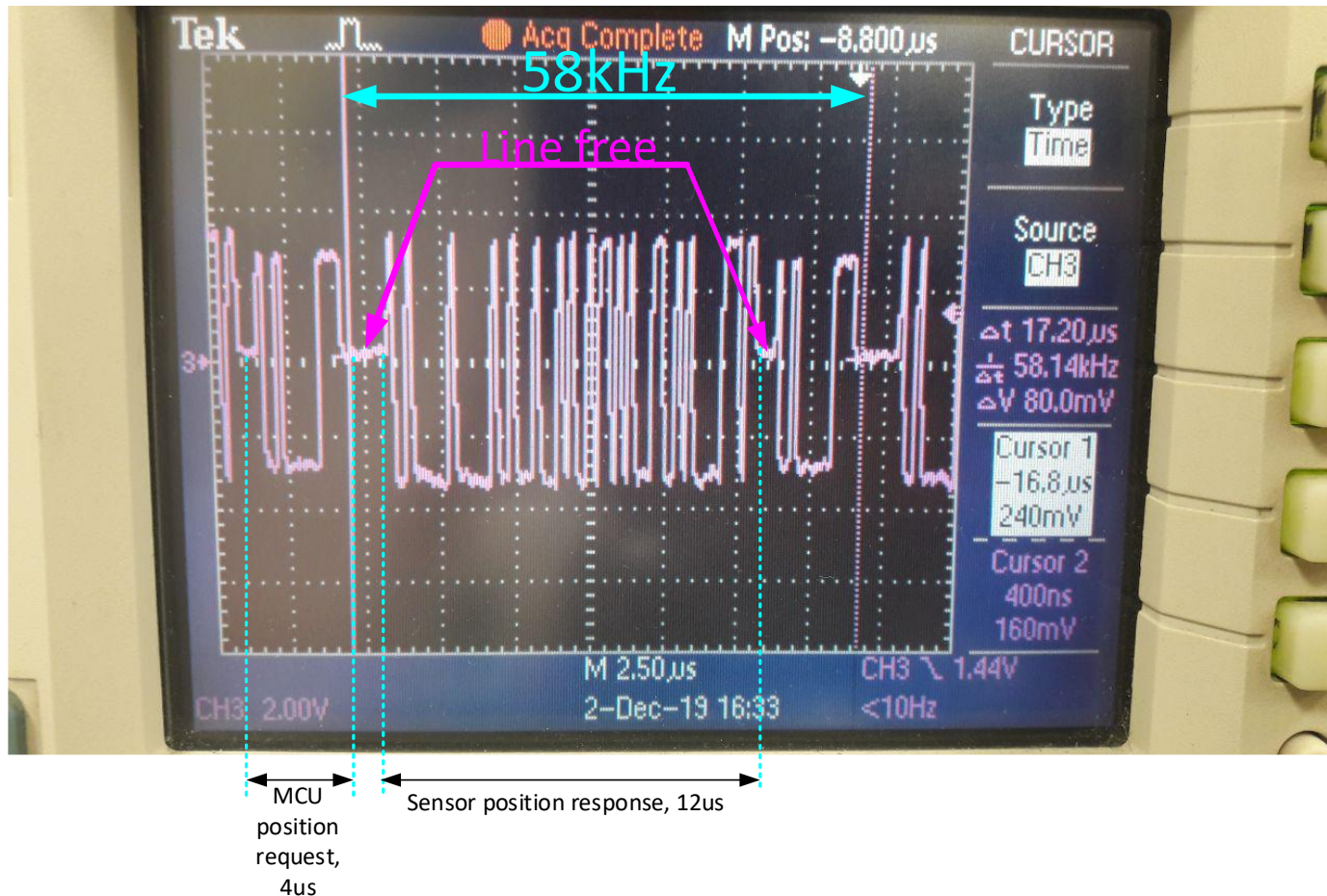


T_{μ} тока – некомпенсируемая постоянная времени контура тока
 T_{μ} тока = 10+2+6 = 18 мкс, (10 измерение, 2 расчёт и 6 ШИМ)
 Ожидание – время переходного процесса $4 T_{\mu}$ тока
 Т.е. $T_{ПП}$ тока = 4*18 = 72 мкс
Реальность – 70мкс. Сходится!

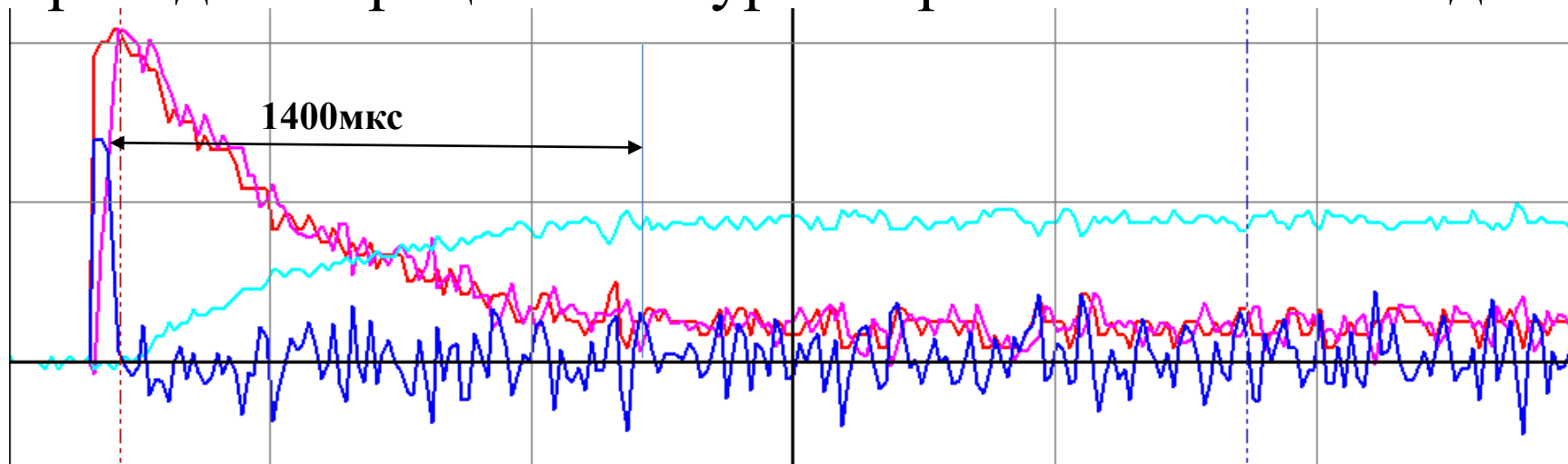
- Красная кривая** – обратная связь по току (0,05 А в клетке)
- Розовая кривая** – заданный ток (0,05 А в клетке)
- Синяя кривая** – выход регулятора (20 В в клетке)
- Ось времени 267мкс в клетке

Контур скорости

- Частота расчёта контура скорости 58кГц – ограничена частотой обратной связи SSI энкодера.
- Скорость считается как производная от положения – это дополнительно увеличивает задержку обратной связи по скорости.
- Используется обычный ПИД регулятор скорости, выдающий задание на ток I_q .



Переходной процесс контура скорости на скачок задания



Голубая кривая – скорость вращения вала, 10об/мин в клетке

Красная и розовая кривая – задание и обратная связь по току (0,1 А в клетке)

Синяя кривая – выход регулятора тока (10 В в клетке)

Ось времени 730мкс в клетке

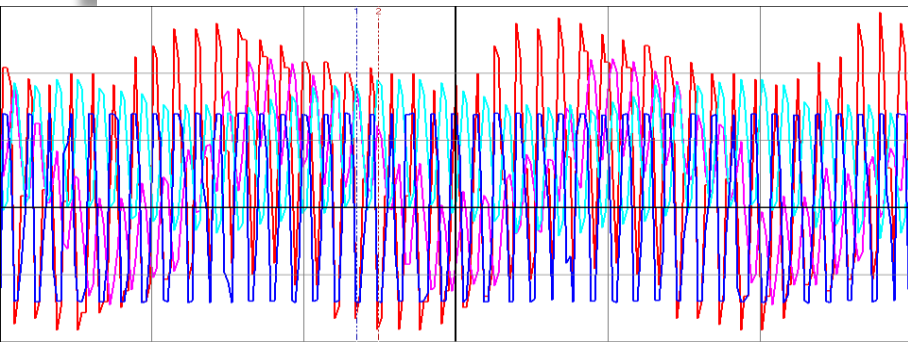
$T_{\mu \text{ скор}}$ - некомпенсируемая постоянная времени контура скорости

$T_{\mu \text{ скор}} = 2 * 18 = 36 \text{ мкс}$, (18 расчётное $T_{\mu \text{ тока}}$ контура тока)

Ожидание – время переходного процесса скорости $4 T_{\mu \text{ скор}}$

Т.е. $T_{\text{ПП скор}} = 4 * 36 = 144 \text{ мкс}$

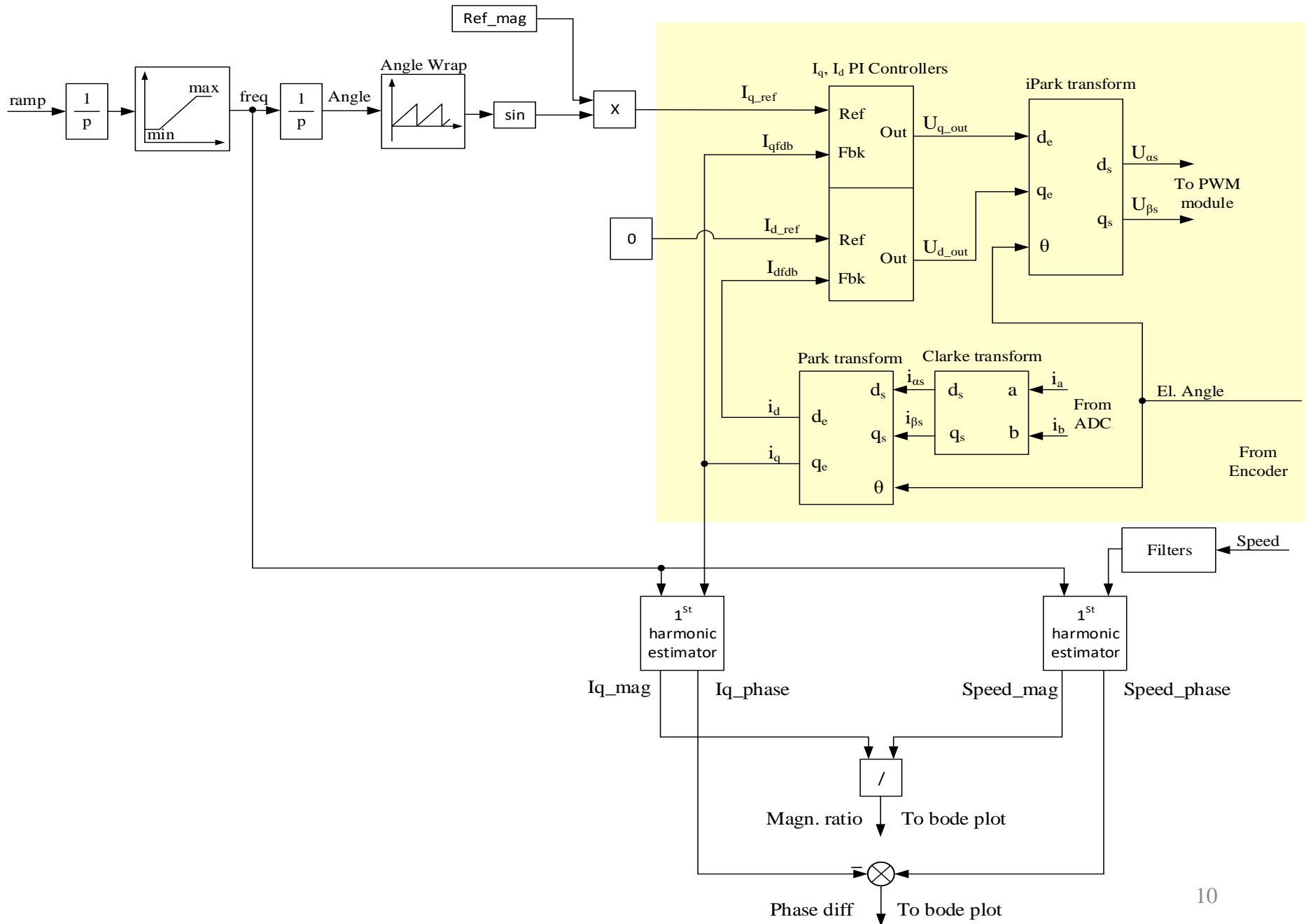
Реальность – 1400мкс на порядок медленнее положенного



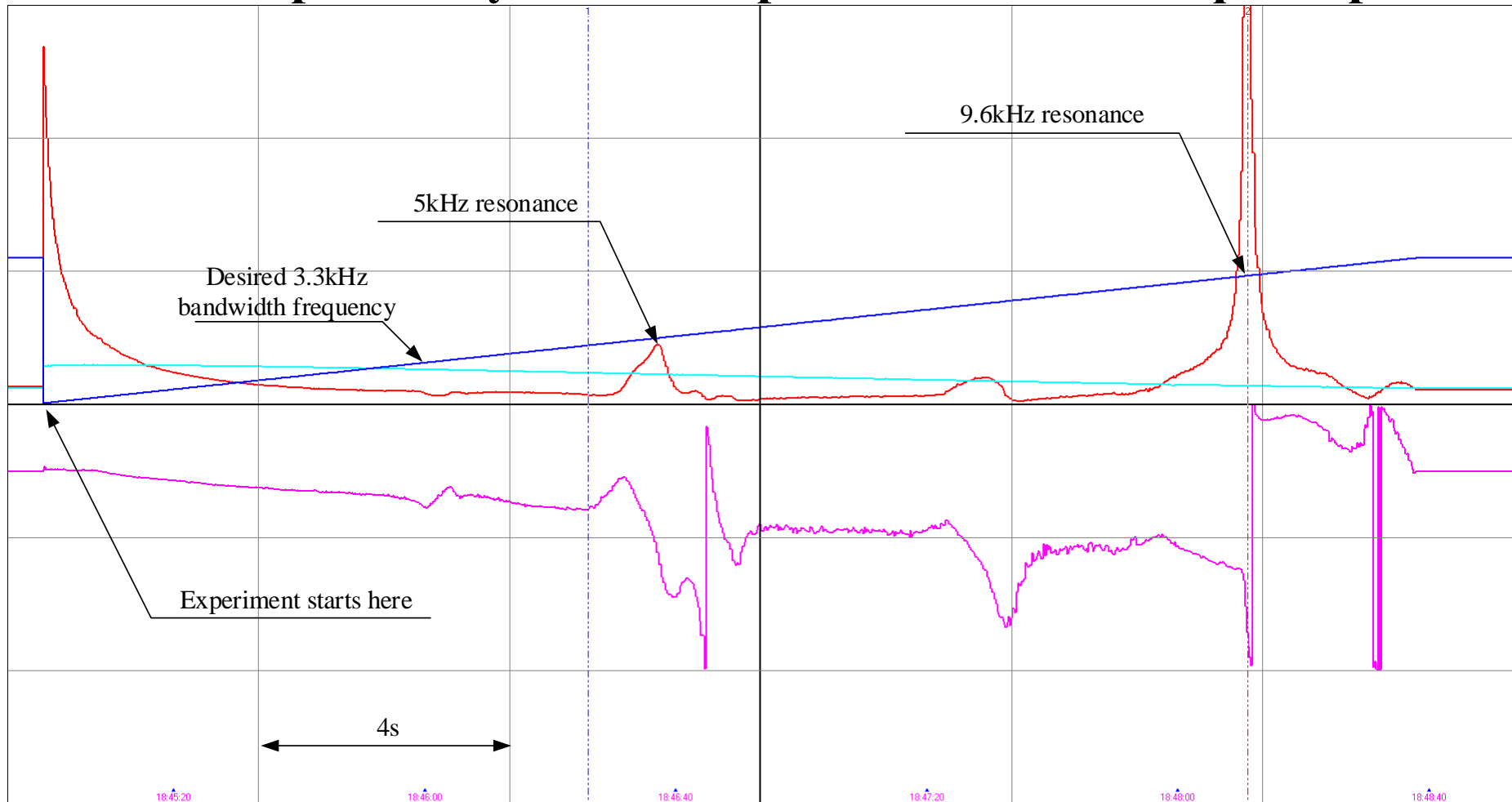
При попытке увеличить коэффициент усиления регулятора скорости начинаются колебания на частоте 10кГц.

Нужно исследовать причины колебаний! 9

Структурная схема для построения АЧХ/ФЧХ



АЧХ/ФЧХ разомкнутой по скорости системы без фильтрации



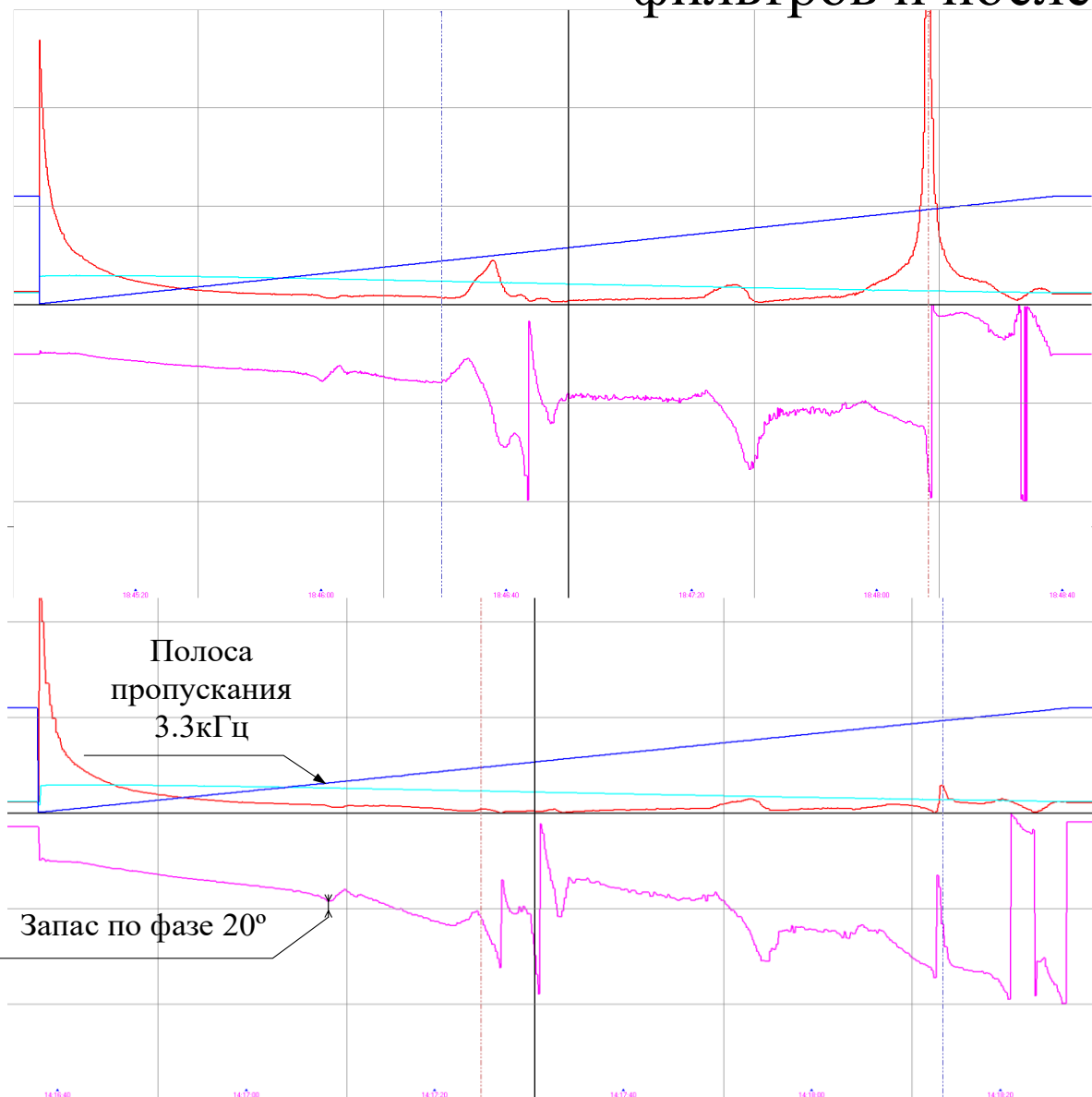
Темно-синяя линия показывает входную частоту от 100 Гц до 12кГц.

Красная линия отображает АЧХ, т.е. отношение выходной/входной величины, а именно отношение амплитуды скорости от энкодера, деленную на величину амплитуды тока обратной связи I_q . Масштаб 50 в клетке.

Голубая линия — величина тока обратной связи I_q .

Фиолетовая линия это ФЧХ, т.е. фазовая разница между выходом и входом, а именно между 1-й гармоникой скорости с энкодера и током I_q . Масштаб 180 град в клетке.

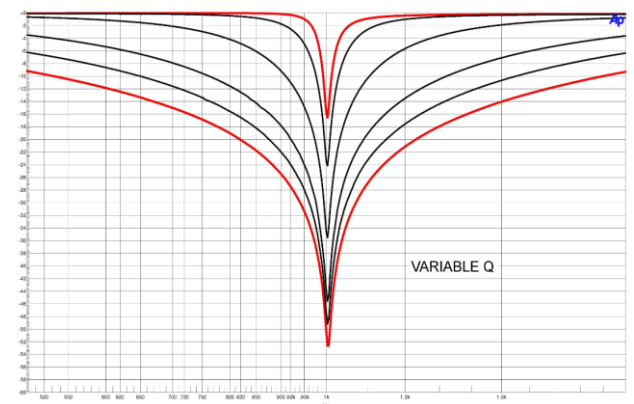
АЧХ разомкнутой по скорости системы до наложения полосовых фильтров и после



3300.13	14.1813305	0.0000	0.000048376	37	0.033042 Hz
300.14	14.686	2.8572	-13.269		
9330.82	0.14879	176.26 deg	17.539 deg		
5300.07	9678.5 Hz	4784.4 Hz	4884 Hz		

Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Making Digital Notch Filters”
DOI:
10.1109/TPEL.2016.2565598

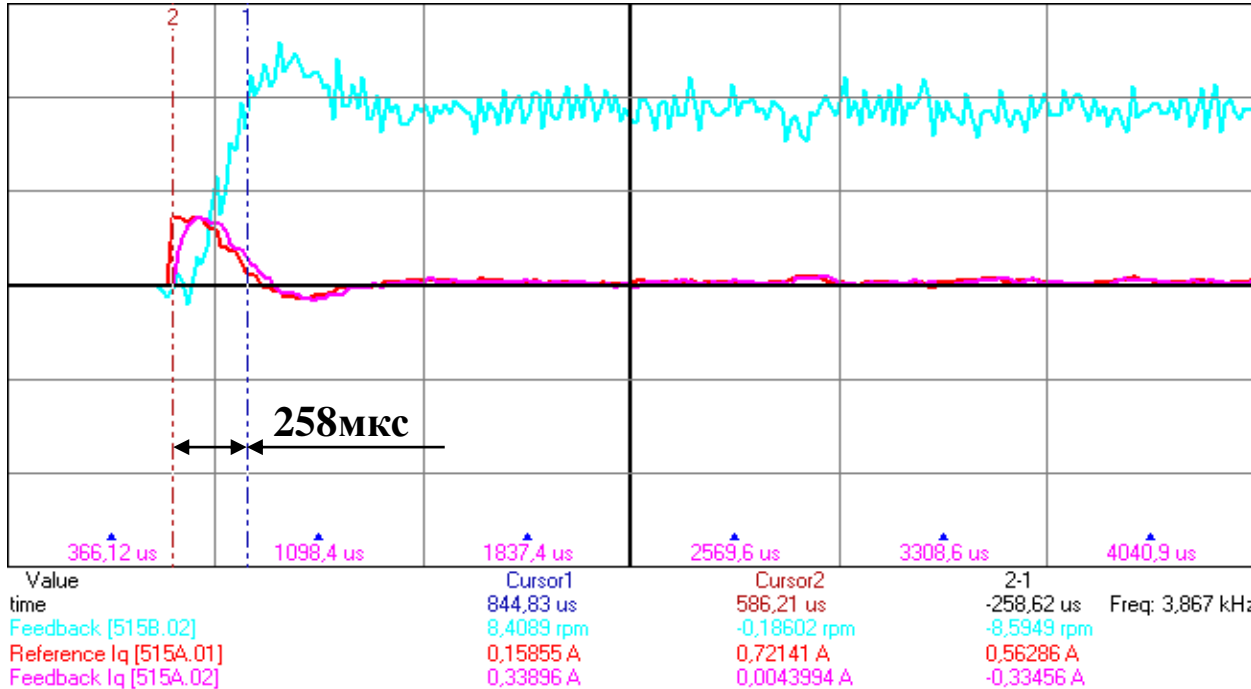
$$G_{\text{notch}}(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + Qs + \omega_n^2}$$



```
void NotchFilter_Calc (TnotchFilter *p)
{
    p->out = p->a1*p->outK_1 - p->a2*p->outK_2 +
    0.5*(1 + p->a2)*(p->in + p->inK_2) - p->a1*p->inK_1;

    //refresh previous values
    p->inK_2 = p->inK_1; //in[k-2] = in[k-1]
    p->inK_1 = p->in; //in[k-1] = in[k]
    p->outK_2 = p->outK_1; //out[k-2] = out[k-1]
    p->outK_1 = p->out; //out[k-1] = out[k]
}
```

Переходной процесс контура скорости на скачок задания 10 об/мин с включенными полосовыми фильтрами



Из-за фильтрации обратной связи скорости увеличилась $T_{\mu \text{ скор}}$

Поэтому этого время переходного процесса (258мкс) ощутимо больше ожидания (144мкс).

Но сильно лучше, чем без фильтрации (1440 мкс).

1.Feedback [515B.02] Scale 5 rpm Offset 0.000 rpm	2.Reference Iq [515A.01] Scale 1 A Offset 0.000 A	Continuous Sample Divider [1-255] 1 us Update forced auto Trigger is off Status: Free.
3.Feedback Iq [515A.02] Scale 1 A Offset 0.000 A	4- Empty Scale 200 U16 Offset 0 U16	

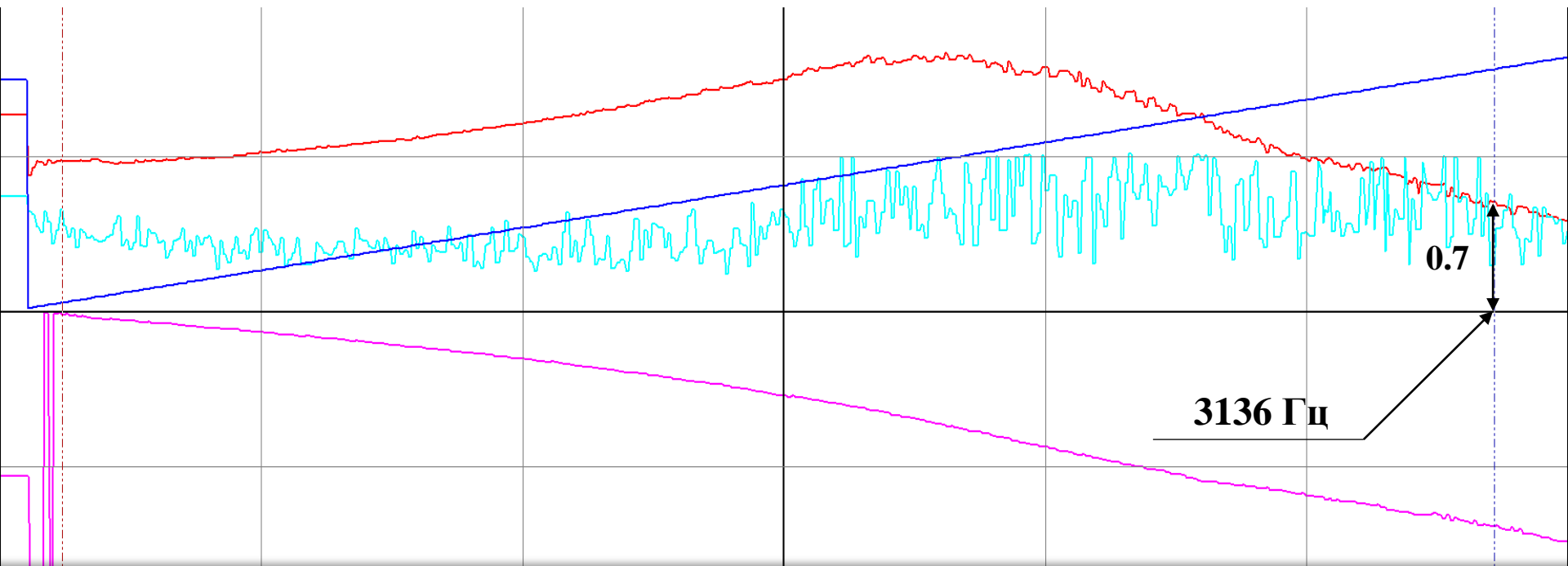
Голубая кривая – обратная связь по скорости (5 об/мин в клетке)

Красная кривая – заданный ток Iq (1 А в клетке)

Розовая кривая – текущий ток Iq (1 А в клетке)

Ось времени 732мкс в клетке

АЧХ замкнутой по скорости системы с полосовыми фильтрами и максимальными (на грани устойчивости) коэффициентами усиления



Темно-синяя линия показывает входную частоту от 100 Гц до 3кГц, в клетке 2000 Гц
Красная линия отображает АЧХ, т.е. отношение выходной/входной величины, а именно отношение амплитуды скорости обратной связи энкодера, деленную на величину задания скорости. Масштаб 1 в клетке.

Голубая линия — используемый уровень напряжения (для отслеживания работы без насыщения).

Фиолетовая линия это ФЧХ, т.е. фазовая разница между выходом и входом, а именно Масштаб 180 град в клетке.

А как у конкурентов? Yaskawa sigma 7 обещает полосу пропускания 3.1кГц

al%20Assets/Downloads/Brochures_Catalogues/Servo_Drives/Sigma7_Series/Sigma7_Standard/YEU_MuC_Sigma-7-Series_EN_V4.pdf

4 / 32 | - 201% + | [] []

1

Comprehensive Motor and A

Wide Power Range

- Very compact motors from 50 W to 15 kW
- Linear motors iron core and ironless with a peak force up to 7,560 N
- Dir from

2

Savings through Performanc

Lower Production Costs

- Speed loop bandwidth of 3.1 kHz
- Shorter settling time, reduced positioning time, higher throughput
- High

High

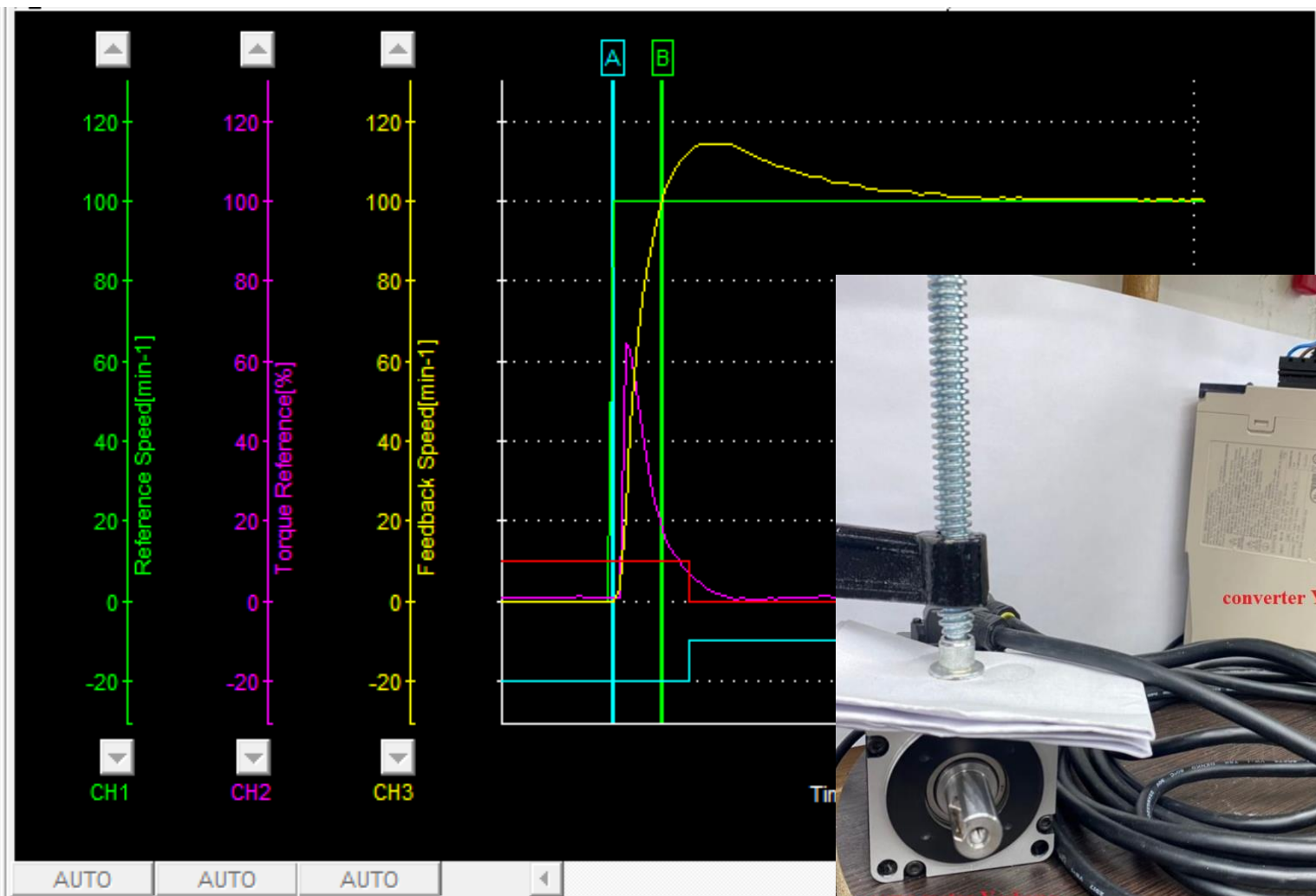
• Ov

• Hig

Ener

• 15

Переходной процесс контура скорости на скачок задания YASKAWA SGD7S-2R8A00A SGM7J-04A7A2C с самой удачной настройкой всех контуров и фильтров



Время регулирования 0,9мс

Время ПП 7,54мс

Перерегулирование 14%

Сравнения нашего привода с YASKAWA

Привод	SGM7J-04A7A2C	Наш привод
Датчик положения	YASKAWA 24 bit	TAMAGAWA 23 bit
Время разгона, мс от -3000 до +3000 об/мин	8.27	6.57
Перерегулирование (%)	1.03	2.5 – без фильтрации скорости 0.1 – с фильтрацией скорости
Время установления контура положения на холостом ходу (20%, ms)	8.78 – regular control 4.1 – model predictive control	4.9 – regular control 0.75 – with acceleration feedforward and fine tuning
Полоса пропускания контура тока	-	12 кГц (50кГц ШИМ, 64 OSR SDFM) 17 кГц (100кГц ШИМ, 32 OSR SDFM)
Полоса пропускания контура скорости	3.1 кГц полоса пропускания из рекламного буклета Опытные данные: Время регулирования 800мкс Полоса пропускания не более 1кГц	3.13 кГц исходя из АЧХ в замкнутом режиме 224 мкс время регулирования Примечание: наиболее агрессивное усиление ПИ, большое перерегулирование, дрожание положения +-5 инкрементов (для 23-битного датчика положения) 2 кГц исходя из АЧХ в замкнутом режиме 300мкс мкс время регулирования Примечание: низкие коэффициенты усиления ПИ, дрожание положения +-2 приращения (для 23-битного датчика положения)