

Современный автоматизированный электропривод горных машин

Курс
лекций

Глава 1

АЭП КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Общий вид экскаватора

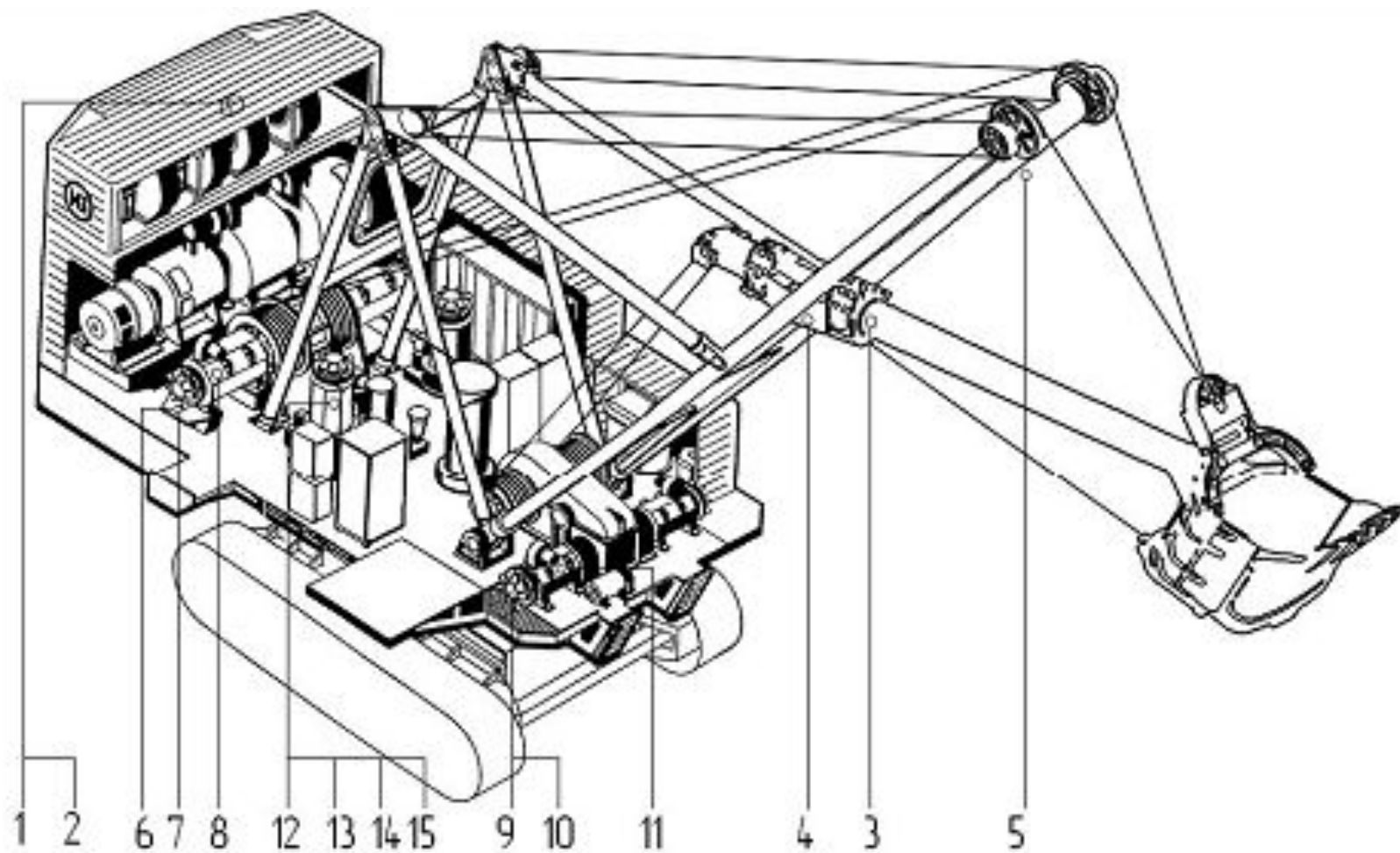
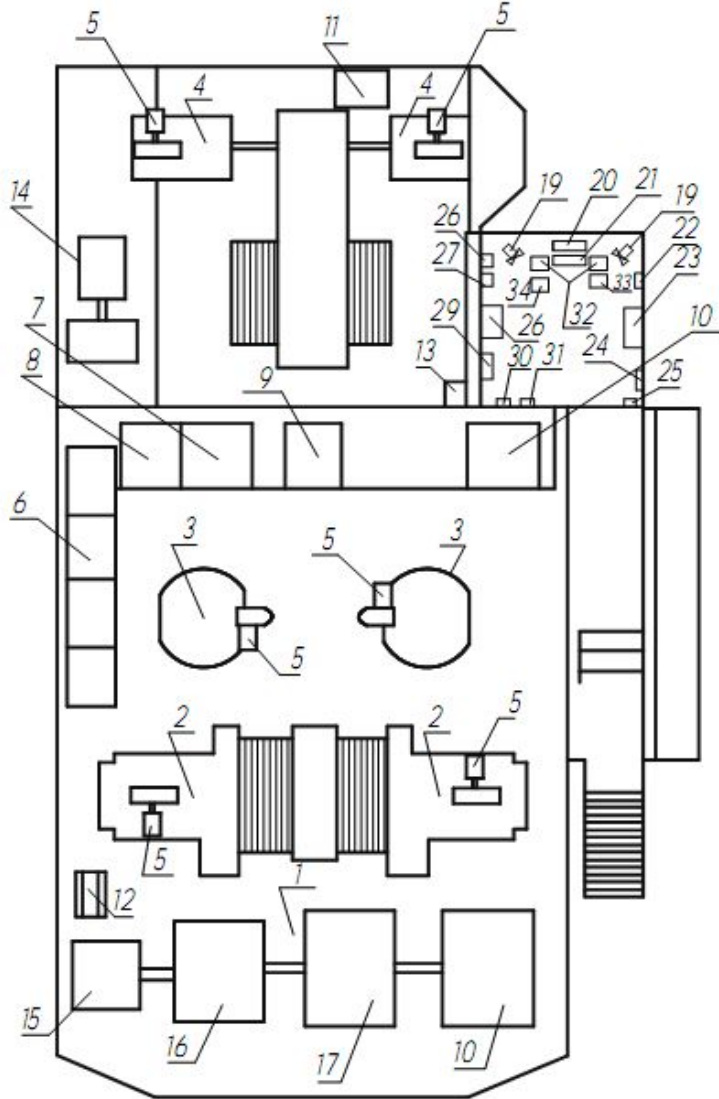


Схема расположения

оборудования

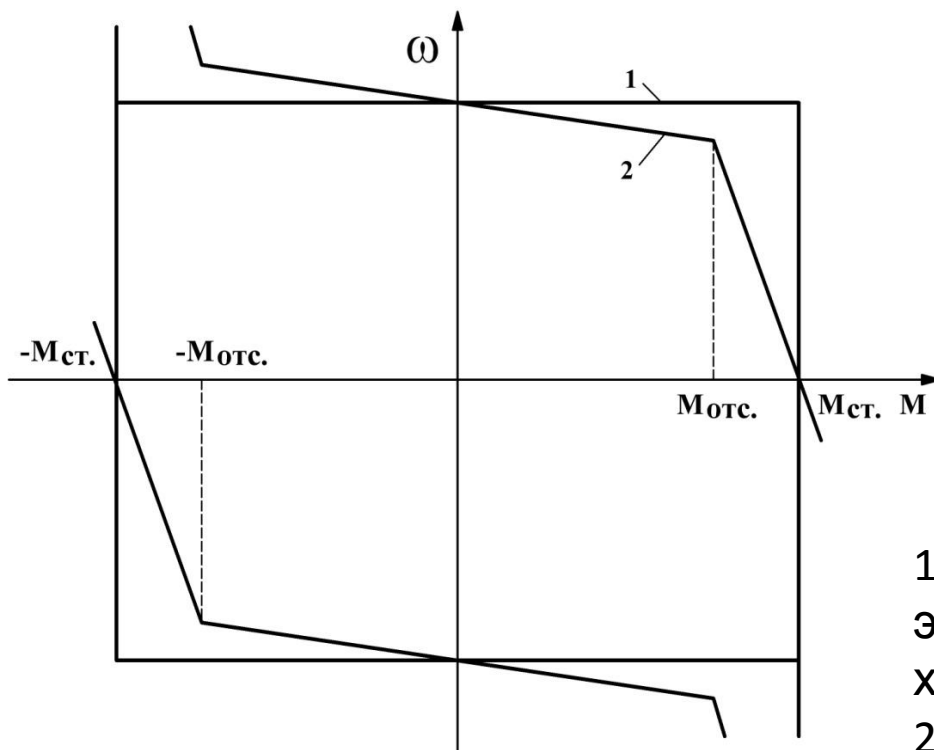


Основное оборудование:

- 1 – главный преобразовательный агрегат;
- 2 – электродвигатели подъема;
- 3 – электродвигатели поворота;
- 4 – электродвигатели напора;
- 5 – вспомогательные электродвигатели;
- 6 – шкаф управления главными электроприводами;
- 7 – шкаф управления возбуждением синхронного двигателя;
- 8 – шкаф управления вспомогательными электроприводами;
- 9 – кольцевой токоприемник;
- 10 – высоковольтное распределительное устройство;
- 11 – двигатель открывания днища ковша;
- 15 – приводный синхронный двигатель;

Требования к АЭП подъема и напора

1. Диапазон регулирования скорости: 10 : 1.
2. Возможность удержания ковша.
3. Ограничение крутящего момента на уровне 2 – 2,5 Мн (формирование экскаваторной механической характеристики).



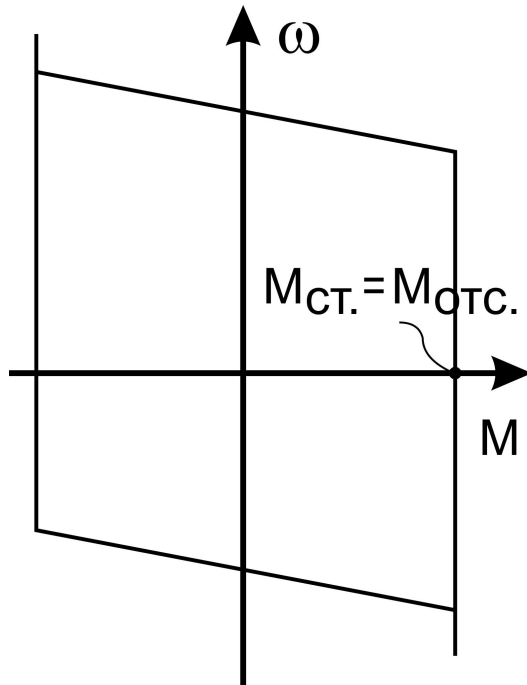
Котс. = $M_{отс.}/M_{ст.}$
где $M_{отс.}$ – момент отсечки;
 $M_{ст.}$ – стопорный момент.

1 – идеальная экскаваторная характеристика,
2 – реальная экскаваторная характеристика.

Требования к АЭП поворота

1. Диапазон регулирования скорости: 10 : 1.
2. Ограничение динамического момента на уровне 2Мн (формирование экскаваторной механической характеристики с $K_{отс.} = 1$).

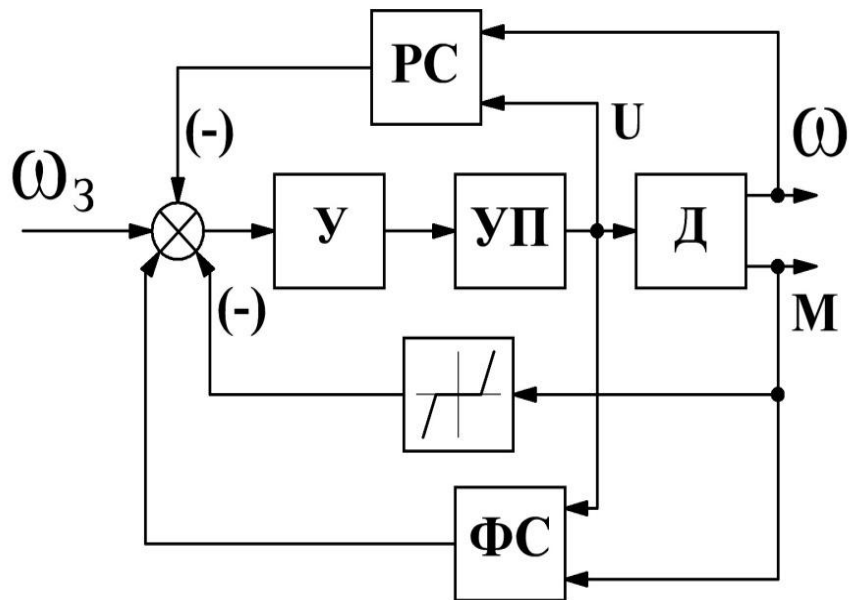
Момент сопротивления в электроприводе поворота составляет 10% от максимального динамического момента.



Формирование экскаваторной характеристики в электроприводе подъема вызвано необходимостью ограничения углового ускорения.

Структурная схема АЭП подъема и напора

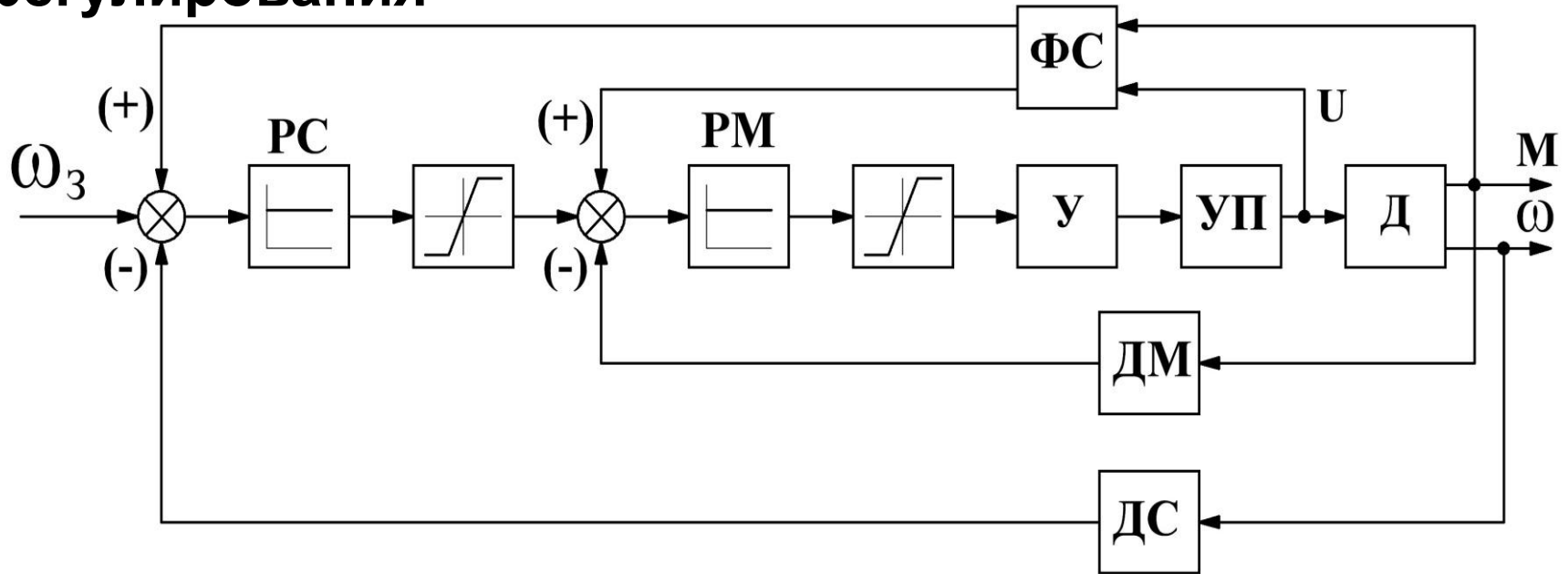
АЭП постоянного тока с суммирующим усилителем



У – усилитель;
УП – управляемый преобразователь;
Д – двигатель;
ФС – формирующие и стабилизирующие связи;
РС – регулятор скорости.

Структурная схема АЭП подъема, напора и поворота

АЭП постоянного тока с системой подчиненного регулирования

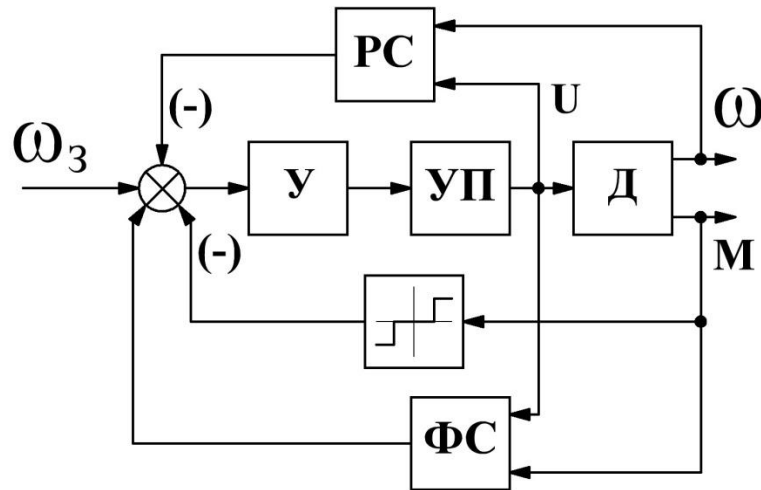


У – усилитель; УП – управляемый преобразователь; Д – двигатель; ФС – формирующие и стабилизирующие связи; РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; ДМ – датчик электромагнитного момента.

Структурная схема АЭП

поворота

АЭП постоянного тока с системой подчиненного регулирования

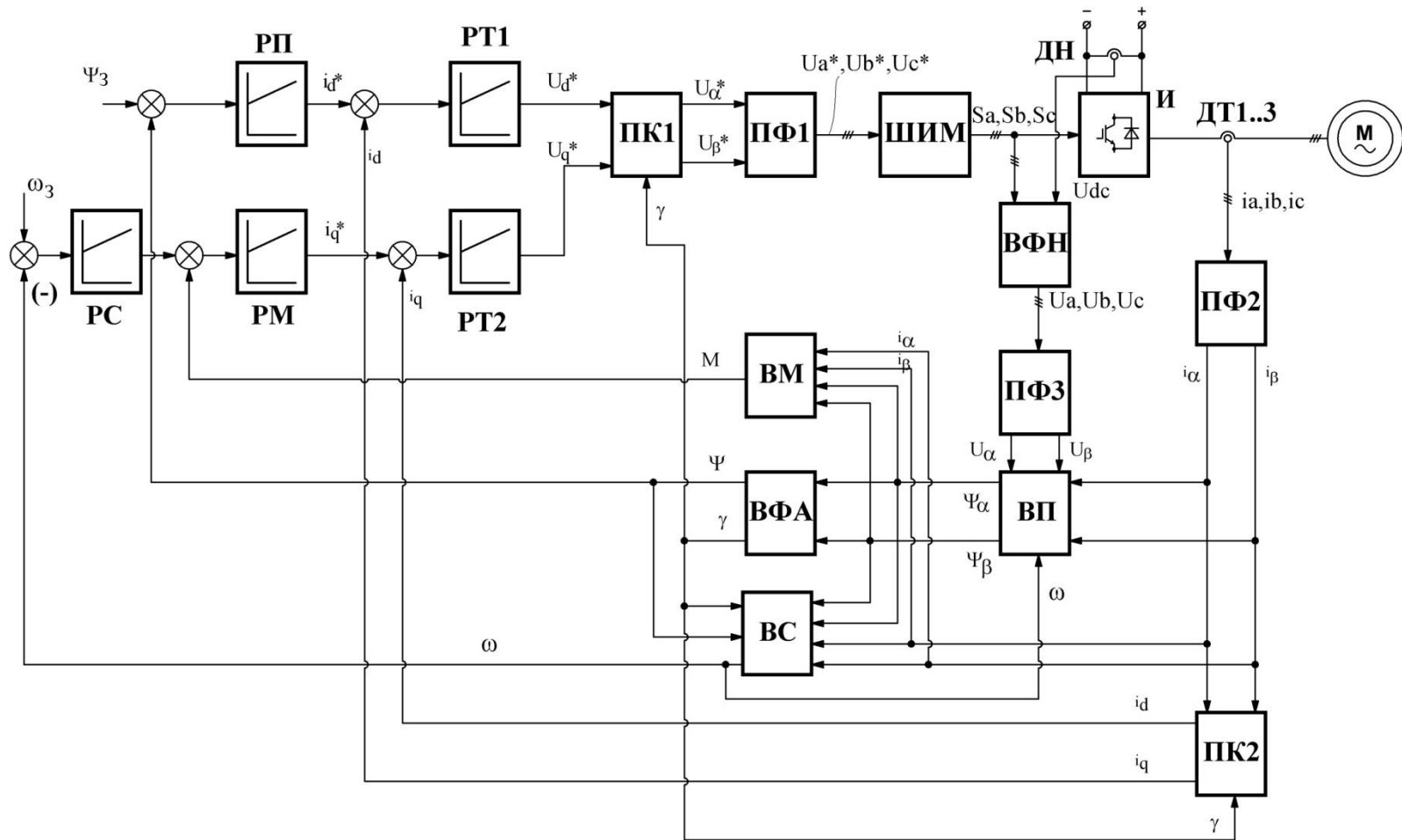


У – усилитель;
УП – управляемый преобразователь;
Д – двигатель;
ФС – формирующие и стабилизирующие связи;
РС – регулятор скорости.

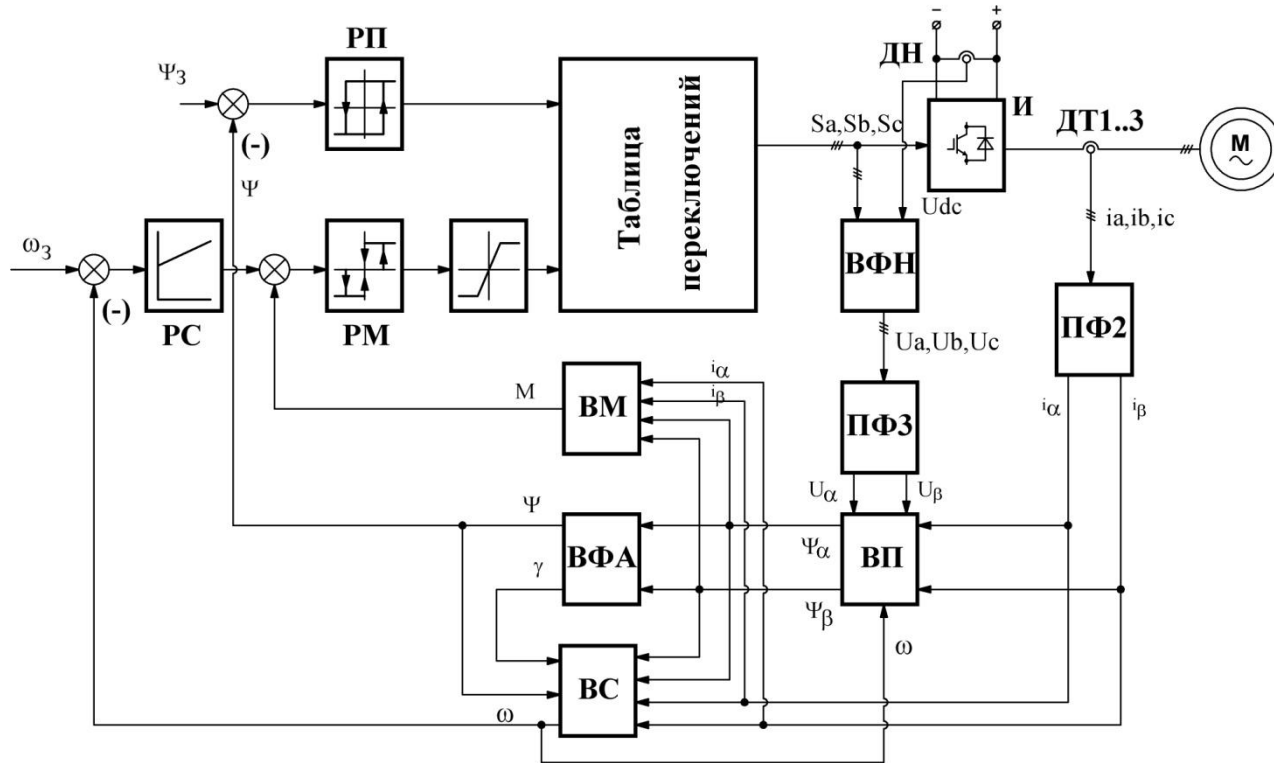
Отличие структурной схемы АЭП поворота от структурной схемы АЭП подъема и напора заключается в нелинейном элементе, отвечающем за ограничение электромагнитного момента

Структурная схема АЭП подъема, напора и поворота

АЭП переменного тока с системой векторного управления

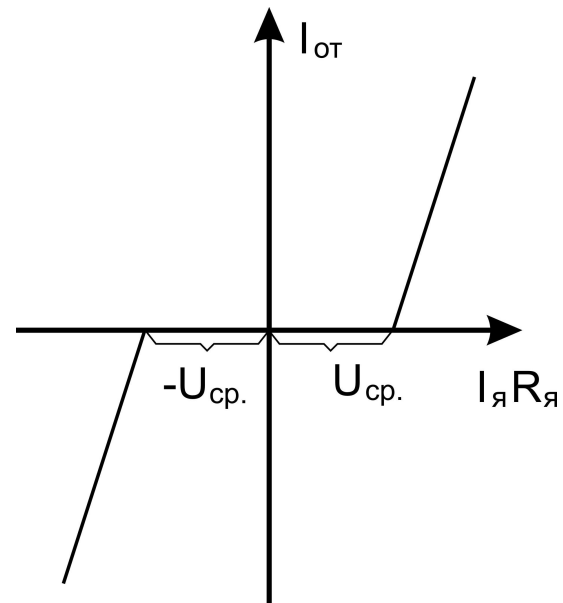
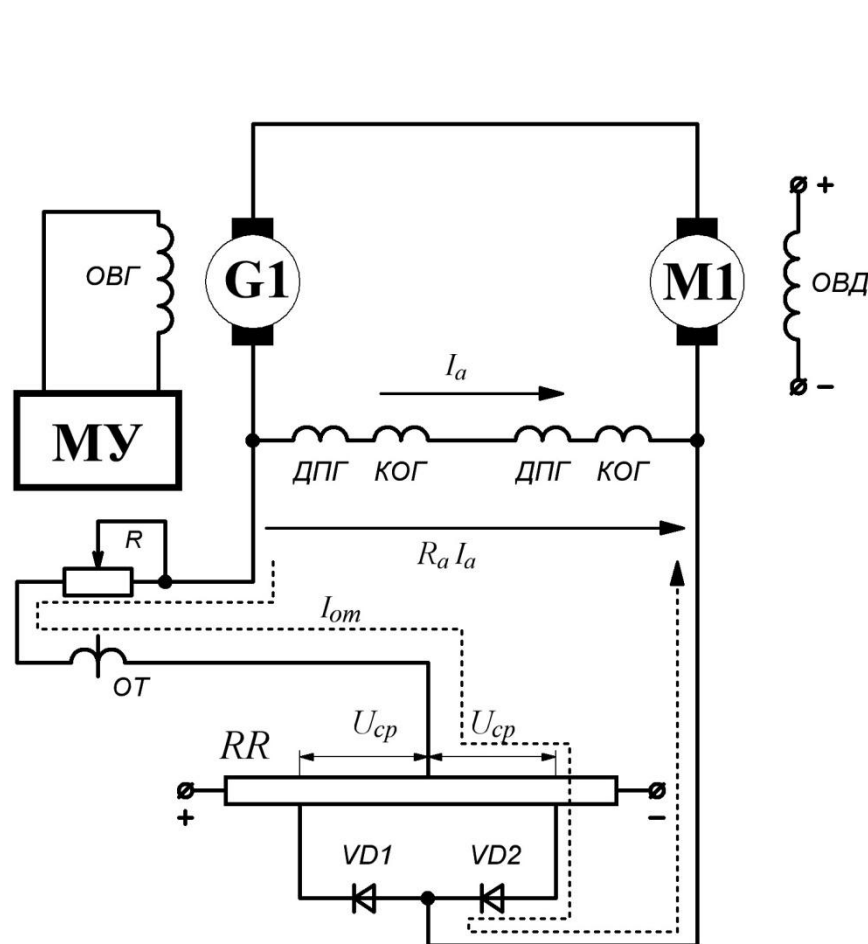


Структурная схема АЭП подъема, напора и поворота АЭП переменного тока с системой прямого



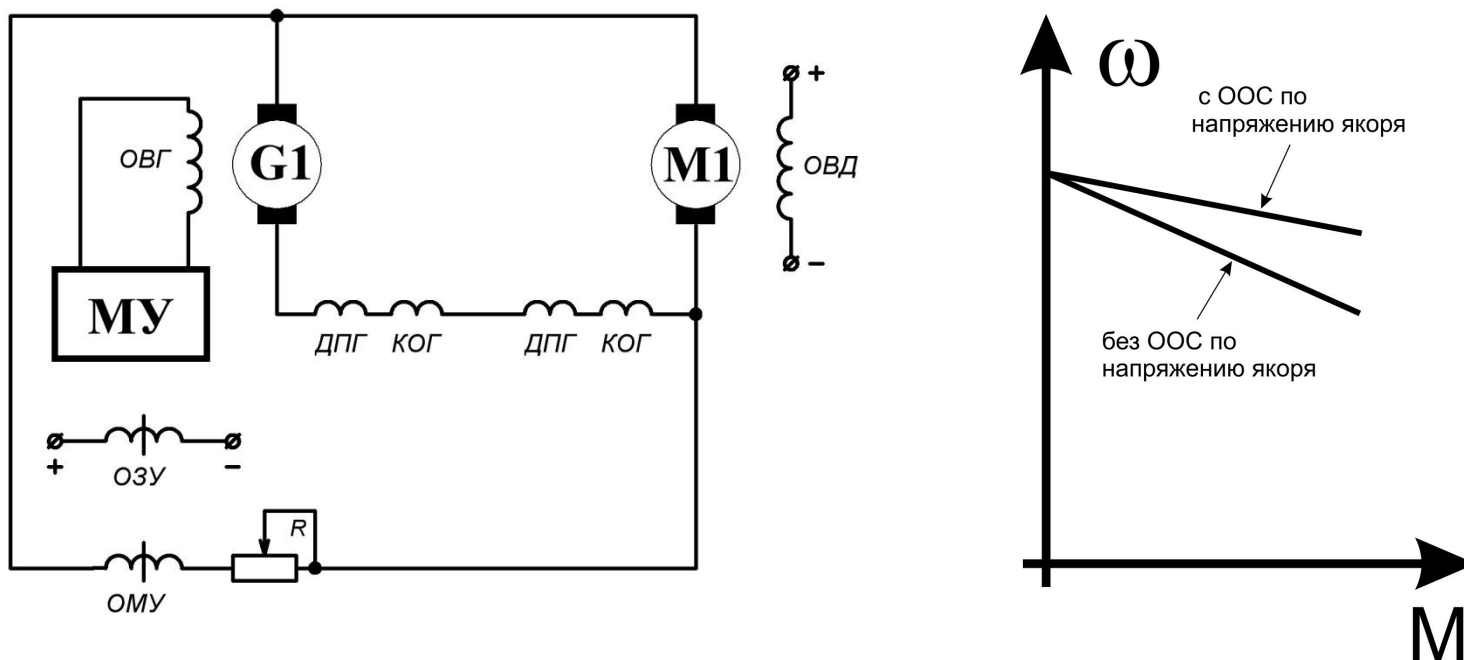
РС – регулятор скорости, РМ – регулятор электромагнитного момента, РП – регулятор потока, ВМ – вычислитель электромагнитного момента, ВФА – вычислитель фазы и амплитуды вектора потока статора, ВП – вычислитель составляющих вектора потока статора, ВФН – вычислитель фазного напряжения, ПФ2, ПФ3 – преобразователи фаз

К пояснению работы жесткой отрицательной обратной связи по току якоря в электроприводе постоянного тока



ДПГ, ДПД – обмотки дополнительных полюсов генератора и двигателя;
КОГ, КОД – компенсационные обмотки генератора и двигателя.

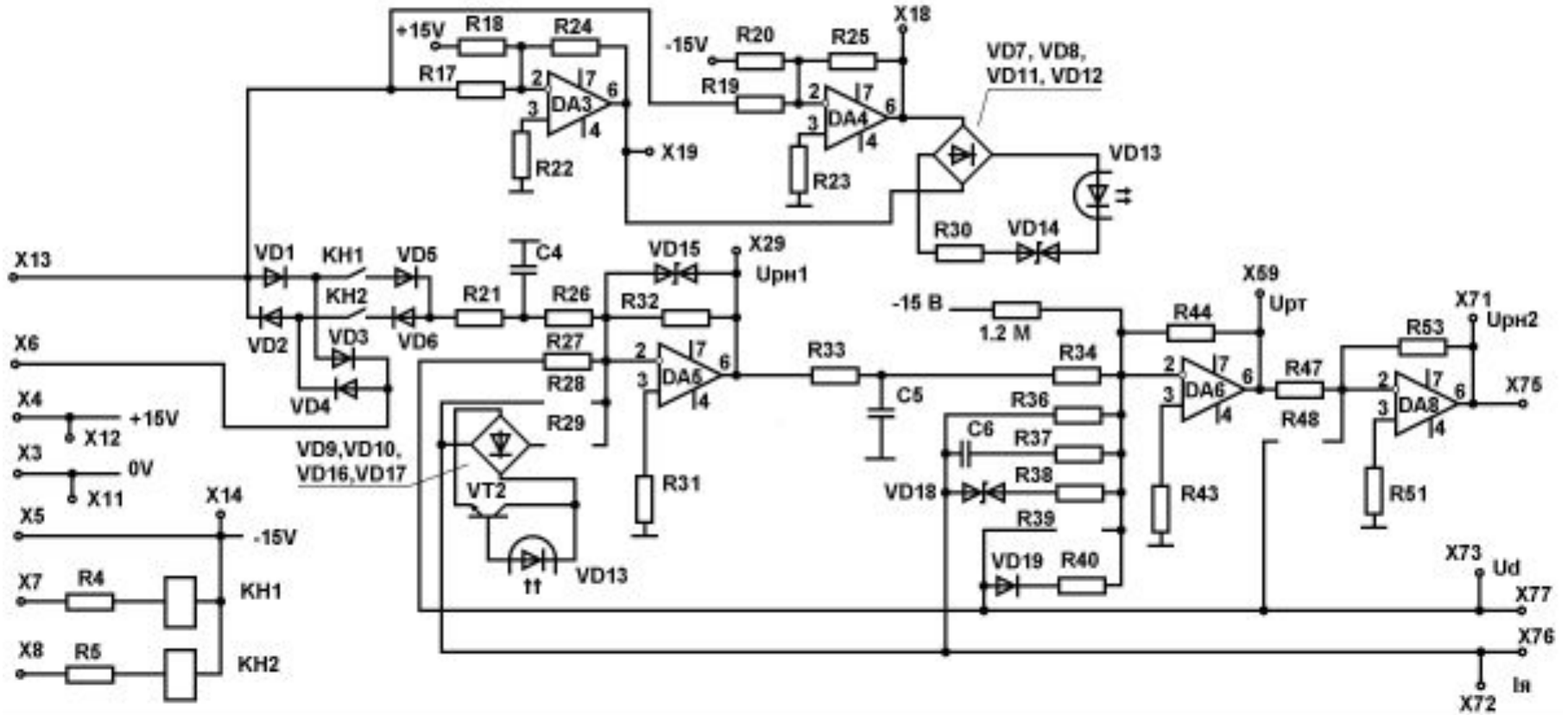
К пояснению работы жесткой отрицательной обратной связи по напряжению якоря в электроприводе постоянного тока



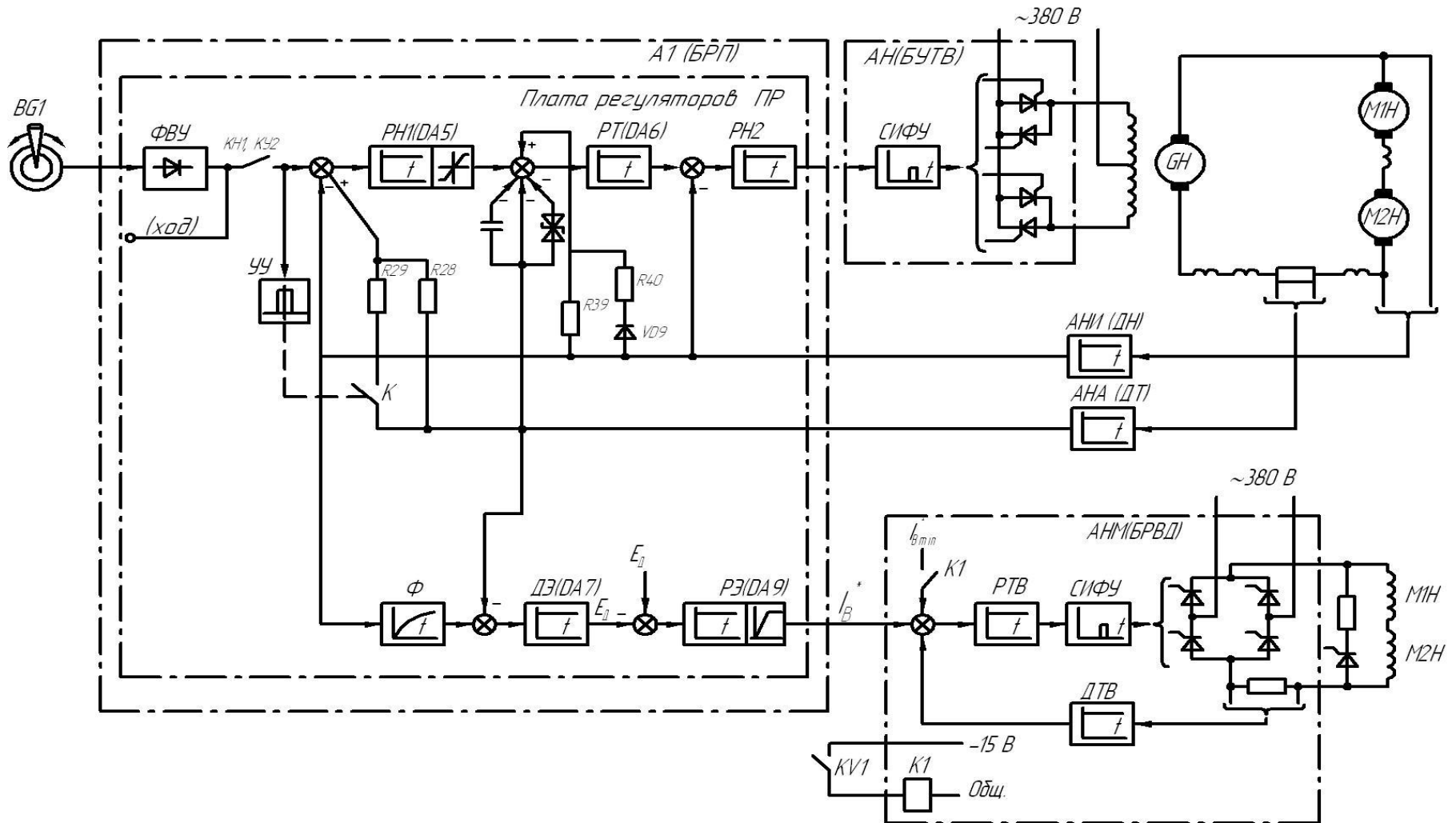
ОЗУ – задающая обмотка; ОМУ – обмотка управления магнитного усилителя; МУ – магнитный усилитель; ДПГ, ДПД – обмотки дополнительных полюсов генератора и двигателя; КОГ, КОД – компенсационные обмотки генератора и двигателя; ОВГ, ОВД – обмотки возбуждения генератора и двигателя.

Принципиальная электрическая схема платы регуляторов системы подчиненного регулирования АЭП польема

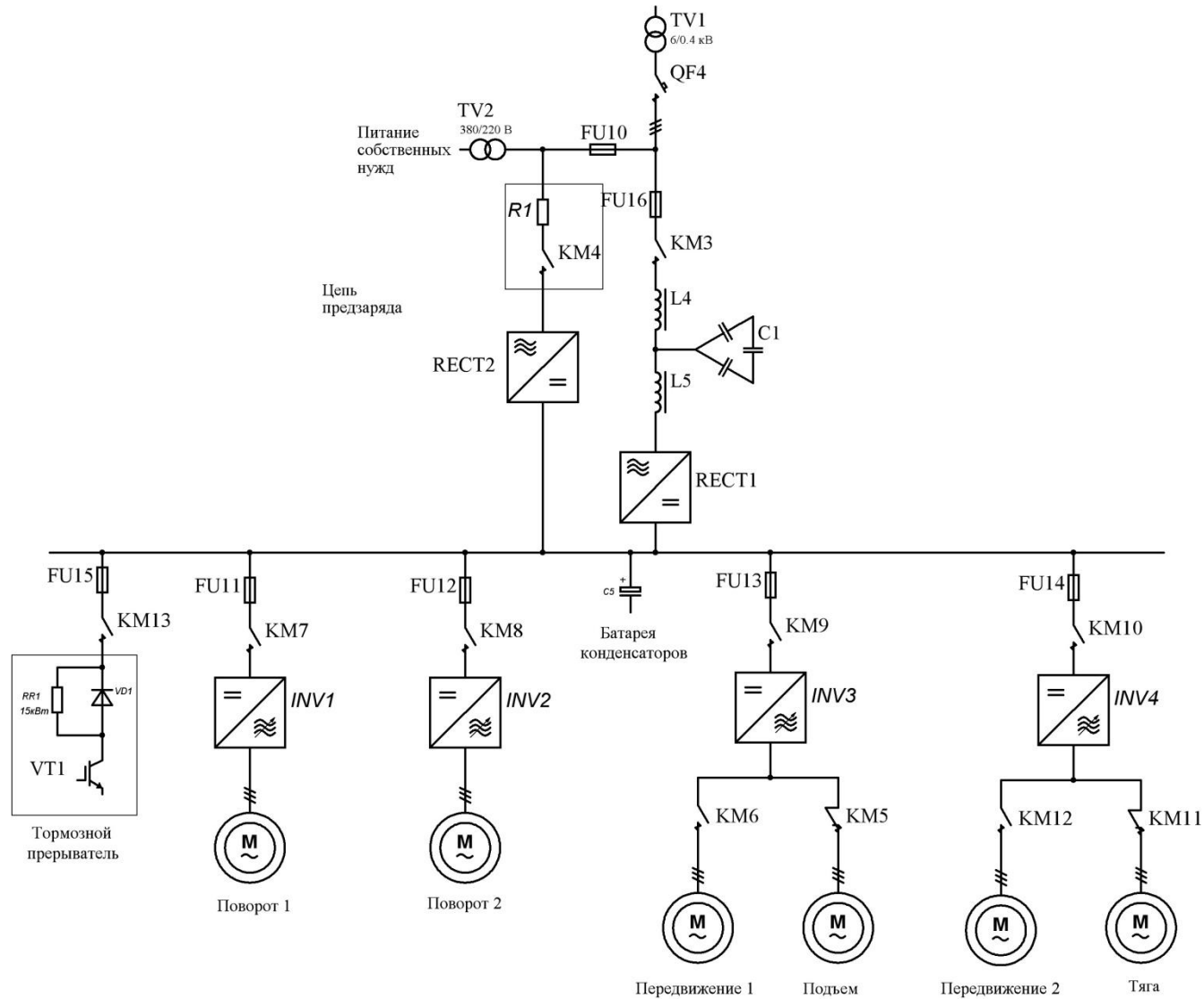
R4 - 510	R33 - 33 k	R44 - 36 k
R5 - 510	R34 - 43 k	R47 - 30 k
R21 - 5k1	R36 - 91 k	R51 - 10 k
R26 - 5k1	R37 - 7k5	R53 - 27 k
R27 - 10 k	R38 - 8k2	
R31 - 10 k	R40 - 110 k	
R32 - 47 k	R43 - 10 k	



Структурная схема системы подчиненного регулирования АЭП подъема



Однолинейная схема силовой части электроприводов



Внешний вид экскаватора P&H 4100C BOSS

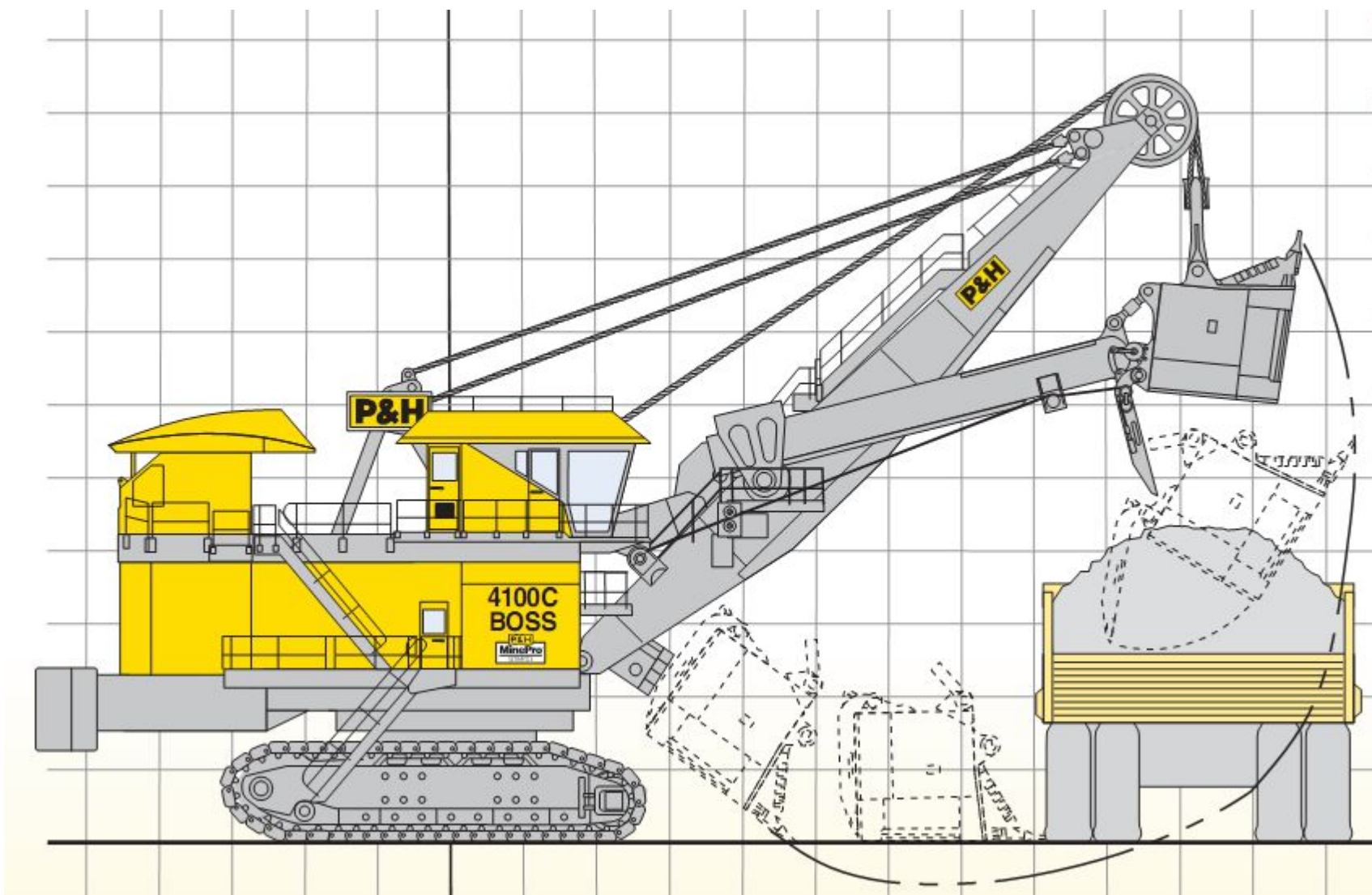
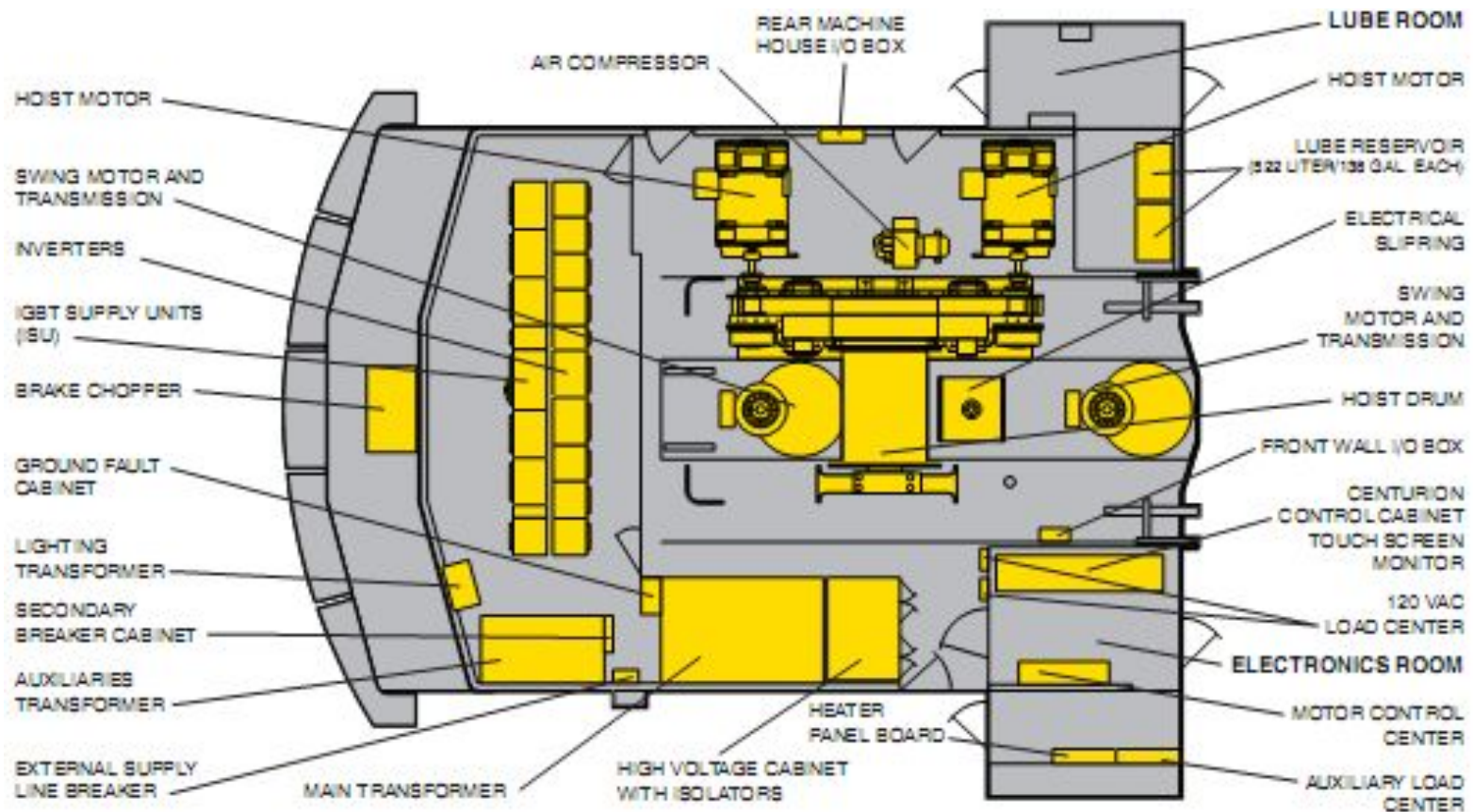
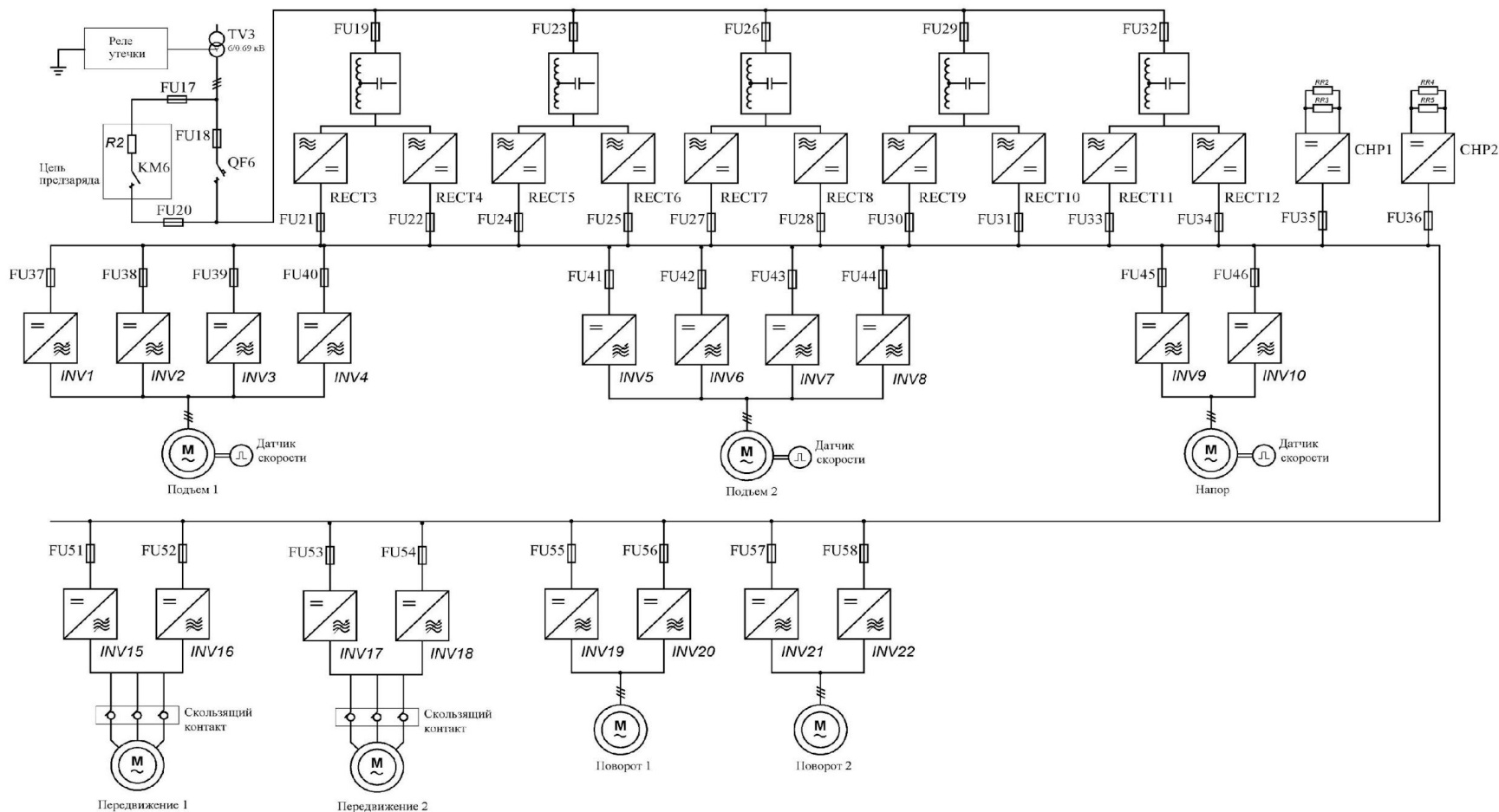


Схема расположения оборудования экскаватора Р&Н 4100С BOSS



Однолинейная схема силовой части электроприводов переменного тока экскаватора P&H 4100C BOSS



Электрооборудование экскаватора P&H 4100C BOSS

Инверторная
секция



Шкаф контроллеров
электроприводов



Шкаф
ПЛК

Кабина машиниста экскаватора

На старом
экскаваторе



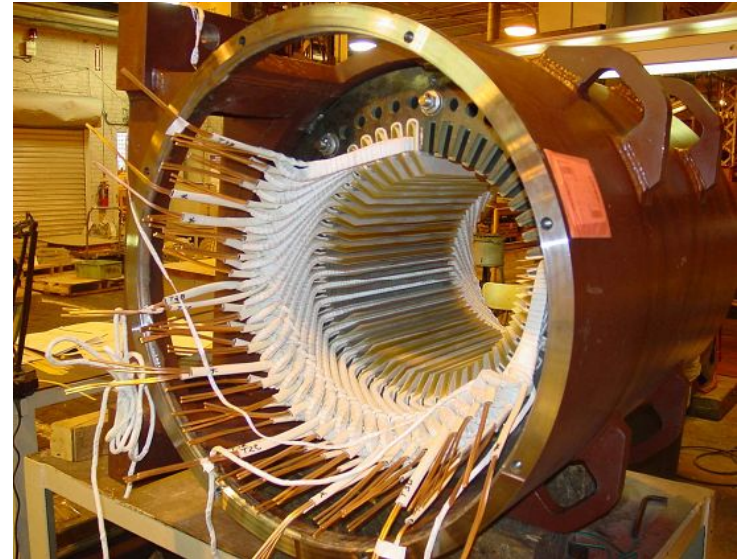
На современном
экскаваторе



Особенности электродвигателей экскаватора P&H 4100

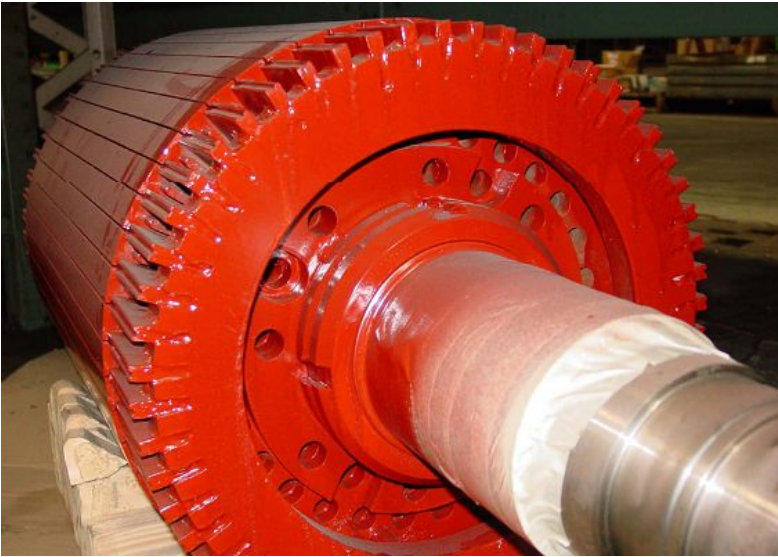


Характерная особенность – наличие датчика скорости и внешней (принудительной) вентиляции



Изоляция обмотки статора двигателя класса F (выполняется из стеклотканевой изоляционной ленты)

Особенности электродвигателей экскаватора P&H 4100

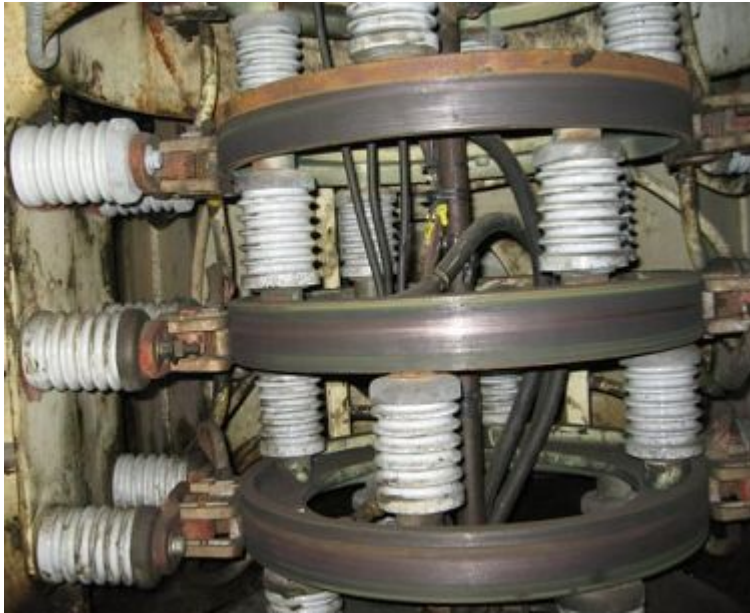


Характерная особенность ротора – наличие вентиляционных отверстий для лучшего охлаждения

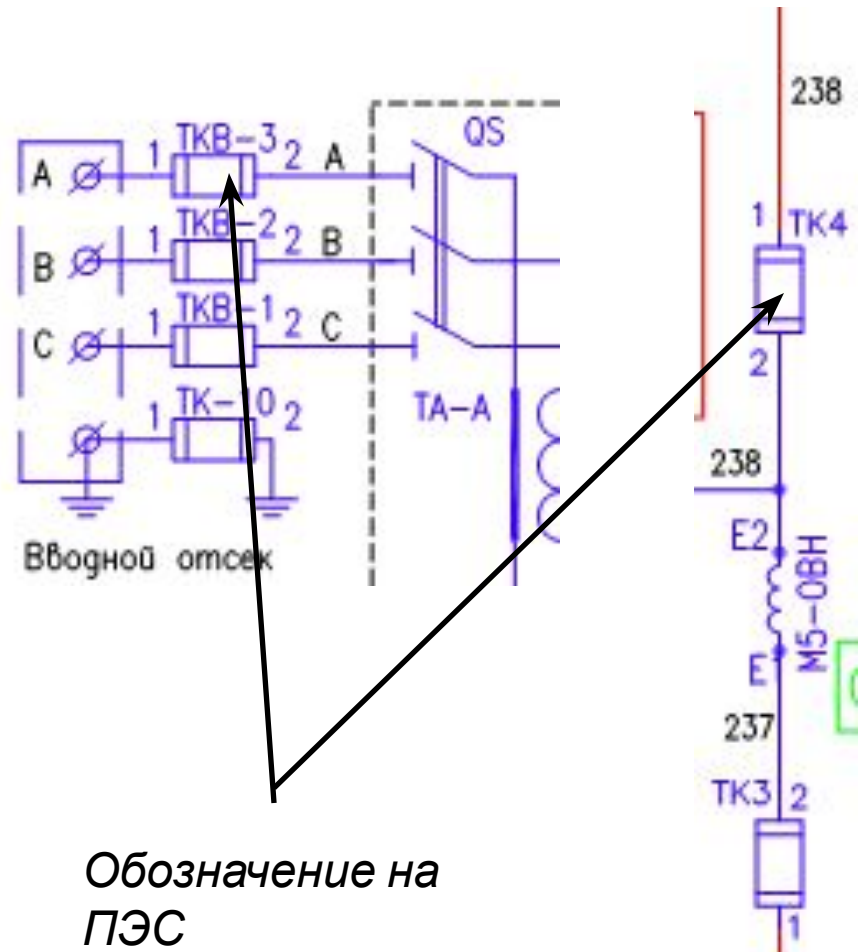


Статор электродвигателя экскаватора после намотки

Высоковольтный коллекторно-щеточный узел



*Внешний вид
коллекторно-
щеточного узла*



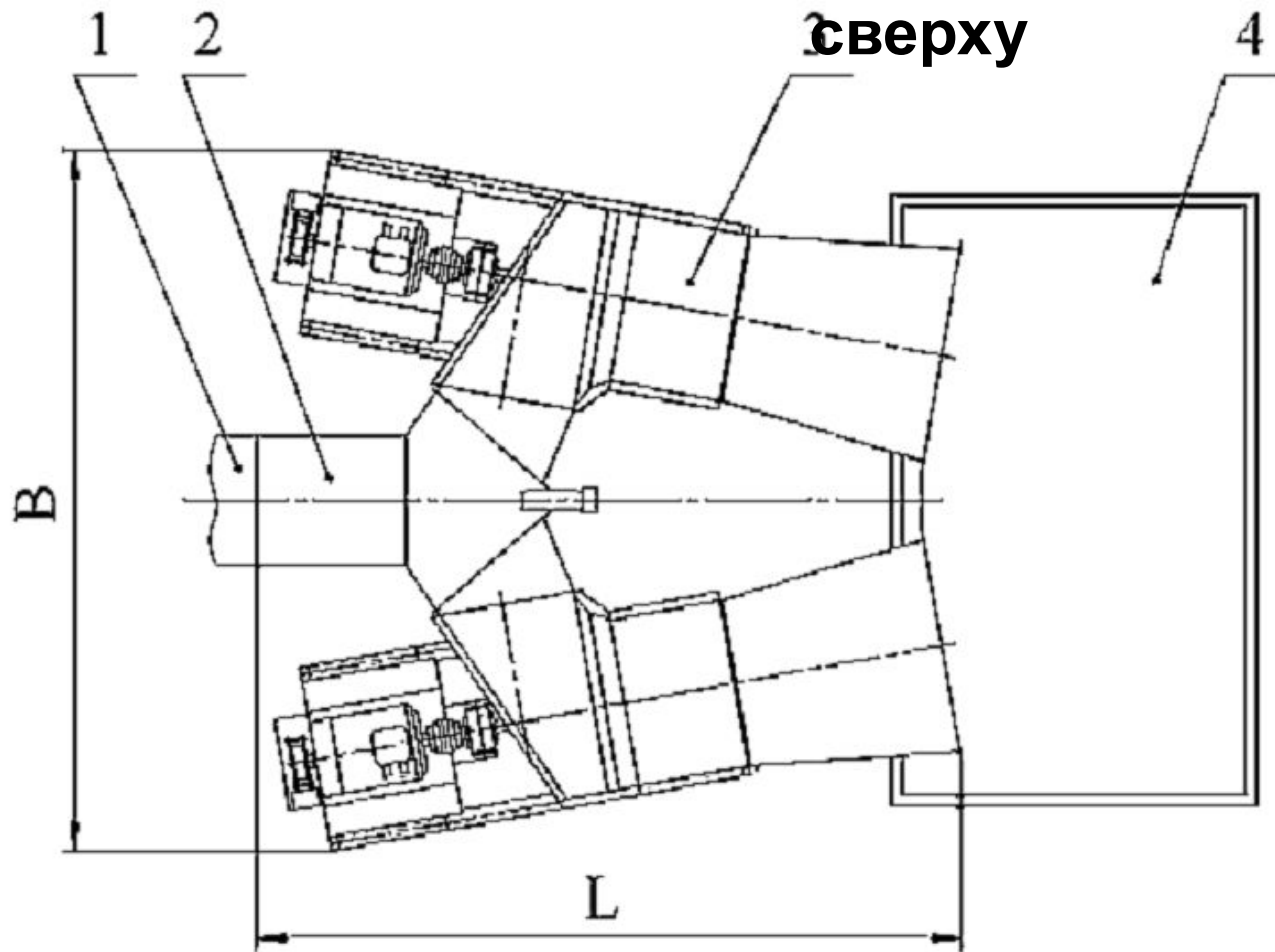
*Обозначение на
ПЭС*

Глава 2

АЭП ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ

Внешний вид вентиляторов главного проветривания шахт

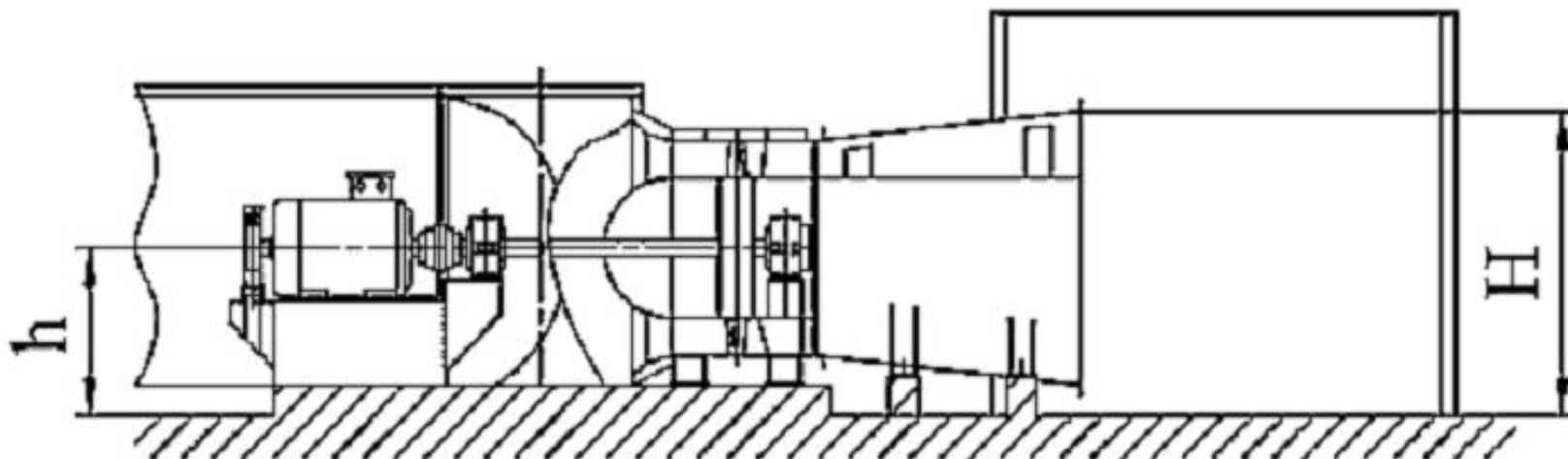
Вид
сверху



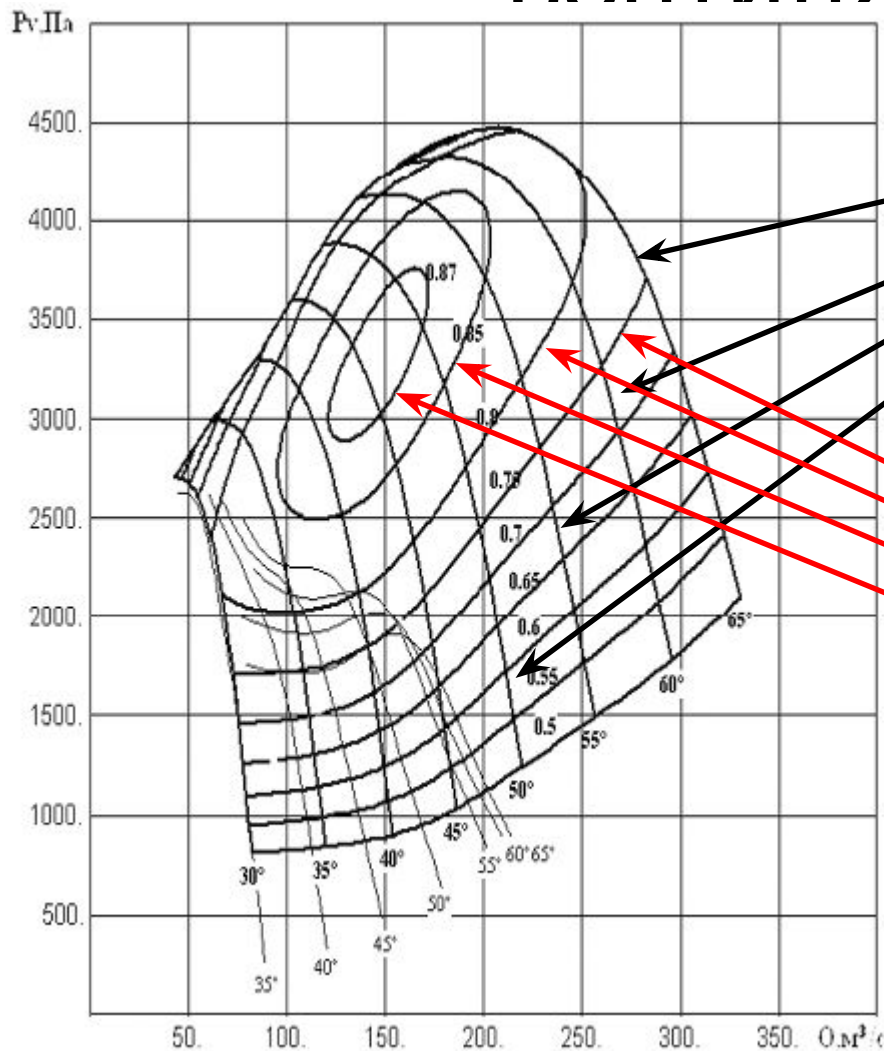
- 1 – подводящий канал;
- 2 – переключатель потока;
- 3 – осевой вентилятор;
- 4 – объединенная выходная часть.

Внешний вид вентиляторов главного проветривания шахт

Вид
сбоку



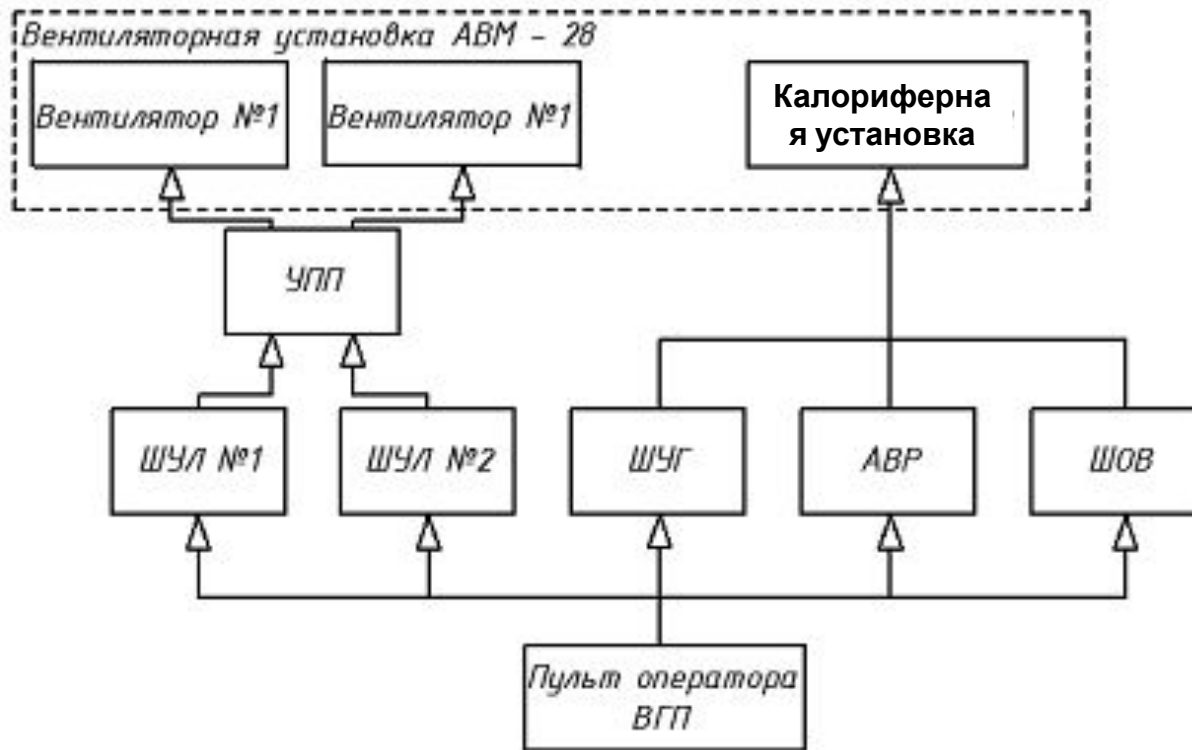
Типовые характеристики шахтного одноосевого вентилятора



Характеристики при
постоянной
скорости и разных
углах поворота
лопаток

Характеристики при
постоянном КПД и
разных углах
поворота лопаток

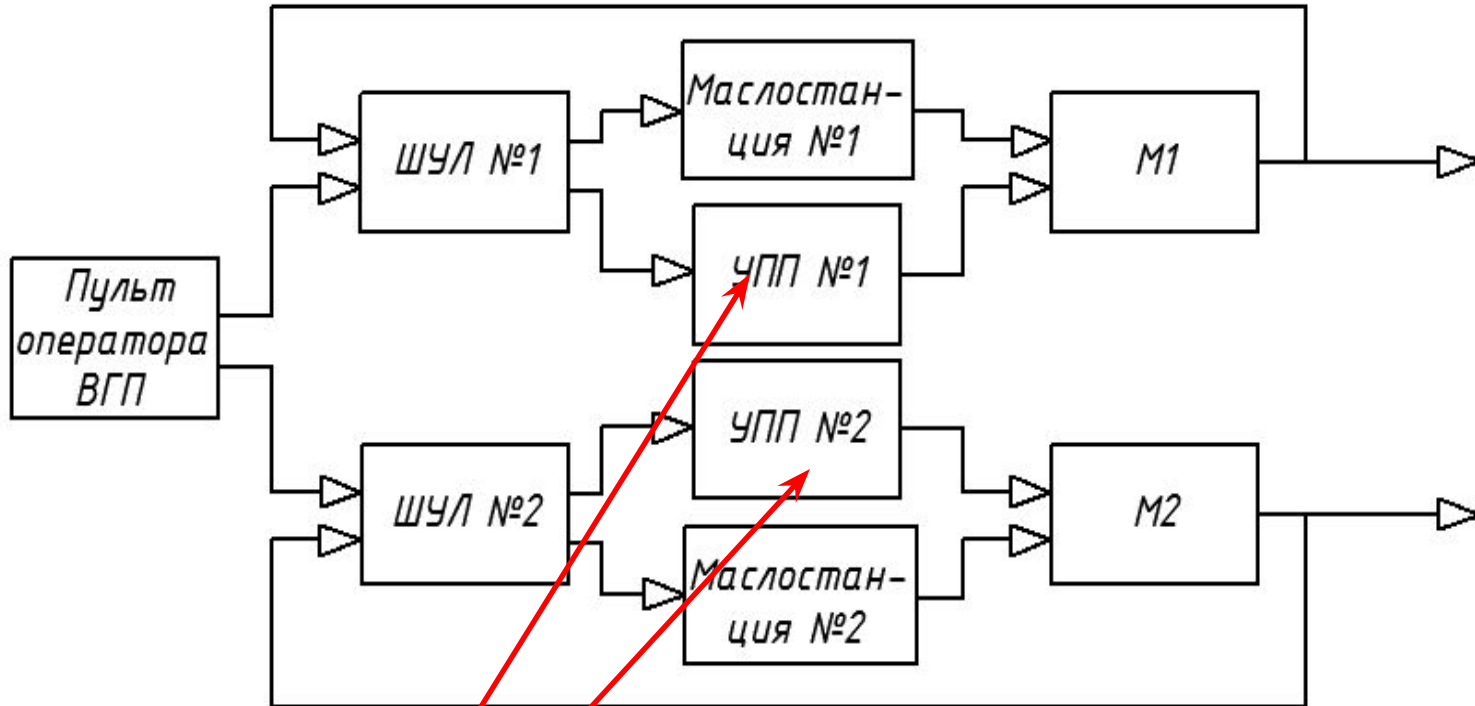
Структурная схема вентиляторно-калориферной установки



ВГП – вентилятор главного проветривания;
ШУЛ – шкаф управления локальный;
ШУГ – шкаф управления главный;
АВР – автоматический ввод резерва;
ШОВ – шкаф отопления и вентиляции;
УПП – устройство плавного пуска.

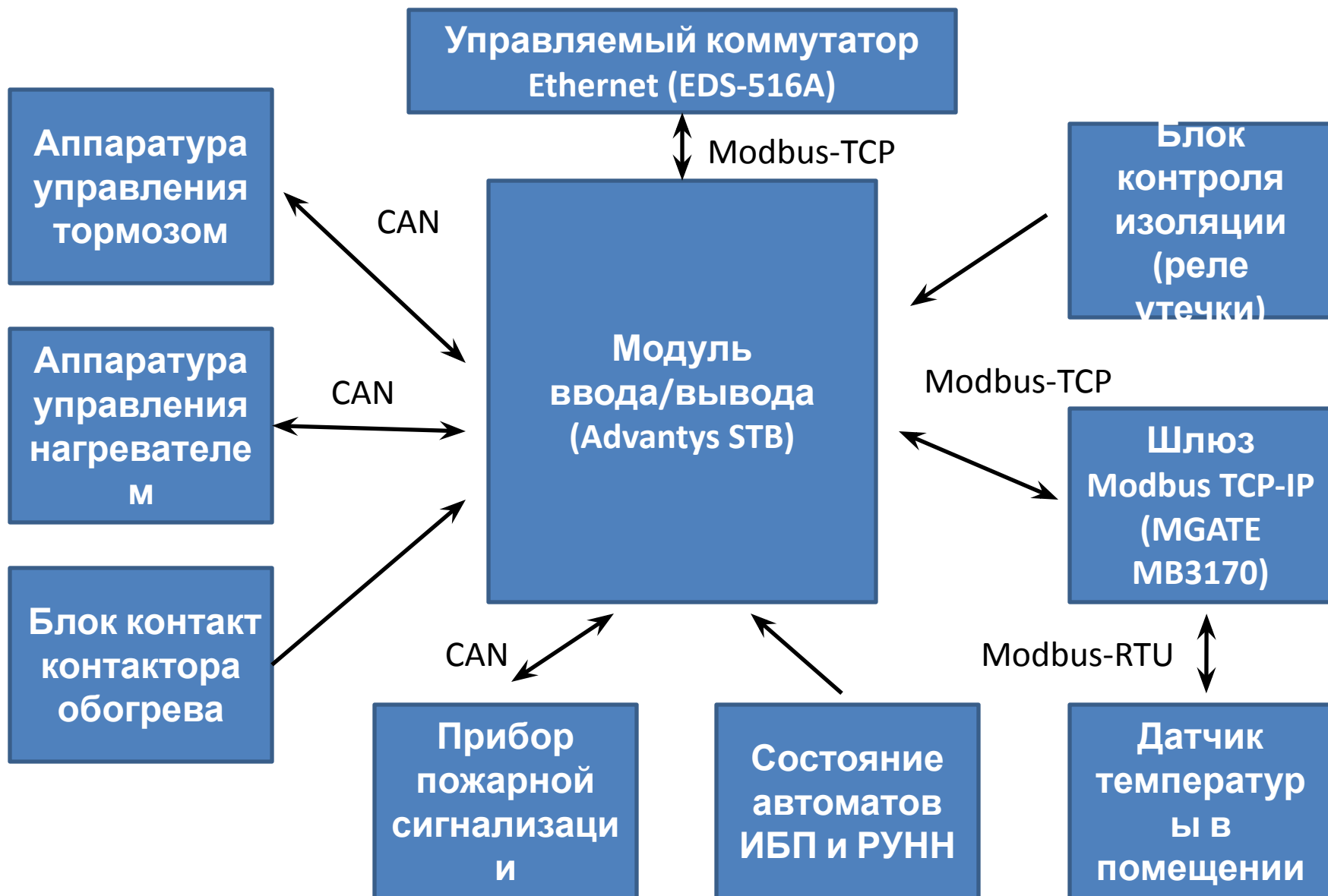
Структурная схема электропривода вентиляторно-калориферной

УСТАНОВКИ



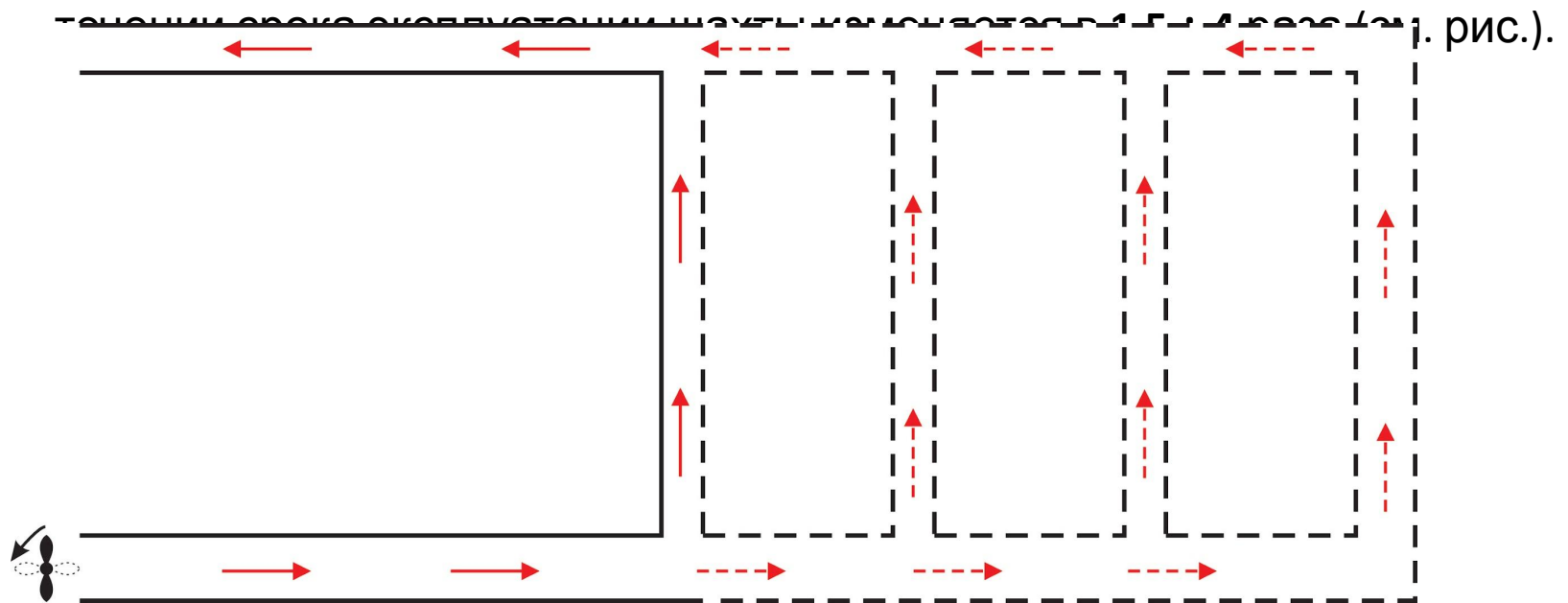
**В качестве преобразователей для
разгона вентиляторов применяют
также
преобразователи частоты**

Структурная схема ШУЛ



Целесообразность внедрения регулируемого электропривода для вентиляторов главного проветривания

1. Изменение **длины** и **эквивалентного сечения** выработки шахты (т.е. изменение характеристики вентиляционной сети).
2. Изначально вентиляторы рассчитаны на максимальную длину выработки при максимально-возможной газоносности пластов.
3. Регулирование производительности вентилятора выполняется зачастую при помощи **изменения углов поворота лопаток** направляющего аппарата.
4. Глубина регулирования вентилятора главного проветривания в



Текущее состояние регулируемого электропривода ВГП

1. Преобразователи частоты в основном применяются для разгона вентилятора до номинальной скорости.
2. Регулирование потока производится путем изменения углового положения лопаток направляющего аппарата, что приводит к снижению КПД вентилятора.
3. Применение преобразователей частоты для плавного пуска вентиляторов имеет следующие преимущества: **высокий коэффициент мощности** ($\cos(\varphi) = 1$) при наличии в составе преобразователя частоты активного выпрямителя; **подхват ротора** двигателя в случае срабатывания АВР (автоматический ввод резерва), т.е. работа без остановки при отключении одного из источников электрической энергии (согласно ПБ вентилятор главного проветривания относится к I категории потребителей).
4. Применение регулируемого электропривода для вентиляторов главного проветривания ограничено ПБ (правилами безопасности), в которых сказано «**запрещается посменное регулирование воздушных струй**»

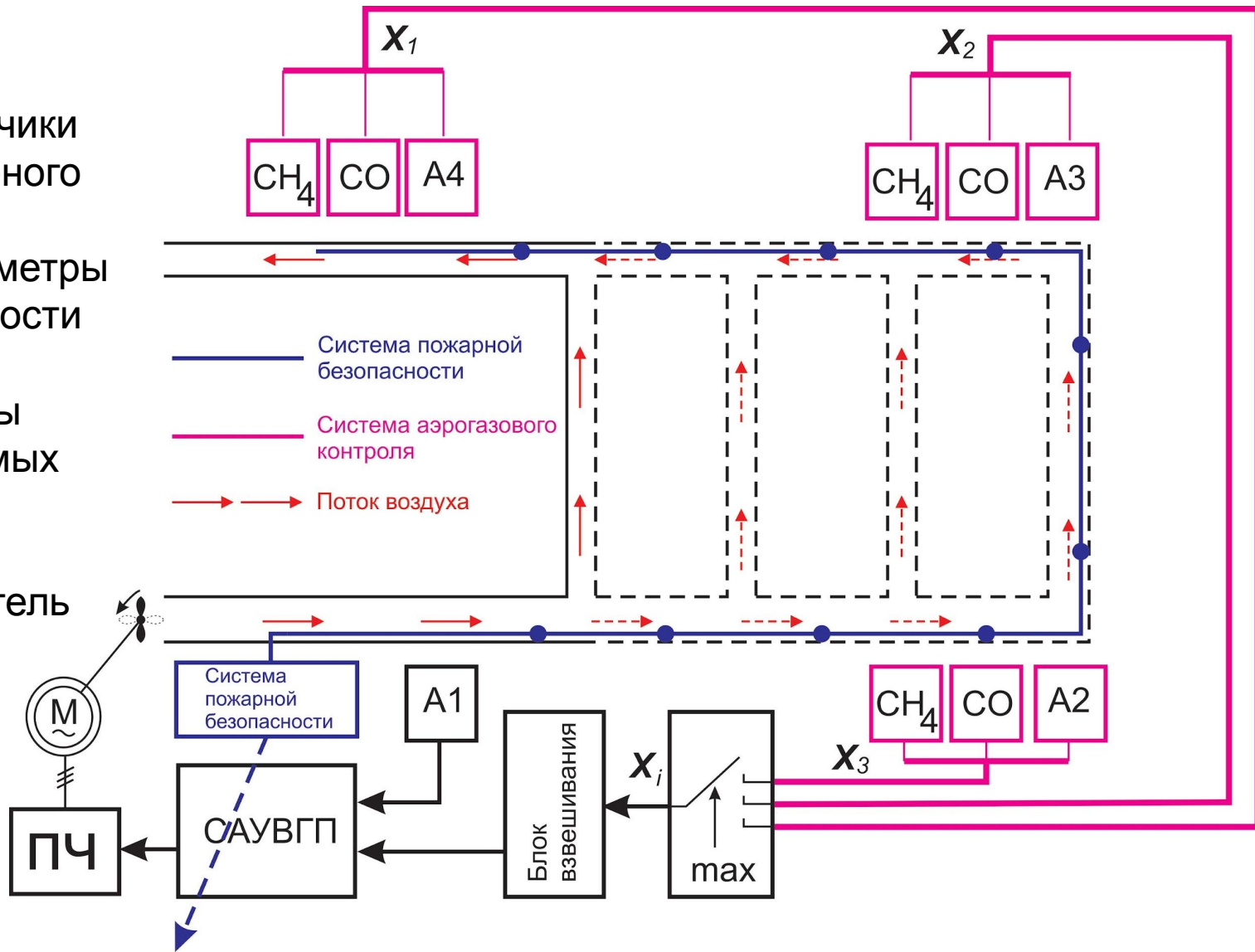
Система управления ВГП

CH₄, CO – датчики метана и угарного газа;

A1..4 – анемометры (датчики скорости воздуха);

X1..3 – векторы контролируемых величин;

ПЧ – преобразователь частоты.



Система управления ВГП

1. Система управления ВГП получает данные от систем пожарной безопасности и аэрогазового контроля.
2. Вектор измеренных величин (концентрации вредных и опасных газов, скорость потока воздуха) поступает на блок переключения, который выдает на выход вектор с наибольшими значениями измеренных величин.
3. С выхода блока переключения максимальных измеренных величин сигналы подаются на вход блока взвешивания, где каждая величина вектора сравнивается с ПДК (предельно-допустимая концентрация) и умножаются на соответствующий вес.
4. На выходе блока взвешивания формируется сигнал $Q^* = Q_{\max} - \sum w_i(\text{ПДК} - x_i)$.
5. Сигнал с выхода блока взвешивания в САУВГП сравнивается с текущим значением расхода воздуха и подается на регулятор, на выходе которого формируется задание частоты вращения вентилятора главного проветривания.

Математическая модель вентилятора

$$H = H_{xx} - cQ^2,$$
$$N = \rho g H Q / \eta_H,$$

где H – напор, развиваемый вентилятором [м],

Q – объемный расход [$\text{м}^3/\text{с}$],

N – мощность вентилятора [Вт],

$H_{xx} = U^2/g$ – напор холостого хода вентилятора [м],

U – линейная скорость на внешней окружности рабочего колеса [м/с],

c – коэффициент, определяющий внутренние потери вентилятора,

η_H – номинальный КПД вентилятора,

ρ – плотность среды [$\text{кг}/\text{м}^3$] (для воздуха $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$),

g – ускорение свободного падения.

Математическая модель вентилятора

Момент сопротивления, создаваемый турбомеханизмами, принято описывать следующим выражением:

$$M_c = M_{c0} + \beta\omega^2,$$

где M_{c0} – момент сопротивления, выражающий потери на трение в механической части привода;

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2,$$

где Q_1, Q_2 – объемные расходы при частотах вращения рабочего колеса ω_1 и ω_2 ;

H_1, H_2 – напоры вентилятора при частотах вращения рабочего колеса ω_1 и ω_2 .

Математическая модель вентиляционной сети

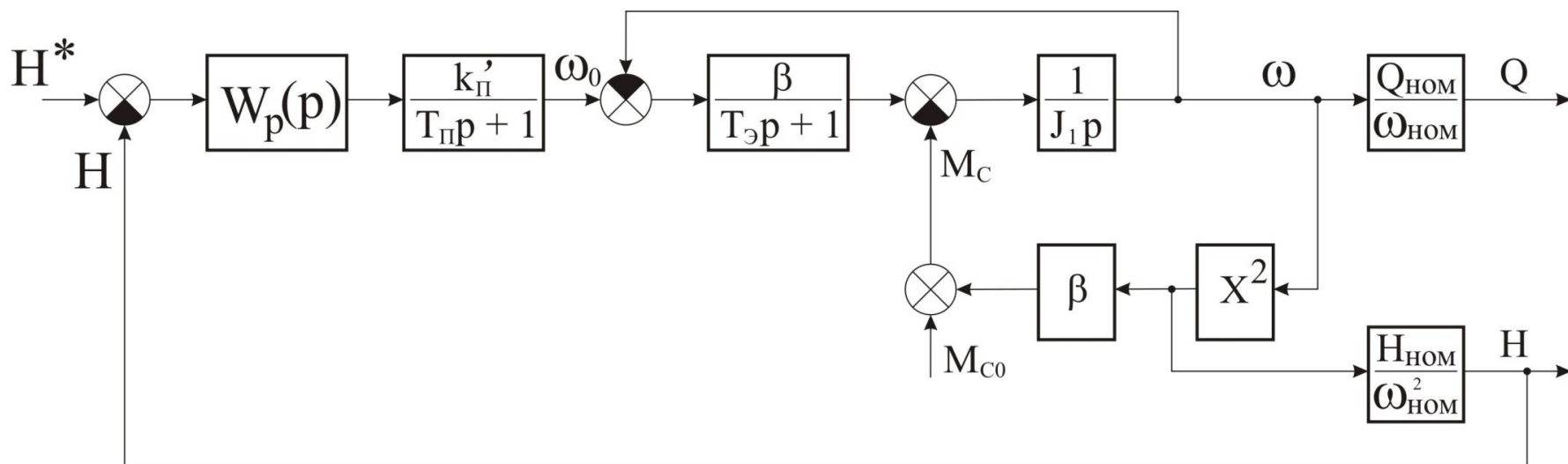
$$H_{\epsilon} = SQ^2,$$

где H_{ϵ} – напор, подаваемый на вентиляционную сеть,
 S – гидравлическое сопротивление вентиляционной сети.

$$P_{\epsilon} = \rho g H_{\epsilon},$$

где P_{ϵ} – давление, развиваемое вентилятором [Па];
 ρ – плотность среды [кг/м³] (для воздуха 1,3 кг/м³),
 g – ускорение свободного падения.

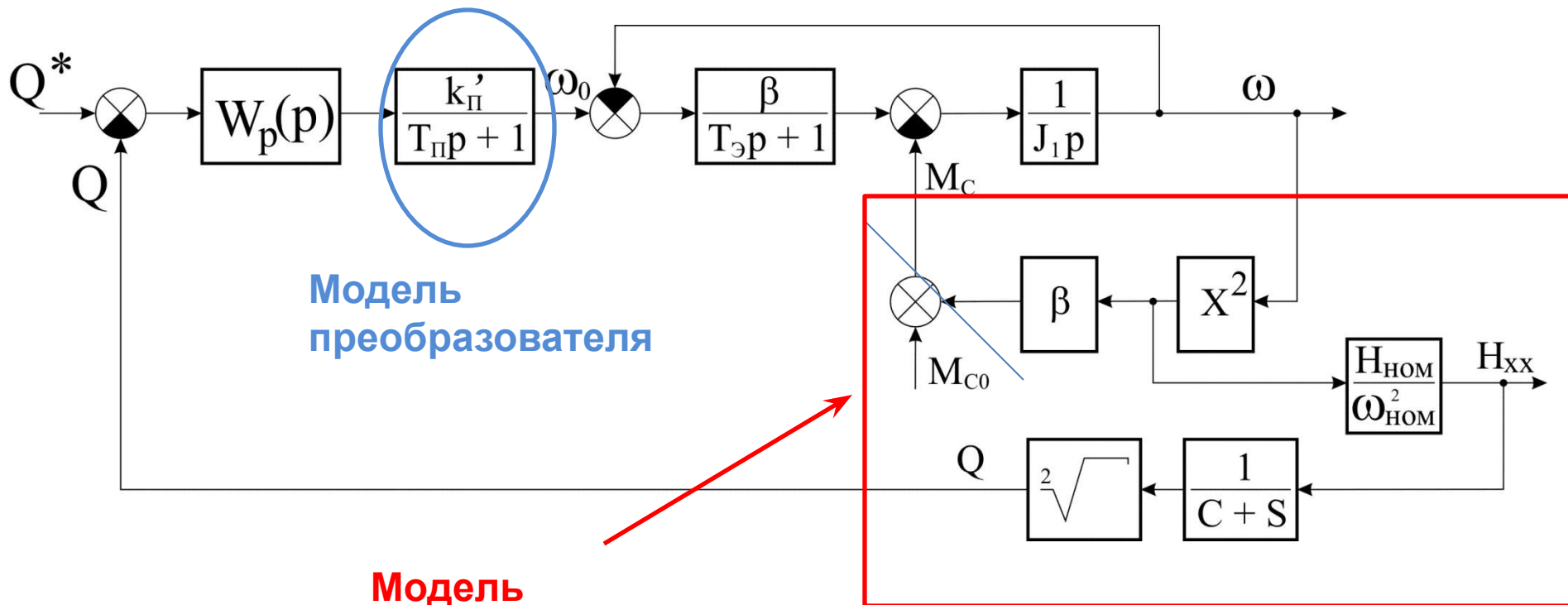
Структурная схема электропривода вентилятора при поддержании заданного напора



где k_{Π}' – коэффициент передачи преобразователя частоты,
 β – коэффициент статической жесткости механической характеристики электродвигателя,

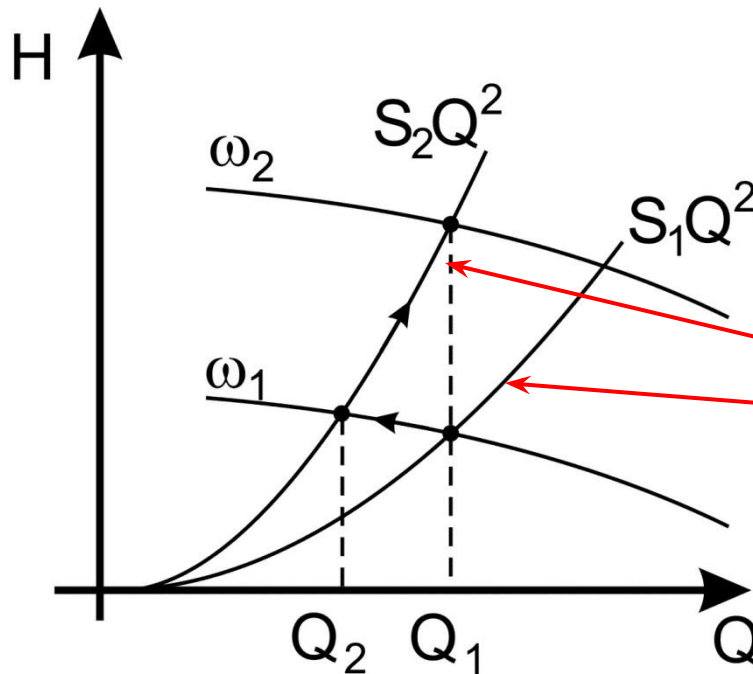
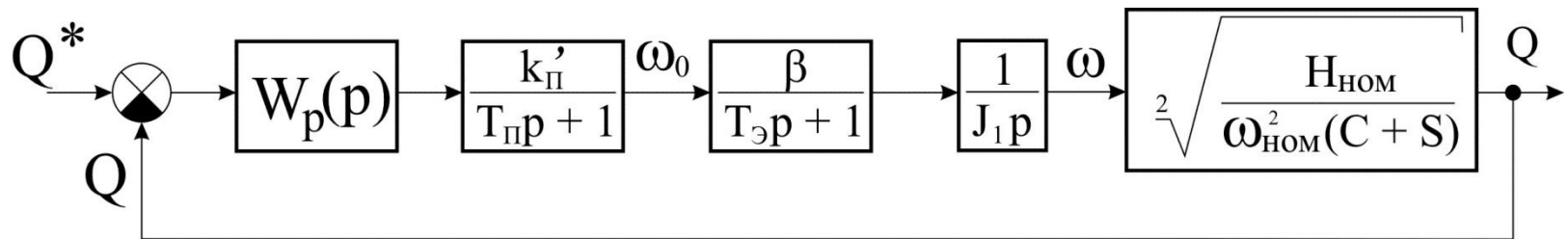
$T_{\text{э}}$ – постоянная времени линеаризованного электродвигателя.

Структурная схема электропривода вентилятора при поддержании заданной производительности



**Модель
вентилятора и
вентиляционной
сети**

Упрощенная структурная схема электропривода вентилятора при поддержании заданной производительности



Увеличение сопротивления вентиляционной сети приводит к уменьшению производительности вентилятора, которую можно увеличить, подняв скорость рабочего колеса вентилятора

Расчет регулятора электропривода вентилятора

$$W_{\alpha}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p}$$

Желаемая передаточная функция

$$W_{\delta\alpha\zeta}(p) = \frac{k_i \beta}{T_Y p + 1} \frac{1}{J_1 p} \sqrt{\frac{H_{\text{ин}}}{\omega_{\text{ин}}^2 (C + S)}} W_{\delta}(p),$$

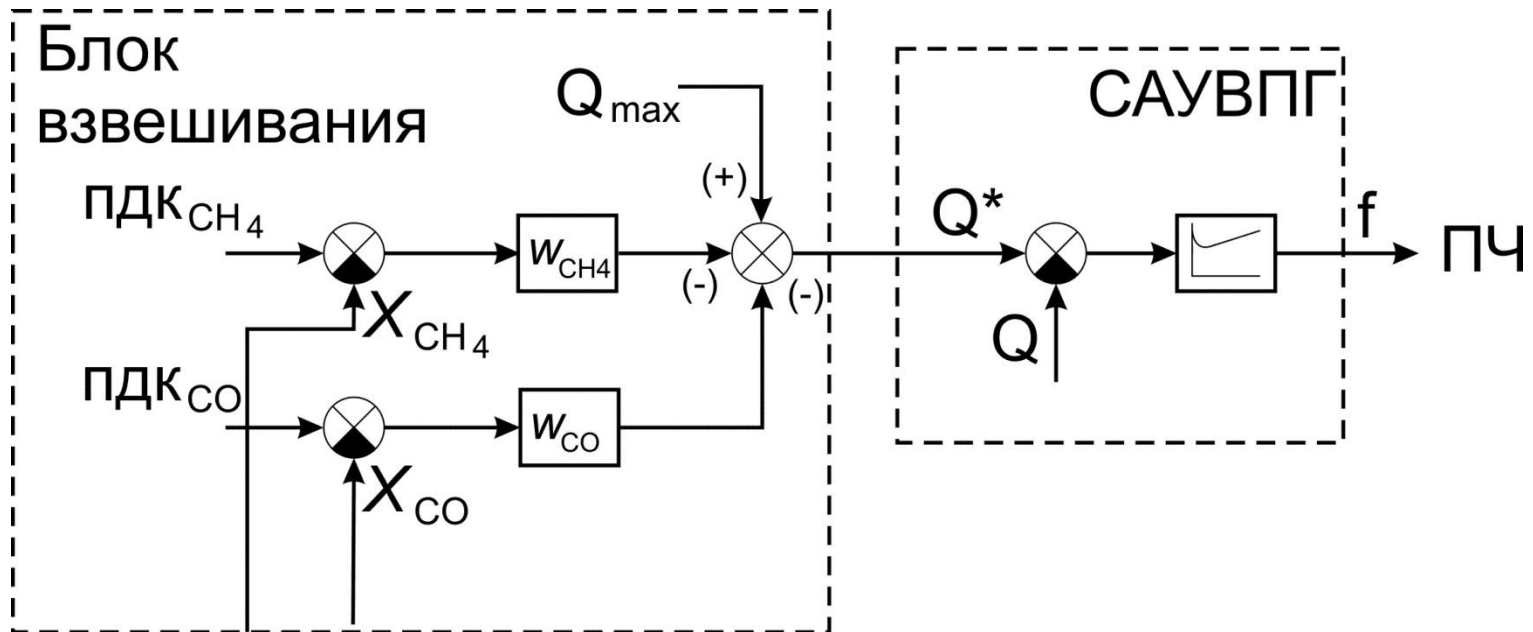
$$W_{\delta\alpha\zeta}(p) = W_{\alpha}(p) \Big|_{T_{\mu}=T_Y} \rightarrow W_{\delta}(p) = \frac{J_1 (T_Y p + 1)}{2T_i k_i \beta \sqrt{\frac{H_{\text{ин}}}{\omega_{\text{ин}}^2 (C + S)}}} =$$

$$= \frac{\text{Д} \quad J_1 T_Y}{2T_i k_i \beta \sqrt{\frac{H_{\text{ин}}}{\omega_{\text{ин}}^2 (C + S)}}} p + \frac{\text{П} \quad J_1}{2T_i k_i \beta \sqrt{\frac{H_{\text{ин}}}{\omega_{\text{ин}}^2 (C + S)}}}$$

Нескомпенсированная постоянная времени

Для исключения статической ошибки регулирования в полученный регулятор (ПД – пропорционально-дифференциальный) необходимо ввести интегральную составляющую (ПИД-регулятор)

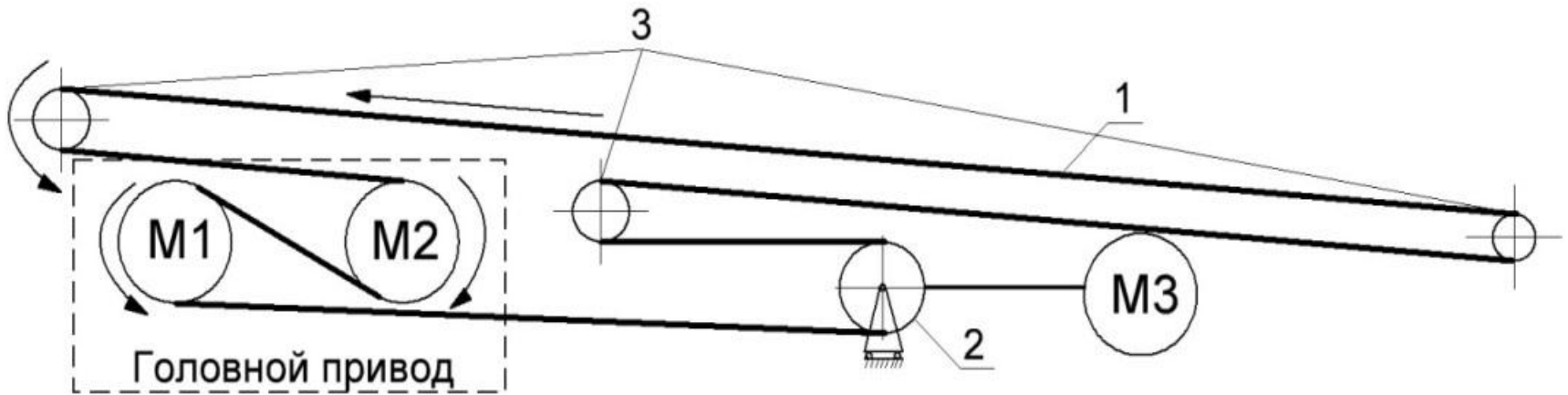
Структурная схема блока взвешивания и САУВПП



Лекция 3

АЭП ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

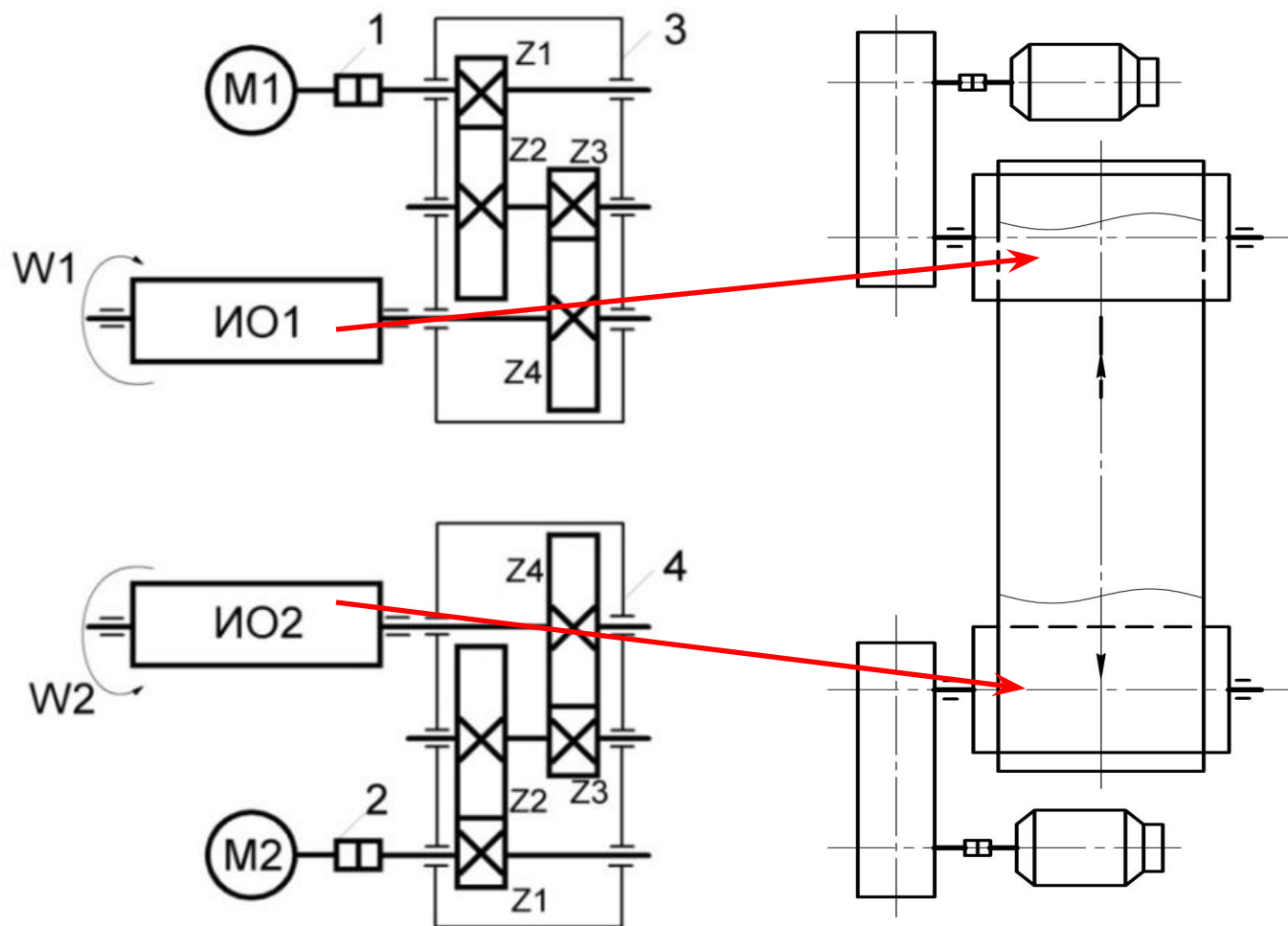
Общий вид конвейера



где 1- ленточный настил; 2- натяжная каретка; 3- обводные ролики; M1 и M2- электродвигатели головного привода; M3- электродвигатель натяжной станци...

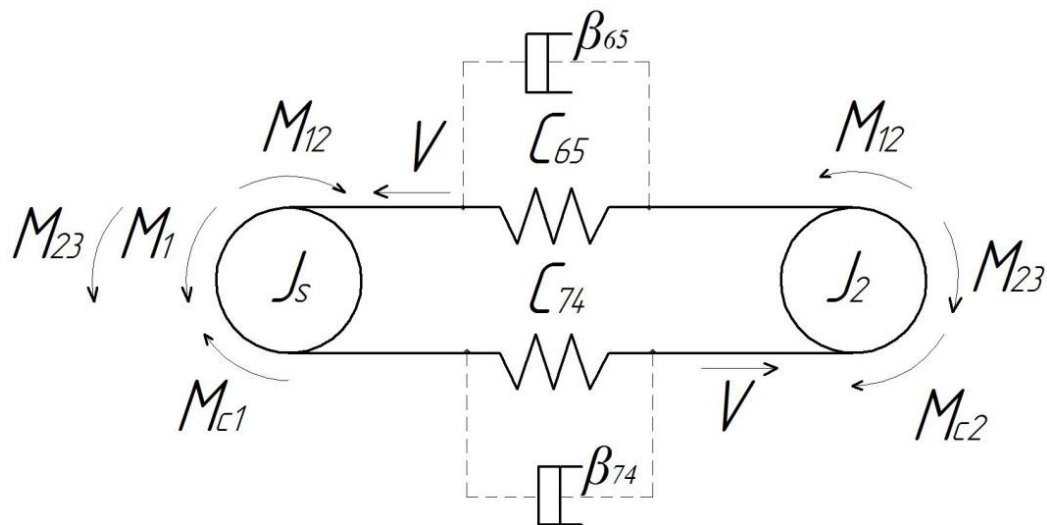
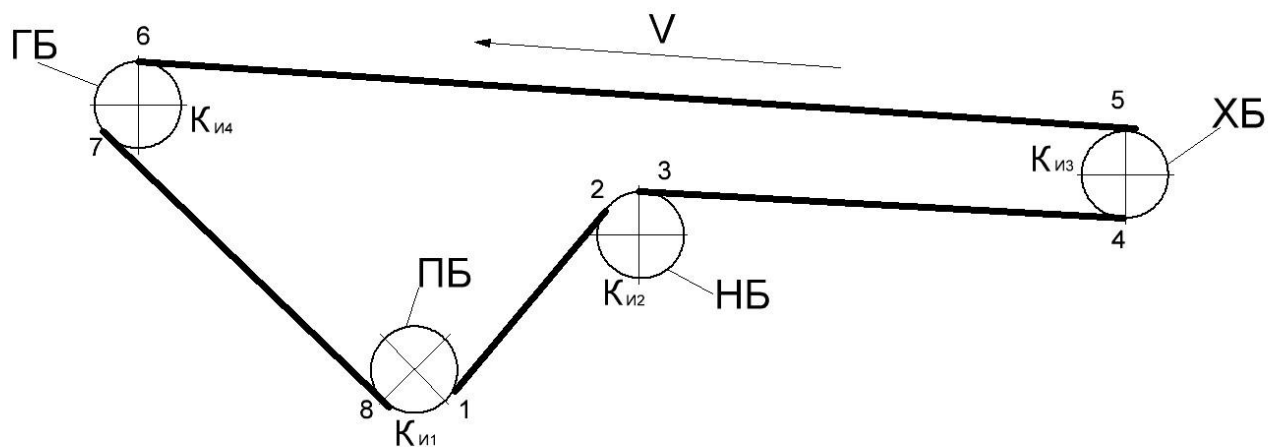


Механическая подсистема электропривода конвейера



где 1, 2- муфты; 3, 4- редукторы; ИО1, ИО2 – исполнительные органы (барабаны головного привода конвейера).

Упрощенная модель конвейера и его схема замещения



ГБ, ПБ, НБ, ХБ –
головной, приводной,
натяжной и хвостовой
барабаны

Упрощенная математическая модель конвейера

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{dw}{dt} = M_1 - M_{c1} - M_{12} + M_{23}; \\ J_2 \frac{dw}{dt} = M_{12} - M_{c2} - M_{23}; \\ M_{12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12}(w_1 - w_2); \\ M_{23} = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_1) + b_{23}(w_2 - w_1). \end{array} \right.$$

где M_1 – крутящий (электромагнитный) момент привода конвейера;

J_1, J_2 – моменты инерции сосредоточенных первой и второй масс;

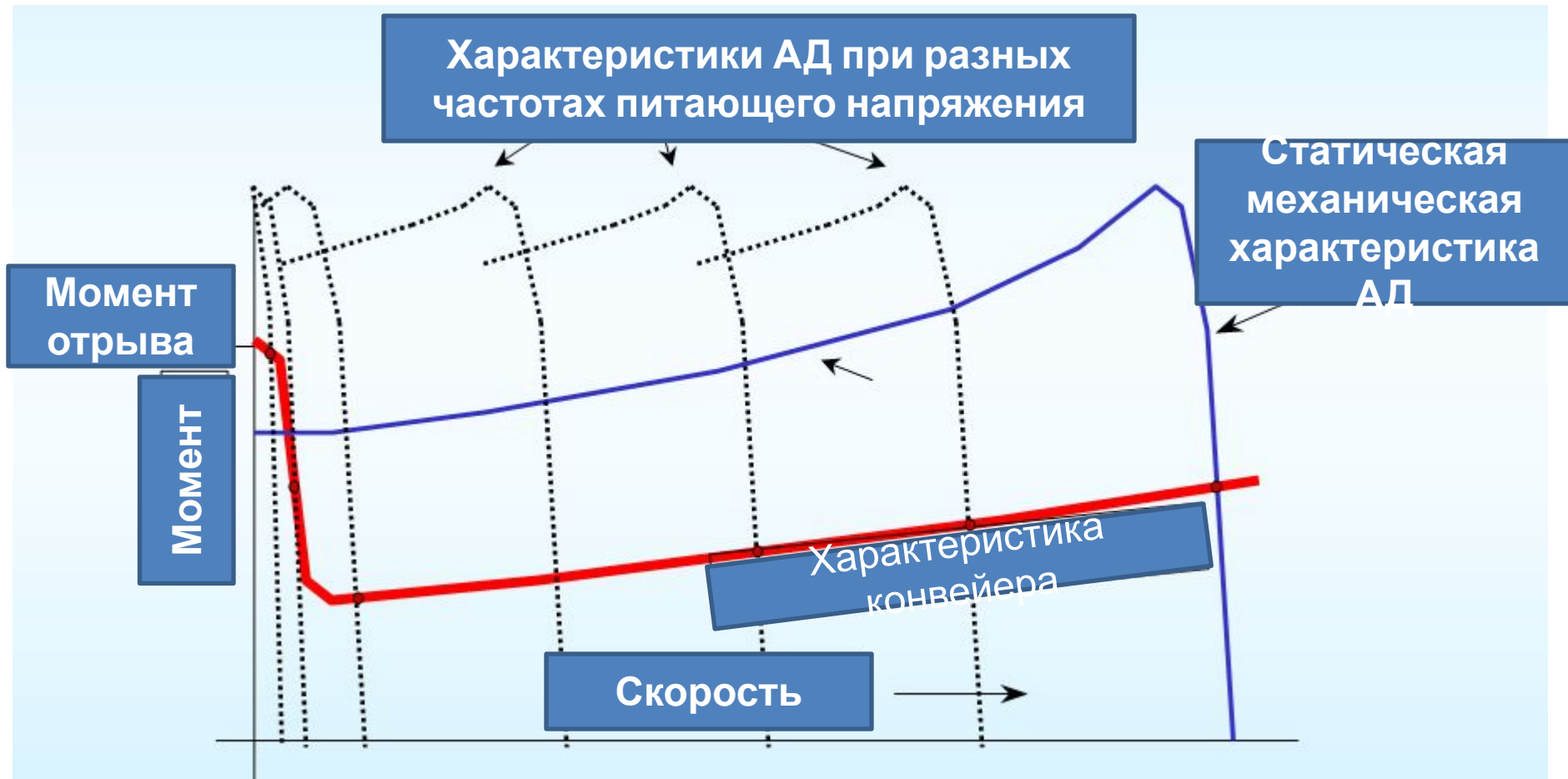
M_{c1}, M_{c2} – моменты сопротивления сбегающей и набегающей частей ленты;

M_{12}, M_{23} – эквивалентные моменты сил упругости сбегающей и набегающей частей ленты;

C_{12}, C_{23} – коэффициенты упругости сбегающей и набегающей частей ленты;

b_{12}, b_{23} – коэффициенты вязкого трения сбегающей и набегающей частей

Статическая механическая характеристика конвейера



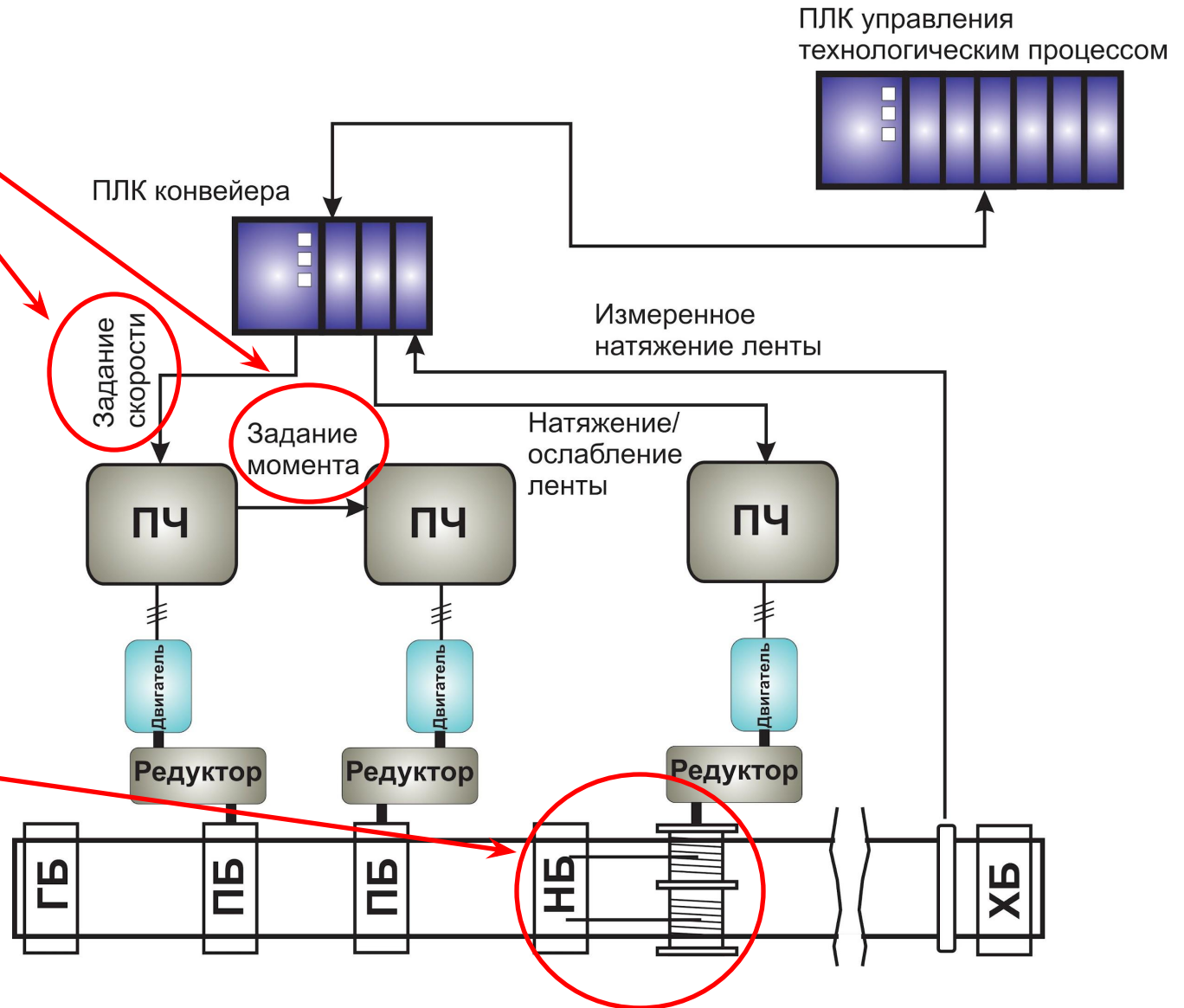
Требования к АЭП конвейера

1. Диапазон регулирования скорости: 10 : 1
2. Высокий пусковой момент (на уровне 2,5 Мн и выше).
3. При работе в шахте, опасной по взрыву газа (метана) и пыли, необходима взрывонепроницаемая оболочка и искробезопасные информационные цепи.
4. Защита от схода ленты.
5. Если предполагается возможность транспортировки людей на конвейере, то необходима защита от проезда места схода (как правило это КТВ – кабель-троссовые выключатели).
6. Цепи управления для синхронизации работы в комплексе с другими конвейерами.

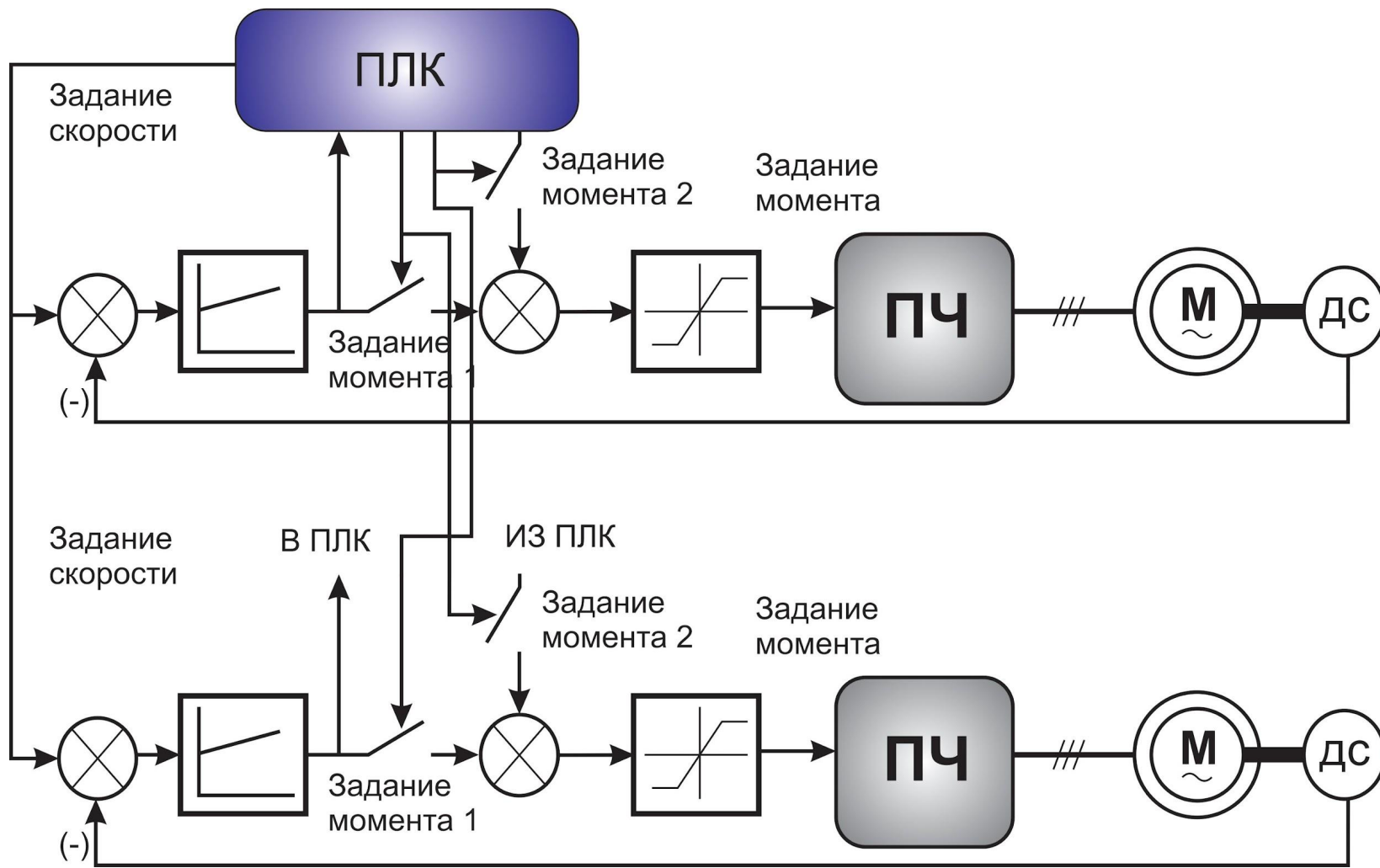
Функциональная схема конвейера

Задание момента для ведомых ПЧ формируется в ведущем ПЧ

Натяжной барабан с натяжной лебедкой используются для изменения натяжения ленты



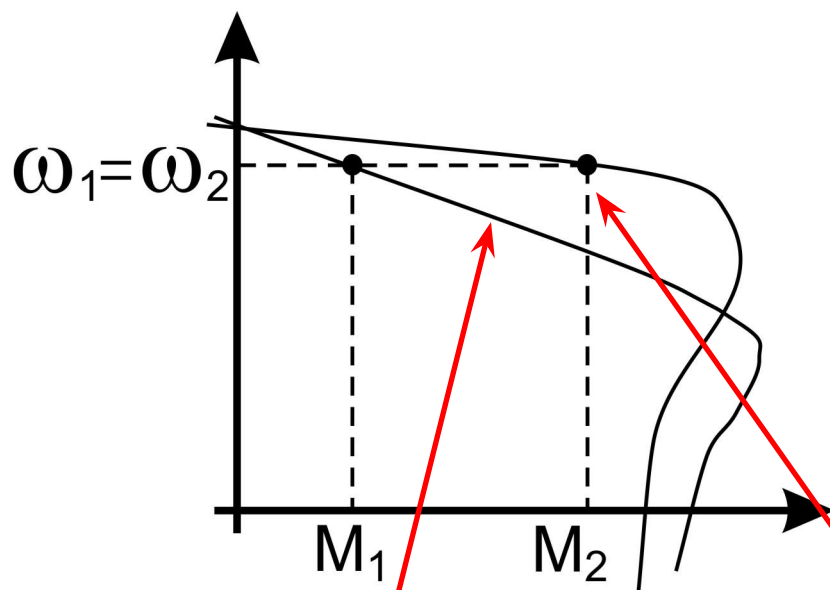
Структурная схема электропривода конвейера



Структурная схема электропривода конвейера

1. При работе электродвигателей в группе (в хвостовой части или в головной) один из двигателей назначается ведущим, а остальные ведомыми.
2. Ведущий электродвигатель с преобразователем получает задание скорости, исходя из которого формирует задание момента.
3. Задание момента передается в контроллер или непосредственно в ведомые ПЧ, если такое предусмотрено производителем. Иначе задание момента передается из контроллера в ведомые ПЧ.

Распределение нагрузки в групповом электроприводе

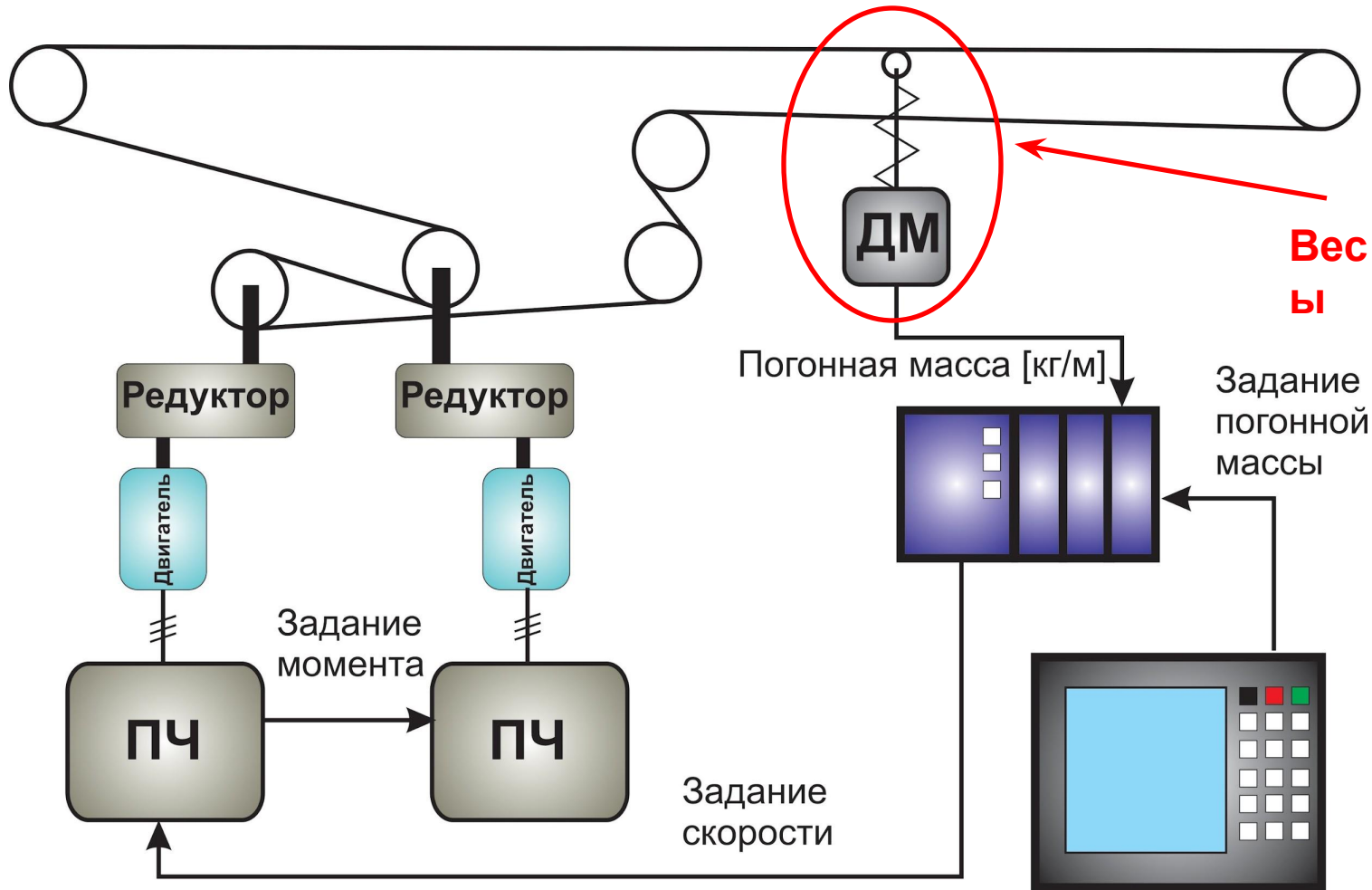


При работе с постоянной заданной скоростью двигателей с разными характеристиками в групповом электроприводе возникает проблема их неравномерной нагруженности

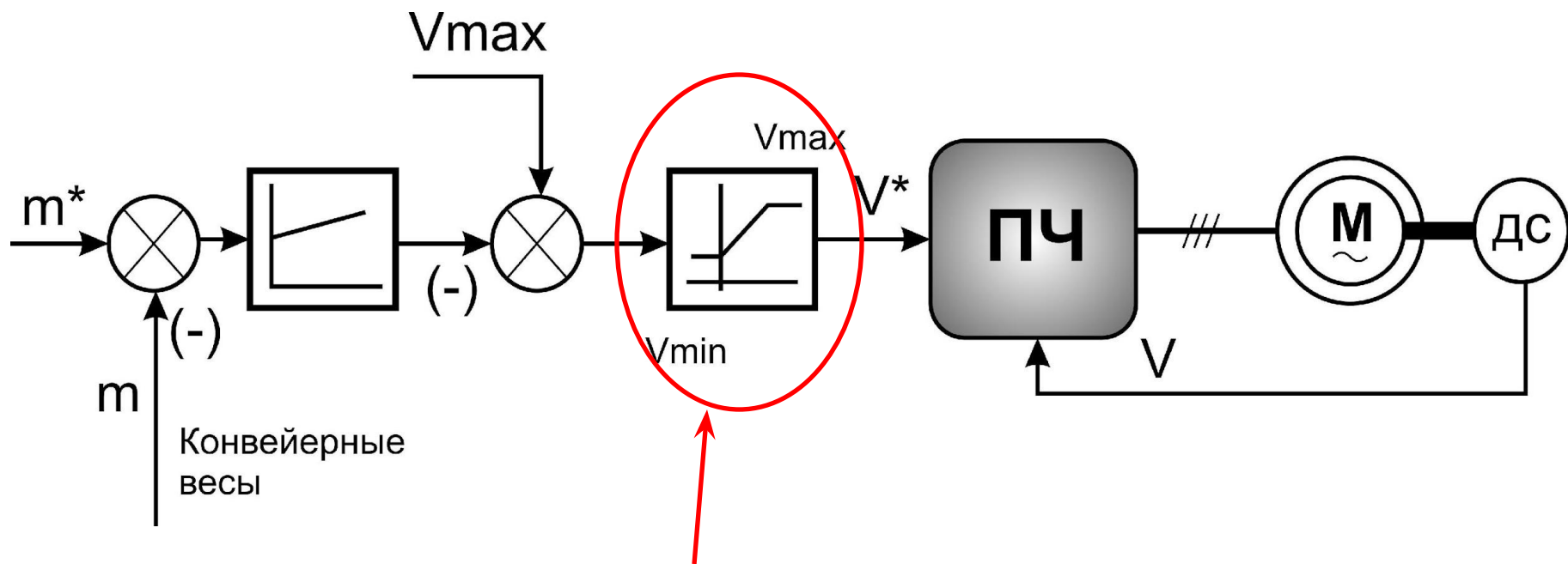
**Двигатель
недогруже
н**

**Двигатель
перегружен**

Регулирование производительности конвейера



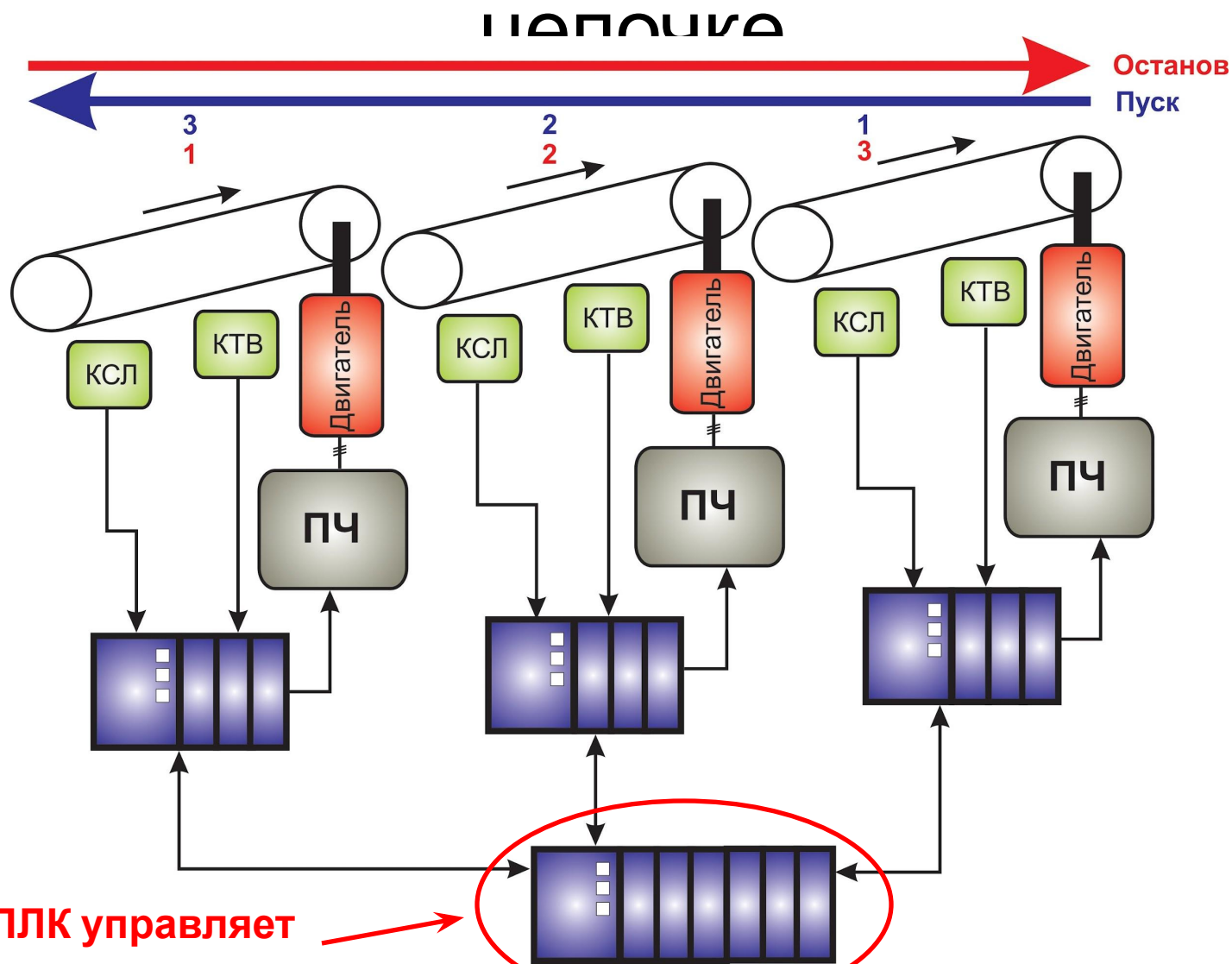
Регулирование производительности конвейера



**Звено ограничения
задания
скорости конвейера**

При нулевой скорости, т.е. при пуске, конвейерные весы будут показывать погонную массу 0 кг/м, что приведет к снижению задания скорости до 0 м/с и конвейер не запустится. Решение указанной проблемы можно получить, если ограничить минимальную скорость конвейера на ненулевом уровне.

Пуск и остановка конвейера в

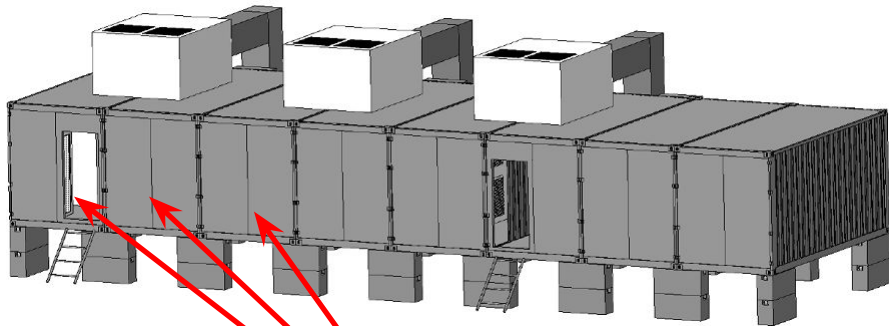


**Этот ПЛК управляет
пуском и остановом
цепочки конвейеров**

Взрывозащищенные электроприводы для шахтных конвейеров

Преобразователь на поверхности (во взрывобезопасной среде)

САУ ЛК

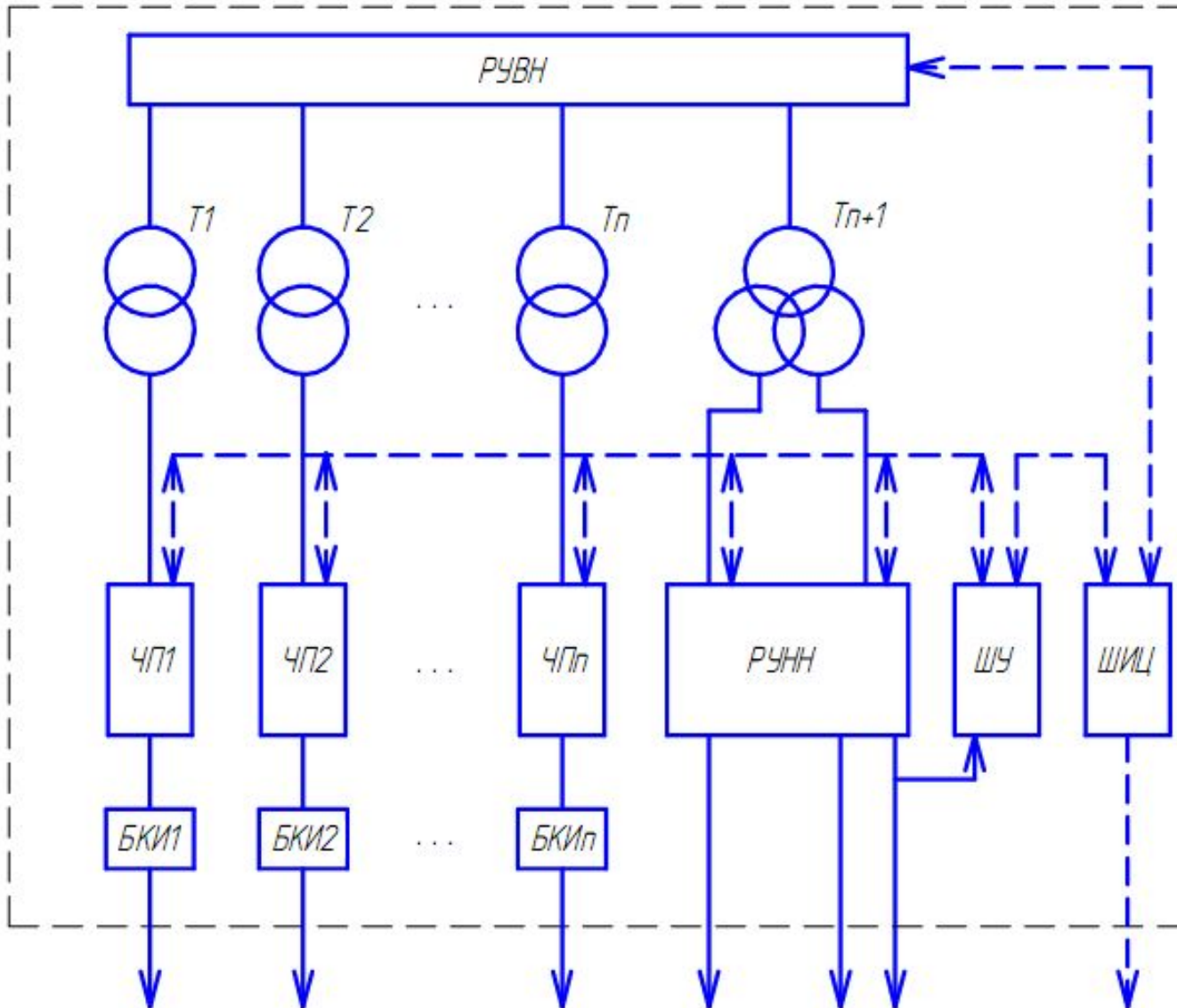


Модульная конструкция (в каждом модуле находится ТП и преобразователь)

Преобразователь в шахте (во взрывоопасной среде)
ЧПСШ

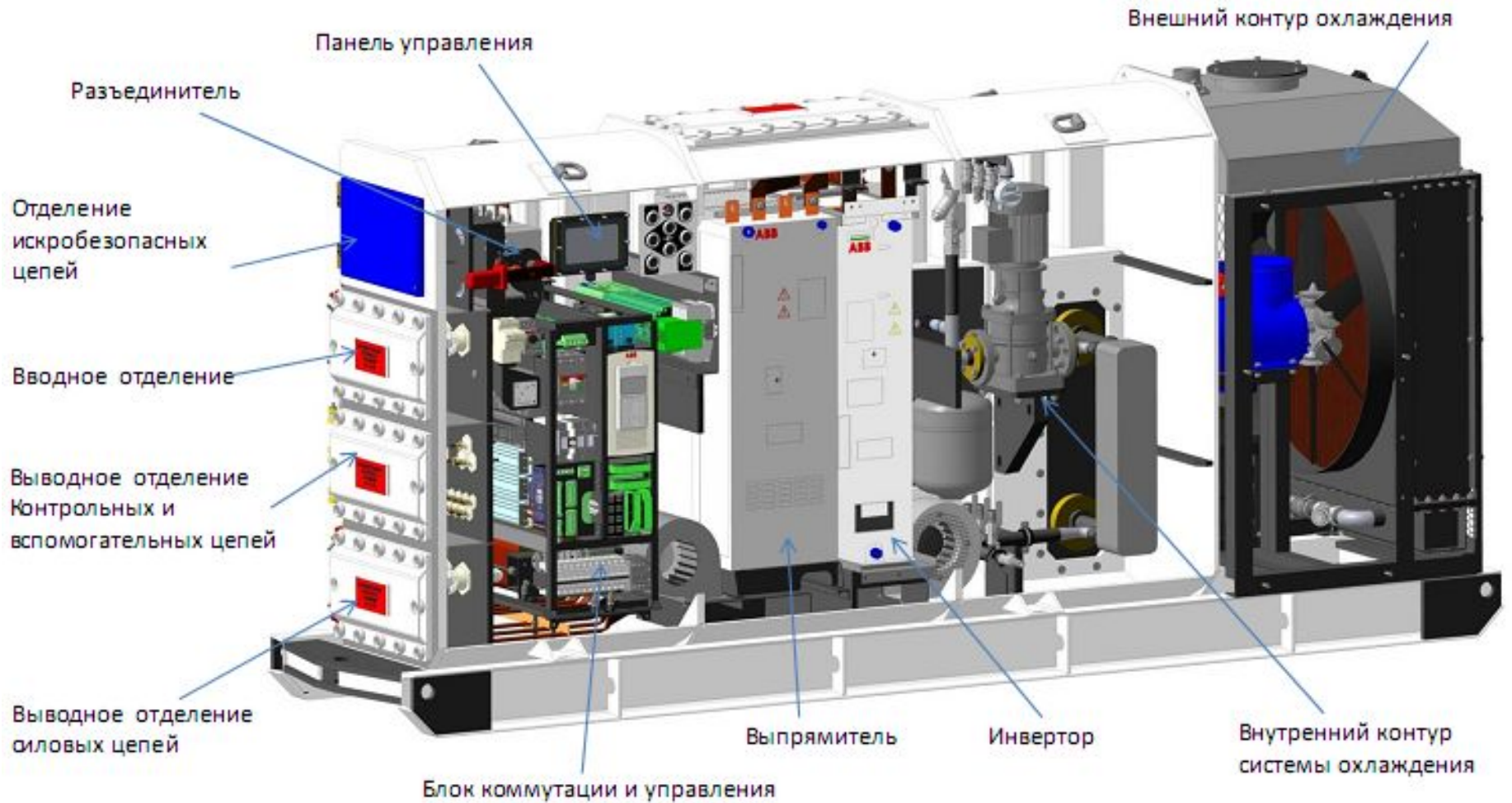


САУ ЛК

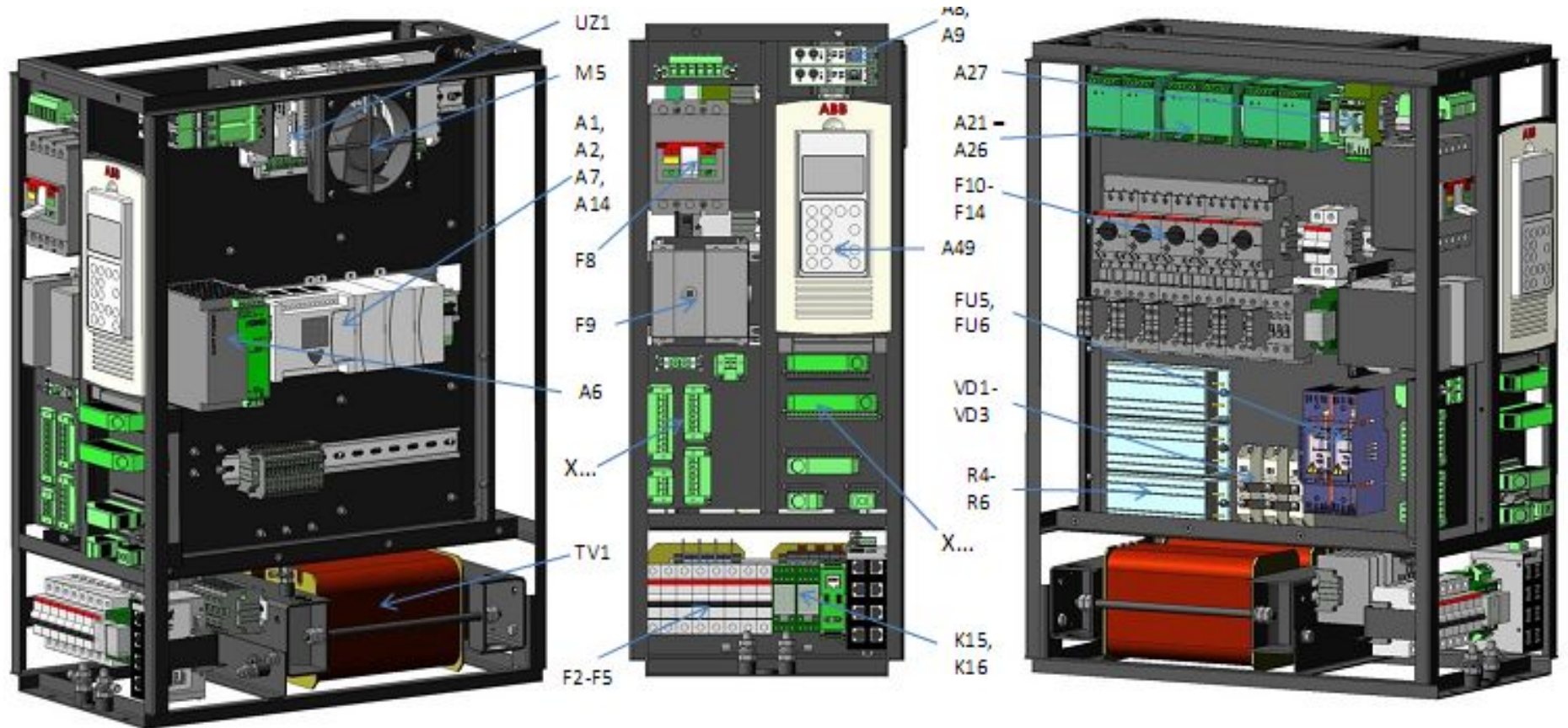


БКИ – блок контроля
изоляции;
ШИЦ – шкаф
изолированной
цифровой связи;
ЧП – частотный
преобразователь
PowerFlex 7000
(высоковольтный,
до 7,2 кВ)

ЧПСШ



ЧПСШ



ЧПСШ

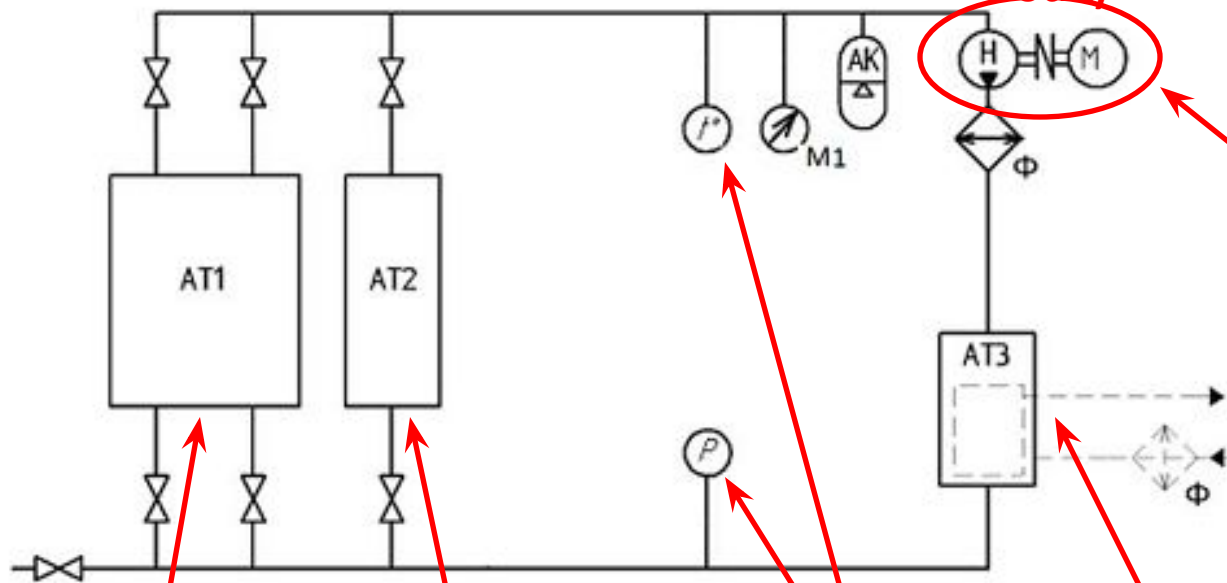
A1, A2, A7, A14 – ПЛК с подключенными блоками расширения; UZ1 - Контроллер привода RMIO-02C; M5-Вентилятор платы RMIO; R4-R6, VD1-VD3, FU5, FU6, K9-Цепь заряда звена постоянного тока; F10-F14-Контакты управляющие вспомогательными приводами и автоматические выключатели; A21-A26 – Блоки предварительного контроля изоляции; K15, K16-Реле, управляющие мотор-приводом автоматического выключателя, двигателями внутреннего контура охлаждения и отходящей линией 220В; A27 -Прибор контроля сопротивления изоляции NakelNIS-75 отходящей линии 220В; TV1 - Трансформатор собственных; A6-Блок питания 24В; A8, A9 - Повторители интерфейса ExFOI-24 ; A49-Панель управления приводом; F8 -Автоматический выключатель; X...-Разъёмы силовых цепей и цепей управления; F9-Разъединитель; F2-F5 -Автоматические выключатели собственных нужд.

Система охлаждения ЧПСШ

Внутренний контур
охлаждения

Аккумулятор
(расширительный
бак)

Циркуляционны
й насос



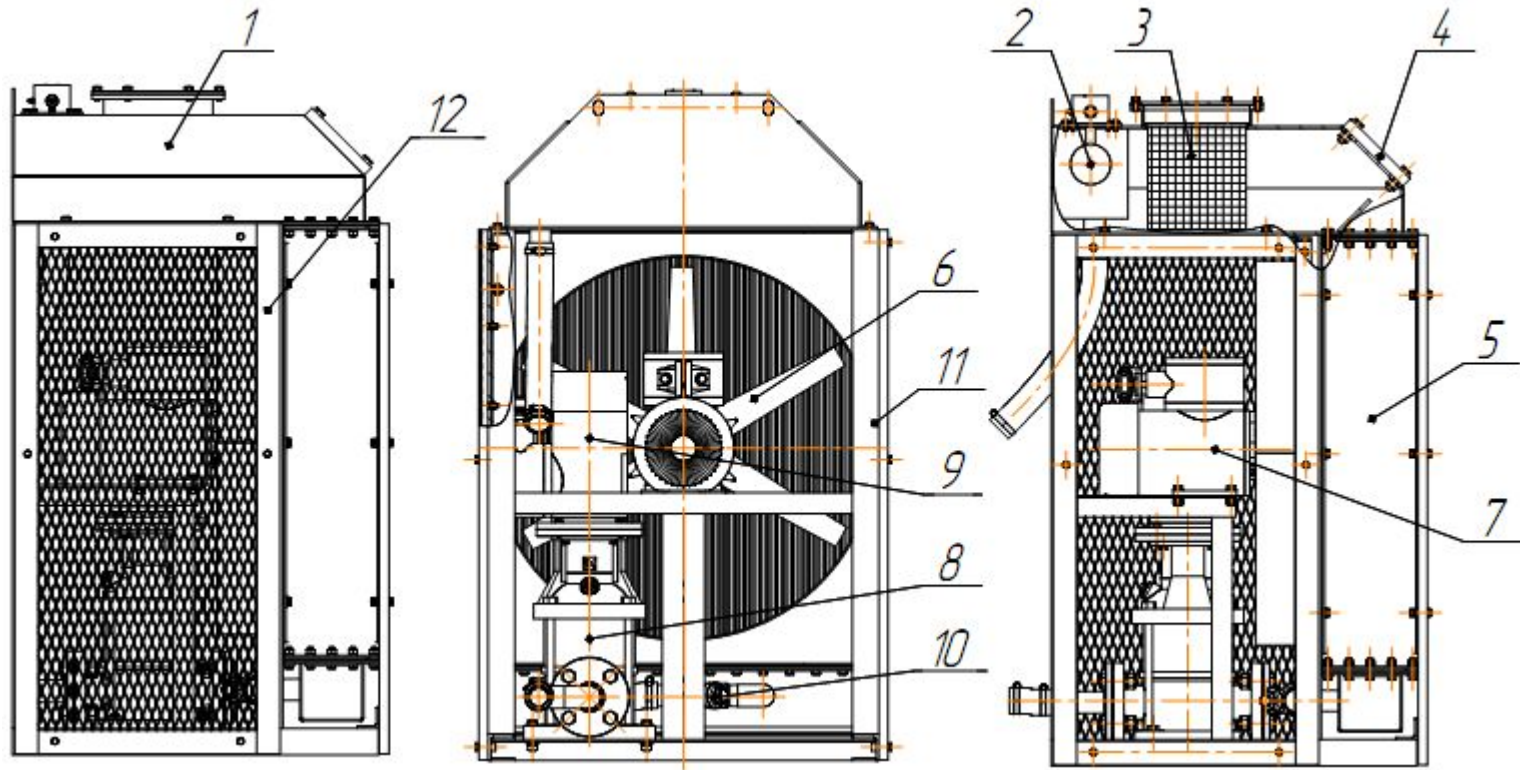
Пластинчатый
теплообменни
к
выпрямителя

Пластинчатый
теплообменни
к
инветора

Датчики
давления и
температуры

Пластинчатый
теплообменни
к
первого
контура

Внешний контур охлаждения ЧПС.И



Внешний контур охлаждения состоит из: расширительного бака 1; фильтра грубой очистки 3; индикатора уровня 4; радиатора 5, передающего тепло в окружающую среду; вентилятора 6 с двигателем 7, для создания воздушного потока через радиатор; насоса 8 с двигателем 9, осуществляющих непрерывную циркуляцию охлаждающей жидкости; фильтра 10; каркаса 11; защитных кожухов 12.

Лекция 4

АЭП БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Внешний вид большегрузного автосамосвала

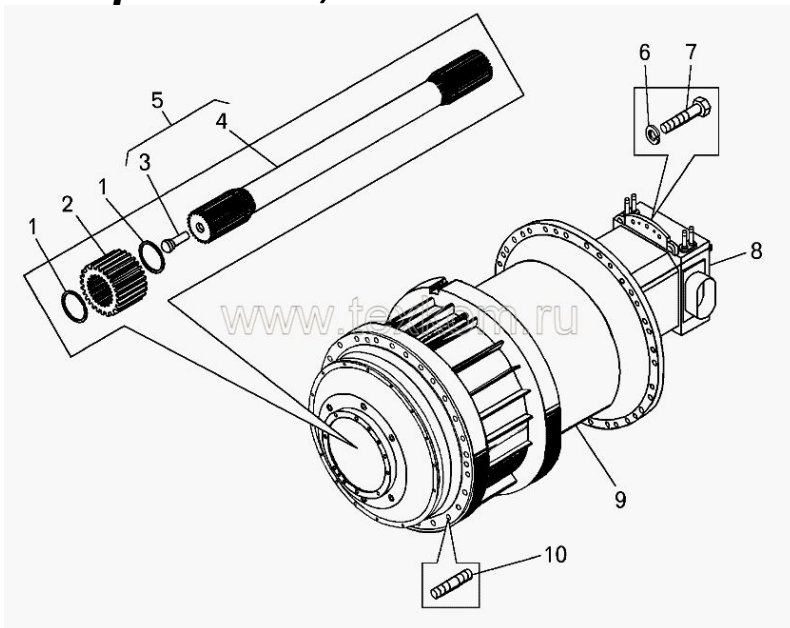


Особенности АЭП большегрузных автосамосвалов

АЭП автономного транспортного средства характеризуется:

- **ограниченностью мощности** источника питания;
- жесткими требованиями к **массо-габаритным показателям, вибрациям** и тряскам;
- повышенным требованием к надежности;
- высоким требованием к коэффициенту полезного действия.

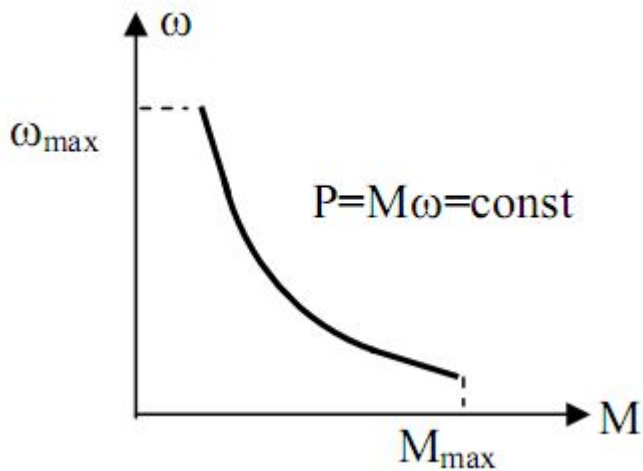
Электродвигатели применяются совмещенные с редукторами и колесами (мотор-колеса).



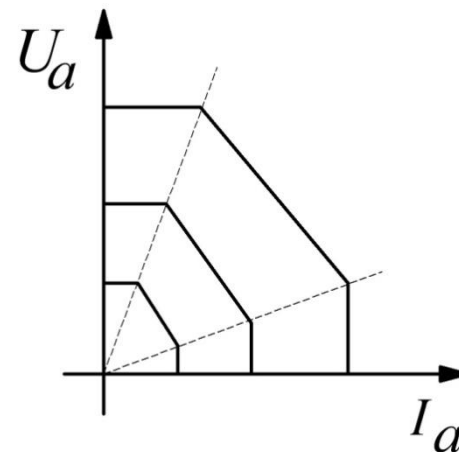
Требования к АЭП большегрузных автосамосвалов

1. Диапазон регулирования скорости: 4:1.
2. Ограничение мощности дизель-генераторной установки.
3. Ограничение тока и напряжения дизель-генераторной установки в нормальном режиме работы.
4. Наличие электрического торможения.
5. Наличие аварийного режима торможения.
6. Работа электродвигателей с разными скоростями во время поворота («электрический дифференциал»).

Рациональная форма механической характеристики



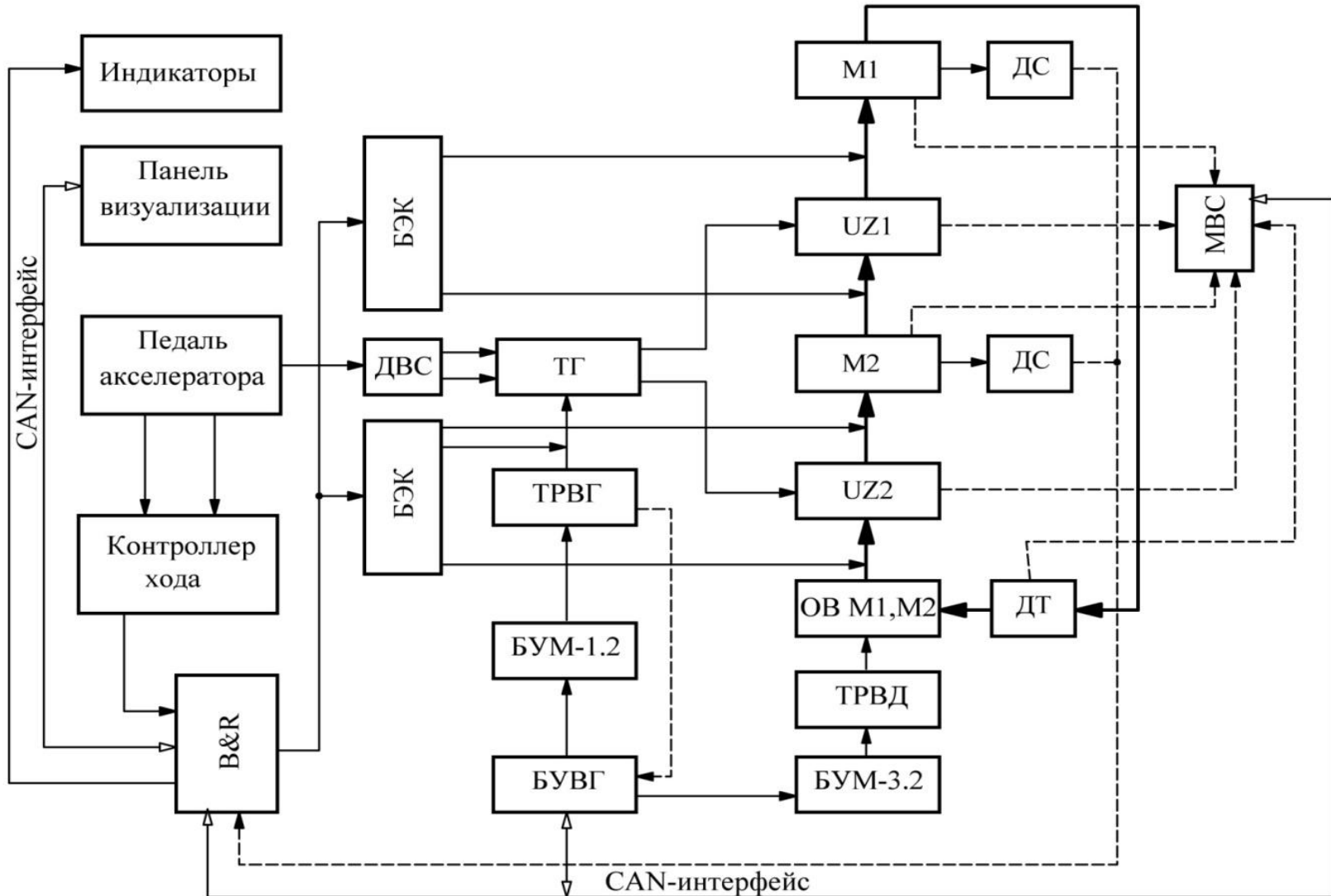
Требуемая внешняя характеристика генератора



АЭП автосамосвала

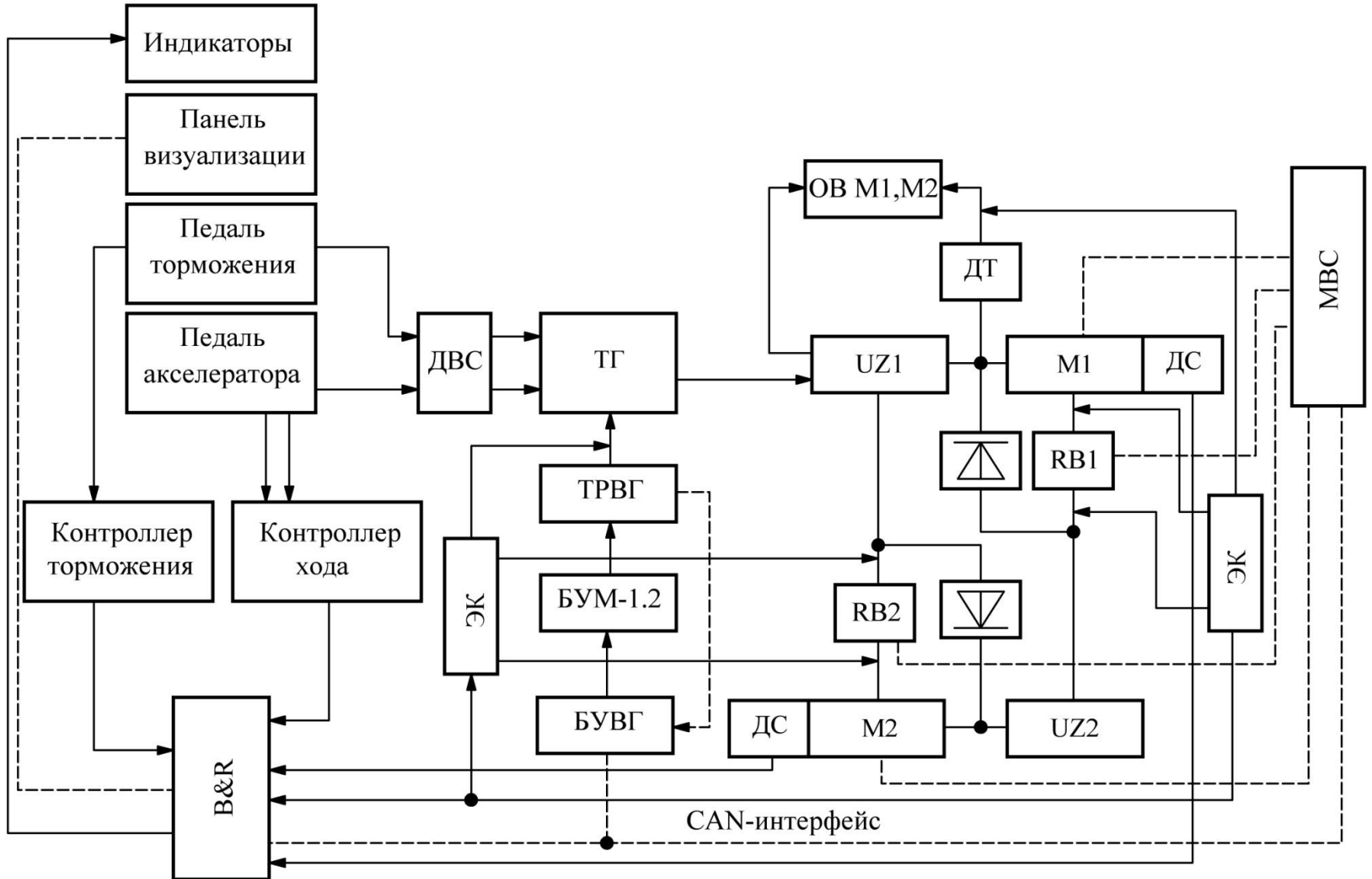
Белаз-75131

ДВИГАТЕЛЬНЫЙ



АЭП автосамосвала

Белаз-75131



АЭП автосамосвала Белаз-75131

Абривиатуры на схемах

БЭК – блок электронных ключей;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ТРВГ – тиристорный возбудитель
генератора;

ТРВД – тиристорный возбудитель
двигателя;

БУМ – блок управления мощностью;

ДС, ДТ – датчики скорости и тока;

UZ – неуправляемые выпрямители;

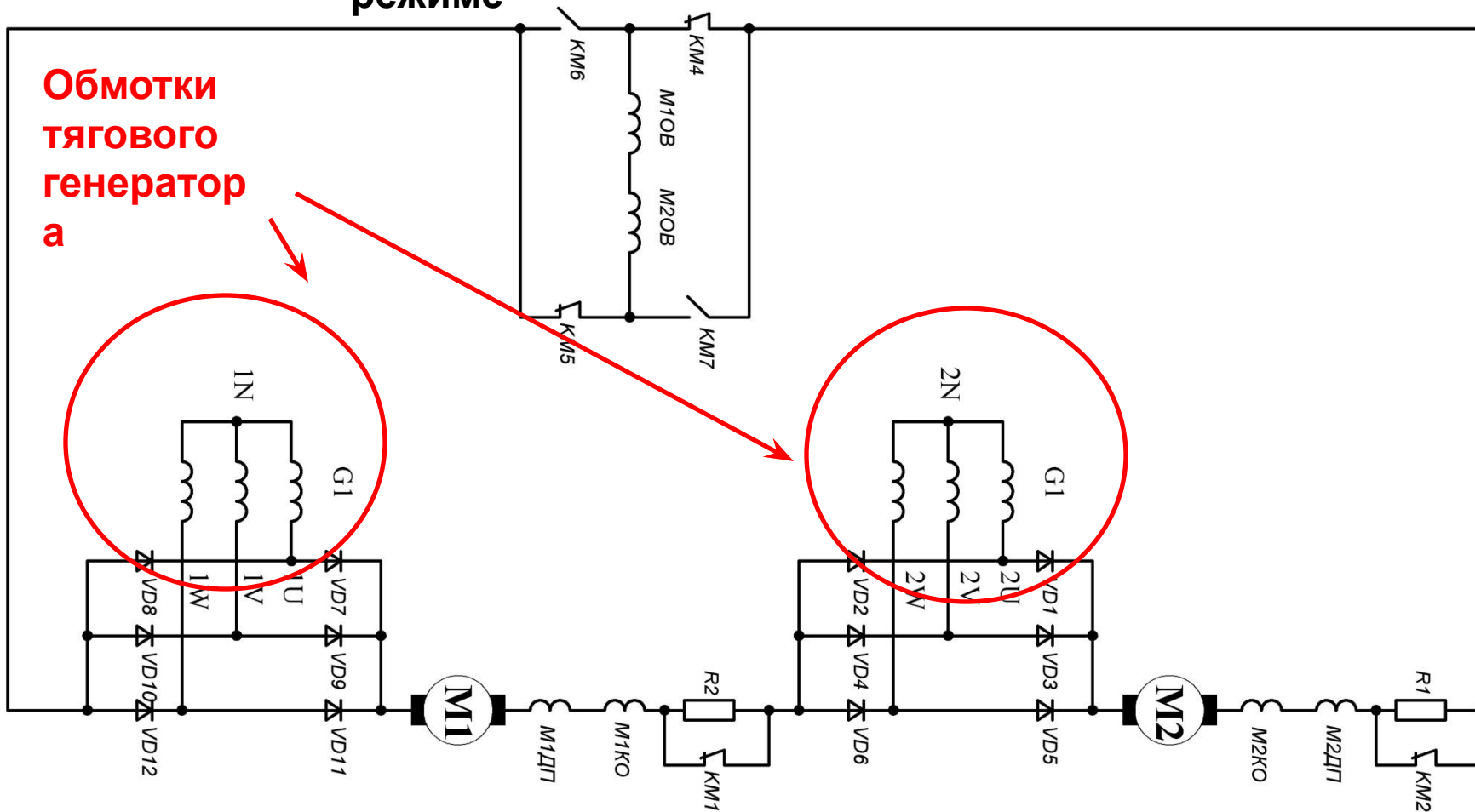
ТГ – тяговый генератор;

МВС – модуль ввода сигналов;

RV – тормозные реостаты.

АЭП автосамосвала Белаз-75131

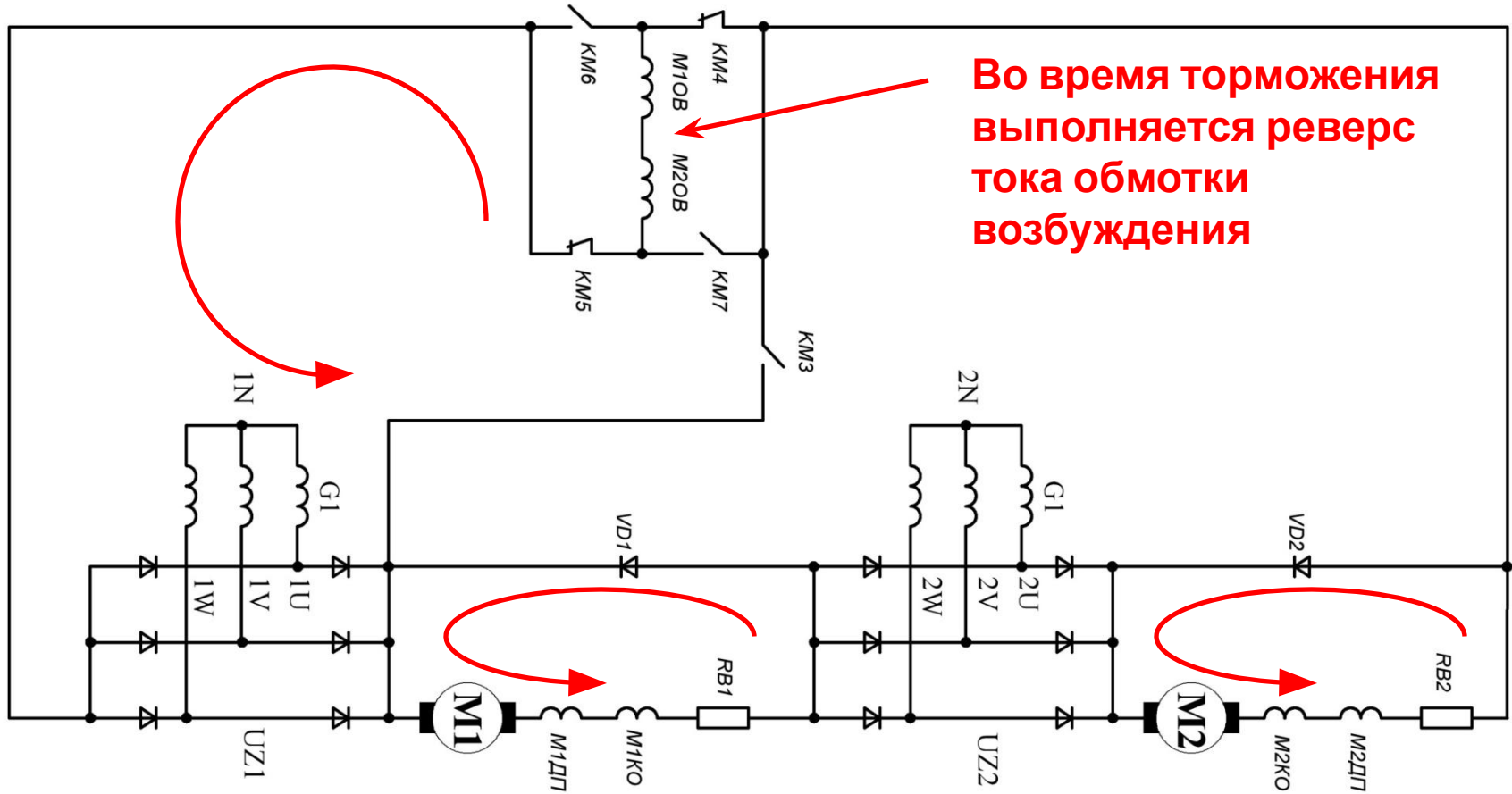
ПЭС силовой части в двигательном режиме



АЭП автосамосвала

Белаз-75131

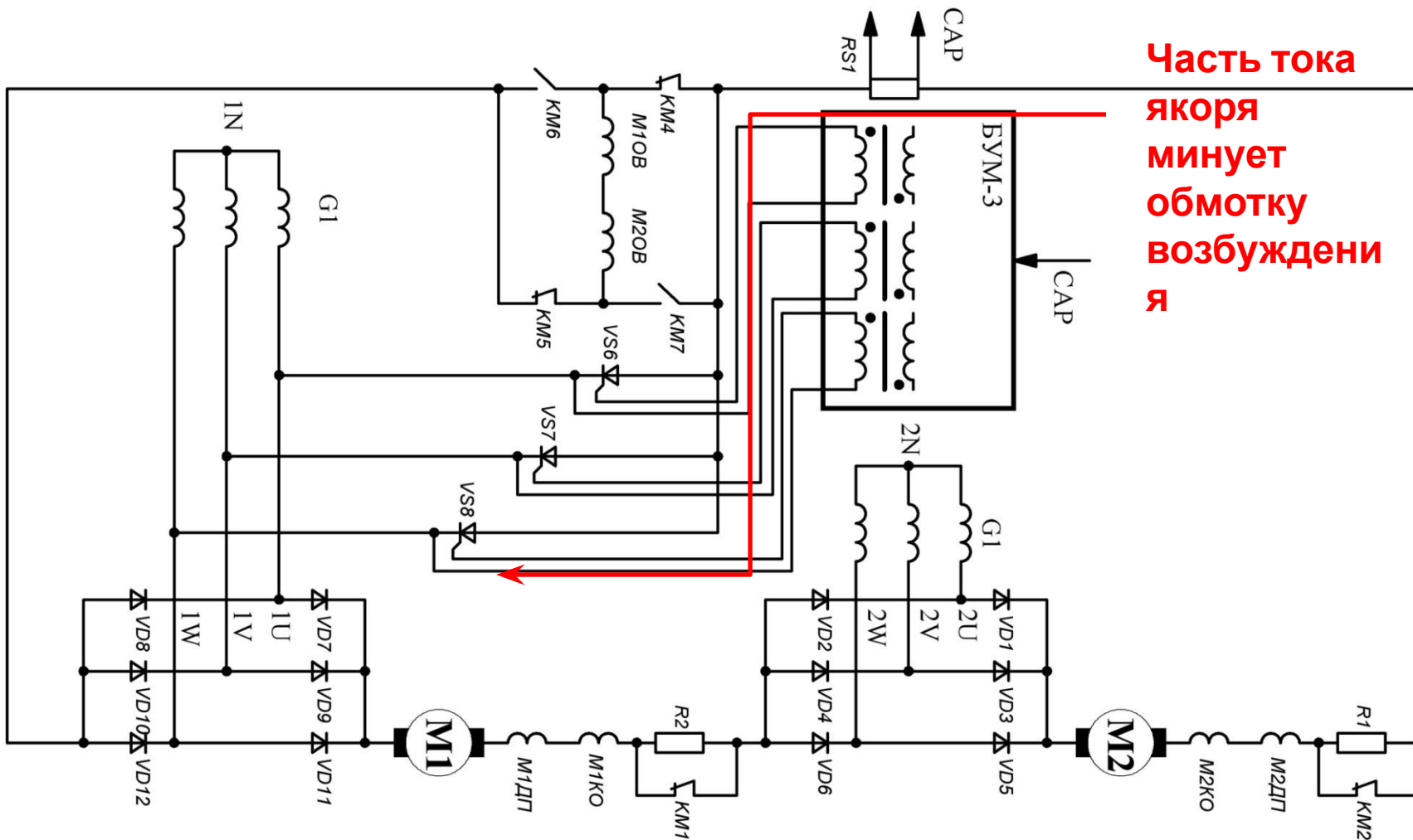
ПЭС силовой части в режиме
торможения



АЭП автосамосвала

Белаз-75131

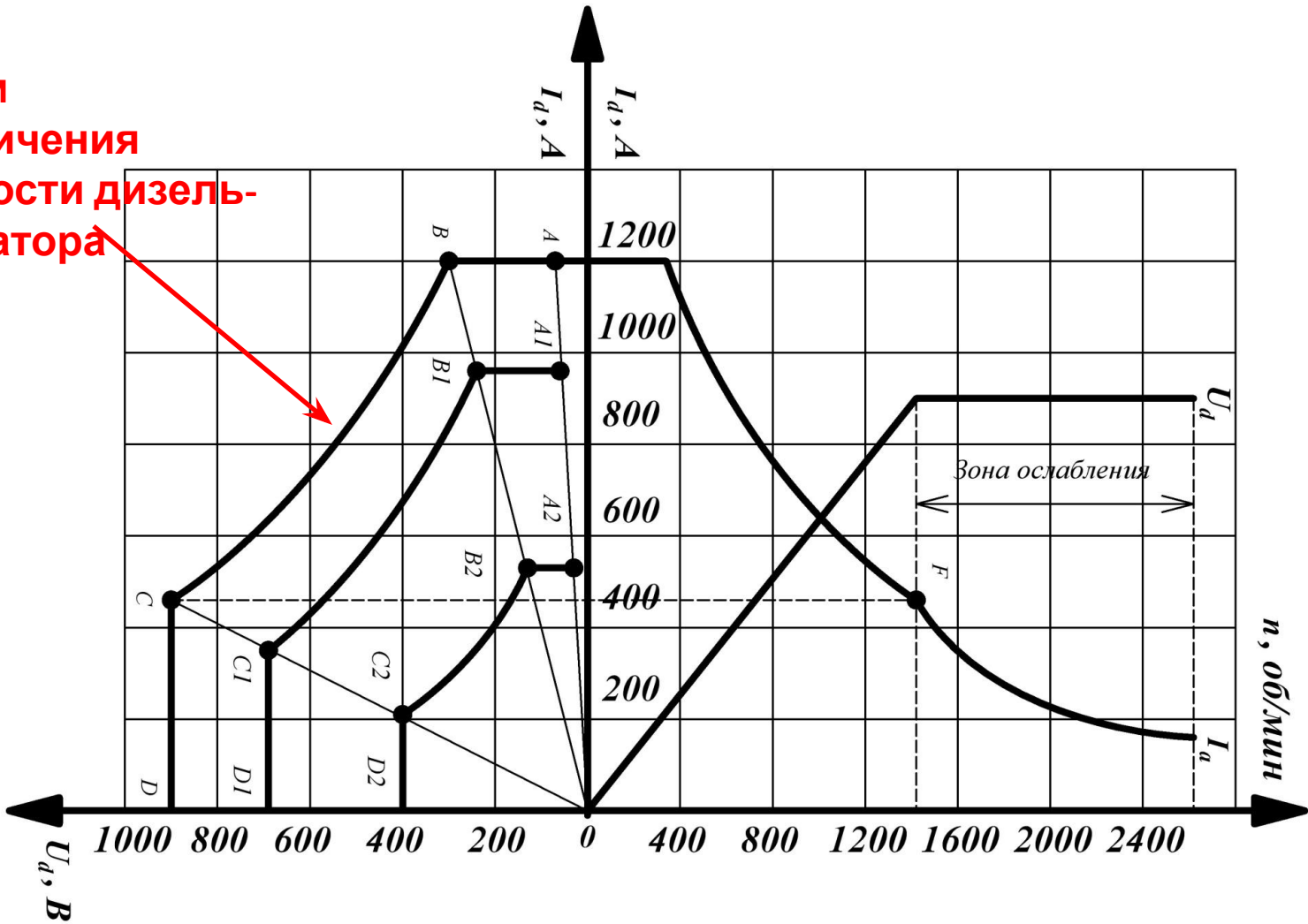
ПЭС силовой части в режиме ослабления поля



АЭП автосамосвала Белаз-75131

Характеристики АЭП автосамосвала в двигательном

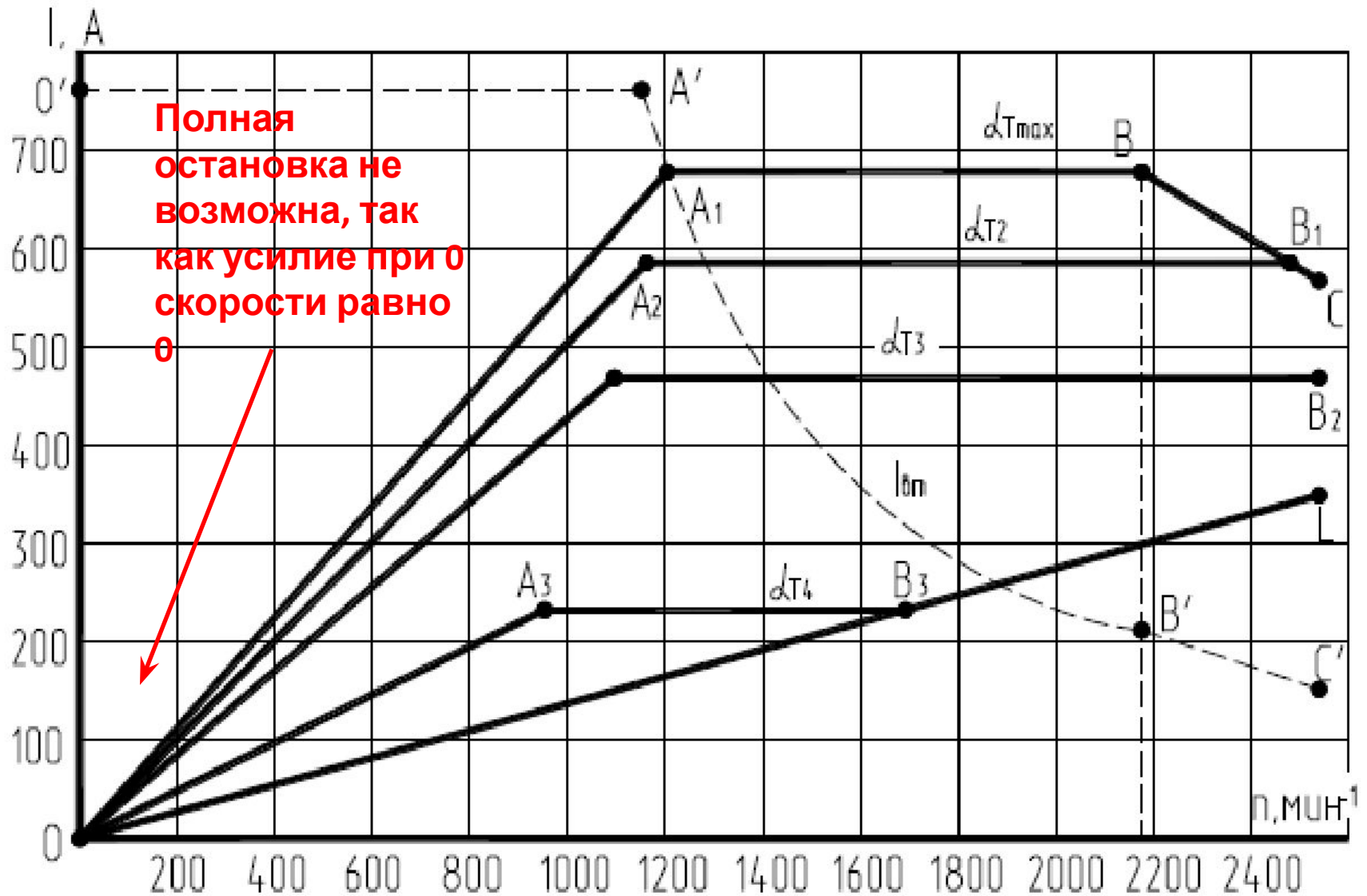
Режим
ограничения
мощности дизель-
генератора



АЭП автосамосвала

Белаз-75131

Характеристики АЭП автосамосвала в режиме



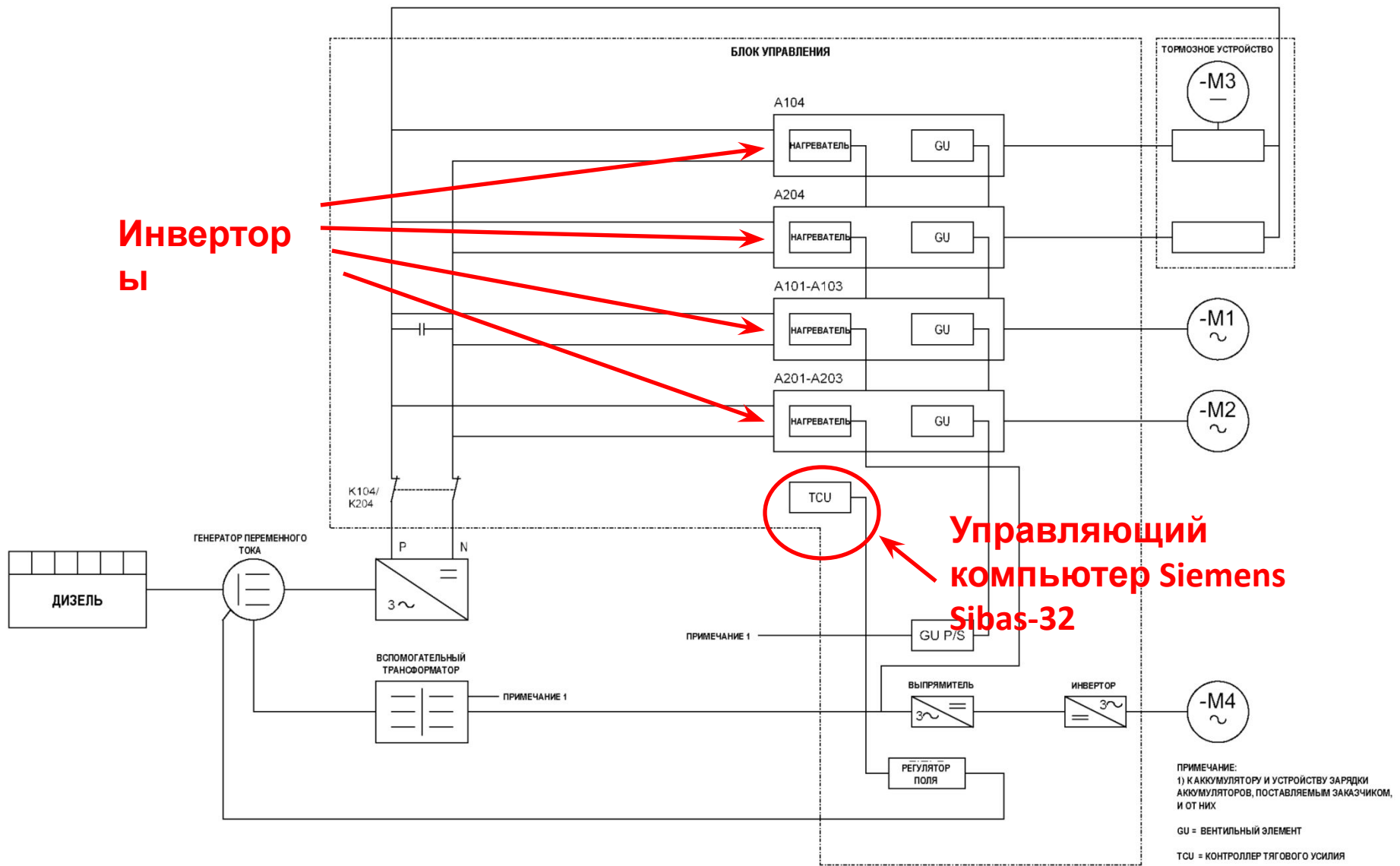
АЭП автосамосвала

Белаз-75131

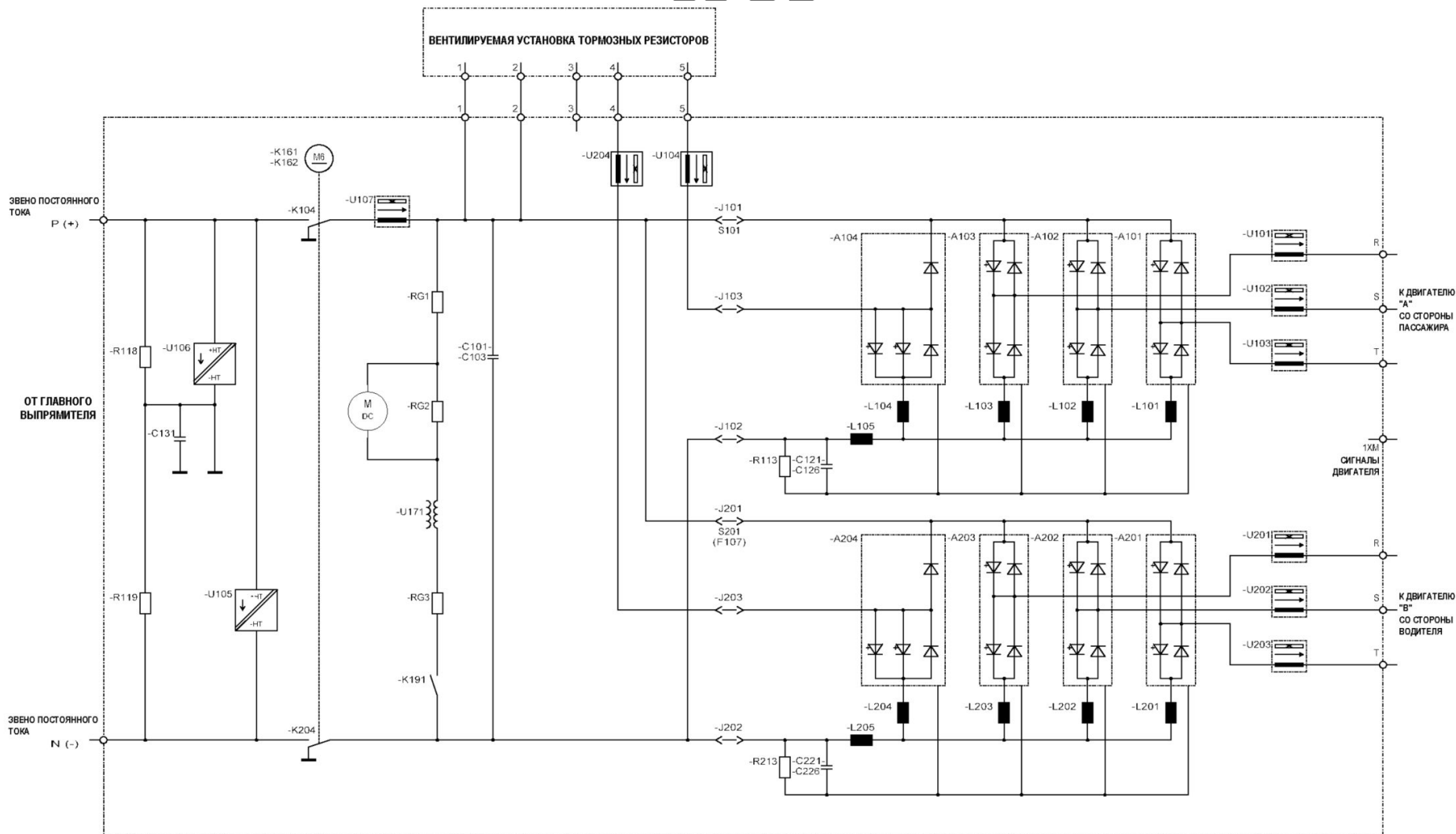
Форсированное торможение при низких скоростях



АЭП автосамосвала БЕЛАЗ-75600 CSGV



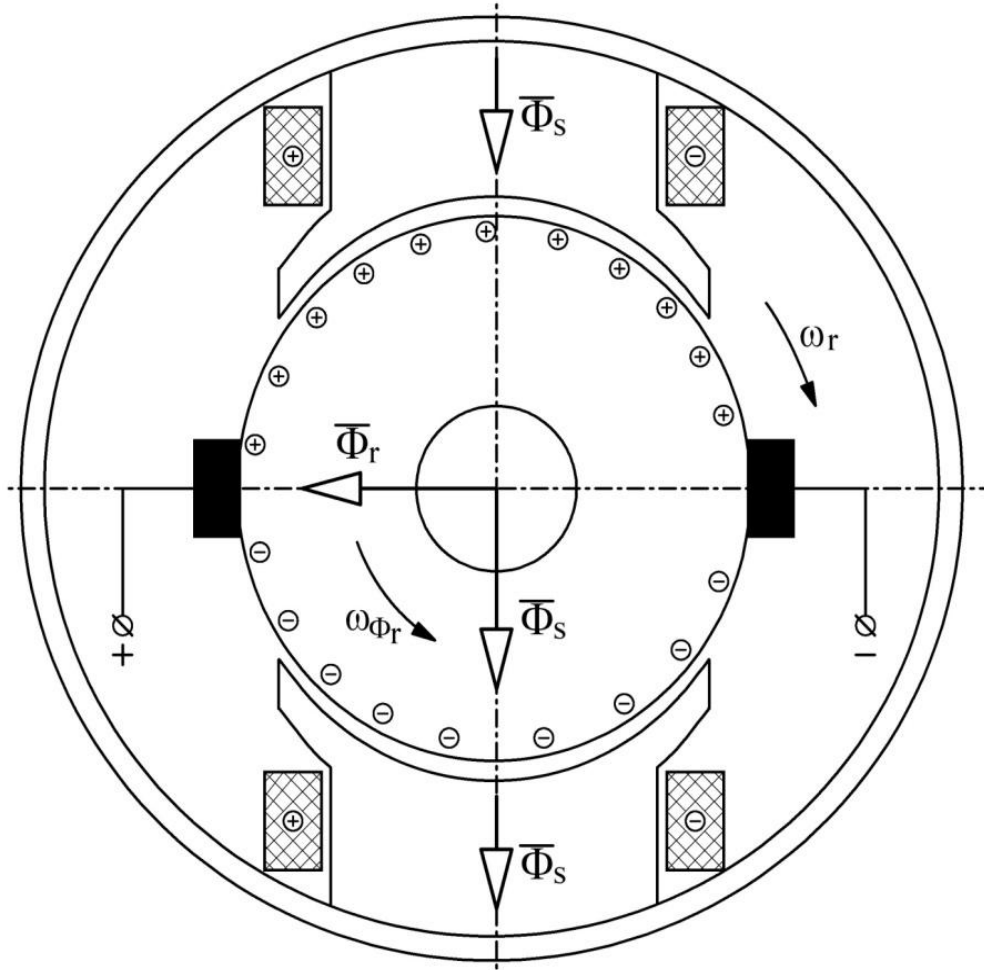
АЭП автосамосвала БЕЛАЗ-75600 CSGB



Лекция 5

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Модель машины постоянного тока с независимым возбуждением



$$\begin{cases} U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k\Phi_a \omega, \\ U_v = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt}, \\ J \frac{d\omega}{dt} = k\Phi_a i_a - M_c. \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_v(p) = \frac{1}{R_v} \frac{U_v(p)}{T_v p + 1}, \\ I_a(p) = \frac{1}{R_a} \frac{(U_a(p) - k\Phi_v(p)\omega(p))}{T_a p + 1}, \\ \omega(p) = \frac{1}{Jp} (k\Phi_v(p)I_a(p) - M_c(p)), \end{cases}$$

$$\tilde{a} \tilde{a} \tilde{a} p = \frac{d}{dt} - \tilde{u} \tilde{a} \tilde{\delta} \tilde{\delta} \tilde{\delta} \tilde{\delta} \quad \tilde{E} \tilde{\delta} \tilde{\delta} \tilde{\delta} \tilde{\delta}$$

Модель машины постоянного тока с независимым возбуждением

Статические характеристики

$$p = 0 \rightarrow \begin{cases} I_v = \frac{U_v}{R_v}, \\ I_a = \frac{(U_a - k\Phi_v \omega)}{R_a}, \\ k\Phi_v I_a = M_c. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{U_a}{k\Phi_v} - \frac{R_a}{k\Phi_v} I_a, \\ \omega = \frac{U_a}{k\Phi_v} - \frac{R_a}{(k\Phi_v)^2} M, \\ M = M_c. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \omega = \omega_0 - \frac{R_a}{k\Phi_v} I_a, \\ \omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}, \\ M = M_c. \end{cases}$$

$$\omega_0 = \frac{U_a}{k\Phi_v}, \beta = \frac{(k\Phi_v)^2}{R_a}.$$

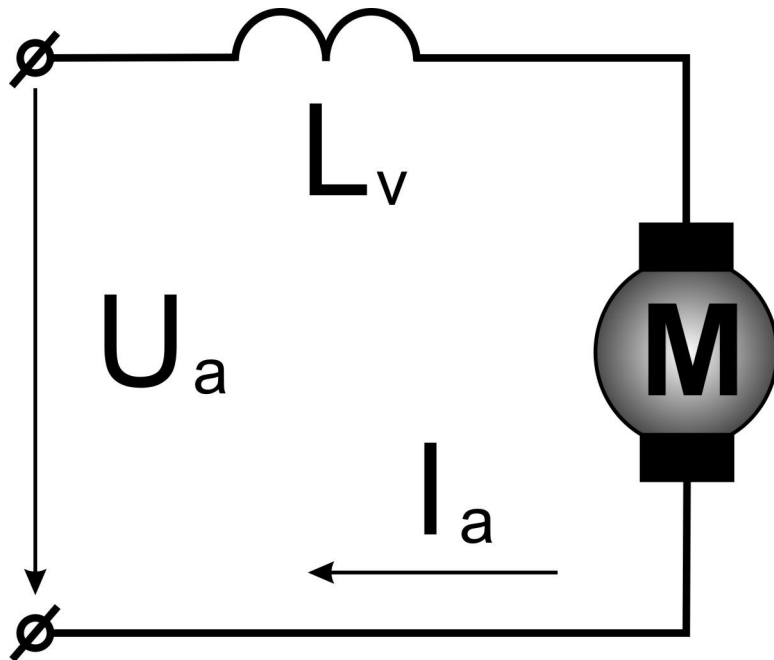
Электромеханическая характеристика

Механическая характеристика

Скорость холостого хода

Жесткость статической механической характеристики

Модель машины постоянного тока с последовательным возбуждением



$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = (R_a + R_v)i_a + (L_a + L_v)\frac{di_a}{dt} + kk_v I_a \omega, \\ U_v = R_v i_a + L_v \frac{di_a}{dt}, \\ J \frac{d\omega}{dt} = kk_v I_a^2 - M_c = M - M_c. \end{array} \right.$$

$$\ddot{\Phi}_v = k_v I_a.$$

Справедливо на линейном
участке кривой
намагничивания

Поскольку в машине постоянного тока с последовательным возбуждением поток возбуждения изменяется в широком диапазоне, в том числе и в зоне насыщения, линеаризованная зависимость потока от тока якоря дает большую погрешность.

Модель машины постоянного тока с последовательным возбуждением

$$\Phi \leq \Phi_{i\grave{a}\tilde{n}}$$

$$\frac{d}{dt} = 0 \rightarrow \begin{cases} U_a = (R_a + R_v)i_a + kk_v I_a \omega, \\ U_v = R_v i_a, \\ M = kk_v I_a^2 = M_c. \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{U_a}{kk_v I_a} - \frac{(R_a + R_v)}{kk_v}, \\ \omega = \frac{U_a}{\sqrt{kk_v M}} - \frac{(R_a + R_v)}{kk_v}, \\ M = kk_v I_a^2 = M_c. \end{cases}$$

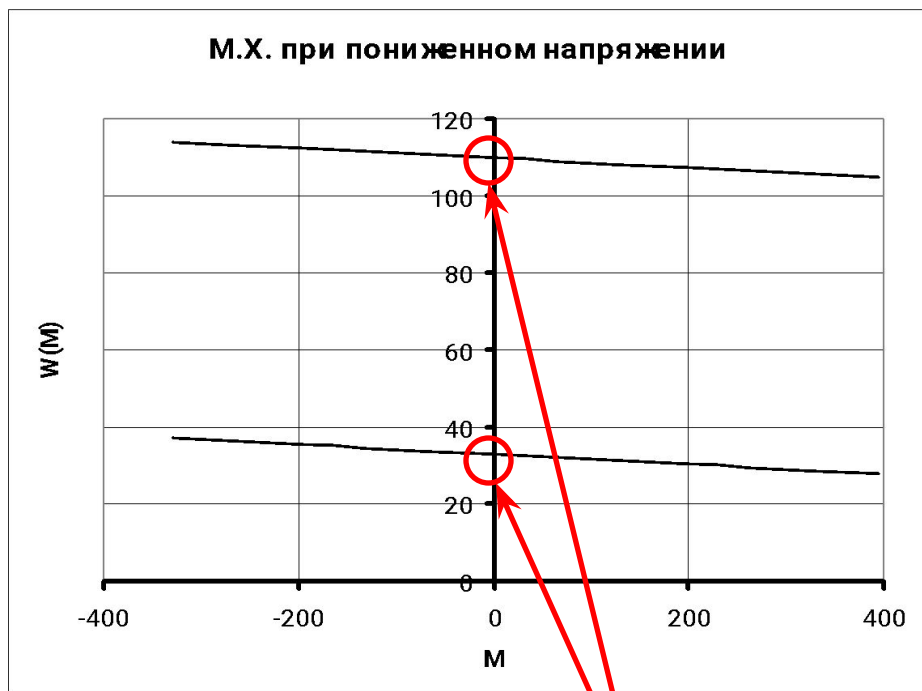
$$\Phi > \Phi_{i\grave{a}\tilde{n}}$$

$$\frac{d}{dt} = 0 \rightarrow \begin{cases} U_a = (R_a + R_v)i_a + k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}} \omega, \\ U_v = R_v i_a, \\ M = k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}} I_a = M_c. \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{U_a}{k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}}} - \frac{R_a}{k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}}} I_a, \\ \omega = \frac{U_a}{k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}}} - \frac{R_a}{(k\Phi_{i\grave{a}\tilde{n}})^2} M, \\ M = M_c. \end{cases}$$

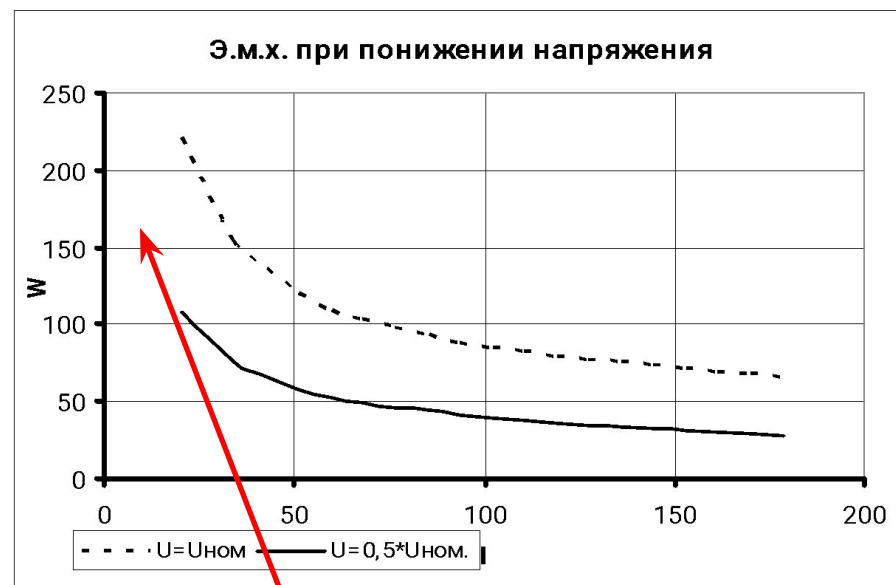
Статические характеристики машин постоянного тока

ДПТ-



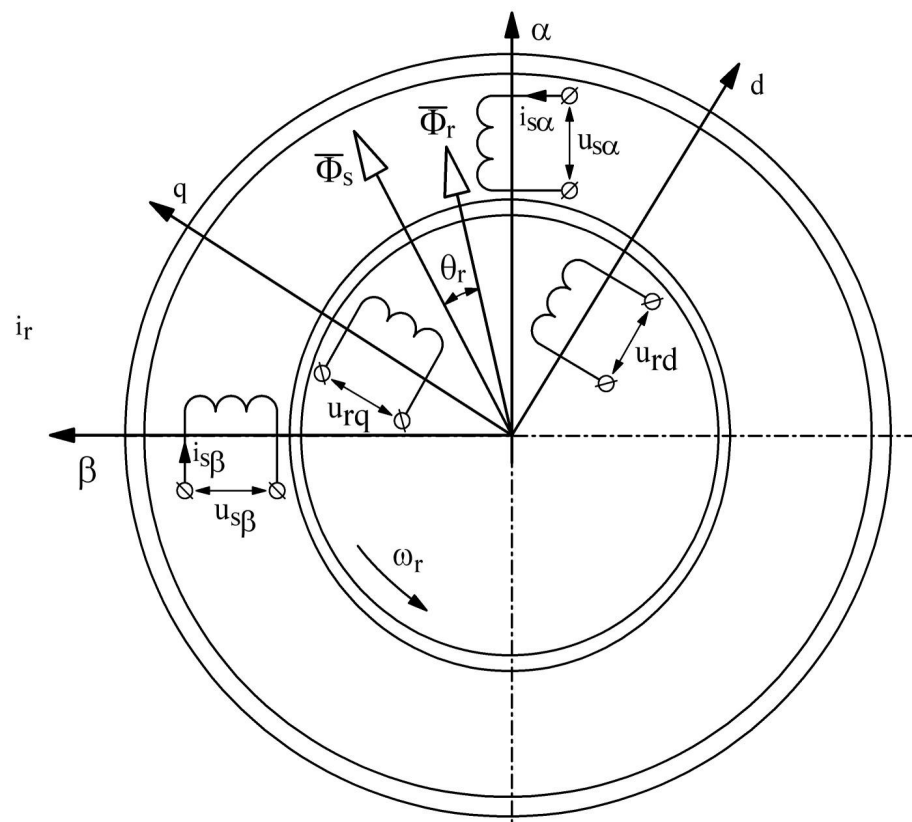
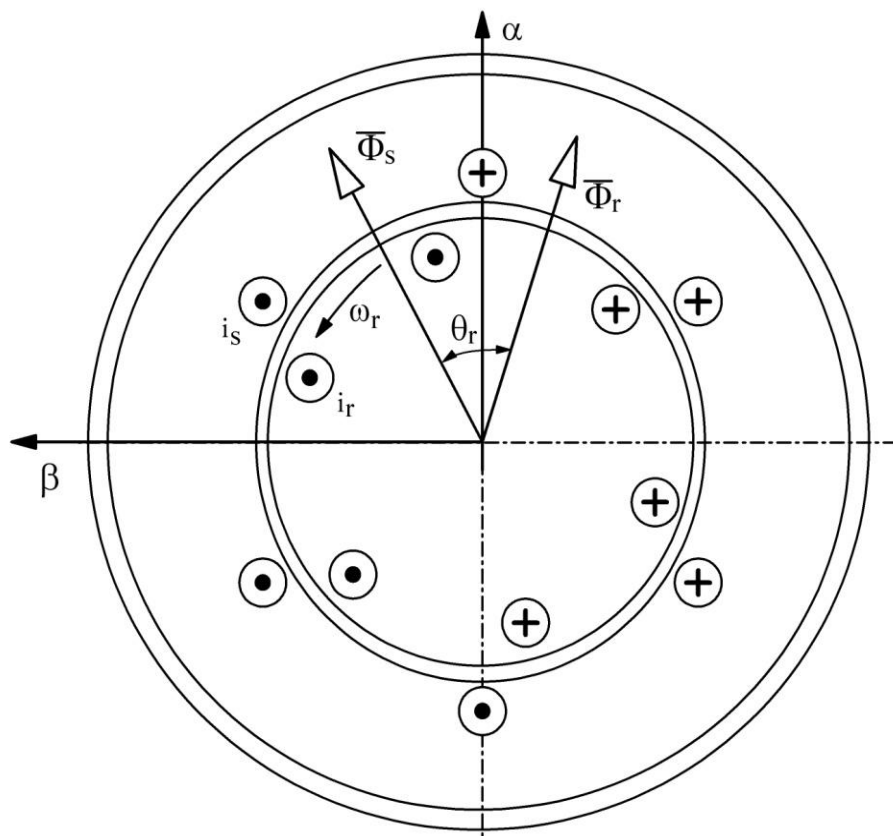
**Скорость холостого
хода**

ДПТ-

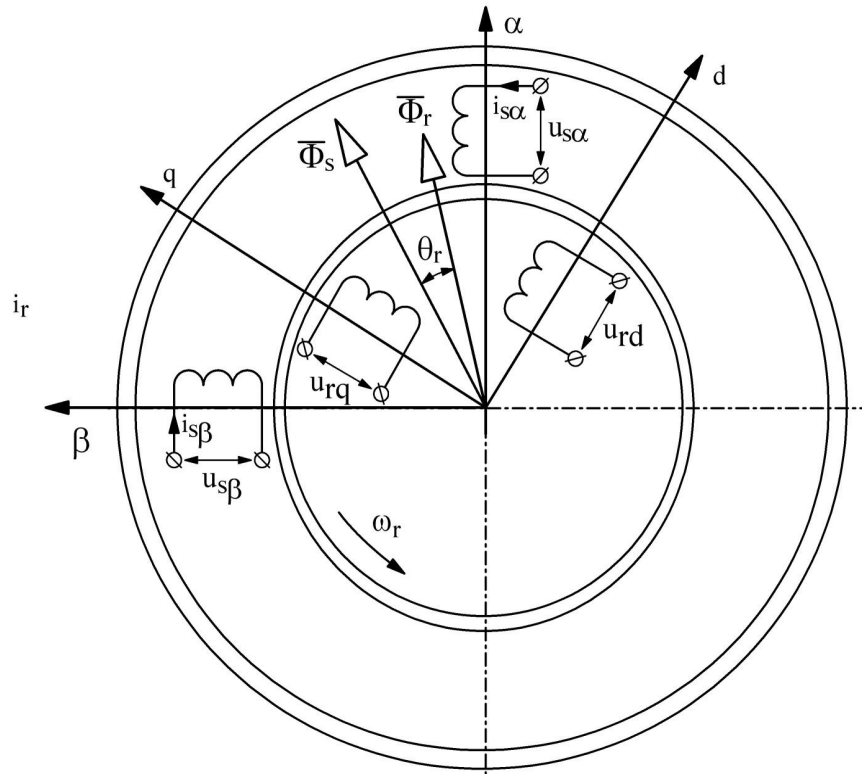


**Холостой ход не
возможен**

Модель асинхронного электродвигателя



Модель асинхронного электродвигателя



$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha},$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - R_s i_{s\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = u_{rd} - R_r i_{rd},$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = u_{rq} - R_r i_{rq},$$

где $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – составляющие вектора напряжения статора в осях системы координат α - β , неподвижно связанной со статором ОЭМ; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – составляющие вектора тока статора в системе координат α - β ; $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ – составляющие вектора потокосцепления статора в системе координат α - β ; u_{rd}, u_{rq} – составляющие вектора напряжения ротора в системе координат d - q , неподвижно связанной с ротором; i_{rd}, i_{rq} – составляющие вектора тока ротора в системе координат d - q ; Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – составляющие вектора потокосцепления ротора в системе координат d - q

Модель асинхронного электродвигателя

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha},$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - R_s i_{s\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = u_{rd} - R_r i_{rd},$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = u_{rq} - R_r i_{rq},$$

Недостатки модели:

Уравнений – 4, переменных – 8

->

бесконечное множество

решений.

**Дополним модель уравнениями
электромагнитной связи:**

$$\Psi_{s\alpha} = L_{s\alpha,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{s\alpha,s\beta} i_{s\beta} + L_{s\alpha,rd} i_{rd} + L_{s\alpha,rq} i_{rq},$$

$$\Psi_{s\beta} = L_{s\beta,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{s\beta,s\beta} i_{s\beta} + L_{s\beta,rd} i_{rd} + L_{s\beta,rq} i_{rq},$$

$$\Psi_{rd} = L_{rd,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{rd,s\beta} i_{s\beta} + L_{rd,rd} i_{rd} + L_{rd,rq} i_{rq},$$

$$\Psi_{rq} = L_{rq,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{rq,s\beta} i_{s\beta} + L_{rq,rd} i_{rd} + L_{rq,rq} i_{rq},$$

**Потокоцеплени
я самоиндукции**

Модель асинхронного электродвигателя

Определение индуктивностей обмоток

$$L_{s\alpha,s\alpha} = L_{s\beta,s\beta} = L_{sl}, \quad L_{s\alpha,s\beta} = L_{s\beta,s\alpha} = 0,$$

$$L_{s\alpha,rd} = L_{rd,s\alpha} = L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}), \quad L_{s\alpha,rq} = L_{rq,s\alpha} = L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}),$$

$$L_{rd,rd} = L_{rq,rq} = L_{rl}, \quad L_{rd,rq} = L_{rq,rd} = 0,$$

$$L_{rq,s\beta} = L_{s\beta,rq} = L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}), \quad L_{rd,s\beta} = L_{s\beta,rd} = L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}).$$



$$\Psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{rd} - L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{rq},$$

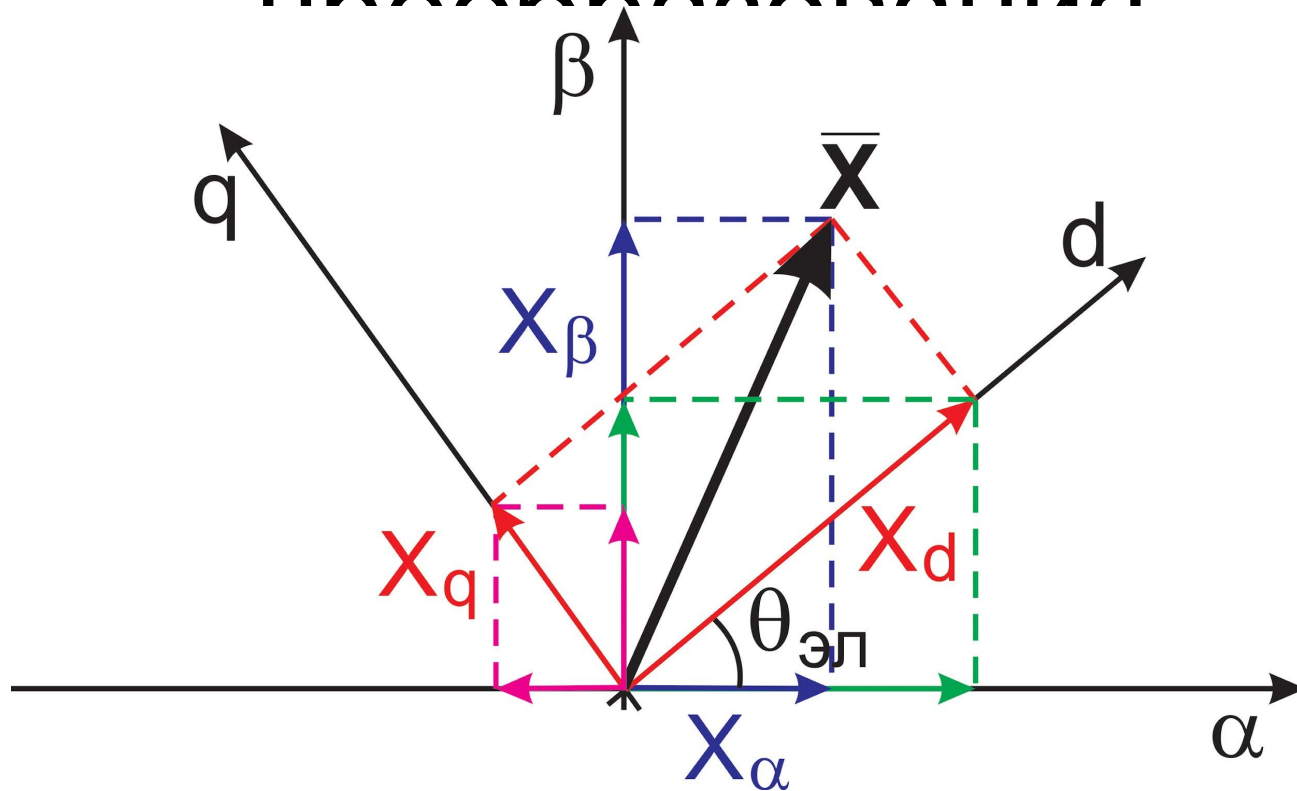
$$\Psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{rd} + L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{rq},$$

$$\Psi_{rd} = L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{s\alpha} + L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{s\beta} + L_r i_{rd},$$

$$\Psi_{rq} = -L_m \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{s\alpha} + L_m \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) i_{s\beta} + L_r i_{rq}.$$

**Нелинейные
функции
значительно
усложняют
модель**

Координатные преобразования



Прямые координатные преобразования

$$X_{\alpha} = X_d \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) - X_q \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}),$$

$$X_{\beta} = X_d \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) + X_q \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}),$$

Обратные координатные преобразования

$$X_d = X_{\alpha} \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) + X_{\beta} \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}),$$

$$X_q = -X_{\alpha} \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) + X_{\beta} \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}),$$

Фазные преобразования

Прямые фазные преобразования $(a \ b \ c) \rightarrow (\alpha \ -\beta)$

$$X_a = \frac{1}{k_c} X_\alpha,$$

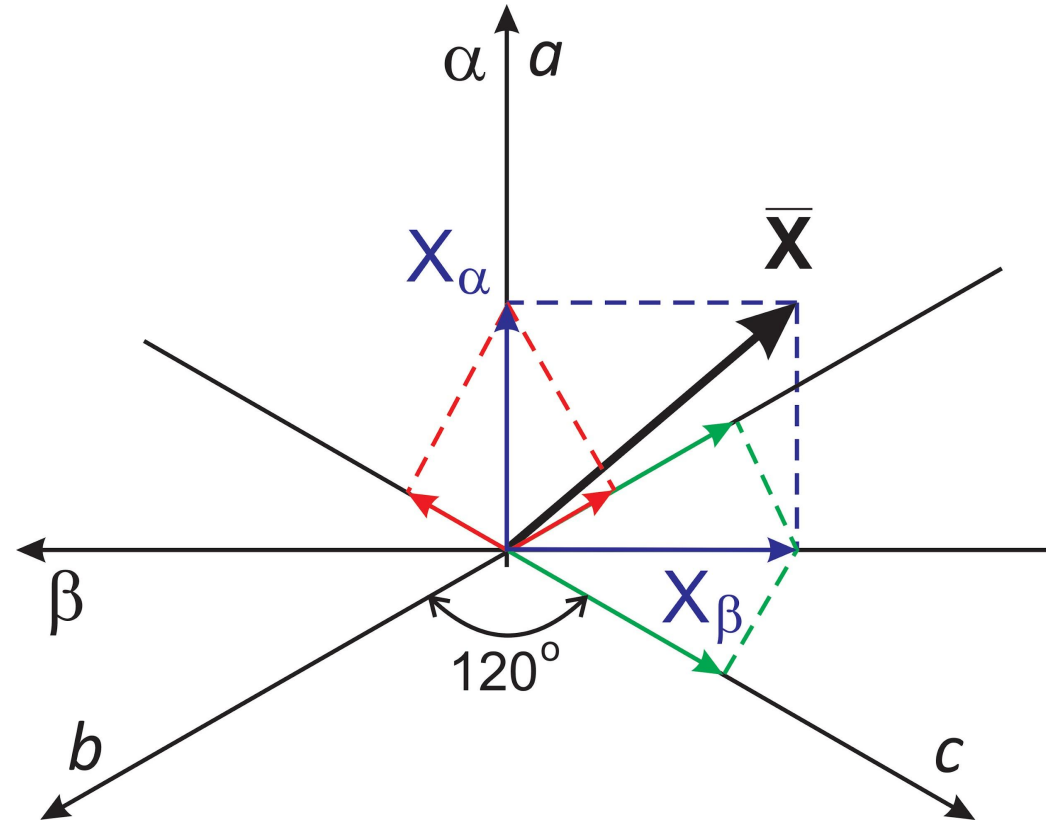
$$X_b = \frac{1}{k_c} \left(-\frac{1}{2} X_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right),$$

$$X_c = \frac{1}{k_c} \left(-\frac{1}{2} X_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} X_\beta \right).$$

Обратные фазные преобразования $(\alpha \ -\beta) \rightarrow (a \ b \ c)$

$$X_\alpha = k_c X_a,$$

$$X_\beta = k_c \left(\frac{\sqrt{3}}{2} X_b - \frac{\sqrt{3}}{2} X_c \right).$$



Коэффициент связи определяет эквивалентность двухфазной и трехфазных машин на основе закона сохранения энергии.

Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя

$$M = \frac{1}{2} p \frac{\partial W(\theta_{y\ddot{e}})}{\partial \theta_{y\ddot{e}}} \leftarrow \text{Энергия электромагнитного поля обмоток двигателя}$$

$$\begin{aligned} W(\theta_{y\ddot{e}}) &= \frac{\Psi_{s\alpha} i_{s\alpha}}{2} + \frac{\Psi_{s\beta} i_{s\beta}}{2} + \frac{\Psi_{rd} i_{rd}}{2} + \frac{\Psi_{rq} i_{rq}}{2} = \\ &= \frac{1}{2} \left(L_s i_{s\alpha}^2 + L_s i_{s\beta}^2 + L_r i_{rd}^2 + L_r i_{rq}^2 \right) + \\ &+ L_m \left[\left(i_{s\alpha} i_{rd} + i_{s\beta} i_{rq} \right) \cos(\theta_{y\ddot{e}}) + \left(i_{s\beta} i_{rd} - i_{s\alpha} i_{rq} \right) \sin(\theta_{y\ddot{e}}) \right] \end{aligned}$$

Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} p L_m \left[(i_{s\beta} i_{rd} - i_{s\alpha} i_{rq}) \cos(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) - (i_{s\alpha} i_{rd} + i_{s\beta} i_{rq}) \sin(\theta_{\dot{y}\ddot{e}}) \right] = \\ &= \frac{1}{2} p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) = \\ &= \frac{1}{2} p L_m (i_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - i_{s\alpha} \Psi_{r\beta}). \end{aligned}$$

Конечная модель асинхронного электродвигателя

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha},$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s i_{s\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} - p\omega_r \Psi_{r\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} + p\omega_r \Psi_{r\alpha},$$

$$\Psi_{s\alpha} = (L_{sl} + L_m) i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha},$$

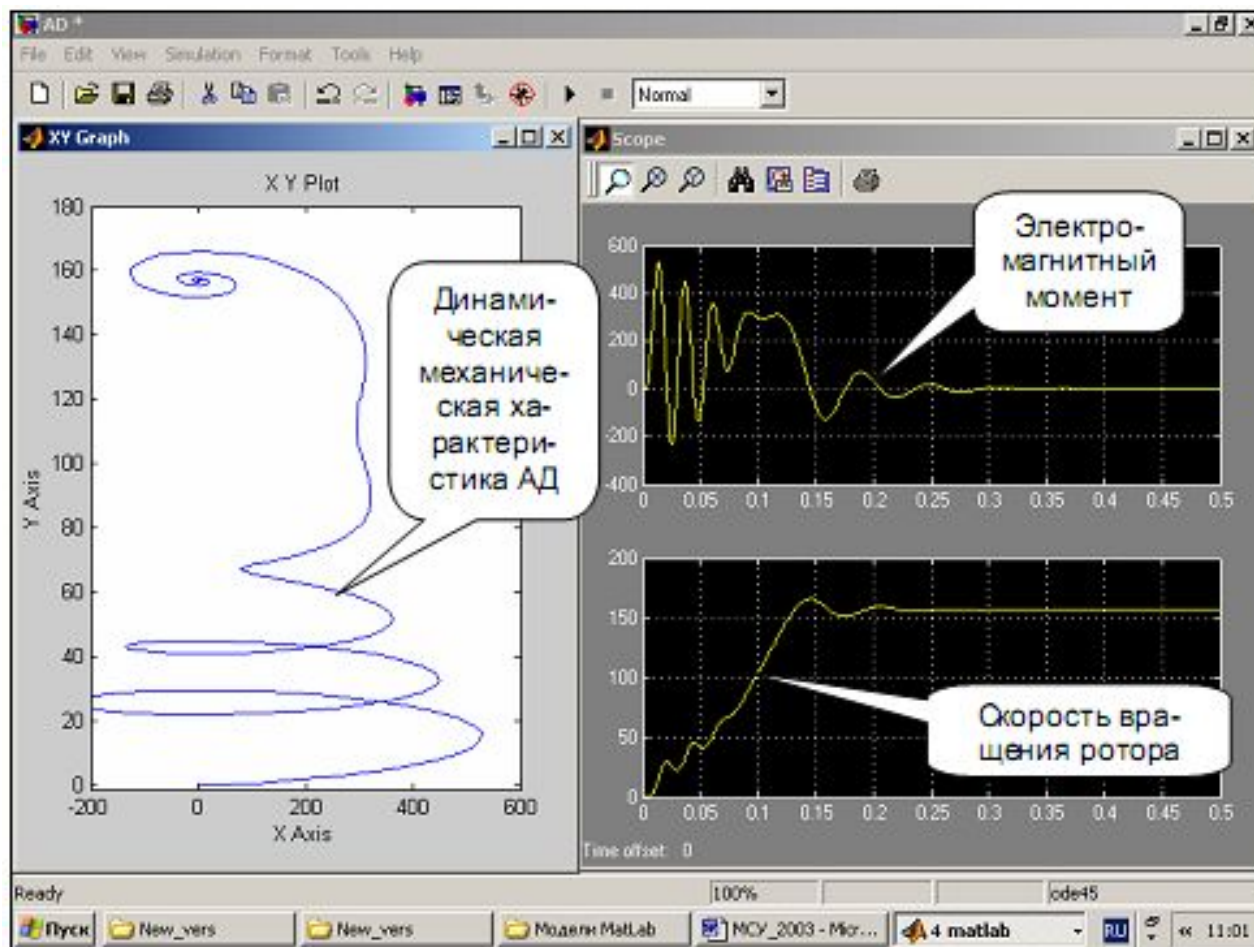
$$\Psi_{s\beta} = (L_{sl} + L_m) i_{s\beta} + L_m i_{r\beta},$$

$$\Psi_{r\alpha} = (L_{rl} + L_m) i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha},$$

$$\Psi_{r\beta} = (L_{rl} + L_m) i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}.$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2} p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) - M_c = M - M_c.$$

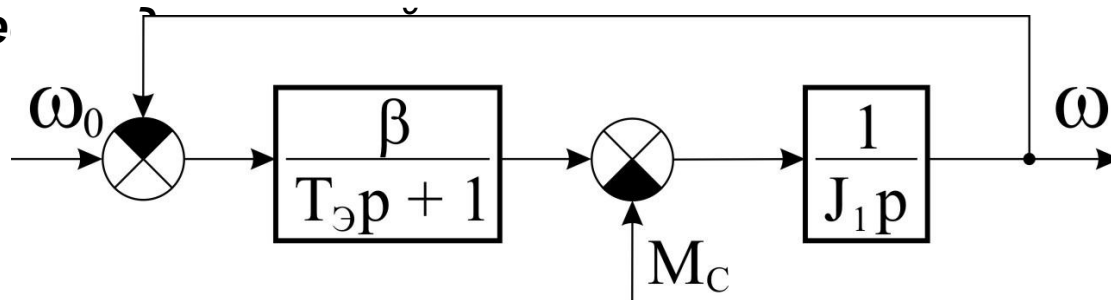
Динамическая механическая характеристика асинхронного электродвигателя



Линеаризация моделей электроприводов

С целью упрощения моделей электроприводов (для получения возможности синтеза регуляторов систем управления) применяют методы линеаризации.

В результате линеаризации можно прийти к общей линеаризованной модели электропривода, справедливой для разного типа электриче



$$\omega_0 = \frac{\overset{\text{ДПТ-}}{\text{НВ}} U_a}{k\Phi_v}, \quad \beta = \frac{(k\Phi_v)^2}{R_a},$$

$$T_{\dot{Y}} = \frac{L_a}{R_a}.$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f \overset{\text{А}}{\text{Д}}}{p}, \quad \beta = \frac{1}{2\pi f_{\text{и}} s_k},$$

$$T_{\dot{Y}} = \frac{2pM_k}{2\pi f_{\text{и}} s_k}.$$

Синтез регулятора для систем управления электроприводов на основе линеаризованной модели

1. Желаемая передаточная функция при настройке на технический

оптимум

$$W_{\alpha}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}(T_{\mu}p + 1)}$$

Суммарная некомпенсированная постоянная времени (сумма малых постоянных времени в контуре)

2. Передаточная функция разомкнутого контура

регулирования

$$W_{\delta\alpha\zeta}(p) = W_{\delta}(p) \frac{\beta}{T_{\dot{y}}p + 1} \frac{1}{J_1 p}$$

3. Приравниваем желаемую и действительную передаточную функцию разомкнутого контура и выражаем передаточную функцию регулятора:

$$\frac{1}{2T_{\dot{y}}p(T_{\dot{y}}p + 1)} = W_{\delta}(p) \frac{\beta}{T_{\dot{y}}p + 1} \frac{1}{J_1 p} \Big|_{T_{\mu}=T_{\dot{y}}} \rightarrow W_{\delta}(p) = \frac{J_1}{2T_{\dot{y}}\beta}$$

Синтез системы управления асинхронного электропривода на основе модели обобщенной электрической машины

Векторное управление

1. Модель асинхронного электродвигателя при ориентировании по вектору потока ротора

$$\Psi_{rq} = 0, \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0,$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} = -R_r \left(\frac{\Psi_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow T_r \frac{d\Psi_{rd}}{dt} + \Psi_{rd} = L_m i_{sd}$$

Уравнение, эквивалентное уравнению обмотки возбуждения ДПТ-НВ

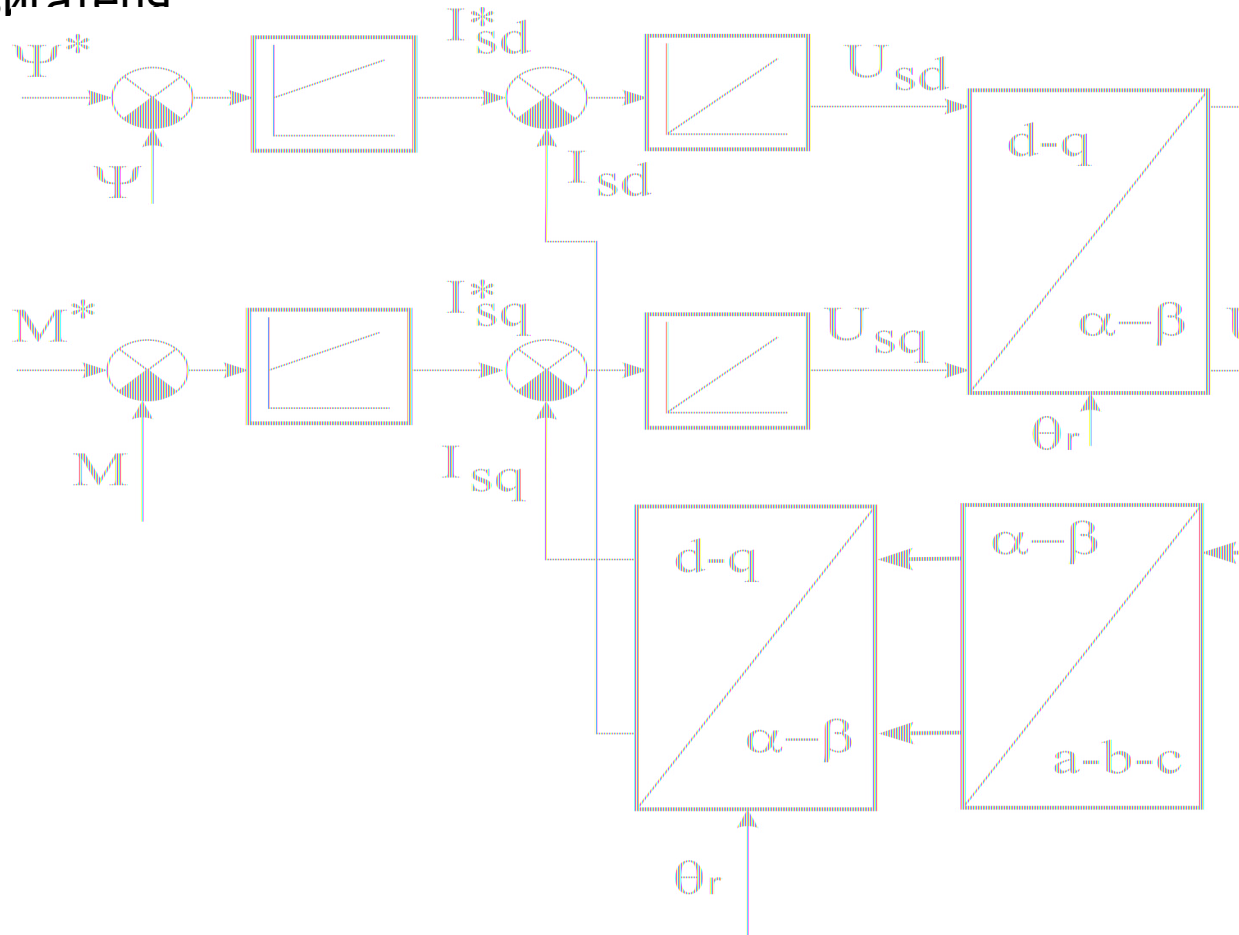
$$M = \frac{1}{2} p L_m i_{sq} \Psi_{rd}$$

Выражение момента АД также соответствует выражению момента ДПТ-НВ

Синтез системы управления асинхронного электропривода на основе модели обобщенной электрической машины

Векторное управление

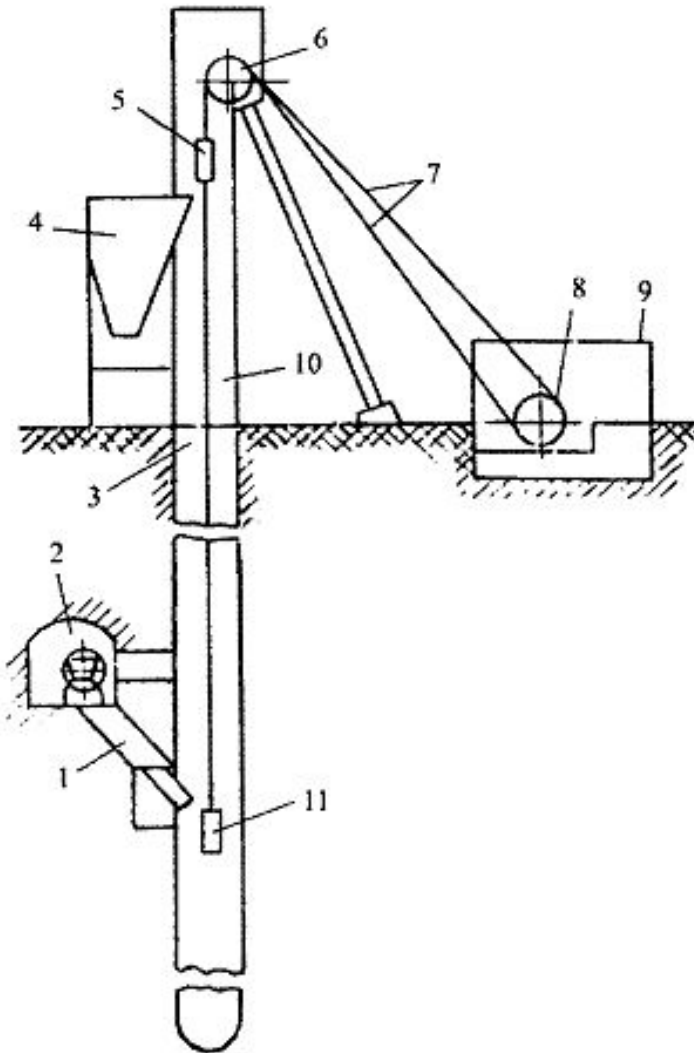
2. Структурная схема системы векторного управления асинхронного электродвигателя



Лекция 6

АЭП ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН

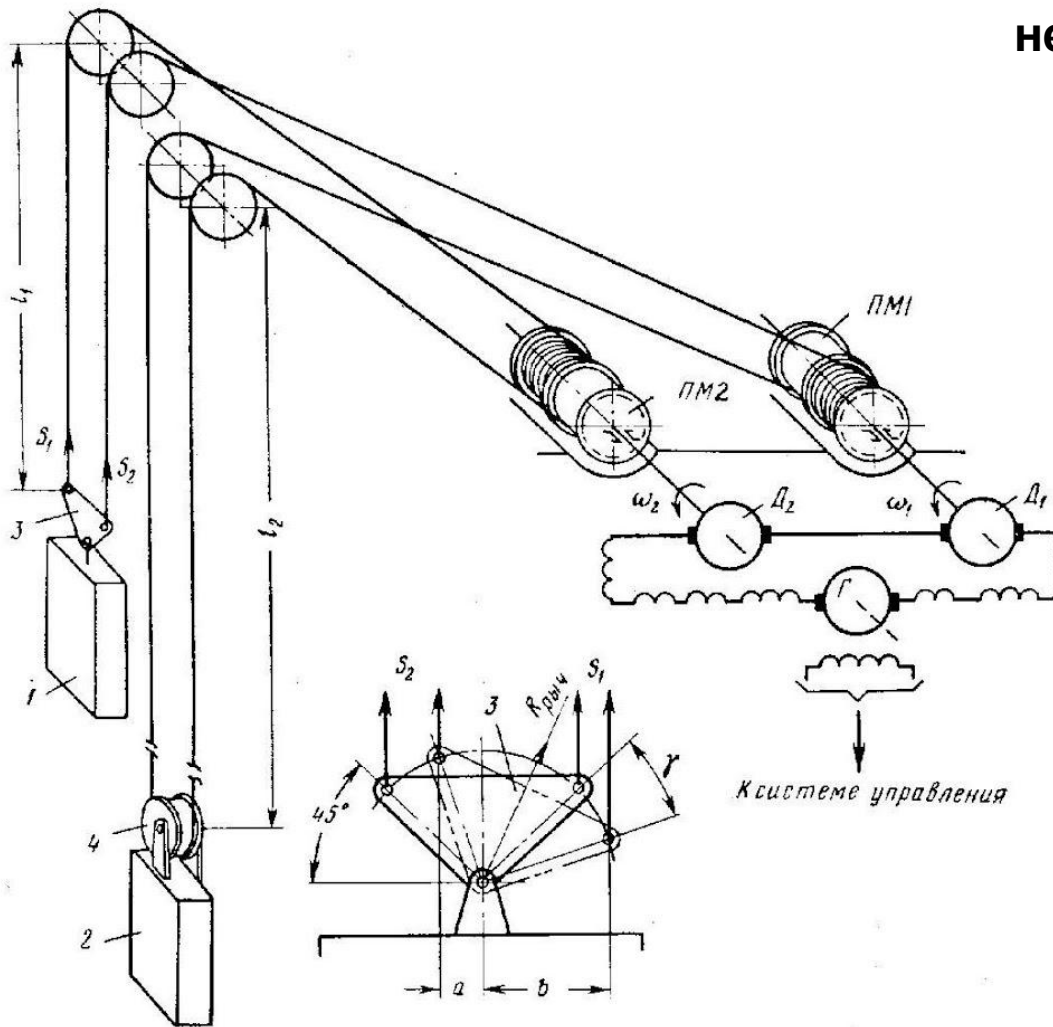
Общий вид и расположение оборудования



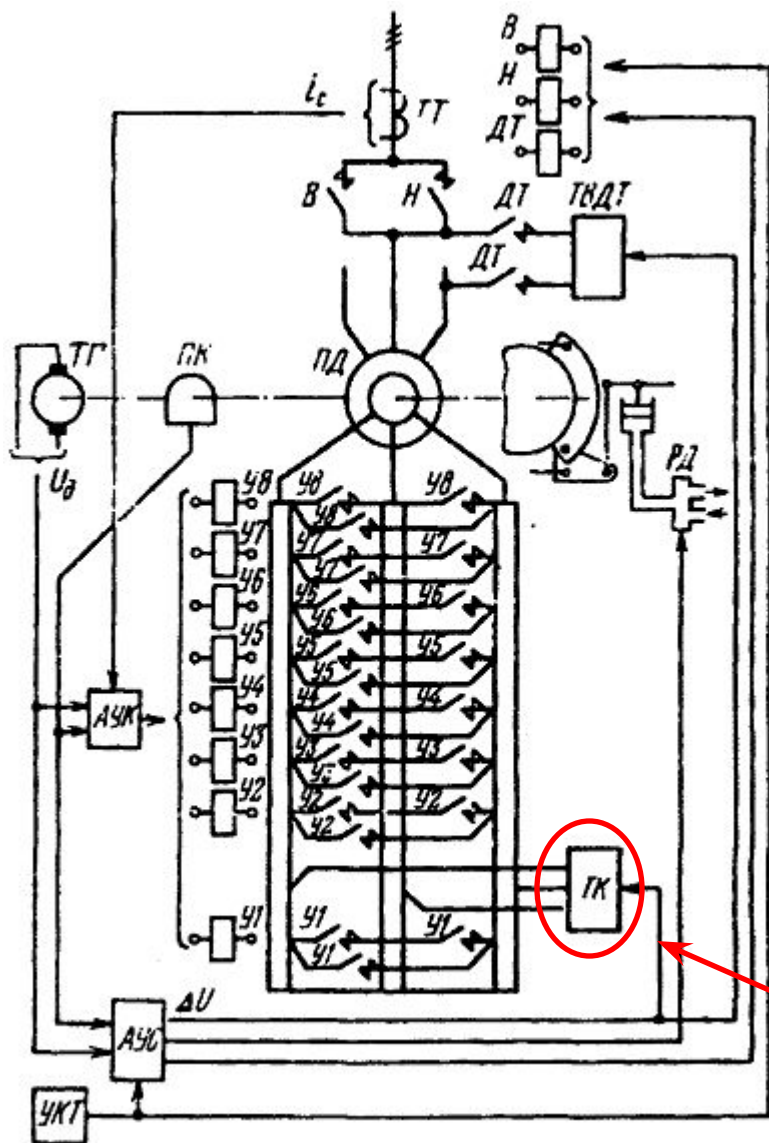
- 1 - Загрузочный бункер и дозатор.
- 2 - Камера опрокидывателя.
- 3 - Ствол.
- 4 - Приемный бункер.
- 5, 11 - Сосуд.
- 6 - Копровые шкивы.
- 7 - Головные канаты.
- 8 - Подъемная машина.
- 9 - Здание подъемной машины.
- 10 - Надшахтный копер.

Модель шахтной подъемной машины

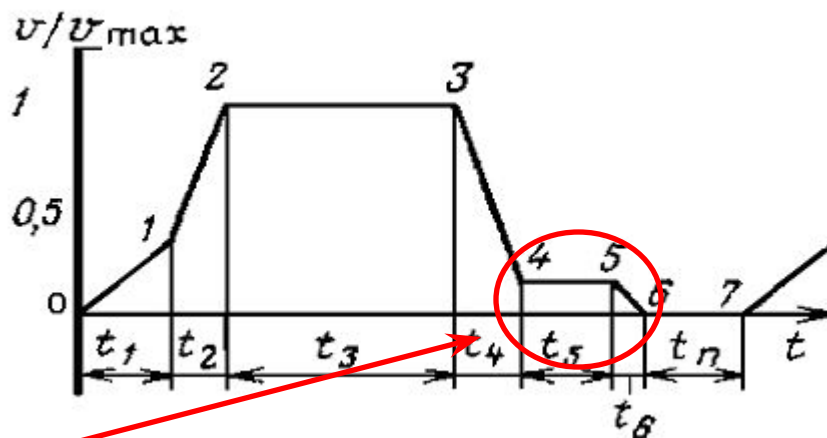
Схема двухконцевой
неуравновешенной установки



Электропривод переменного тока с реостатным регулированием

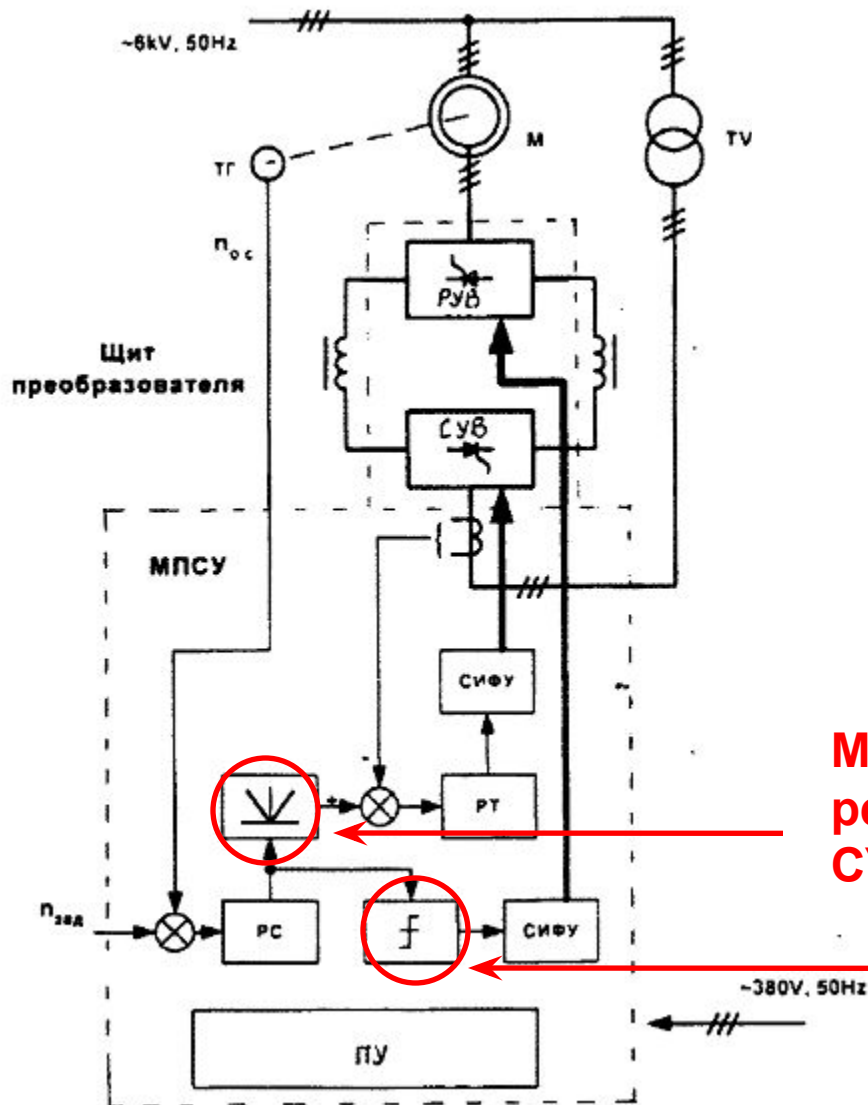


ПК – путьевой командоаппарат;
ТК – тиристорный коммутатор;
АУК – аппаратура управления контакторами;
УКТ – узел команд и технологического контроля;
ТВДТ – тиристорный возбудитель динамического торможения.



ТК нужен для реализации дотягивания

Электропривод переменного тока по системе АВК

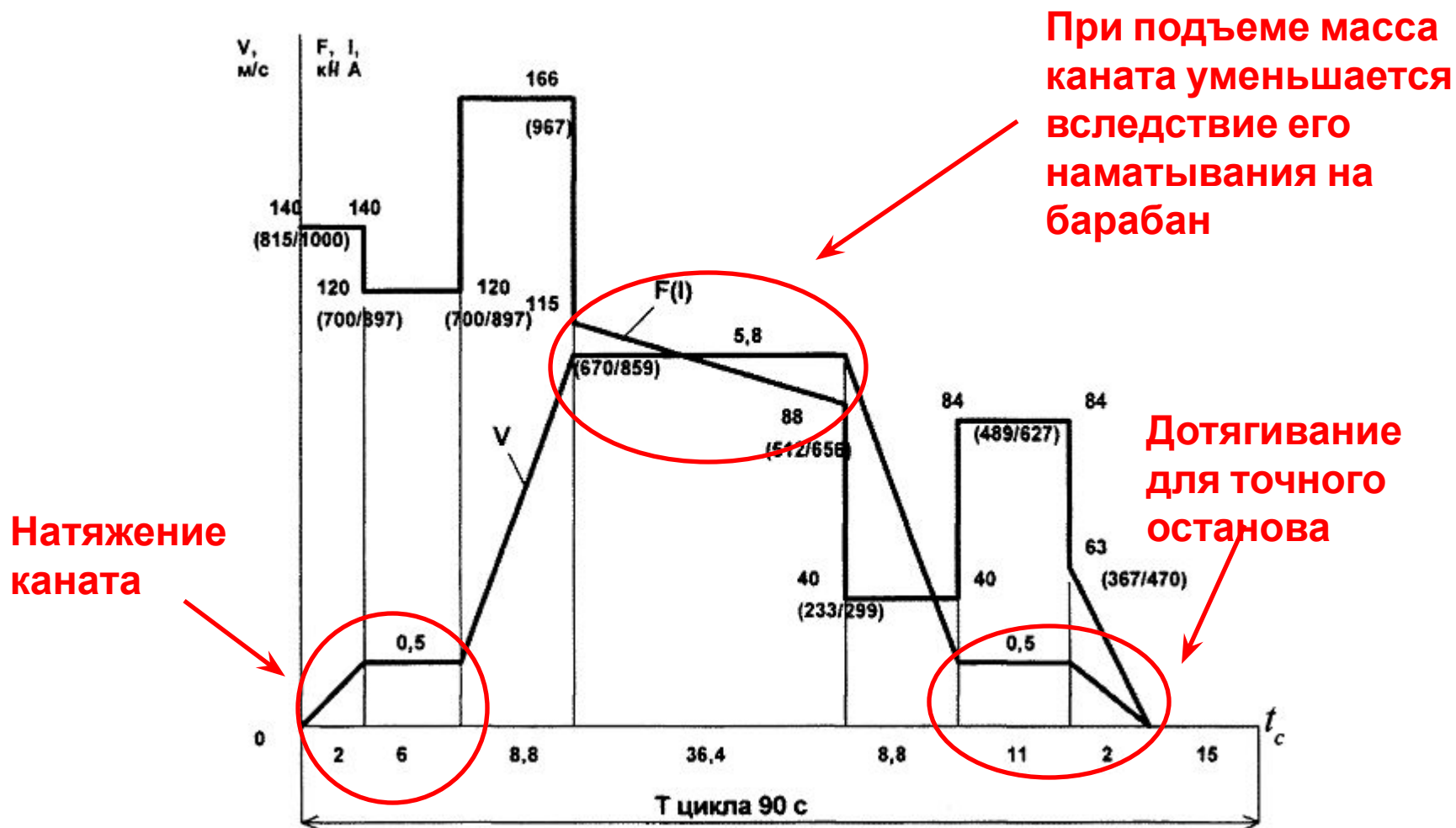


МПСУ – микропроцессорная система управления;
ПУ – программное устройство;
РС – регулятор скорости;
РТ – регулятор тока;
СУВ – сетевой управляемый выпрямитель;
РУВ – роторный управляемый выпрямитель;
СИФУ – система импульсно-фазового управления.

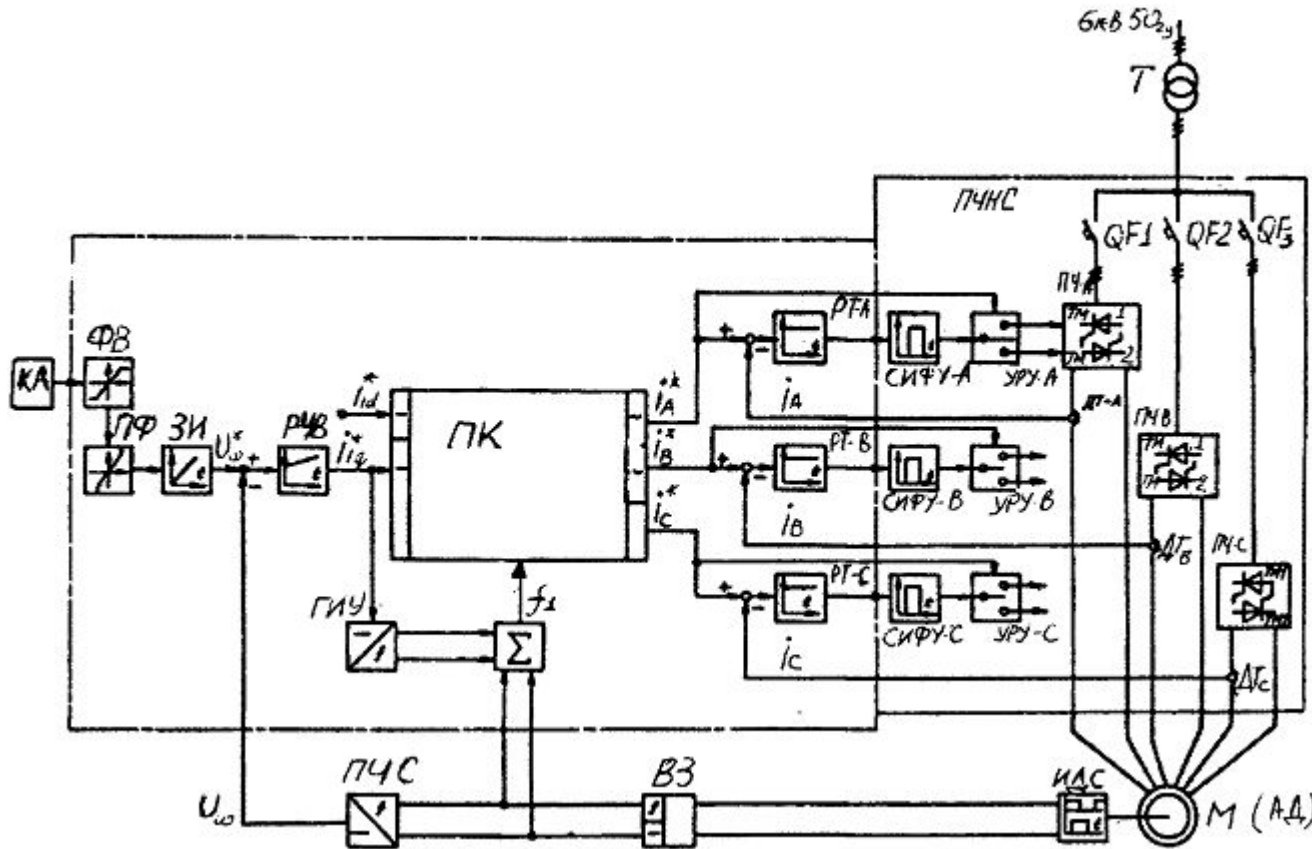
Модуль сигнала с выхода регулятора скорости задает ток СУВ и РУВ

Знак с выхода регулятора скорости задает режим работы РУВ и СУВ

Нагрузочная диаграмма электропривода шахтного подъема по системе АВК

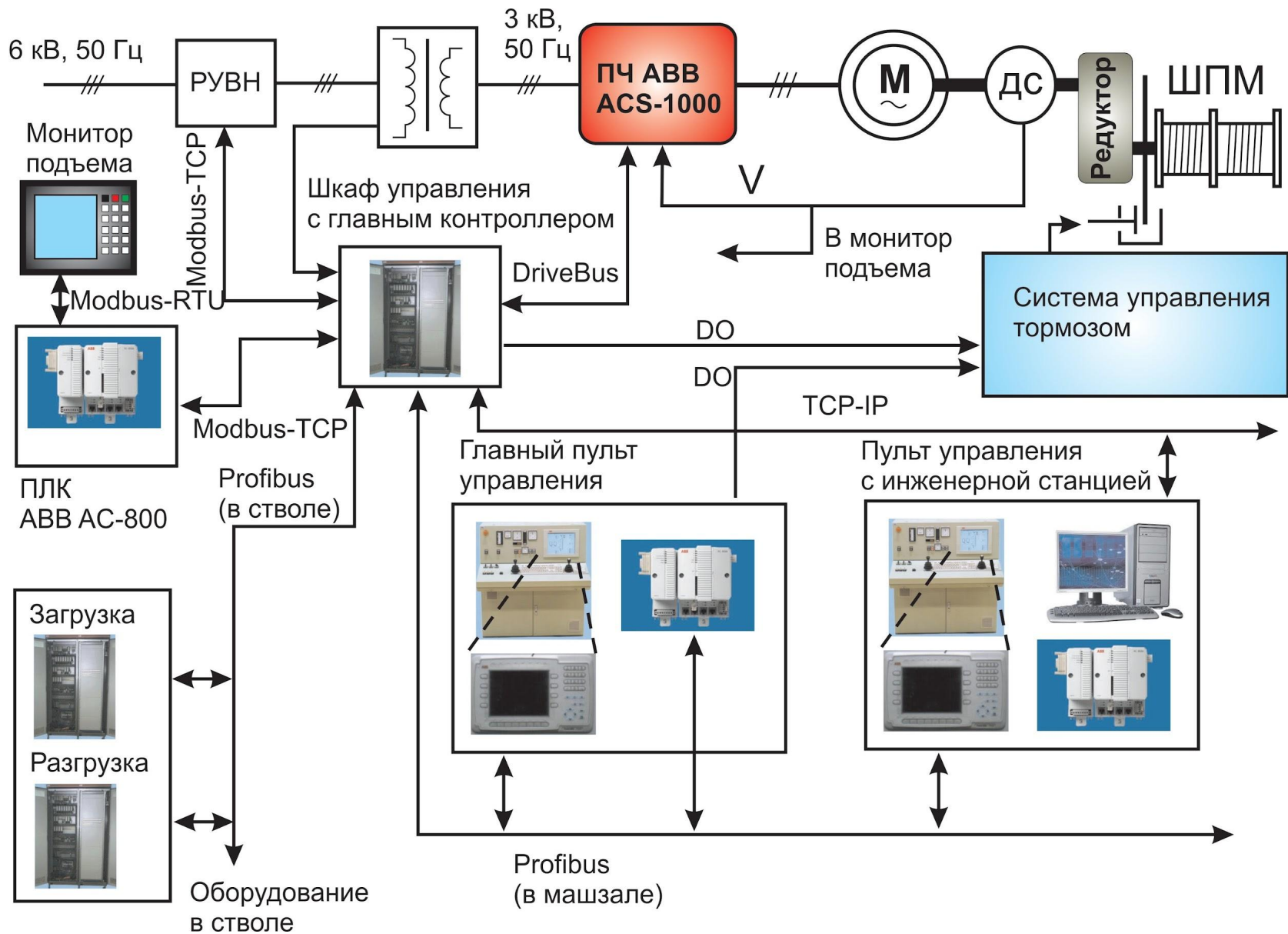


АЭП по системе НПЧ-АД для шахтного подъема



- КА –
командоаппарат;
- ПФ –
преобразователь
функциональный;
- ПК –
преобразователь
координат;
- ЗИ – задатчик
интенсивности;
- ИДС – импульсный
датчик скорости;
- РТ – регулятор тока;
- ВЗ – вычислитель
знака;
- ПЧС –
преобразователь
частотного сигнала;

АЭП по системе ПЧ-АД для шахтного подъема



Управление тормозом ШПМ

Дисковый тормоз



При торможении для исключения «подпрыгивания» подъемного сосуда необходимо управлять тормозным усилием тормоза, поэтому для шахтного подъема наилучшим образом подходят многодисковые тормоза с системой управления.

Гидроцилиндр
др тормоза

