Servo Drivers

- HCFA Integration KUKA

HCFA Integration KUKA

ПОЛНАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ИНТЕГРАЦИИ HCFA SV-X5 + KUKA KRC4 (EtherCAT)

На основе 3-х технических логов проекта

СОДЕРЖАНИЕ

1. Электрическое подключение (Hardware)
2. Настройка драйвера HCFA (Параметры)
3. Распайка кабеля энкодера
4. Настройка EtherCAT в WorkVisual
5. Модификация XML (PDO Mapping)
6. Программирование KRL
7. Решение типовых проблем

---

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОДКЛЮЧЕНИЕ (Hardware)

1.1. Организация питания (КРИТИЧНО!)

Раздельное питание силовой и управляющей части:

- **L1C / L2C (Control Power):**
  - Подключить к **220В** (Фаза + Ноль) **напрямую** от автомата питания (ДО контакторов безопасности)
  - Обеспечивает работу логики и связи EtherCAT при E-Stop
- **L1 / L2 (Main Power):**
  - Подключить к **220В** через контактор безопасности робота
  - ⚠ **ВАЖНО:** Драйвер рассчитан только на 220В, НЕ подключать к 3-фазной сети 400В!

1.2. Подключение тормоза

⚠ **ЗАПРЕЩЕНО** подключать тормоз напрямую в выход DO драйвера (сгорит транзистор, макс. 50мА)!

Правильная схема:

```
Выход DO1 (CN6: Pin 1 DO+ / Pin 6 DO-) → Катушка реле 24В → Контакты реле → Тормоз
```

Настройка драйвера:

- **P04.21 = 6** (Функция Brake Release)

1.3. STO (Safe Torque Off)

На разъеме **CN2** установить перемычки для деактивации аппаратной блокировки (временное решение для пусконаладки).

---

2. НАСТРОЙКА ДРАЙВЕРА HCFA (Параметры)

2.1. Программное обеспечение

Использовать:

- **HCS-Studio(Cn) V2.13** или
- **HCServoWorks 1.2.9**

⚠ Новые версии (Sysctrl Studio) этот привод НЕ ВИДЯТ!

2.2. ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ параметры для EtherCAT

Базовая конфигурация:

```
P00.01 = 7          // Режим EtherCAT
P06.28 = 1          // Отключить концевики P-OT/N-OT (КРИТИЧНО!)
P09.13 = H0015      // Единицы: RPM (скорость), ms (ускорение)
                    // или H0005 в зависимости от версии прошивки
P00.19 = 0          // Отключить контроль рассогласования (при пусконаладке)
```

⚠ **КРИТИЧНО - Настройка цифровых входов:**

Для работы через EtherCAT **ОБЯЗАТЕЛЬНО** убрать назначение функций концевиков:

```
P04.01 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.02 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.03 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.04 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.05 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.06 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.07 = 0 или другая функция (не 14, не 15)
P04.08 = 0 или другая функция (не 14, не 15)

Где: 14 = P_OT (положительный концевик)
     15 = N_OT (отрицательный концевик)
```

Причина: Если оставить функции 14 или 15, драйвер будет ждать сигналы концевиков и останется в состоянии **Switch On Disabled** (StatusWord = 592), игнорируя команды включения.

2.3. "Взлом" защиты для стороннего мотора

Если используется неродной мотор (например, GSK 150SJTRE):

Строго по порядку:

1. **P07.21 = 1** (Снятие защиты от записи)
2. **Выключить/Включить питание**
3. **P18.00 = 0000FFFF** (HEX) или **65535** (DEC) — код "Универсальный двигатель"
4. **Выключить/Включить питание**

2.4. Параметры мотора (P18 Group)

Заполнить с шильдика мотора:

```
P18.05 = 13.00      // Номинальный ток (A)
P18.06 = 10.00      // Номинальный момент (Nm)
P18.08 = 2000       // Номинальная скорость (rpm)
P18.11 = 4          // Количество пар полюсов (КРИТИЧНО!)
                    // Для моторов 150-й серии = 4 (8 полюсов)
                    // При неправильном значении: рывки, Err.047
P18.19 = 0, 1 или 2 // Протокол энкодера (подбирать)
```

После изменения P18.11 ОБЯЗАТЕЛЬНО:

```
P20.03 = 5          // Поиск начального электрического угла
```

2.5. Настройка инерции и жесткости

Автоматический замер инерции:

```
P20.03 = 1 или 2    // Автоопределение инерции нагрузки
```

После замера система установит значение в **P00.04** (обычно 5-15).

Жесткость регулятора:

```
P00.02 = 2          // Режим автонастройки (рекомендуется)
P00.03 = 10-12      // Жесткость (для высокой скорости)
                    // Низкое значение (5) = мягко, отставание
                    // Высокое значение (10-12) = жестко, точно
```

Скоростное упреждение (если есть отставание):

```
P01.12 = 30-50      // Feedforward (%)
```

2.6. Обнуление абсолютного энкодера

Если нужно установить текущую позицию как "0":

1. Выключить Servo OFF (мотор свободен)
2. Убедиться: **P06.47 = 1** (Абсолютный режим)
3. **P20.06 = 7** (Команда сброса)
4. Перезагрузить питание

Если не работает (Нард-ресет):

1. Выключить привод
2. Вынуть батарейку на 1 минуту
3. Включить → Получить ошибку **Err.012**
4. В состоянии ошибки: **P20.06 = 7**
5. Перезагрузить питание

---

3. РАСПАЙКА КАБЕЛЯ ЭНКОДЕРА

3.1. Проблема разъемов

- **Мотор:** D-Sub (DB15)

- **Драйвер CN7:** IEEE 1394 (FireWire 6-pin)

Решение: Кастомный кабель с перепайкой.

3.2. Правильная распиновка

Сигнал	Пин на CN7 (IEEE1394)	Пин на моторе (D-Sub)	Цвет (проверить!)
+5V	**1**	**2**	Красный
GND	**2**	**3**	Черный
Data+	**5**	**4**	Белый
Data-	**6**	**5**	Желтый
Экран	**Корпус (Shell)**	**Корпус/9**	Оплетка

3.3. КРИТИЧЕСКИЕ требования к монтажу

1. НИКАКИХ СКРУТОК!

- Линии данных работают на частоте 2.5 МГц
- Скрутка = отражение сигнала + помехи (Err.013)
- Только пайка, минимальная разделка

2. Экранирование:

- Экран припаять к металлическому корпусу CN7 **вкруговую**
- Или зажать хомутом
- "Свиной хвостик" = антенна для помех

3. Диагностика энкодера:

- Замерить ток по линии +5В: норма **30-80 мА**
- 0 мА = обрыв
- > 200 мА = КЗ

3.4. Борьба с помехами (Err.013)

Если при включении или вращении вылетает **Err.013**:

Аппаратные меры:

1. Надеть **ферритовое кольцо** на силовой кабель UVW возле привода
2. Заземлить корпус мотора отдельным проводом на PE привода

Программный фильтр (крайняя мера):

```
P06.40 = 10-39      // Фильтр помех энкодера
                    // Заводское: 0
                    // Увеличивать при Err.013
                    // ⚠ Высокое значение = задержка = хуже динамика
```

---

4. НАСТРОЙКА ETHERCAT В WORKVISUAL

4.1. Топология сети

Драйвер подключить в порт **X44** контроллера KRC4:

```
KRC4 (X44) → Beckhoff EK1100 (Coupler) → HCFA SV-X5E
```

Порядок устройств в дереве WorkVisual = физическое подключение.

4.2. ESI-файл (XML)

Использовать оригинальный XML от производителя:

```
HCFA_X5B_Servo_Driver2.1.27.1.xml
```

4.3. Первичная диагностика

Через WorkVisual → Диагностика входов:

- Код **0x7305** = Ошибка связи с энкодером (проверить кабель)
- После правильной пайки ошибка должна исчезнуть

---

5. МОДИФИКАЦИЯ XML (PDO MAPPING)

5.1. Проблема

В стандартном XML отсутствуют объекты для передачи скорости и ускорения:

- **0x6081** (Profile Velocity)
- **0x6083** (Profile Acceleration)
- **0x6084** (Profile Deceleration)

Без них драйвер получает команду на движение со скоростью **0** → мотор стоит.

5.2. Решение — Модификация 1st RxPdo

Анализ:

- **1st RxPdo (#x1600)** имеет `<Access>rw</Access>`
- Нет флага `Fixed="true"`
- → Драйвер поддерживает динамическую реконфигурацию

Правки в XML:

Найти секцию `<Object Index="1600">` и добавить:

xml

```xml
<Entry>
  <Index>#x6081</Index>
```

```
    <SubIndex>0</SubIndex>
    <BitLen>32</BitLen>
    <Name>Profile Velocity</Name>
    <DataType>UDINT</DataType>
  </Entry>
  <Entry>
    <Index>#x6083</Index>
    <SubIndex>0</SubIndex>
    <BitLen>32</BitLen>
    <Name>Profile Acceleration</Name>
    <DataType>UDINT</DataType>
  </Entry>
  <Entry>
    <Index>#x6084</Index>
    <SubIndex>0</SubIndex>
    <BitLen>32</BitLen>
    <Name>Profile Deceleration</Name>
    <DataType>UDINT</DataType>
  </Entry>
```

Найти секцию `<RxPdo Index="#x1600">` и добавить соответствующие Entry.

После импорта нового XML и компиляции → переменные появятся в WorkVisual.

5.3. ⚠ Что НЕ работает

Попытка 1 (Неудачная) — 5th PDO:

- 5-й набор помечен `Fixed="true"` (жестко зашит)
- Изменение размера → потеря связи

Попытка 2 (Неудачная) — Target Velocity:

- Существует в 5-м наборе
- Работает только в режиме скорости (Mode 3)
- В режиме позиционирования (Mode 1) игнорируется

---

6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ KRL

6.1. Конфигурация ($CONFIG.DAT)

Создать `SIGNAL` для объединения битов:

krl

```
SIGNAL do_HCFA_ControlWord $OUT[1] TO $OUT[16]     ; UINT
SIGNAL do_HCFA_TargetPos $OUT[17] TO $OUT[48]      ; DINT
SIGNAL do_HCFA_ProfileVel $OUT[49] TO $OUT[80]     ; UDINT
SIGNAL do_HCFA_ProfileAcc $OUT[81] TO $OUT[112]    ; UDINT

SIGNAL di_HCFA_StatusWord $IN[1] TO $IN[16]        ; UINT
SIGNAL di_HCFA_ActPos $IN[17] TO $IN[48]           ; DINT
SIGNAL di_HCFA_OpMode $IN[49] TO $IN[56]           ; INT
```

6.2. Алгоритм включения (Servo ON)

Автомат состояний CiA 402:

krl

```
DEF HCFA_ServoON()
  ; Проверка текущего статуса
  INT status
  status = di_HCFA_StatusWord

  ; Если есть ошибка (Bit 3 = 1)
  IF (status B_AND 'H0008') == 'H0008' THEN
    ; Fault Reset
    do_HCFA_ControlWord = 128  ; Бит 7
    WAIT SEC 0.2
    do_HCFA_ControlWord = 0
    WAIT SEC 0.2
  ENDIF

  ; State Machine: Shutdown → Switch On → Enable Operation
```

```
  ; 1. Shutdown (если не в Ready to Switch On)
  IF (status B_AND 'H006F') <> 'H0021' THEN
    do_HCFA_ControlWord = 6
    WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H006F') == 'H0021'  ; Ready to Switch On
  ENDIF

  ; 2. Switch On
  do_HCFA_ControlWord = 7
  WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H006F') == 'H0023'  ; Switched On

  ; 3. Enable Operation
  do_HCFA_ControlWord = 15
  WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H006F') == 'H0027'  ; Operation Enabled
END

DEF HCFA_ServoOFF()
  do_HCFA_ControlWord = 6  ; Shutdown (отключает момент)
END
```

6.3. Функция движения (Move)

Режим: Profile Position (Mode 1) — Абсолютное позиционирование

krl

```
DEF HCFA_MoveToAngle(angle :REAL)
  ; Константы
  INT encoder_resolution = 131072  ; 17-bit энкодер
  REAL gear_ratio = 100.0          ; Редуктор 1:100

  ; Расчет импульсов
  INT target_pulses
  target_pulses = (angle / 360.0) * encoder_resolution * gear_ratio

  ; === SMART CHECK & AUTO RECOVERY ===

  INT status
  status = di_HCFA_StatusWord
```

```
; 1. Проверка на ошибку
IF (status B_AND 'H0008') == 'H0008' THEN
  ; Fault Reset + Включение
  do_HCFA_ControlWord = 128
  WAIT SEC 0.2
  do_HCFA_ControlWord = 0
  WAIT SEC 0.2
  HCFA_ServoON()
ENDIF

; 2. Проверка включения
IF (status B_AND 'H006F') <> 'H0027' THEN
  HCFA_ServoON()
ENDIF

; 3. Проверка режима (OpMode должен быть 1)
IF di_HCFA_OpMode <> 1 THEN
  do_HCFA_OpMode = 0  ; Сброс
  WAIT SEC 0.1
  do_HCFA_OpMode = 1  ; Установка Profile Position
  WAIT SEC 0.1
ENDIF

; 4. Сброс зависшего бита подтверждения (Bit 12)
IF (status B_AND 'H1000') == 'H1000' THEN
  do_HCFA_ControlWord = 15  ; Сброс в базовое состояние
  WAIT SEC 0.1
ENDIF

; === ЗАПИСЬ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ===

do_HCFA_ProfileVel = 500      ; Скорость: 500 rpm
do_HCFA_ProfileAcc = 100      ; Ускорение: 100 ms
do_HCFA_TargetPos = target_pulses

; === HANDSHAKE (Двухступенчатый старт) ===

; Шаг 1: Подготовка (Absolute, New Set-point)
```

```
  do_HCFA_ControlWord = 47      ; Биты: 0,1,2,3,4,5 (без Change Immediately)
  WAIT SEC 0.05

  ; Шаг 2: Старт (Rising Edge бита 4)
  do_HCFA_ControlWord = 63      ; Биты: 0,1,2,3,4,5,6 (с Change Immediately)

  ; Ждем подтверждения (Bit 12 = Set-point Acknowledge)
  WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H1000') == 'H1000' TIMEOUT 2

  ; Сброс бита New Set-point
  do_HCFA_ControlWord = 15

  ; Ждем начала движения (Bit 10 = Target Reached сбросится)
  WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H0400') == 'H0000' TIMEOUT 2

  ; Ждем завершения (Bit 10 = Target Reached установится)
  WAIT FOR (di_HCFA_StatusWord B_AND 'H0400') == 'H0400'

  ; Финиш: Отключение момента
  do_HCFA_ControlWord = 6  ; Shutdown
END
```

6.4. Расшифровка ControlWord

Значение	Биты	Команда
6	0110	Shutdown (переход в Ready to Switch On)
7	0111	Switch On
15	1111	Enable Operation (базовое рабочее состояние)
47	0010 1111	Absolute + New Set-point (подготовка)
63	0011 1111	+ Change Immediately (старт по Rising Edge)
128	1000 0000	Fault Reset (сброс ошибки)

6.5. Расшифровка StatusWord (ключевые биты)

Бит	Маска	Значение
3	0x0008	Fault (есть ошибка)
5	0x0020	Quick Stop (0 = активна блокировка)
10	0x0400	Target Reached
12	0x1000	Set-point Acknowledge

Состояния (биты 0-6):

- **0x0021 (33):** Ready to Switch On
- **0x0023 (35):** Switched On
- **0x0027 (39):** Operation Enabled
- **0x0250 (592):** Switch On Disabled (блокировка)
- **0x0637 (1591):** Operation Enabled + Ready + Target Reached

---

7. РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ПРОБЛЕМ

7.1. Драйвер не включается (StatusWord = 592)

Симптомы: Команды включения игнорируются.

Причины:

1. Не сняты функции концевиков (P04.01...P04.08 содержат 14 или 15)
2. Не установлен **P06.28 = 1**

Решение: См. раздел 2.2 (обязательные параметры).

7.2. Err.007 (Нет связи с энкодером)

Причины:

1. Неправильная распайка кабеля
2. Обрыв/КЗ в линиях Data+/Data-
3. Не подключен +5V или GND
4. Неправильный протокол (**P18.19**)

Диагностика:

- Замерить ток по +5V: должен быть 30-80 мА
- Проверить распайку по таблице из раздела 3.2

7.3. Err.013 (Помехи энкодера)

Причины:

1. Скрутки в линиях Data+/Data-
2. Плохое экранирование
3. Помехи от силового кабеля

Решение:

1. Перепаять кабель (без скруток)
2. Экран припаять к корпусу CN7 вкруговую
3. Ферритовое кольцо на силовой кабель UVW
4. Заземлить корпус мотора
5. Крайняя мера: **P06.40 = 10-39**

7.4. Err.043 (Position Deviation Too Large)

Причины:

1. Низкая жесткость регулятора (P00.03)
2. Неправильная инерция (P00.04)
3. Слишком жесткий допуск (P00.19)

Решение:

1. Выполнить автозамер инерции: **P20.03 = 1**
2. Увеличить жесткость: **P00.03 = 10-12**
3. На этапе пусконаладки: **P00.19 = 0**
4. При отставании: **P01.12 = 30-50** (Feedforward)

7.5. Err.047 (Перегрузка)

Причины:

1. Неправильное количество пар полюсов (**P18.11**)
2. Неправильный ток/момент мотора
3. Механическая перегрузка

Решение:

1. Проверить **P18.11 = 4** (для моторов 150-й серии)
2. После изменения: **P20.03 = 5**
3. Проверить параметры мотора (P18.05, P18.06, P18.08)

7.6. Мотор стоит на месте (нет движения)

Причины:

1. Отсутствуют объекты 0x6081/0x6083 в PDO
2. Неправильные единицы измерения (P09.13)
3. Скорость = 0

Решение:

1. Модифицировать XML (раздел 5)
2. Установить **P09.13 = H0015** (RPM/ms)
3. В коде задать **ProfileVel > 0** (например, 500)

7.7. Зависание на WAIT FOR Bit 12

Причины:

1. Бит подтверждения завис с прошлого раза
2. Драйвер не в режиме позиционирования (Mode <> 1)

Решение:

1. Перед движением: сброс `OpMode = 0` → `OpMode = 1`
2. Если `Bit 12 == 1` перед стартом → сброс `ControlWord = 15`

7.8. Очень медленное движение (незаметное глазу)

Причина: P09.13 = H1115 (единицы измерения = импульсы/сек)

Решение: P09.13 = H0015 (RPM/ms)

7.9. Поворот на неправильный угол

Причины:

1. Не учтен редуктор
2. Неправильное разрешение энкодера

Решение:

1. Определить передаточное число экспериментально
2. В формуле расчета: `pulses = (angle / 360) * encoder_resolution * gear_ratio`

ФИНАЛЬНЫЙ ЧЕКЛИСТ ПЕРЕД ЗАПУСКОМ

- ☐ Раздельное питание L1C/L2C (220В напрямую) и L1/L2 (220В через контактор)
- ☐ Кабель энкодера: пайка по таблице, экран к корпусу, без скруток
- ☐ Диагностика энкодера: ток 30-80 мА
- ☐ **P00.01 = 7** (EtherCAT)
- ☐ **P06.28 = 1** (Игнорировать концевики)
- ☐ **P04.01...P04.08**: Все значения ≠ 14 и ≠ 15
- ☐ **P09.13 = H0015** (RPM/ms)
- ☐ **P18.11 = 4** (Пары полюсов для 150-й серии)
- ☐ **P20.03 = 5** (Поиск угла) после изменения полюсов
- ☐ **P20.03 = 1** (Автозамер инерции)
- ☐ **P00.03 = 10-12** (Жесткость)
- ☐ XML модифицирован (объекты 0x6081, 0x6083 добавлены в 1st RxPdo)

- ☐ Топология EtherCAT в WorkVisual = физическое подключение
- ☐ Код KRL: включение через Shutdown → Switch On → Enable Operation
- ☐ Код KRL: движение с ProfileVel > 0 и двухступенчатым стартом (47 → 63)
- ☐ Тестовое движение на малой скорости (50-100 rpm)

СИСТЕМА ГОТОВА К РАБОТЕ!

Эта инструкция основана на реальном опыте пусконаладки и содержит все критические нюансы для успешной интеграции HCFA + KUKA через EtherCAT.