

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 19 » июня 2026 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

«Разработка и внедрение системы плавного пуска и защиты двигателя
переменного тока 250М4-В3-55-1500-У2 на предприятии ООО «Лысьвенский
завод металлоизделий»»

Студент: _____ Н.О. Лузянин
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-1603

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах
3. Электронный носитель с материалами ВКР

Руководитель: _____ ст. преподаватель В.Г. Лопатин
(подпись, дата)

Проверено
на наличие

заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева
(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка и внедрение системы плавного пуска и защиты двигателя переменного тока 250М4-В3-55-1500-У2, на предприятии ООО "Лысьвенский завод металлоизделий"».

Работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников, состоящего из 20 источников. Работа изложена на 76 листах печатного текста, содержит 10 рисунков, 13 таблиц.

Цель работы: разработка и внедрение системы плавного пуска и защиты для конкретного двигателя с целью повышения надежности его работы и снижения негативного влияния на питающую сеть и механизм, повышение энергоэффективности.

Задачи исследования:

- Провести анализ технического состояния оборудования и выявить недостатки текущей схемы запуска.
- Изучить современные методы и устройства плавного пуска и защиты асинхронных двигателей (УПП, частотные преобразователи).
- Выбрать оптимальную схему и компоненты для модернизации.
- Выполнить расчет параметров и выбор оборудования (УПП, автоматические выключатели, контакторы, кабели).
- Разработать принципиальную электрическую схему подключения.
- Оценить технико-экономическую эффективность от внедрения разработки.

Объект исследования: система электроснабжения и пуска двигателя переменного тока 250М4-В3-55-1500-У2 в составе технологического оборудования (пресс 1300 TON FP) на предприятии ООО «ЛЗМИ».

Предмет исследования: методы и средства плавного пуска и релейной защиты асинхронного двигателя.

Практическая значимость: результаты работы будут внедрены на реальном производстве в качестве рационализаторского предложения, что позволит снизить аварийность и затраты на обслуживание.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

УПП – устройство плавного пуска

ЛЗМИ – Лысьвенский завод металлоизделий

АД – Асинхронный двигатель

КЗ – Короткое замыкание

КПД – Коэффициент полезного действия

ПЛК – Программируемый логический контроллер

ЧПУ – Числовое программное управление

ЭМС – Электромагнитная совместимость

DOL – Direct-On-Line (прямой пуск двигателя)

IP – Ingress Protection (степень защиты оболочки)

Modbus RTU – Remote Terminal Unit (Промышленный протокол связи)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И МЕТОДОВ ПЛАВНОГО ПУСКА.....	7
1.1. Характеристики асинхронного двигателя 250М4-В3-55-1500-У2.....	7
1.2. Описание привода пресса «1300 TON FP»	9
1.3. Анализ способов пуска и защиты	12
1.3.1. Прямой пуск.....	12
1.3.2. Пуск методом «звезда-треугольник».....	14
1.3.3. Устройства плавного пуска (софт-стартеры): принцип работы, возможности и структура.....	18
1.4. Анализ проблем: Пусковые токи и моменты, их влияние на сеть и привод	20
1.5. Виды защит АД.....	25
1.6. Описание установки и требования к регулированию	30
2. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА И ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ.....	34
2.1. Краткая характеристика деятельности ООО «Лысьвенский завод металлоизделий»	34
2.2. Описание техпроцесса.....	35
2.3. Устройство станка.....	36
2.4. Анализ текущей схемы управления	38
2.5. Формулировка технического задания	45
3. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЛАВНОГО ПУСКА.....	53
3.1. Техническое предложение по выбору устройства плавного пуска.....	53
3.2. Расчет и выбор аппаратов защиты	57
3.3. Выбор кабельной продукции	61
3.4. Проверка селективности и условий эксплуатации	62
3.5. Экономическое обоснование.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	70
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	72
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	73

ВВЕДЕНИЕ

Современное промышленное оборудование, эксплуатируемое на ООО «Лысьвенский завод металлоизделий», в значительной степени представлено машинами, введенными в эксплуатацию 20–30 лет назад. Полная замена такого парка требует значительных капитальных вложений и экономически нецелесообразна. Основным направлением технической политики предприятия является модернизация — замена отдельных узлов и систем с целью продления ресурса оборудования, повышения надёжности. Снижения эксплуатационных затрат.

В структуре большинства установок применяются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Наибольшее распространение получил прямой пуск (Direct-On-Line, DOL) — подключение обмоток статора непосредственно к питающей сети. Данный метод характеризуется минимальной стоимостью реализации и высокой надёжностью коммутационной аппаратуры. Однако он имеет ряд существенных недостатков, которые в условиях интенсивной циклической эксплуатации становятся критическими.

При прямом пуске пусковой ток превышает номинальный в 5–7 раз. Для двигателя мощностью 55 кВт с номинальным током 103 А это соответствует броску 600–700 А. Такие значения вызывают провалы напряжения на шинах цеховой сети, достигающие 25–40 % от номинала. Следствием является нестабильная работа другого оборудования, питающегося от тех же распределительных устройств. Кроме того, в момент включения возникают ударные электромагнитные моменты, которые передаются через редукторы, муфты и ремённые передачи. По данным, представленным в работе [4], кратность пускового момента может достигать 4–5 относительно номинального, что приводит к усталостным повреждениям металлоконструкций и преждевременному износу трансмиссии.

Дополнительным негативным фактором является термическое и электродинамическое воздействие пусковых токов на изоляцию обмоток статора. Каждый прямой пуск вызывает циклические температурные деформации, ускоряющие старение изоляции класса F (допустимая температура 155 °C). При частоте включений до 20 пусков в смену ресурс изоляции сокращается в 2–3 раза по сравнению с номинальным режимом S1.

Альтернативой является применение устройств плавного пуска (УПП). Такие устройства обеспечивают ограничение пускового тока до 2,5–4 $I_{ном}$, что практически исключает динамические удары по механике и снижает просадки напряжения до 5–10 %. Дополнительным преимуществом является комплексная защита двигателя от перегрузок, обрыва фаз и заклинивания, реализованная на базе микропроцессорной системы управления. Данное решение соответствует современным требованиям энергоэффективности и импортозамещения, поскольку на рынке представлены отечественные модели, по параметрам не уступающие зарубежным аналогам. [4,12]

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И МЕТОДОВ ПЛАВНОГО ПУСКА

1.1. Характеристики асинхронного двигателя 250М4-В3-55-1500-У2

Электродвигатель 250М4-В3-55-1500-У2 представляет собой трёхфазную асинхронную машину с короткозамкнутым ротором, предназначенную для длительного режима работы S1 в общепромышленных механизмах.

Расшифровка названия АД 250М4-В3-55-1500-У2:

1 2 3 4 5 6 7

- 1) **250** — габарит двигателя (высота оси вращения), мм.
- 2) **М** — установочный размер по длине станины.
- 3) **4** — число полюсов.
- 4) **В3** — монтажное исполнение.
- 5) **55** — номинальная мощность двигателя, кВт.
- 6) **1500** — номинальная частота вращения вала (асинхронная), об/мин.
- 7) **У2** — климатическое исполнение и категория условий.

Габаритные и установочные размеры электродвигателя ESQ SDN 250М4-В3-55-1500-У2 (Рис. 1.1):

- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| • А - 406 мм; | • С - 168 мм; | • Е - 140 мм; |
| • В - 349 мм; | • D - 65 мм; | • F - 18 мм; |
| • G - 58 мм; | • Н - 250 мм; | • К - 24 мм; |
| • АВ - 490 мм; | • АС - 510 мм; | • AD - 370 мм; |

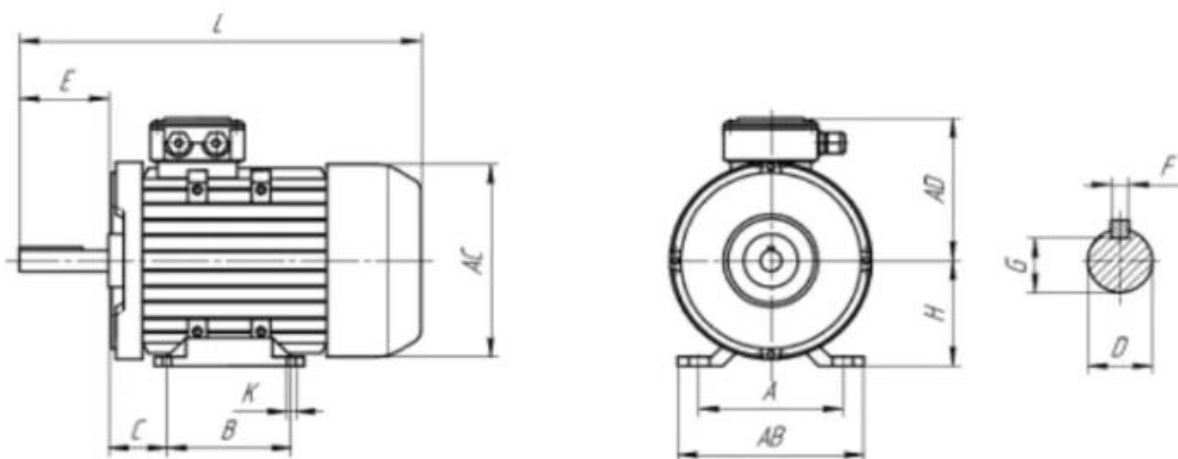


Рисунок 1.1 – Эскиз электродвигателя 250M4-B3-55-1500-Y2

Номинальные электрические параметры (приложение А):

- напряжение питания — 380/660 В (Δ/Y);
- номинальный ток при 380 В — 103 А;
- кратность пускового тока — 7,2 (относительно $I_{ном}$);
- кратность пускового момента — 2,2 (относительно $M_{ном}$);
- кратность максимального момента — 2,3;
- КПД — 93,0 %;
- $\cos \varphi$ — 0,87–0,88.

Класс нагревостойкости изоляции F (допустимая температура обмоток 155 °С) обеспечивает ресурс не менее 20 000 часов при номинальной нагрузке и соблюдении температурного режима. Степень защиты IP55 позволяет эксплуатировать двигатель в условиях повышенной запылённости, характерной для цехов металлообработки.

Следует обратить внимание на соотношение пускового и максимального моментов: $M_{пуск}/M_{ном} = 2,2$, $M_{макс}/M_{ном} = 2,3$. Это указывает на то, что двигатель обладает невысоким запасом по перегрузочной способности. При прямом пуске механизма с большим моментом инерции возможен выход на

критическое скольжение с последующим срывом пуска, если момент сопротивления превысит 2,0 Мном. Данное обстоятельство учитывается при выборе режима пуска (раздел 3.1).

1.2. Описание привода пресса «1300 TON FP»

Привод фрикционного винтового пресса 1300 TON FP (Özsakız Makina Kalır, Турция) построен по схеме открытой клиноремённой передачи и изображен на рисунке 1.2. Передаточное отношение определяется отношением радиусов ведущего и ведомого шкивов и составляет $i = 0,85 / 0,1325 = 6,416$.

Основные параметры передачи (табл. 1.2–1.3):

- ведущий шкив (на валу двигателя): радиус 0,1325 м, масса 30 кг;
- ведомый шкив (маховик пресса): радиус 0,85 м, масса 8332 кг (два шкива по 4166 кг);
- ремни: клиновые, армированные, суммарной массой 17,66 кг (расчёт приведён ниже).

Таблица 1.2 – Преимущества и недостатки

Преимущества	Недостатки
Простота конструкции	Значительные габариты
Плавность хода, бесшумность	Непостоянство передаточного отношения (проскальзывание)
Защита от перегрузок (буксует)	Низкая долговечность ремня
Компенсация несоосности валов	Требуется натяжное устройство
Низкая стоимость	Потери на упругое скольжение

Таблица 1.3 – Характеристики шкивов

Параметр	Ведущий шкив	Ведомый шкив
Масса кг.	30	4166 x 2
Радиус м.	0.1325	0.85

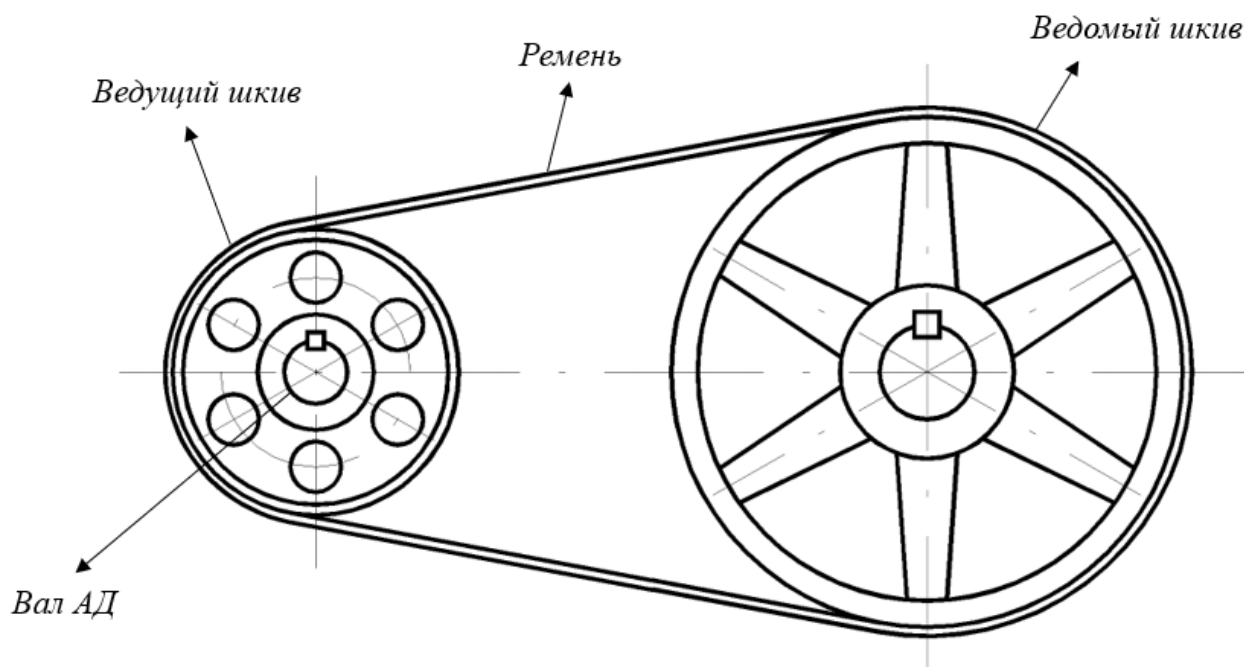


Рисунок 1.2 – Схема ременной передачи

Рассчитаем массу ремня для того, чтобы в будущем ее учесть для расчета пускового момента. [5,6,7]

Длина ремня для открытой передачи вычисляется по формуле:

$$L = 2\sqrt{d^2 - (R - r)^2} + \pi(R + r) + 2(R - r) \arcsin \left(\frac{R - r}{d} \right),$$

где $r = 13.25$ см. – радиус ведущего шкива,

$R = 85$ см. – радиус ведомого шкива,

$d = 170$ см. – расстояние между осями шкивов.

Подстановка числовых значений:

- разность радиусов: $\Delta = R - r = 85 - 13,25 = 71,75 \text{ см,}$
- $\sqrt{d^2 - \Delta^2} = \sqrt{170^2 - 71,25^2} = 154,12 \text{ см,}$
- $\pi(R + r) = \pi \cdot 98,25 = 308,67 \text{ см,}$
- $\arcsin\left(\frac{\Delta}{d}\right) = \arcsin\left(\frac{71,25}{170}\right) = 0,436 \text{ рад,}$
- $2\Delta\arcsin = 2 \cdot 71,25 \cdot 0,436 = 62,52 \text{ см.}$

Итого: $L = 2 \cdot 154,12 + 308,67 + 62,52 \approx 680 \text{ см.}$

Расчёт массы ремней. Ремни рассматриваются как параллелепипед с сечением $b \times h = 20 \text{ см} \times 1 \text{ см.}$

Объём:

$$V = L \times b \times h = 679,4 \text{ см} \times 20 \text{ см} \times 1 \text{ см} = 13\,588 \text{ см}^3.$$

Плотность армированной резины, из которой он сделан $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$.

Масса равна:

$$M = V \times \rho = 13\,588 \text{ см}^3 \times 1,3 \text{ г/см}^3 = 17\,664,4 \text{ г} \approx 17,66 \text{ кг.}$$

Анализ кинематической схемы.

При пуске двигателя крутящий момент передаётся через ведущий шкив на ремни, затем на ведомый шкив-маховик. Масса маховика составляет 8332 кг, что создаёт инерционный момент, значительно превышающий момент инерции ротора двигателя ($2,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$). Расчёт приведённого момента инерции (раздел 2.5) показал значение $74,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что в 34 раза превышает момент инерции ротора. Это означает, что при прямом пуске вся кинетическая энергия разгона сосредоточена в маховике, а двигатель работает в режиме, близком к пуску с закороченным ротором, в течение длительного времени (4–6 секунд). За это время ремни испытывают циклические растягивающие нагрузки, что сокращает их ресурс.

Клиноремённая передача имеет преимущество перед другими типами (плоскоремённой, цепной) — способность к пробуксовке при перегрузках, что защищает механизм от поломок. Однако при прямом пуске пробуксовка возникает не только при перегрузках, но и в штатном пусковом режиме, что

приводит к абразивному износу ремней и потере тяговой способности. Переход на плавный пуск позволяет снизить пиковые нагрузки на ремни и увеличить межремонтный интервал. [8]

1.3. Анализ способов пуска и защиты

1.3.1. Прямой пуск

Метод прямого пуска (DOL) предполагает непосредственное подключение обмоток статора к трёхфазной сети через контактор. Схема управления включает минимальный набор компонентов: автоматический выключатель, контактор и тепловое реле. Это обуславливает низкую стоимость, простоту монтажа и обслуживания, а также минимальные габариты шкафа управления. Прямой пуск обеспечивает максимальный пусковой момент, близкий к критическому, что является преимуществом для механизмов с высоким моментом сопротивления при трогании — дробилок, конвейеров, центрифуг.

Типовая схема подключения при таком способе проста. Она приведена на рисунке 1.3. Всё остальное зависит от конкретных условий. Об этом нужно помнить, если хочется, чтобы оборудование работало долго.

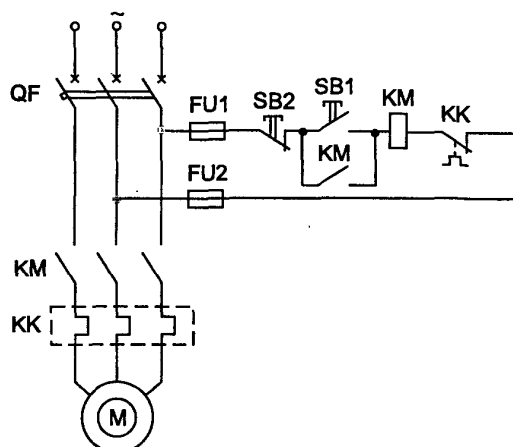


Рисунок 1.3 – Принципиальная эл. схема управления АД методом прямого пуска

Основной недостаток метода — высокий пусковой ток, составляющий 5–7 $I_{ном}$. Для двигателя 250М4-В3-55-1500-У2 ($I_{ном} = 103$ А) пусковой ток достигает 600–700 А, что вызывает просадки напряжения в питающей сети. При слабых питающих линиях или при питании от трансформатора ограниченной мощности падение напряжения может составлять 25–40 %, что нарушает работу соседнего оборудования.

Второй значимый недостаток — ударный характер пускового момента. При включении электромагнитный момент возрастает от нуля до значения 0,8–1,2 $M_{ном}$ практически мгновенно, что создаёт динамические нагрузки на редукторы, муфты и ремённые передачи. По данным [8, с. 235], ресурс зубчатых передач при прямом пуске снижается на 30–40 % по сравнению с плавным разгоном. Ударные нагрузки также способствуют повышенному износу подшипниковых узлов и шпоночных соединений.

Третий недостаток — тепловое воздействие на обмотки. Потери энергии при пуске по тепловому эффекту эквивалентны работе двигателя в номинальном режиме в течение 10–15 секунд. Для двигателей без принудительного охлаждения допустимое количество включений в час ограничивается 10–15 операциями. Превышение этого предела приводит к перегреву обмоток и сокращению срока службы изоляции.

Несмотря на перечисленные недостатки, прямой пуск сохраняет применение в следующих условиях:

- для двигателей мощностью до 7 кВт, где пусковые токи не создают проблем для сети;
- для механизмов с редкими пусками (не более 2–3 в час) и длительным периодом установившейся работы (вентиляторы, циркуляционные насосы);

- для мощных механизмов, требующих максимального момента на старте, при условии, что сеть обладает достаточной пропускной способностью.

В целом, тенденция современного электропривода — переход от прямого пуска к управляемым пусковым устройствам (УПП, частотные преобразователи) для двигателей средней и большой мощности. Однако для вспомогательных механизмов и маломощных двигателей прямой пуск остаётся экономически обоснованным решением.

1.3.2. Пуск методом «звезда-треугольник»

Метод «звезда-треугольник» является релейно-контакторным способом снижения пускового тока. На первом этапе обмотки статора соединяются в схему «звезда», при этом на каждую фазу подаётся напряжение 220 В (что в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного 380 В). На втором этапе, после разгона двигателя до 80–90 % номинальной частоты вращения, обмотки переключаются в «треугольник» с подачей полного линейного напряжения 380 В.

Двигатель разгоняется так около 5–10 секунд, после чего автоматика переключает обмотки в «треугольник». На них уже подаётся полное напряжение 380 В. Всё переключение обеспечивается тремя контакторами — линейным, звёздным и треугольным. А также реле времени, которое даёт выдержку на разгон.

Что даёт этот метод.

При соединении в «звезду» пусковой ток падает в три раза по сравнению с прямым включением. Но и момент на валу тоже снижается ровно в три раза. Это важно помнить. Если момент станет меньше сопротивления на валу, двигатель просто не раскрутится. Соотношения наглядно сведены в

таблице 1.4. Там хорошо видно, что выигрыш в токе оборачивается потерей в моменте.

Метод простой, надёжный и не требует полупроводников. Однако подходит далеко не для всех механизмов. Только для тех, где пуск лёгкий или нагрузка на валу невелика.

Таблица 1.4 – Сравнительные характеристики пуска: прямой пуск, пуск «звездой», работа в «треугольнике»

Параметр	Прямой пуск	Схема «звезда» (пуск)	Схема «треугольник» (номинал)
Схема соединения обмоток	Треугольник	Звезда	Треугольник
Фазное напряжение	380 В	220 В ($380/\sqrt{3}$)	380 В
Пусковой ток (кратность к $I_{\text{ном}}$)	5–7	1,7–2,3 ($\approx 1/3$ от прямого)	1
Пусковой момент (кратность к $M_{\text{ном}}$)	0,8–1,2	0,27–0,4 ($\approx 1/3$ от прямого)	1
Падение напряжения на шинах (ΔU)	Значительное (до 30–40%)	Умеренное (10–15%)	Отсутствует
Наличие разрыва цепи при переключении	Нет	Да (50–100 мс)	Нет
Бросок тока в момент переключения	Нет	До $3-5 \cdot I_{\text{ном}}$ (кратковременно)	Нет
Динамический удар по механике	Высокий (один импульс)	Двойной удар: при старте + при переключении	Отсутствует
Допустимая частота включений в час	10–15	5–10 (из-за тепла в роторе и ударов)	–
Рекомендуемый тип нагрузки	Любой (при мощной сети)	Только вентиляторная / центробежная	Рекомендуемый тип нагрузки

Основные недостатки метода.

Таким образом, пусковой момент снижается до значения, не превышающего 0,73 от номинального. Для пресса 1300 TON FP с моментом сопротивления при трогании, оценённым в 0,6 Мном, этого может быть недостаточно. При снижении питающего напряжения из-за просадок сети (что

характерно для цехов с несколькими мощными потребителями) момент может оказаться ниже сопротивления, и двигатель не сможет сдвигаться с места.

Дополнительным недостатком метода является разрыв цепи в момент переключения со «звезды» на «треугольник». Длительность паузы составляет 50–100 мс, за которые ротор успевает снизить частоту вращения на 5–15 %. При повторном включении в схему «треугольник» возникает бросок тока, сравнимый с прямым пуском (до 500–600 А), и ударный момент, который передаётся на механизм. Для ремённой передачи пресса это означает дополнительные динамические нагрузки, сокращающие ресурс ремней.

Метод «звезда–треугольник» может быть применён только для двигателей, обмотки которых рассчитаны на работу в «треугольнике» при номинальном напряжении 380 В (двигатель 250М4 соответствует этому условию). Однако для механизмов с постоянным моментом нагрузки (конвейеры, элеваторы, экструдеры) и для высокоинерционных механизмов (маховичные прессы) метод не рекомендуется из-за недостаточного пускового момента и ударных нагрузок при переключении.

Что происходит при переключении.

1. Сначала запуск в «звезде» — момент на валу составляет 0,33 от номинала. Двигатель разгоняется примерно до 80–90% от номинальной частоты вращения. До номинала не доходит.
2. Наступает пауза переключения — питание пропадает. Момент падает до нуля. Ротор начинает замедляться под действием момента сопротивления. Обычно на 5–15%.
3. При включении «треугольника» возникает кратковременный ударный момент. После этого процесс выходит на рабочий режим.

За время паузы ротор затормаживается. Бросок тока в этот момент почти такой же, как при прямом включении. [8]

Где метод ещё применяется.

- двигатели от 15 до 75 кВт;
- механизмы с вентиляторной или центробежной характеристикой — насосы, вентиляторы, дымососы;
- при редких пусках.

«Звезда–треугольник» — это компромисс. Он позволяет снизить пусковой ток без полупроводников. За это приходится платить сниженным моментом на старте и ударом при переключении. Для приводов с постоянным моментом нагрузки — конвейеров, элеваторов, экструдеров — этот метод практически непригоден. В современных электроприводах его уверенно вытесняют устройства плавного пуска: они регулируют напряжение плавно, без разрыва цепи и без динамических ударов.

Схема реализации метода «звезда–треугольник» показана на рисунке 1.4.

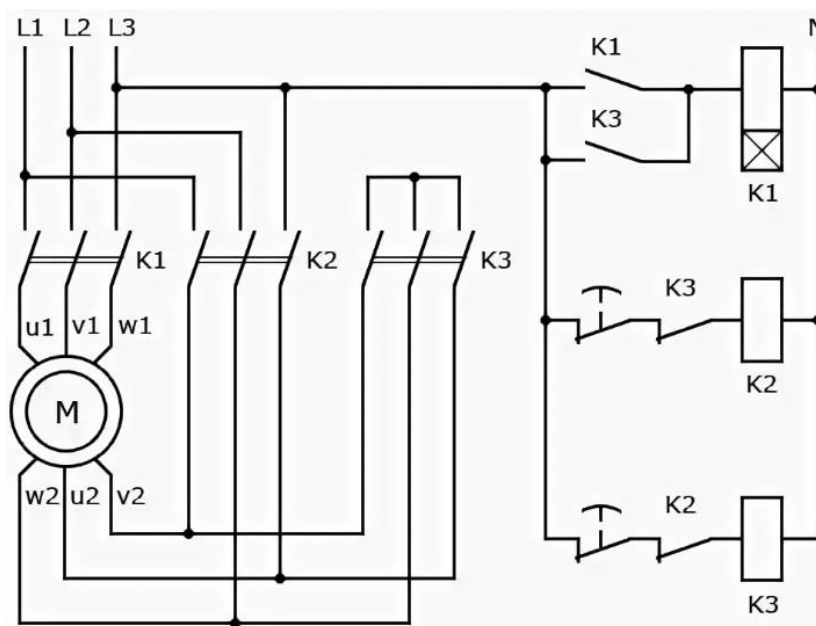


Рисунок 1.4 – Принципиальная эл. схема управления АД методом «звезда - треугольник»

1.3.3. Устройства плавного пуска (софт-стартеры): принцип работы, возможности и структура

Регулировка напряжения по фазе.

Большинство софт-стартеров строятся на принципе фазового регулирования. В цепь каждой фазы двигателя устанавливают встречно-параллельные тиристоры (или симисторы). Управляет ими схема импульсно-фазового управления (СИФУ).

Главный параметр — угол открытия α . Это задержка открытия тиристора после перехода напряжения через ноль. Если угол большой, тиристор почти всё время закрыт. На статор подаётся лишь малая часть напряжения. По мере уменьшения угла (вплоть до нуля) действующее напряжение на двигателе растёт. От стартового уровня (обычно 30–50 % от номинала) до полного сетевого. Интервал этого нарастания задаётся временем разгона (ramp time). Это время может длиться от 1 до 60 секунд.

Что умеет современный софт-стартер.

Возможности УПП не ограничиваются одной лишь задержкой пуска. Набор настраиваемых параметров позволяет гибко подстраивать режим под тип нагрузки. Основные функции сведены в таблицу 1.5.

В моделях с обратной связью по току доступен режим стабилизации момента. Электроника сама корректирует угол открытия тириستоров, чтобы удерживать заданный ток при меняющейся нагрузке во время разгона.

Главный практический результат — пусковой ток снижается с 5–7 от $I_{ном}$ до 2–4 от $I_{ном}$. Это заметно уменьшает нагрев обмоток и позволяет выполнять до 20–30 пусков в час без риска перегрева двигателя.

Таблица 1.5 – Основные функции УПП и их назначение

Функция	Назначение	Типичные настройки
Ограничение пускового тока (Current Limit)	Поддержание тока в заданных пределах (2–4 I _{ном}) для защиты сети и обмоток	Уставка 200–500% от I _{ном}
Плавное нарастание напряжения (Voltage Ramp)	Увеличение напряжения от начального до номинального за заданное время	Время разгона 1–30 с
Управление моментом (Torque Control)	Ограничение ударного момента для защиты механики	Начальный момент 0–70% от M _{ном}
Плавная остановка (Soft Stop)	Постепенное снижение скорости при выключении	Время останова 1–20 с
Предварительный подогрев (Kickstart)	Кратковременная подача повышенного напряжения для страгивания	Импульс 0.1–2 с
DC-торможение	Торможение подачей постоянного тока в обмотки	Время и уровень торможения

1.4. Анализ проблем: Пусковые токи и моменты, их влияние на сеть и привод

Броски тока при пуске.

При прямом включении асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в начальный момент скольжение оказывается равным единице ($s = 1$). В этой точке частота тока в роторе максимальна. Она равна частоте питающей сети. Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток резко преобладает над активным. Одновременно пика достигает и ток намагничивания из-за насыщения магнитопровода. Итак, мы видим, что пусковой ток вырастает до 5–7 номинальных значений. В отдельных исполнениях — до 8–9.

При этом пусковой момент хоть и превышает номинальный (обычно в пределах 0,8–1,2 Мном), но его кратность заметно уступает кратности тока. Все из-за крайне низкого коэффициента мощности в пусковом режиме ($\cos\varphi_{\text{пуск}} \approx 0,2\text{--}0,3$). Энергия тратится в основном на создание магнитного поля, а не на полезную механическую работу.

Такая картина электромагнитных процессов оборачивается двумя группами проблем. Первая — удар по питающей сети. Вторая — удар по самому приводу и рабочей машине.

Влияние на сеть.

Большой пусковой ток создаёт заметные потери напряжения на всех участках линии. От трансформаторной подстанции до клемм двигателя. В результате на шинах подстанции и у соседних потребителей возникает кратковременная просадка напряжения. Чтобы оценить масштаб этого влияния, используют показатель относительного падения напряжения. Он показывает, насколько проседает сеть в момент пуска (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Последствия просадки напряжения при пуске двигателя

Падение напряжения	Влияние на двигатель	Влияние на оборудование
До 10%	Практически незаметно	Контакторы не отпускают, освещение не мигает
10–15%	Заметное снижение пускового момента (может не страгиваться)	Мигание ламп накаливания, ложные срабатывания ПЛК при плохом питании
15–25%	Резкое затягивание пуска, перегрев обмоток	Отпадание магнитных пускателей смежных двигателей, сбой частотных преобразователей
Более 25%	Срыв пуска, срабатывание тепловой защиты	Отключение чувствительной электроники, «зависание» контроллеров

Просадки напряжения при прямом пуске обусловлены высоким пусковым током и полным сопротивлением питающей линии, включая кабели, трансформаторы и контакты коммутационной аппаратуры.

Для двигателя 250М4 при $I_{\text{пуск}} = 650 \text{ А}$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi_{\text{пуск}} \approx 0,25$ падение напряжения на шинах РУ-0,4 кВ достигает 25–35 %. В результате напряжение на клеммах двигателя снижается до 250–280 В, что уменьшает пусковой момент пропорционально квадрату напряжения и может привести к срыву пуска.

Для пресса 1300 TON FP, установленного в цехе нержавеющей посуды, последствия просадок напряжения проявляются в нескольких аспектах. Во-первых, нестабильная работа системы ЧПУ лазерных раскройных комплексов, питающихся от того же распределительного щита, что и пресс. Зафиксированы случаи сбоев программного обеспечения и потери координат при одновременном пуске пресса и включении лазерного станка. Во-вторых, ложные срабатывания тепловых реле соседних двигателей, настроенных на номинальный ток, но воспринимающих просадку напряжения как перегрузку.

Механические последствия прямого пуска связаны с ударным характером электромагнитного момента. В момент включения момент скачком возрастает от нуля до $M_{\text{пуск}}$, затем проходит через максимум (критический момент $M_{\text{крит}} \approx 2,0\text{--}2,5 M_{\text{ном}}$) и снижается до номинального значения при выходе двигателя на установившийся режим. Для ремённой передачи пресса, где масса ремней составляет 17,7 кг (расчёт в разделе 1.2), а натяжение клиновых ремней создаёт дополнительную нагрузку на валы, ударный момент вызывает:

- упругое проскальзывание ремней и их ускоренный абразивный износ;
- циклические деформации шпоночных соединений на валу двигателя и ведомого шкива;
- повышенный износ подшипников из-за знакопеременных нагрузок.

Для оценки влияния ударных моментов на ресурс подшипников качения можно использовать методику, приведённую в [12], согласно которой ресурс подшипника снижается обратно пропорционально кубу эквивалентной динамической нагрузки. При кратности пускового момента 1,2 относительно номинального эквивалентная нагрузка возрастает в 1,7 раза, что уменьшает расчётный ресурс подшипников с 20 000 до примерно 5 000 часов.

Насосные агрегаты и механизмы, содержащие гидравлические системы (например, система смазки подшипников маховика пресса), испытывают дополнительный негативный эффект — гидравлический удар. Резкое нарастание момента на валу насоса вызывает скачок давления в маслопроводах, что может привести к повреждению уплотнений и разрыву гибких рукавов. [12]

Пусковая диаграмма.

На рисунке 1.5 (приведён условный график) показаны типичные зависимости момента от скольжения. Здесь отчётливо выделяются три ключевые точки:

- В самом начале пуска ($s = 1$) ток взлетает до 5–7 $I_{ном}$, а момент составляет 0,8–1,2 $M_{ном}$.
- В районе критического скольжения $s \approx 0,1–0,2$ ток уже снижается до 4–5 $I_{ном}$, зато момент достигает своего пика $M_{крит} = 1,5–2,5 M_{ном}$.
- При выходе на номинал ($s \rightarrow 0$) характеристики приходят к своим расчётным значениям: $I = I_{ном}$, $M = M_{ном}$.

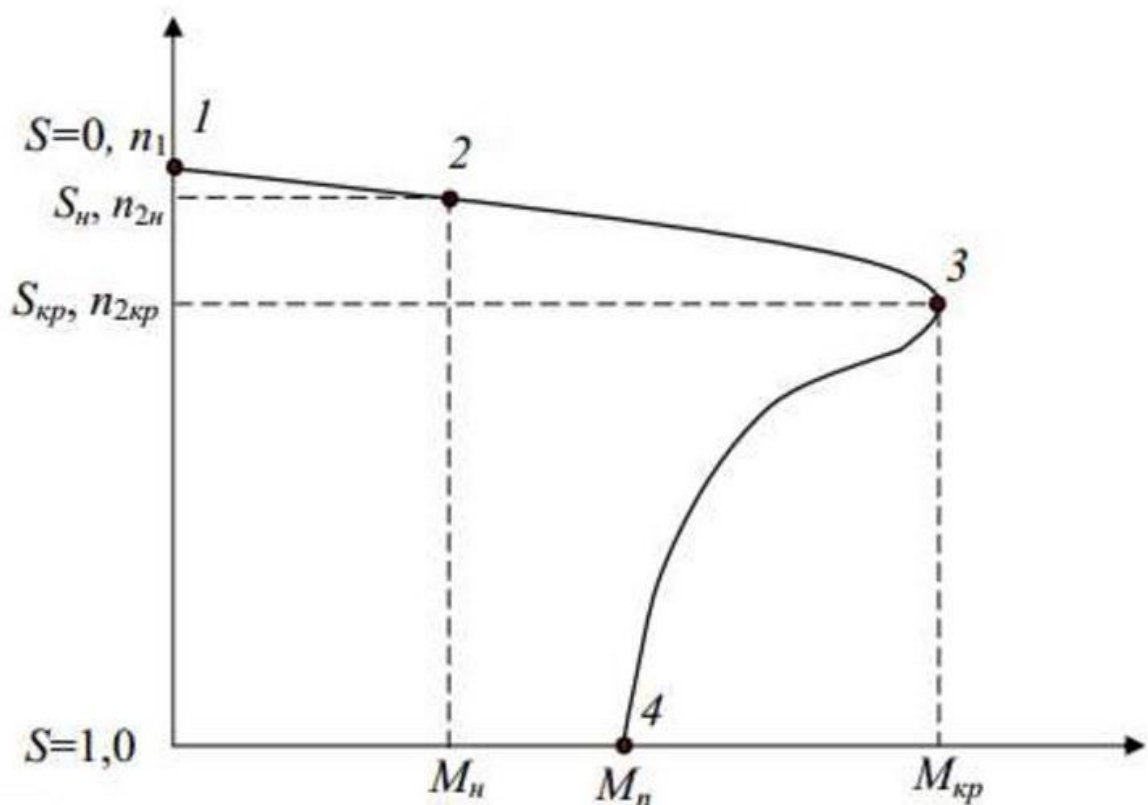


Рисунок 1.5 – Взаимосвязь скольжения и момента

Мы видим разделение ударных нагрузок по времени. Пик механического удара приходится на момент прохождения двигателем

критической точки (максимум момента). А вот максимальная тепловая нагрузка обрушивается на самый начальный момент пуска. Эти два пика находятся в разных зонах пусковой диаграммы. Каждый требует своего подхода к защите.

Насколько сильно тот или иной способ пуска позволяет ослабить эти эффекты, показывает сводная таблица 1.7. В ней наглядно сопоставлены ключевые показатели. Уровни пускового тока, моментов, тепловые потери и влияние на механику. [8]

Таблица 1.7 – Влияние пусковых режимов на сеть и механику при разных методах пуска

Параметр	Прямой пуск	Звезда-треугольник	УПП (софт-стартер)
Максимальный пусковой ток (к $I_{ном}$)	5–7	1,7–2,3 (на звезде) + бросок при переключении	2–4 (регулируемый)
Просадка напряжения	Высокая (25–40%)	Умеренная (10–15%)	Низкая (5–10%)
Максимальный пусковой момент (к $M_{ном}$)	0,8–1,2	0,27–0,4 (на звезде) + удар при переключении	0,5–0,7 (плавное нарастание)
Удар по механике	Один сильный	Два умеренных (старт + переключение)	Отсутствует (плавный разгон)
Гидроудар в насосах	Есть	Частично снижен	Полностью исключён
Теплонапряжённость обмоток	Высокая	Средняя	Низкая

1.5. Виды защит АД

Защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представляет собой многоуровневую систему, каждый уровень которой ориентирован на конкретный вид аномалии. В отличие от силовых трансформаторов, где тепловой режим относительно стабилен, у асинхронного двигателя перегрев зависит не только от тока. Он зависит от частоты вращения, интенсивности охлаждения и симметрии питающего напряжения. Поэтому современные системы защиты строятся на принципе комплексного контроля параметров.

В рамках настоящего проекта защита организована на базе микропроцессорного устройства плавного пуска (УПП), которое совмещает пусковые и защитные функции. Ниже последовательно рассматриваются основные виды защит. Их реализация и настройка применительно к двигателю 250М4-В3-55-1500-У2 и условиям эксплуатации на прессе 1300 TON FP.

Тепловая защита.

Традиционные тепловые реле, используемые в схемах прямого пуска, строятся на биметаллическом принципе. Они обладают значительной тепловой инерцией. Для двигателя мощностью 55 кВт с тепловой постоянной времени обмоток, оцениваемой в 15–25 минут, реле с классом срабатывания 10А или 20А может обеспечить приемлемую защиту от длительных систематических перегрузок. Однако при циклической работе пресса с фактической продолжительностью включения 25 % и частыми пусками тепловая картина становится сложнее. Биметаллическое реле не различает пусковые броски тока и установившийся режим. Это приводит либо к ложным отключениям (если уставка занижена), либо к недогрузу защиты (если уставка завышена).

В выбранном УПП Русэлком RS-RM-55-4 реализована цифровая тепловая модель, основанная на интегрировании квадрата тока по времени (I^2t). В отличие от биметаллического реле, эта модель учитывает:

- фактическое значение тока в каждой фазе с дискретностью 1 мс;
- время протекания тока;
- начальную температуру двигателя (память нагрева сохраняется между циклами работы);
- класс тепловой защиты (настраивается от 10 до 30 в соответствии с ИЕС 60947-4-2).

Расчётное значение тепловой постоянной для двигателя 250М4 может быть определено по методике, приведённой в [8, с. 217], и составляет ориентировочно 18 минут. Исходя из этого, для прессового оборудования с интенсивным циклическим режимом целесообразно выбрать класс 20. Это обеспечит отключение двигателя при перегрузке 1,2·I_{ном} в течение примерно 20 минут — достаточно для предотвращения деградации изоляции класса F (допустимая температура 155 °C), но без ложных срабатываний при штатных пусках.

Защита от технологической перегрузки и заклинивания.

Для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме, характерны внезапные увеличения момента сопротивления. В случае фрикционного пресса заклинивание может произойти из-за попадания постороннего предмета в зону деформации или при заедании направляющих ползуна. При заклинивании ротор двигателя останавливается или значительно замедляется, ток в обмотках возрастает до 4–6 I_{ном}.

Тепловая защита в такой ситуации срабатывает не мгновенно — её тепловая инерция составляет секунды и десятки секунд. За это время обмотки

успевают нагреться до критической температуры, а механические узлы — получить дополнительные динамические нагрузки.

УПП оснащён функцией токовой отсечки с настраиваемой задержкой. Уставка срабатывания задаётся в процентах от номинального тока двигателя. Исходя из анализа механических характеристик пресса (раздел 2.5, $J_{\text{сум}} = 74,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$), а также из условий пуска, принята уставка 350 % от $I_{\text{ном}}$ с выдержкой времени 0,2 секунды. Этого достаточно для того, чтобы отличить заклинивание от нормального пускового режима, где ток достигает аналогичных значений, но снижается в течение 40–60 секунд.

Дополнительно предусмотрена защита от затянувшегося пуска — если по истечении заданного времени разгона (программируется до 60 с) двигатель не вышел на номинальную скорость, УПП отключает питание и фиксирует ошибку. Это предотвращает перегрев обмоток в случае, если нагрузка на валу оказалась выше расчётной или если механизм неисправен.

Защита от коротких замыканий.

Здесь важно разделить функции: УПП не предназначен для коммутации токов короткого замыкания. Тиристорные ключи, установленные в каждой фазе, могут быть повреждены при сквозном токе КЗ, превышающем 10–12 $I_{\text{ном}}$. Поэтому внешняя защита — автоматический выключатель QF1 и быстродействующие полупроводниковые предохранители FU1 — является обязательным элементом схемы.

Автоматический выключатель ВА47-125 с характеристикой С обеспечивает отключение при токах КЗ более 625 А ($5 \cdot I_{\text{ном.авт}}$). Время его срабатывания при реальных значениях тока КЗ в цеховой сети (ориентировочно 2–3 кА) составляет 10–20 мс. Предохранители ППН-37 с номиналом 125 А и типом aR обладают ещё меньшим временем отключения — 2–5 мс при токе КЗ, что гарантирует сохранность тиристорных модулей.

При возникновении КЗ внутри самого УПП или на двигателе алгоритм работы следующий: предохранители FU1 перегорают первыми (селективность по току и времени), защищая тиристоры от разрушения; автомат QF1 отключается как резервная защита линии. Сам УПП при этом формирует сигнал блокировки тириستоров, но не участвует в разрыве тока КЗ.

Защита от обрыва и дисбаланса фаз.

Обрыв одной из фаз питающей сети или обрыв обмотки статора — аномалия, которую трудно обнаружить без специальных средств. При работе на двух фазах токи в оставшихся фазах возрастают в 1,7–2,2 раза по сравнению с номиналом. Двигатель продолжает вращаться, но с пониженным моментом, повышенным скольжением и сильным нагревом ротора. Биметаллическое тепловое реле среагирует на это как на обычную перегрузку, но с задержкой; за это время изоляция может получить необратимые повреждения.

УПП осуществляет непрерывный контроль токов всех трёх фаз. Алгоритм сравнения действующих значений позволяет выявить:

- полный обрыв фазы (ток в фазе менее 5 % от номинала);
- дисбаланс токов (разница между фазами более 20–30 % от среднего значения);
- неправильное чередование фаз (обратное вращение поля).

При обнаружении любой из этих ситуаций устройство блокирует запуск (если двигатель остановлен) или отключает двигатель (если он работал). Время реакции — не более 100 мс. Кроме того, УПП проверяет чередование фаз на входе до каждого включения, что исключает ошибочный реверс при подключении кабелей.

Контроль недогрузки и обрыва ремня.

Эта защита специфична для приводов с ременной передачей. Для прессы 1300 TON FP характерна клиноременная передача с двумя ремнями суммарной массой 17,7 кг (расчёт в разделе 1.2). Обрыв одного из ремней или их проскальзывание приводит к снижению механической мощности на валу, росту скольжения, падению КПД и дополнительному нагреву. При этом ток двигателя может быть ниже номинального, что не позволяет использовать тепловую защиту.

Функция контроля недогрузки в УПП позволяет задать нижнюю границу тока (например, 50 % от $I_{ном}$) и минимальное время работы в этом режиме. Если в течение установленного интервала (10–30 с) ток не достигает порогового значения, устройство фиксирует ошибку «Обрыв ремня» и отключает двигатель. Данный параметр был скорректирован по результатам измерения токов холостого хода двигателя (фактически зафиксировано 37 А, что составляет $\approx 36\%$ $I_{ном}$). Для исключения ложных срабатываний на режиме холостого хода прессы уставка выбрана на уровне 30 % от $I_{ном}$ с выдержкой 5 секунд. Такой подход позволяет отделить штатный холостой ход от аварийной ситуации.

Интеграция защит в единую систему управления.

Итоговым преимуществом применения УПП является объединение всех перечисленных защит в одном устройстве. Это не только сокращает объём шкафа управления и упрощает монтаж, но и исключает противоречия между разными реле (например, когда тепловое реле отключает двигатель по перегреву, а реле контроля фаз продолжает выдавать разрешение на повторный пуск).

В УПП Русэлком RS-RM-55-4 все защитные функции имеют приоритетную логику:

- защита от КЗ и обрыва фаз имеет наивысший приоритет и действует мгновенно;
- тепловая защита и защита от затянувшегося пуска работают с выдержками, соответствующими тепловым постоянным двигателя;
- контроль недогрузки и ограничение числа пусков в час относятся к превентивным мерам и отключают двигатель только при длительном нарушении.

Дополнительно все аварийные события фиксируются в энергонезависимой памяти УПП с указанием времени и параметров (ток, напряжение, температура радиатора). Это позволяет проводить диагностику причин отключения и корректировать настройки без привлечения внешнего оборудования. Для передачи данных на верхний уровень управления предусмотрен интерфейс Modbus RTU, что позволяет интегрировать пресс в общую систему АСУ ТП цеха и формировать журнал событий автоматически.[2].

1.6. Описание установки и требования к регулированию

Фрикционный винтовой пресс модели 1300 TON FP турецкого производства (торговая марка SAKIZ, изготовитель — Özsakız Makina Kalıp, масса 45 тонн) задействован в технологической цепочке предприятия. Используется для операций диффузионной сварки деталей с усилием до 1300 тонн.

Как устроен фрикционный пресс.

В отличие от гидравлики, где усилие создаётся давлением жидкости, здесь энергия передаётся через винтовую пару. Маховик, раскручиваемый фрикционными дисками, приводит во вращение винт. А тот преобразует

вращение в поступательное движение ползуна. Такая схема даёт высокую скорость рабочего хода и большую энергию удара при компактных габаритах.

Привод осуществляется с помощью асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 250М4-В3-55-1500-У2. Именно его работа определяет кинетическую энергию маховика.

Оборудование установлено в отапливаемом сухом помещении (средняя температура 22°C, цех нержавеющей посуды). Внешние факторы здесь отсутствуют. Рядом находится распределительная подстанция. Это позволяет отлаживать оборудование без существенной нагрузки на питающую сеть.

Режим работы прессы.

Пресс работает в повторно-кратковременном режиме (S3 по ГОСТ ИЕС 60034-1). С частыми пусками и циклическим изменением нагрузки. Каждый цикл распадается на три характерные фазы:

- Разгон маховика — двигатель выводит тяжёлый маховик на номинальные обороты, запасая энергию для удара.
- Рабочий ход — фрикционная передача переключается на винт, энергия маховика уходит в поступательное движение ползуна. В этот момент ток двигателя кратковременно подсакивает из-за отбора мощности на поддержание вращения.
- Возврат ползуна и пауза. Двигатель работает почти на холостом ходу, восстанавливая обороты маховика к следующему циклу.

Фактическая продолжительность включения для этой модели 25%. Это означает, что электропривод обязан уверенно выдерживать перегрузки. Обмотки — успевать остывать за время пауз. Двигатель практически не выходит на установившийся режим с постоянной характеристикой. Поэтому и тепловую защиту, и алгоритмы ограничения пусковых токов приходится настраивать с особой тщательностью.

Основные требования к приводу

Из такого цикла работы вытекают несколько жёстких требований.

1. Ограничение пускового тока и механических ударов. При прямом пуске двигатель мощностью 55 кВт выбрасывает в сеть 600–700 А. Это не только просадки напряжения в цеховой сети, но и сильные динамические удары по фрикционным дискам и подшипникам. Привод должен запускаться плавно. Удерживая пусковой ток на уровне 3,0–3,5 номинала и разгоняя маховик по контролируемой рампе. Это единственный способ снизить износ фрикционных накладок.

2. Поддержание оборотов маховика при циклической нагрузке. В момент рабочего хода пресс забирает накопленную энергию. Обороты двигателя кратковременно падают. Система управления обязана быстро отработать эту просадку и восстановить номинальную скорость до следующего цикла. Для этой задачи оптимально подходит УПП. Оно же позволяет регулировать энергию удара за счёт изменения скорости вращения маховика без механической перенастройки пресса.

3. Интеграция электронных защит двигателя. Устройство управления (УПП) должно взять на себя комплексную защиту двигателя:

- тепловую защиту — цифровая модель I^2t с учётом фактического тока 103 А и реальных условий охлаждения;
- контроль обрыва и дисбаланса фаз — исключить работу на двух фазах;
- защиту от заклинивания механизма — аварийное отключение при превышении тока выше уставки.

4. Энергоэффективность.

В паузах между циклами привод должен переходить в режим пониженного потребления или ожидания. Это снижает эксплуатационные расходы и соответствует современным стандартам энергосбережения.

Вывод.

Электропривод фрикционного пресса SAKIZ 1300 TON FP с двигателем ESQ SDN 250M4 нельзя рассматривать как обычный пускатель. Это активный управляющий элемент технологического процесса. Соблюдение перечисленных требований обеспечивает стабильность цикла. Продлевает ресурс механики и изоляции двигателя. Снижает эксплуатационные затраты предприятия.

2. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА И ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ

2.1. Краткая характеристика деятельности ООО «Лысьвенский завод металлоизделий»

Лысьва — старый уральский город с почти двухвековыми металлургическими традициями. Здесь, на Лысьвенском заводе металлоизделий (ЛЗМИ), сегодня выпускают посуду и фурнитуру из нержавеющей стали. В основе производственного цикла лежит уникальное оборудование. Фрикционный пресс с усилием 1300 тонн с мощным асинхронным двигателем. Именно этот агрегат и будет в центре нашего рассмотрения.

Предприятие.

ООО «ЛЗМИ» входит в Промышленную Группу «ЛИНПРОГ». Завод ведёт свою историю от Лысьвенского металлургического завода, основанного ещё в 1785 году. Сегодня это действующий лидер сегмента. В 2024 году завод вышел на первое место в России по продажам продукции из нержавеющей стали. Прирост составил более 50% за год.

Основной материал это марка стали AISI 304 (отечественный аналог 08Х18Н10). Она долговечная, гигиеничная, с хорошим внешним видом. Номенклатура широкая. Кастрюли, сковороды, ковши, металлическая фурнитура, термосы.

Главное преимущество ЛЗМИ — полный цикл. Завод не зависит от поставщиков комплектующих. Завод выполняет всю металлообработку сам. От раскроя рулонного проката до финишной полировки и упаковки. В процессе учувствуют лазерные станки, установки диффузионной пайки. Это позволяет не только удерживать позиции, но и наращивать выпуск. Продукция успешно конкурирует с зарубежными аналогами.

2.2. Описание техпроцесса

Технологическая цепочка ЛЗМИ включает в себя несколько этапов.

1. Лазерный раскрой (ЧПУ). Начинается всё с резки. Листы нержавеющей стали подаются на лазерные комплексы с числовым программным управлением. Лазер даёт идеально ровную кромку. Потом её не нужно дорабатывать механически. В точке реза металл мгновенно разогревается, испаряется и формирует контур будущей детали. Круги для дна, развёртки корпусов, ручки. Инструмент к листу не прикасается, так что тонкий материал не деформируется. Метод даёт мало отходов. Детали можно плотно раскладывать на листе.

2. Формовка и вытяжка. Вырезанные заготовки переходят на холодную штамповку. Здесь на мощных гидравлических прессах плоский диск становится объёмным. Десятки тонн давления вдавливают стальной круг в матрицу. Металл тянется, формируя стенки будущей кастрюли или чаши. Это сложная пластическая деформация, и усилия нужно рассчитывать точно, иначе металл порвётся или пойдёт складками (гофром). После формовки на обрезных штампах изделию придают точную геометрию и задают высоту борта.

3. Подготовка поверхности. Механическая обработка оставляет шероховатости. Следы инструмента и неоднородный цвет. Чтобы посуда стала товарного вида, её шлифуют и полируют. Сначала на ленточных или круговых шлифмашинах снимают дефектный поверхностный слой и выравнивают текстуру. Потом идёт полировка специальными пастами и войлочными кругами. Именно она даёт тот самый зеркальный блеск, ради которого покупатели выбирают нержавейку.

4. Сборочные операции. Для части продукции используется технология пайки с применением флюса. Флюс очищает место соединения от оксидной

плёнки при нагреве. Обеспечивается прочное сцепление припоя с нержавеющей сталью.

5. Диффузионная сварка (изготовление термораспределительного дна). Для посуды с многослойным дном на ООО «ЛЗМИ» применяется передовая технология — диффузионная сварка ударом. Это не просто соединение двух слоёв металла. Это взаимное проникновение (диффузия) атомов нержавеющей стали и алюминия на границе раздела сред. Это происходит под воздействием огромного давления и нагрева. Здесь в технологический процесс вступает главный силовой агрегат — фрикционный пресс.

2.3. Устройство станка

Диффузионная сварка предъявляет к прессовому оборудованию жёсткие требования. Чтобы сформировать трёхслойное дно недостаточно просто сжать заготовки. Нужно приложить колоссальное усилие.

Фрикционный пресс — это вертикальная машина. Кинетическая энергия маховика преобразуется в поступательную энергию для деформации заготовки. Конструктивно пресс состоит из массивной станины, внутри которой движется ползун (баба). На ней закреплён штамп. Ползун приводится ходовым винтом, связанным с маховиком. Вращение на маховик передаётся через фрикционный контакт с одним из двух дисков привода.

Усилие в 1300 тонн — величина очень огромная. Чтобы разогнать тяжёлые стальные маховики и передать такую энергию ползуну за короткий цикл, нужен мощный электропривод.

Эту задачу решает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 250М4-В3-55-1500-У2.

Привод.

С вала двигателя на вал пресса вращение передаётся через клиноременную передачу. Это не случайность, а продуманное инженерное решение. В момент удара ползуна о заготовку на валу возникают пиковые ударные нагрузки. Ременная передача, в отличие от жёсткой муфты, работает как демпфер. Проскальзывание ремней при заклинивании или резком торможении защищает обмотки двигателя от критических токов и механических поломок.

Схема запуска — прямой пуск. На обмотки статора одномоментно подаётся полное напряжение сети (380 В). Это самая простая и надёжная схема, и её применение здесь оправдано. Но в нынешних реалиях это не целесообразно. [1, 6]

Вывод.

Лысьвенский завод металлоизделий — это пример того, как вековые традиции качества сочетаются с современными технологиями. Каждое изделие проходит путь от лазерной резки до точного удара 1300-тонного пресса. И именно в работе этого пресса ключевую роль играет двигатель 250М4-В3-55-1500-У2. Надёжная машина, обеспечивающая прочное соединение слоёв металла и неизменное качество готовой продукции. [13]

2.4. Анализ текущей схемы управления

Надёжность кузнечно-прессового оборудования определяется в первую очередь качеством электропривода. На фрикционном прессе усилием 1300 тонн установлен трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 250М4-В3-55-1500-У2. Это общепромышленная машина мощностью 55 кВт, с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Задача настоящей работы — детально разобрать действующую релейно-контакторную схему прямого пуска этого двигателя и полный набор применяемых средств защиты.

Двигатель как объект управления: основные параметры.

Чтобы грамотно анализировать схему управления нужно представлять, чем мы управляем. Двигатель 250М4-В3-55-1500-У2 — четырёхполюсная машина с высотой оси вращения 250 мм, то есть аппарат из класса мощных промышленных приводов. Его основные номинальные характеристики сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Основные номинальные характеристики

Параметр	Значение
Номинальная мощность, $P_{\text{ном}}$	55 кВт
Напряжение питания (Δ / Y)	380 / 660 В
Номинальный ток при 380 В, $I_{\text{ном}}$	103 А
Синхронная частота вращения, n_0	1500 об/мин
Номинальная частота вращения, $n_{\text{ном}}$	1460–1480 об/мин
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,87–0,88
КПД, η	$\approx 93 \%$
Кратность пускового тока, I_p / $I_{\text{ном}}$	6,5–7,0
Режим работы	S1 (продолжительный)
Климатическое исполнение	У2 (умеренный климат, от -40 до $+40$ °С)
Степень защиты	IP54–IP55
Класс изоляции	F (допустимый нагрев до 155 °С)

Как устроена текущая схема.

Электропривод пресса 1300 TON FP реализован на базе трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 250М4-В3-55-1500-У2. Управление пуском осуществляется по схеме прямого включения (DOL). Принципиальная схема (рис. 2.1) включает следующие элементы:

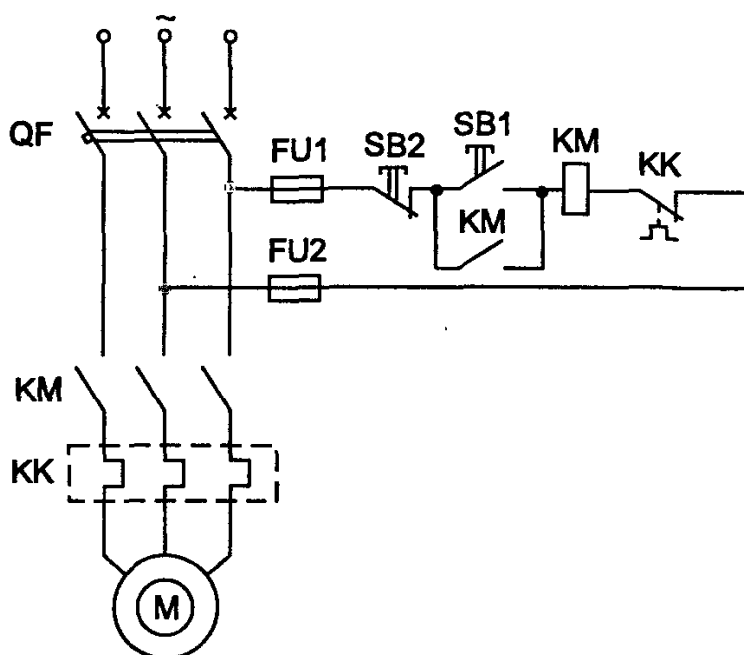


Рисунок 2.1. – Схема управления АД с нереверсивным магнитным пускателем

- автоматический выключатель QF — обеспечивает защиту силовой цепи от токов короткого замыкания и выполняет функцию ручного отключения;
- контактор KM — осуществляет непосредственную коммутацию двигателя с сетью по команде от кнопочного поста;
- тепловое реле KK — защищает двигатель от длительных токовых перегрузок;
- кнопки управления SB1 («Стоп») и SB2 («Пуск») — обеспечивают местное управление;
- плавкие предохранители FU1, FU2 — защищают цепи управления.

Как работает схема.

Алгоритм работы схемы следующий. При включении автомата QF напряжение подаётся на силовые контакты контактора и на цепь управления. Нажатие кнопки SB2 подаёт напряжение на катушку контактора КМ. Контактор срабатывает, замыкаются главные силовые контакты в цепи двигателя, и двигатель подключается к трёхфазной сети 380 В. Одновременно замыкается блок-контакт КМ, шунтирующий кнопку SB2 (цепь самоподхвата), что позволяет удерживать контактор во включенном состоянии после отпускания кнопки. Остановка двигателя производится нажатием кнопки SB1, которая разрывает цепь питания катушки контактора, вызывая отключение двигателя и его свободный выбег.

Состав оборудования на момент обследования.

На момент проведения обследования (март–апрель 2026 года) в схеме применяются:

- контактор КТ-6000 ($I_{ном} = 160$ А, 2012 года выпуска);
- тепловое реле РТЛ-1000 с механизмом косвенного нагрева;
- автоматический выключатель с электромагнитным расцепителем, настроенным на ток срабатывания 800–1000 А (что составляет 1,25 от пускового тока 650 А)

Защита от коротких замыканий и выбор уставок.

Защиту от сверхтоков и коротких замыканий обеспечивает автоматический выключатель QF. Его электромагнитный расцепитель настроен на мгновенное срабатывание при токе КЗ. Учитывая, что пусковой ток двигателя достигает примерно $6,5 I_{ном} \approx 650$ А, уставку электромагнитного расцепителя выбирают с запасом: $I_{уст} \geq 1,25 I_{пуск}$, то есть в диапазоне 800–1000 А. Это исключает ложные срабатывания при

нормальном пуске, но гарантирует надёжное отключение при коротком замыкании в обмотках статора или питающем кабеле.

Отмечу, что использование автоматического выключателя без теплового реле не обеспечивает полноценной защиты двигателя. Штатные тепловые расцепители автоматов имеют грубую настройку и не учитывают тепловую постоянную времени обмоток конкретного двигателя. Поэтому комбинация «автомат + тепловое реле» является минимально достаточной для схем прямого пуска, однако тепловое реле класса 10А срабатывает при перегрузке 1,2 I_{ном} за время порядка 2–5 минут, что в условиях циклической работы пресса с частыми пусками может быть недостаточно для предотвращения перегрева. [13, 36].

Эмпирические данные: анализ отказов.

Статистика отказов за период 2023–2026 годов (табл. 2.2) выявила тенденцию к росту числа аварийных остановов: с 5 случаев в 2023 году до 9 в 2025 году. Основные причины — подгорание силовых контактов контактора, ложные срабатывания теплового реле из-за просадок напряжения и механический износ подшипников двигателя. Наиболее критичным случаем является отказ, произошедший в I квартале 2026 года, когда перекос фаз вызвал оплавление гибкой связи контактора и остановку плавильного участка на 1,5 часа.

Таблица 2.2. Статистика отказов и аварийных остановов двигателя 250М4-ВЗ

Период	Количество аварийных остановов	Причина	Последствия / Ремонтные работы
2023 г.	5	Срабатывание тепловой защиты / подгорание силовых контактов	Замена контактов КТ-6000 (3 раза), продувка обмоток
2024 г.	7	Ложное срабатывание ТР / просадка напряжения сети при пуске	Замена теплового реле, восстановление изоляции выводов
2025 г.	9	Подгорание контактов / механический износ подшипников из-за ударных нагрузок	Капитальный ремонт контактора, замена подшипников двигателя
I кв. 2026	3	Перекас фаз / оплавление гибкой связи контактора	Аварийный останов плавильного участка на 1,5 часа

Для того чтобы подтвердить расчётные значения пусковых токов и оценить реальное влияние пуска на сеть, были проведены инструментальные замеры. Использовались токоизмерительные клещи с функцией регистрации пиковых значений. Осциллограммы пускового тока (рисунки 2.2.1 и 2.2.2) зафиксировали характерную картину — данные усреднены по трём последовательным пускам.

Результаты инструментального обследования показали:

- пиковое значение пускового тока — 690 А (кратность 6,7 $I_{ном}$);
- длительность переходного процесса — 4,5 секунды;
- просадка напряжения на шинах РУ-0,4 кВ — до 345 В (9,2 % от номинала).

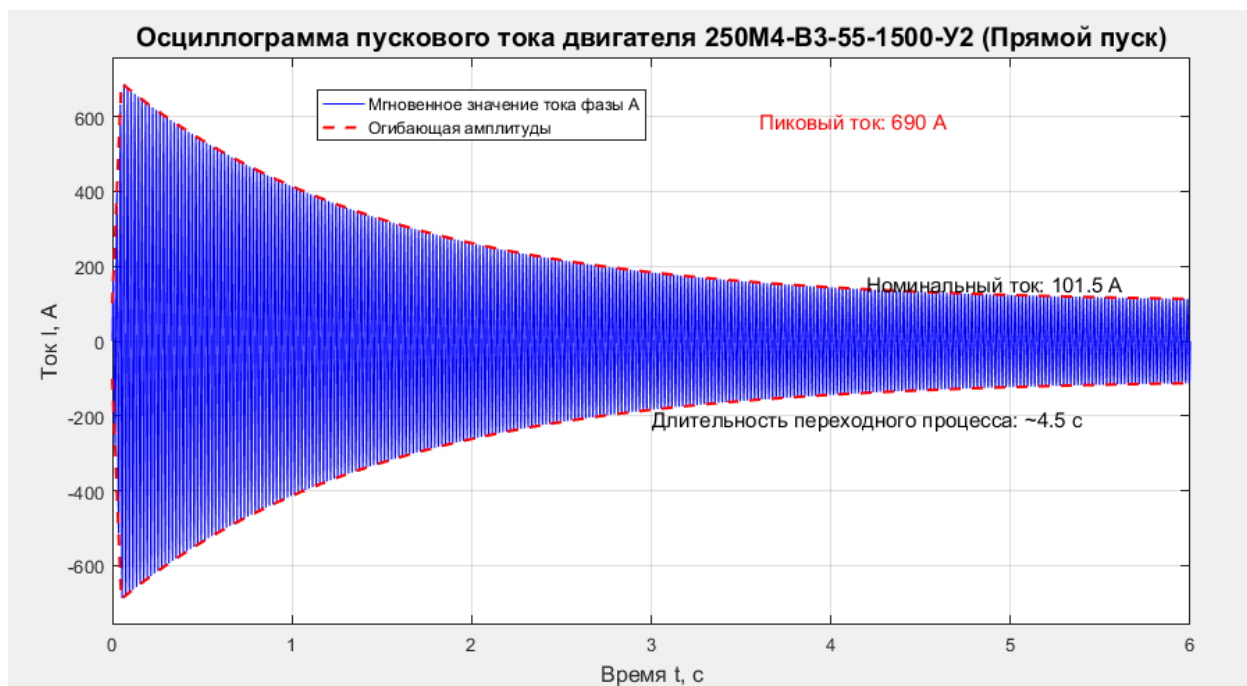


Рисунок 2.2.1. – Осциллограмма пускового тока двигателя при прямом пуске

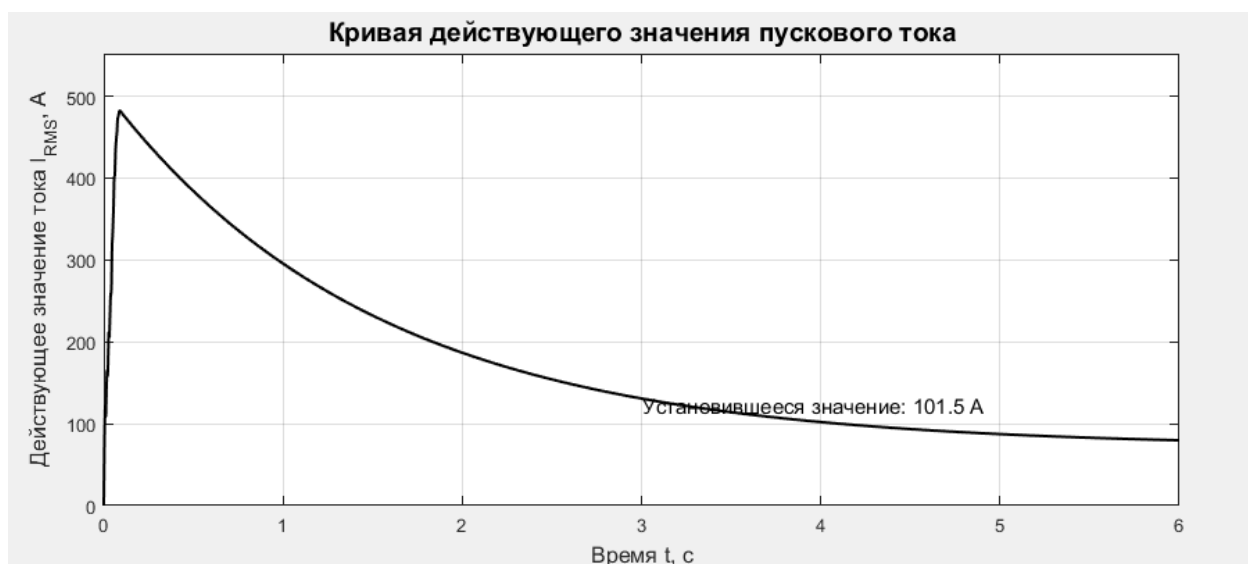


Рисунок 2.2.2. – Кривая действующего значения тока

Недостатки схемы прямого пуска.

При всей своей простоте и надёжности схема прямого пуска имеет ряд ограничений. Они начинают проявляться при эксплуатации в условиях интенсивного циклического режима.

Главная проблема — это высокие пусковые токи. Даже при старте без нагрузки в момент включения возникают броски до 600–700 А. Они создают динамические нагрузки на обмотки статора и ротора. Также вызывают заметные просадки напряжения в заводской сети. Это нежелательно для чувствительного оборудования.

Мы имеем отсутствие плавного разгона. Ударный характер набора скорости ускоряет износ подшипниковых узлов. А еще способствует механическому старению обмоток. Эти процессы не видны сразу, но накапливаются и сокращают ресурс двигателя.

Защита от перегрева. Тепловое реле обладает значительной инерцией. Оно неплохо справляется с медленными перегрузками, но беспомощно при быстропротекающих процессах. При частых перегрузках в режиме залипания фрикциона или при межвитковых замыканиях. Реле не может это отследить.

Классическая релейная схема полностью невидима для внешних систем. Она не даёт данных о текущем токе, температуре обмоток или вибрации. Это значит, что данная схема не позволяет реализовать обслуживание по фактическому состоянию. Также не дает возможности интегрировать привод в общую систему АСУ ТП предприятия.

Визуальный осмотр и выводы.

1. Высокие пусковые токи создают динамические нагрузки на обмотки и способствуют ускоренному старению изоляции.
2. Ударный характер разгона приводит к повышенному износу подшипников и ремённой передачи.
3. Тепловое реле обладает значительной инерцией и не защищает двигатель от быстропротекающих перегрузок (например, при заклинивании).
4. Схема не позволяет интегрировать привод в АСУ ТП предприятия из-за отсутствия интерфейсов связи и датчиков состояния.

2.5. Формулировка технического задания

Обоснование необходимости модернизации.

Решение о разработке системы плавного пуска продиктовано результатами анализа действующей схемы управления и защиты двигателя 250М4-ВЗ-55-1500-У2 (см. раздел 2.2). Также данными визуального и инструментального обследования оборудования. Прямой пуск негативно сказывается на механике привода, вызывает просадки напряжения в сети. Ускоряет старение изоляции обмоток. Цель модернизации — повысить надёжность прессового оборудования. Снизить динамические нагрузки на клиноременную передачу и подшипники. Улучшить электромагнитную совместимость с внутрицеховой сетью 0,4 кВ.

Исходные данные для проектирования.

Чтобы правильно рассчитать параметры разгона и выбрать силовые полупроводниковые модули УПП, недостаточно одних паспортных данных двигателя — нужно знать механические характеристики приводимого механизма. В частности, требуется определить приведённый момент инерции к валу двигателя. Исходные данные для этого расчёта приведены в приложении А и в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Геометрические и массовые параметры ременной передачи (фрикционный привод пресса)

Параметр	Обозначение	Значение
Радиус ведущего шкива (на валу двигателя)	r_1	0,1325 м
Масса ведущего шкива	m_1	30 кг
Радиус ведомого шкива (маховик пресса)	r_2	0,85 м
Масса ведомого шкива (маховика)	m_2	8332 кг
Масса клиновых ремней (суммарная)	m_3	17,66 кг
Передаточное число ременной передачи	$i = r_2 / r_1$	6,415

Требования к расчёту приведённого момента инерции.

При расчёте статического момента инерции системы, приведённого к валу двигателя учтем:

1. Момент инерции ротора двигателя $J_{дв}$.
2. Момент инерции ведущего шкива $J_{ш1}=0,5 \cdot m_1 \cdot r_1^2$.
3. Момент инерции ведомого шкива (маховика) $J_{ш2}=0,5 \cdot m_2 \cdot r_2^2$, приведённый к валу двигателя с учётом квадрата передаточного отношения: $J_{ш2}'=J_{ш2}/i^2$.
4. Приведённый момент инерции от поступательно движущейся массы ремней: $J_p=m_3 \cdot r_1^2$.

Расчёт моментов инерции отдельных элементов.

1. Момент инерции ведущего шкива $J_{ш1}$:

$$J_{ш1} = \frac{1}{2} m_1 r_1^2,$$

$$J_{ш1} = 0,5 * 30 * (0,1325)^2 \text{ кг*м}^2,$$

$$r_1^2 = 0.0176 \text{ м},$$

$$J_{ш1} = 15 * 0.0176 = 0.263 \text{ кг*м}^2.$$

2. Момент инерции ведомого шкива (маховика) $J_{ш2}$:

$$J_{ш2} = \frac{1}{2} m_2 r_2^2,$$

$$J_{ш2} = 0,5 * 8332 * (0,85)^2 \text{ кг*м}^2,$$

$$r_2^2 = 0,7225 \text{ м},$$

$$J_{ш2} = 4166 * 0,7225 = 3009,94 \text{ кг*м}^2.$$

3. Приведённый момент инерции ременной передачи:

Клиновые ремни движутся поступательно со скоростью, равной линейной скорости на ободу ведущего шкива $v = \omega_1 r_1$. Приведённый к валу двигателя момент инерции от массы ремней:

$$J_{\text{рем}} = m_3 r_1^2,$$

$$J_{\text{рем}} = 17,66 * 0,176 = 0,310 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведение момента инерции ведомого шкива к валу двигателя.

Передаточное отношение ременной передачи:

$$i = \frac{r_2}{r_1} = \frac{0,85}{0,1325} = 6,416.$$

Если нужно пересчитать момент инерции на вал с меньшей скоростью (обычно это вал двигателя), то момент тихоходного вала делят на квадрат передаточного отношения:

$$J'_{\text{ш2}} = \frac{J_{\text{ш2}}}{i^2},$$

вычислим i^2 , тогда:

$$i^2 = 6,416^2 = 41,15,$$

$$J'_{\text{ш2}} = \frac{3009,94}{41,15} = 73,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

суммарный приведённый момент инерции системы будет равен:

$$J_{\text{сум}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{ш1}} + J_{\text{рем}} + J'_{\text{ш2}},$$

$$J_{\text{сум}} = 2,2 + 0,263 + 0,310 + 73,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{\text{сум}} = 74,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Что дал расчёт и как выбирать УПП.

Цифра $74,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ для двигателя 55 кВт — это очень высокий приведённый момент инерции. Чтобы оценить масштаб нужно собственный

момент ротора этого двигателя — всего $2,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ разделить на суммарный. Иными словами, нагрузка превышает момент самого двигателя в 34 раза.

Соотношение $J_{\text{сум}}/J_{\text{дв}} \approx 34$ однозначно относит привод к механизмам с особо тяжёлым пуском. Чтобы такой маховик плавно разогнался за приемлемые 40–60 секунд, потребуется:

1. УПП в усиленном тепловом исполнении. Устройство должно уверенно держать ток ограничения на уровне 350–400 % от номинала в течение как минимум 60 секунд.

1. Существенно увеличенное время разгона. Расчётное время пуска $t_{\text{пуск}}$ при заданном ограничении тока можно оценить по формуле:

$$t_{\text{пуск}} = \frac{J_{\text{сум}} \cdot \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} - M_{\text{ст}}}$$

Номинальная угловая скорость двигателя $\omega_{\text{ном}} = 2\pi \cdot 1500/60 \approx 154,46$ рад/с.

Если принять пусковой момент равным 1,5 от номинального, время разгона составит не менее 45–50 секунд. И это важно. Ускорять процесс сильнее просто не позволит физика — не хватит ни тока, ни момента.

Обязательный элемент схемы — байпасный контактор. После выхода двигателя на номинальную скорость он шунтирует тиристоры УПП. Снимает с них тепловую нагрузку и исключая потери на полупроводниках в установившемся режиме.

Расчётное значение $J_{\text{сум}}=74,57$ прямо указывает на класс УПП — это однозначно тяжёлый пуск (Heavy Duty). Кривую разгона придётся программировать с начальным напряжением не ниже 40% и плавной рампой

длительностью не менее 45 секунд. Более короткое время попросту нереализуемо. Тиристоры не выдержат тепла, а ремни сорвутся в пробуксовку.

Основные функциональные требования к системе УПП.

Система плавного пуска должна обеспечивать следующий набор режимов и функций.

Режим пуска:

- Плавное нарастание напряжения на статоре от начальной уставки $U_{нач}$ (30–40% номинала) до полного $U_{ном}$, с регулируемой длительностью.
- Ограничение пускового тока на уровне не выше $3,5 \cdot I_{ном}$ (≈ 350 А). Это компромиссная величина. Ток достаточно, чтобы уверенно стронуть массивный маховик, но просадки напряжения в цеховой сети при этом не превышают 10% [19].
- Регулируемое время разгона — от 20 до 60 секунд. При таком моменте инерции попытка уложиться в 20 секунд рискованна. Возможна перегрузка тиристоров по току и теплу, плюс пробуксовка ремней.
- Функция «кик-старт» (форсирование момента) — короткий импульс напряжения до 80% от $U_{нач}$, длительностью 0,1–0,5 с. Нужна, чтобы гарантированно сдвинуть систему с места, если момент трогания покоя велик.

Режим останова:

- Плавное снижение напряжения с регулируемым временем 15–30 секунд. Основная цель — избежать гидравлических ударов в системе смазки подшипников маховика при резком снятии момента.
- Хотя основной останов происходит механическим образом, плавный электрический останов полезен и для снижения ударных нагрузок.

Работа в обходном режиме (Bypass).

После завершения разгона и выхода на номинальную скорость УПП должно автоматически замкнуть встроенный байпасный контактор. Зашунтировав тиристоры. Это исключает их нагрев в длительном режиме и снижает потери электроэнергии.

Технические требования к выбору УПП.

Исходя из расчётов и функциональных требований, устройство должно соответствовать следующим параметрам.

Номинальные характеристики:

- Напряжение питания: 380 В (–15% / +10%), 50 Гц.
- Мощность двигателя: не менее 55 кВт в тяжёлом режиме пуска.
- Номинальный ток УПП (I_e): не менее 120–140 А.
- Перегрузочная способность по току не менее 350% от I_e в течение 60 секунд при пуске из холодного состояния. Не менее 300% от I_e в течение 30 секунд при пуске из горячего.
- Допустимое количество пусков в час: не более 6, с интервалом не менее 10 минут (с учётом охлаждения).

Силовая часть:

- УПП должно быть построено на тиристорных модулях с двухсторонним управлением (встречно-параллельные пары на каждую фазу).
- Обязательно наличие встроенного датчика температуры радиатора и защиты от перегрева.

Встроенные защиты (с возможностью настройки уставок):

- Электронная тепловая защита двигателя (модель I^2t с памятью нагрева, класс 10 или 20).

- Контроль недогрузки / обрыва ремня — при падении тока ниже уставки (признак обрыва или проскальзывания) следует отключение с сигналом аварии.
- Защита от обрыва и чередования фаз на входе и выходе УПП.
- Защита от затянувшегося пуска — отключение по тайм-ауту при превышении заданного времени разгона.
- Защита от заклинивания ротора — контроль тока в момент старта.
- Ограничение числа пусков в час — для защиты обмоток от перегрева.

Надёжность и безопасность.

Система должна соответствовать ГОСТ Р МЭК 60204-1 (безопасность машин, электрооборудование). При пропадании и последующем восстановлении напряжения сети самопроизвольный пуск двигателя должен быть исключён.

Климатическое исполнение компонентов — под условия цеха металлообработки (пыль, пары СОЖ). Степень защиты шкафа — не ниже IP54.

Предусмотреть резервирование: при выходе УПП из строя должна быть возможность быстро переключиться на схему прямого пуска через ручной байпасный рубильник. Это позволит завершить производственный цикл в аварийном порядке. Снижает риск длительных простоев.

Ожидаемый эффект от внедрения.

Реализация системы плавного пуска в соответствии с данным техзаданием должна обеспечить:

- снижение пускового тока с 650–700 А до 300–350 А;
- исключение просадок напряжения на шинах 0,4 кВ при пуске пресса;
- увеличение срока службы клиновых ремней не менее чем на 40% за счёт устранения рывковых нагрузок;
- снижение динамических нагрузок на подшипники двигателя и маховика, увеличение межремонтных интервалов;
- предотвращение ложных срабатываний вводного автомата цеха при одновременном пуске нескольких мощных потребителей. [3]

3. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЛАВНОГО ПУСКА

3.1. Техническое предложение по выбору устройства плавного пуска

Анализ условий эксплуатации.

Расчёт приведённого момента инерции системы, выполненный в разделе 2.5, показал значение $J_{\text{сум}} = 74,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Для двигателя 250М4 с моментом инерции ротора $J_{\text{дв}} = 2,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ соотношение $J_{\text{сум}}/J_{\text{дв}} \approx 34$. Данное значение классифицирует привод как механизм с особо тяжёлыми условиями пуска (Heavy Duty). Для сравнения: для насосов и вентиляторов это соотношение обычно не превышает 5–8, для центрифуг и дробилок составляет 10–20, для маховичных прессов и мельниц превышает 30.

Исходя из данного соотношения, требования к УПП формулируются следующим образом:

- номинальный ток устройства — не менее 110 А (запас 7–12 % относительно $I_{\text{ном}}$ двигателя 103 А);
- перегрузочная способность — 350–400 % от $I_{\text{ном}}$ в течение 40–60 секунд (для обеспечения разгона маховика с рассчитанным временем 45–55 секунд);
- наличие встроенного байпасного контактора для снятия тепловой нагрузки с тириستоров после завершения пуска;
- трёхфазное симметричное управление — для снижения гармонических искажений и уравнивания нагрузок на фазы;
- развитая система защит — электронная тепловая модель, контроль обрыва фаз, защита от затянутого пуска;
- интерфейс связи Modbus RTU — для интеграции в систему АСУ ТП.

Сравнительный анализ доступных моделей УПП.

Сравнительный анализ доступных на рынке моделей представлен в табл. 3.1. В результате сопоставления по критериям стоимости, перегрузочной способности и функциональности выделяются следующие группы:

Таблица 3.1. Сравнительный анализ УПП для двигателя 55 кВт

Параметр	Instart SSI- 55/110-04	Энерджисейвер ES55	Schneider ATS48C11Q	Siemens 3RW5534- 6HA14	Русэлком RS-RM-55- 4	ОВЕН УПП2-55К- В
Ином, А	110	108	110	113	110	100 (тяжёлый режим — 92)
Встроенный байпас	нет (внешний)	опционально	есть	есть	есть	есть
Управление по фазам	3 фазы	3 фазы	3 фазы	3 фазы	3 фазы	2 фазы
Время пуска, макс.	60 с	60 с (авто)	до 999 с	360 с	60 с	20 с
Перегрузочная способность	500% Ином	400% — 5 с; 300% — 30 с; 200% — 60 с	3,5×Ином — 40 с (класс 10–30)	3×Ie — 15 с	350% Ином — 60 с (расчётная)	400% Ином — 20 с
Modbus RTU	есть	опционально	есть	есть	есть	нет
Диапазон Упит	380 В ±15%	342–418 В	230–415 В	200–480 В	380 В ±15%	170–480 В
Степень защиты	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20
Ориентир. цена	низкая	низкая	высокая	очень высокая	средняя	низкая

Ключевые выводы из анализа.

Группа 1. Бюджетные модели (Instant SSI-55/110-04, Энерджисейвер ES55). Устройства имеют номинальный ток 108–110 А и перегрузочную способность 200 % Ином в течение 60 секунд. Однако отсутствие встроенного байпаса (у SSI) или его опциональность (у ES55) требует дополнительных затрат на внешний контактор. Кроме того, данные модели не имеют подтверждённой эксплуатационной статистики для механизмов с временем

разгона более 40 секунд. ситуация схожа. Устройство заявлено как работающее, но в открытых источниках нет подтверждений его успешной эксплуатации с 60-секундным разгоном при 200% нагрузки.

Группа 2. Зарубежные бренды (Schneider ATS48C11QS, Siemens 3RW5534-6HA14). Оборудование отличается высокой надёжностью, развитой системой диагностики и широким диапазоном питающих напряжений. Однако перегрузочная способность Siemens 3RW5534 составляет $3 I_e$ в течение всего 15 секунд, что для маховичного пресса с 60-секундным разгоном недостаточно. Модель Schneider ATS48C11QS имеет перегрузку $3,5 I_{ном}$ в течение 40 секунд (класс 10–30), но её стоимость значительно выше отечественных аналогов, а сроки поставки увеличены.

Группа 3. Отечественные разработки (Русэлком RS-RM-55-4, ОБЕН УПП2-55К-В). Модель ОБЕН имеет ограничение по времени разгона (максимум 20 секунд) и двухфазное управление, что не соответствует требованиям. Русэлком RS-RM-55-4, напротив, полностью удовлетворяет всем критериям: $I_{ном} = 110 \text{ А}$, перегрузка $350 \% I_{ном}$ в течение 60 секунд, встроенный байпас, трёхфазное управление, шесть режимов пуска, интерфейс Modbus RTU. Устройство сертифицировано в России и имеет положительные отзывы при эксплуатации на маховичных прессах аналогичной мощности.

Рекомендуемое решение.

На основании проведённого анализа, с учётом стратегии импортозамещения и полного соответствия техническим требованиям, для модернизации электропривода выбран УПП Русэлком RS-RM-55-4. Дополнительным аргументом является возможность оперативного получения технической поддержки и запасных частей от производителя (ООО «Русэлком», г. Чебоксары).

Обоснование выбора.

Привод пресса характеризуется экстремально высоким приведённым моментом инерции — $J_{\text{сум}} = 74,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что в 34 раз превышает момент инерции ротора двигателя 250М4-В3-55-1500-У2. Расчётное время разгона маховика при токоограничении 350% от номинала составляет 45–55 секунд. Это ставит привод в категорию механизмов с очень тяжёлыми условиями пуска, требующих от УПП:

- номинального тока не ниже 103 А (номинал двигателя);
- перегрузочной способности 350% $I_{\text{ном}}$ в течение минимум 40–60 секунд;
- трёхфазного симметричного управления;
- встроенного байпасного контактора для снятия тепловой нагрузки с тиристоров в длительном режиме.

Русэлком RS-RM-55-4 полностью удовлетворяет этим условиям. Номинальный ток 110 А (запас 12% относительно $I_{\text{ном}}$ двигателя), трёхфазное управление с шестью режимами пуска. Толчковый режим для высокоинерционных нагрузок, расчётное время разгона до 60 секунд при 350% $I_{\text{ном}}$ (подтверждено документацией для маховичных механизмов), встроенный байпасный контактор.

Обеспечение технологической независимости.

Применение УПП российского производства соответствует стратегии импортозамещения и технологического суверенитета. Выбор Русэлком RS-RM-55-4 исключает зависимость от зарубежных поставок и сервиса. Сокращает логистические издержки и сроки поставки запасных частей. Обеспечивает оперативную техническую поддержку непосредственно от разработчика на территории РФ.

По функциональности и надёжности устройство не уступает зарубежным аналогам (включая Schneider Electric Altistart 48 ATS48C11Q). А по ряду параметров превосходит их. Технические параметры УПП приведены в приложении Б. [9, 10, 15, 16, 17, 20]

3.2. Расчет и выбор аппаратов защиты

Выбор автоматического выключателя QF1 (вводной аппарат защиты).

Автоматический выключатель QF1 устанавливается перед УПП и решает три задачи. Защита питающей линии и входных цепей УПП от токов короткого замыкания. Ручное отключение питания при ремонтных и регламентных работах. Обеспечение селективности с защитами самого УПП и двигателя.

Расчётные условия выбора.

Номинальный ток выключателя должен быть не менее номинального тока УПП, который, в свою очередь, выбирается по току двигателя. Номинальный ток двигателя — 103 А, поэтому принимаем $I_{ном.А} = 125 \text{ А}$ (ближайшее стандартное значение из ряда).

Уставка теплового расцепителя — для защиты от длительных перегрузок — выбирается из условия:

$$I_{т.р.} \geq 1,1 * I_{ном.дв},$$

$$1,1 * 103 = 113,3 \text{ А.}$$

Для автоматического выключателя на 125 А уставка теплового расцепителя, как правило, регулируется в пределах $0,8...1,0 I_{ном.А}$. Выставляем её на 115 А — точное значение зависит от возможностей конкретного аппарата. Поскольку основную функцию защиты двигателя от технологических перегрузок берёт на себя электронное тепловое реле УПП, тепловой расцепитель автомата играет роль резервной защиты линии от перегрузок свыше 115–120 А.

Уставка электромагнитного расцепителя (отсечка) выбирается из условия отстройки от максимального пускового тока, который протекает через автомат при пуске с УПП:

$$I_{эм} \geq 1,2 * I_{пуск.УПП},$$

$$1,2 * 343 = 411,6 \text{ А.}$$

В то же время отсечка должна быть ниже минимального ожидаемого тока короткого замыкания в конце защищаемой линии. Это необходимо для быстрого действия. Внутрицеховые сети 0,4 кВ зачастую обеспечивают токи КЗ значительно выше 1 кА, поэтому данное условие выполняется автоматически.

Для автоматических выключателей с характеристикой С мгновенное срабатывание наступает при токе 5...10 $I_{ном.А}$. При $I_{ном.А} = 125 \text{ А}$ диапазон составляет от 625 до 1250 А. Нижняя граница (625 А) надёжно превышает $1,2 I_{пуск.УПП} = 412 \text{ А}$, следовательно, ложных отключений при пуске с УПП не произойдёт. Характеристика D (10...20 $I_{ном}$) не требуется, так как пусковые токи невелики, а задержка срабатывания отсечки при реальном КЗ нежелательна.

Выбор конкретного аппарата.

Рекомендован автоматический выключатель IEK ВА47-125 3Р 125А С (или аналог КЭАЗ ВА47-125, ЕКФ ВА47-125) с номинальным током 125 А. Трёхполюсный, характеристика срабатывания С. Номинальная отключающая способность не менее 10 кА (этого достаточно для цеховой сети). Выключатель прост, надёжен, широко доступен и экономически целесообразен.

Выбор предохранителей для защиты тиристоров УПП (FU1).

Производители УПП часто рекомендуют устанавливать быстродействующие предохранители (типа aR) последовательно с каждым силовым входом для защиты полупроводников от сквозных токов КЗ. Анализ схемотехники Русэлком RS-RM показывает, что внутренняя защита может отсутствовать или быть недостаточно быстродействующей при глухих внутренних КЗ тиристора. Для повышения надёжности и в соответствии с

рекомендациями по эксплуатации серии RS-RM в схему вводятся предохранители.

Расчёт.

Номинальный ток предохранителя выбирается из условия:

$$I_{\text{пр}} \geq 1,25 * I_{\text{ном.дв}},$$
$$1,25 * 103 = 122,5 \text{ А.}$$

Принимаем номинальный ток предохранителя 125 А.

Рекомендованный тип — предохранители плавкие быстродействующие ППН-37 (125 А, 690 В, аR) или аналоги, обеспечивающие защиту тиристоров ($I^2t < \text{пропускной способности тиристоров}$). Устанавливаются по одному на каждую фазу перед входными клеммами УПП. Допускается использование трёхполюсного держателя-разъединителя с предохранителями (например, РПБ-125. Он совмещает функции защиты и видимого разрыва цепи.

Выбор рубильника-переключателя QS для аварийного прямого пуска.

В соответствии с требованиями технического задания, при выходе из строя УПП должна сохраняться возможность аварийного завершения производственного цикла путём прямого включения двигателя. Для этого в схеме предусматривается ручной переключатель QS, позволяющий подать напряжение на двигатель напрямую. Минуя УПП [7].

Требования к переключателю. Номинальный ток не менее $I_{\text{ном.дв}} = 103$ А, с запасом принимаем 125 А. Категория применения АС-23В (коммутация асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором). Наличие трёх фиксированных положений: «0» — отключено, «I» — питание через УПП (рабочий режим), «II» — питание напрямую (аварийный прямой пуск). Механическая блокировка от одновременного включения обоих режимов. Степень защиты не ниже IP20 (при установке в шкафу).

В качестве такого переключателя идеально подходит рубильник-переключатель (реверсивный перекидной) серии ОТ или РЕ19. Конкретная модель — рубильник-переключатель РПБ-125/3П (125 А, 3 полюса, $I_{th}=125$ А). Рубильник с нулевой и двумя рабочими позициями, передняя рукоятка, производства России. Этот аппарат обеспечивает видимый разрыв цепи, простую механическую блокировку и коммутацию без нагрузки (переключение производится только при отключённом автомате QF1). Прямой пуск в аварийном режиме будет осуществляться включением рубильника при предварительном отключении УПП. Однако для сохранения штатного алгоритма управления с рекомендуется сохранить участок старой схемы. Автоматический выключатель, контактор КМ и тепловое реле. Это отдельный элемент, который можно выбрать. Тем не менее, в рамках аварийного ручного управления достаточно рубильника без контактора — оператор вручную подаёт питание на двигатель, предварительно убедившись, что муфта пресса разомкнута. Такой подход допустим для кратковременного использования. Выбираем рубильник-переключатель РПБ-125/3П.

Выбор контактора для схемы прямого пуска (КМ1) – резервный вариант.

Если по условиям эксплуатации требуется сохранение дистанционного управления прямым пуском (с пульта) на период неисправности УПП. В аварийной цепи следует сохранить силовой контактор. Расчёт контактора ведётся по номинальному току двигателя и категории применения АС-3.

Исходные данные: $I_{ном.дв} = 103$ А, $U_{ном} = 380$ В.

Условия выбора:

- Номинальный ток контактора $I_{ном.К} \geq 103$ А. По каталогу для АС-3 выбираем контактор на 115 А (или 150 А, так как шкала номиналов: 95, 115, 150 А).

- Номинальное напряжение катушки: 220 В АС (для стыковки с существующей схемой управления).
- Количество и тип контактов: три главных силовых контакта, минимум один нормально-открытый блок-контакт для самоподхвата.

Рекомендуемый аппарат: контактор КЭАЗ КТ-6000 115А 230В АС3 (КТ-60115) или аналог IEK КМИ-115. Это отечественная продукция, соответствующая требованиям. Контактор должен быть дополнен тепловым реле (если оно не используется в УПП). В аварийной ветви тепловое реле обязательно, так как УПП отключено. Поэтому в цепь прямого пуска устанавливаем тепловое реле РТЛ-2061 (регулируемое 95...115 А). [14]

3.3. Выбор кабельной продукции

Выбор силовых кабелей.

Силовой кабель от автоматического выключателя QF1 до УПП и далее до двигателя выбирается по длительно допустимому току с учётом способа прокладки и температурных условий в цехе. Расчётный ток принимаем равным номинальному току двигателя — 103 А. Прокладка предполагается в металлическом коробе или непосредственно в шкафу. Открыто, без образования пучков. Материал жил — медь, изоляция — ПВХ (рабочая температура 70 °С).

Согласно ПУЭ, таблица 1.3.6, допустимый длительный ток для кабеля с медными жилами сечением 25 мм² при прокладке в воздухе составляет 115 А, что превышает расчётные 103 А. Однако для запаса и учёта возможного повышения температуры окружающей среды (в цехе до +40 °С) необходимо применить поправочный коэффициент 0,87. Тогда допустимый ток кабеля 25 мм² составит $115 \times 0,87 = 100,05$ А. Это лишь незначительно выше 103 А. Для надёжности и с учетом что двигатель может кратковременно работать с током

до 110 А (настройка УПП), рекомендуется сечение 35 мм² с допустимым током 135 А (с учётом коэффициента: $135 \times 0,87 = 117,5$ А).

Выбираем кабель ВВГнг(А)-LS 3×35+1×16 — три фазных жилы сечением 35 мм² и нулевая защитная жила 16 мм². Нулевая рабочая жила не требуется, так как двигатель симметричный. Длина кабельной линии в пределах цеха не превышает 20–30 метров. Потеря напряжения минимальна (ориентировочно менее 1%) и проверке не подлежит.

Для цепей управления применяется гибкий медный кабель КВВГнг(А)-LS 7×1,5 (или 4×1,5) с сечением жил 1,5 мм². Допустимый длительный ток такого кабеля не менее 10 А, что заведомо больше токов управления.

Для подключения УПП к системе диспетчеризации используется экранированная витая пара МКЭШ 2×2×0,5 (или аналогичная), прокладываемая отдельно от силовых линий для исключения наводок и помех.

3.4. Проверка селективности и условий эксплуатации

Проверка токовой селективности показывает, что при пуске с УПП ток составляет 343 А, а автоматический выключатель QF1 (125 А, характеристика С) имеет нижний предел отсечки 625 А. Ложное срабатывание исключено. При коротком замыкании внутри УПП предохранители FU1 (тип aR) перегорают быстрее, чем срабатывает QF1. Это защищает тиристоры, а автомат QF1 выполняет функцию резервной защиты. Тепловое реле УПП (класс 20) обеспечит отключение при длительной перегрузке раньше, чем сработает тепловой расцепитель автомата QF1. Последний настроен на больший ток и имеет большую инерцию. Отметим что принцип селективности соблюдается как по току, так и по перегрузке.

Что касается невозможности самозапуска после исчезновения напряжения. Схема управления УПП построена так, что после пропадания и

восстановления питания катушка реле готовности не становится на самоподхват без повторной команды «Пуск». Это полностью соответствует требованиям безопасности.

Защита от обрыва ремня реализуется через функцию контроля недогрузки, встроенную в УПП RS-RM. Она настраивается на минимальный рабочий ток (например, $60\% I_{ном.дв} = 59 \text{ А}$) с выдержкой времени 5 секунд. При обрыве ремня ток падает ниже уставки. УПП отключает двигатель и выдаёт аварийный сигнал [3].

Вся сводная информация по аппаратам защиты и коммутации приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Сводная ведомость выбранных аппаратов

Обозначение	Наименование	Тип, марка	Основные параметры
QF1	Автоматический выключатель	ВА47-125 3Р 125А С	$I_n=125 \text{ А}$, хар-ка С, 10 кА
FU1	Предохранители быстродействующие	ППН-37 (125 А, аR)	3 шт., 125 А, 690 В
QS	Рубильник-переключатель аварийного ввода	РПБ-125/3П	$I_n=125 \text{ А}$, 3 пол., АС-23В
КМ (опционально)	Контактор прямого пуска	КЭАЗ КТ-60115	$I_n=115 \text{ А}$, АС-3, катушка 220 В
КК (опционально)	Тепловое реле	РТЛ-2061	$I_{рег}=95\dots 115 \text{ А}$
Кабель силовой	Кабель силовой медный	ВВГнг(А)-LS 3×35+1×16	Допуст. ток 135 А (в воздухе)
Кабель управления	Кабель управления медный	КВВГнг(А)-LS 7×1,5	Сечение 1,5 мм ²
Кабель интерфейсный	Витая пара экранированная	МКЭШ 2×2×0,5	Modbus RTU

3.5. Экономическое обоснование

Исходные данные и цель проекта.

В настоящее время электропривод фрикционного пресса 1300 тонн реализован по схеме прямого пуска электродвигателя 250М4-В3-55-1500-У2. Проведённое обследование выявило систематические негативные последствия такого режима. Высокие пусковые токи (до 667 А), вызывающие просадки напряжения и ускоренный износ изоляции двигателя. Ударные механические нагрузки на клиноременную передачу и подшипниковые узлы. Повышенный расход ремней и частые внеплановые остановки. Риск ложных срабатываний вводных автоматов и штрафных санкций за ухудшение качества электроэнергии.

Целью проекта является замена прямого пуска на устройство плавного пуска (УПП) «Русэлком RS-RM-55-4» с сохранением аварийной возможности прямого включения. Экономический эффект достигается за счёт увеличения межремонтных интервалов, сокращения простоев и снижения эксплуатационных расходов [13, 14].

Инвестиционные затраты (капитальные вложения).

Состав и стоимость оборудования, материалов и работ по внедрению УПП приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Смета капитальных затрат

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
УПП Русэлком RS-RM-55-4	1 шт.	185 000	185 000
Автоматический выключатель ВА47-125 3Р 125А С	1 шт.	6 500	6 500
Предохранители ППН-37 125А аR	3 шт.	1 800	5 400
Рубильник-переключатель РПБ-125/3П	1 шт.	12 000	12 000
Контактор аварийного прямого пуска КЭАЗ КТ-60115	1 шт.	15 000	15 000
Тепловое реле РТЛ-2061	1 шт.	3 200	3 200
Кабель силовой ВВГнг(А)-LS 3×35+1×16 (20 м)	20 м	950	19 000
Кабель управления, клеммы, метизы, короб	компл.	12 000	12 000
Монтажные и пусконаладочные работы	1 компл.	45 000	45 000
Итого капитальных затрат			303 100

С учётом транспортных расходов и непредвиденных затрат (10 %) принимаем инвестиции в размере **К = 333 000 рублей.**

Эксплуатационные затраты по базовому и проектному вариантам.

Пресс работает в 2 смены (16 часов), 250 рабочих дней в году. Годовой фонд рабочего времени составляет 4000 часов. Количество пусков — в среднем 20 в смену, 10 000 пусков в год.

Сравнение прямых эксплуатационных расходов по основным статьям представлено в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Сравнительные эксплуатационные затраты, руб./год

Статья затрат	Базовый вариант (прямой пуск)	Проектный вариант (с УПП)
Замена клиновых ремней (комплект)	4 замены $\times$ 20 000 руб. = 80 000	2 замены $\times$ 20 000 руб. = 40 000
Ремонт и замена подшипников двигателя	1 раз в 2 года — 30 000 (в год 15 000)	1 раз в 4 года — 30 000 (в год 7 500)
Ремонт обмоток статора (сушка, пропитка, замена)	1 раз в 5 лет — 120 000 (в год 24 000)	1 раз в 10 лет — 120 000 (в год 12 000)
Замена силовых контактов контактора	1 раз в 1,5 года — 8 000 (в год 5 333)	контактор не используется в штатном режиме, аварийный — износ минимален (0)
Обслуживание автоматического выключателя (замена, ревизия)	1 раз в 3 года — 10 000 (в год 3 333)	1 раз в 6 лет — 10 000 (в год 1 667)
Потери электроэнергии в пусковых режимах (доп. нагрев)	$\approx 2\,500 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \times 5 \text{ руб.} = 12\,500$	$\approx 500 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \times 5 \text{ руб.} = 2\,500$
Итого прямых затрат	140 166	63 667

Прямая ежегодная экономия составляет: $140\,166 - 63\,667 = 76\,499$ руб.

Оценка косвенной экономии от сокращения простоев.

Внеплановые простои из-за обрыва ремней или ложных срабатываний защиты при прямом пуске оцениваются статистикой за прошлый год. При базовом варианте зафиксировано 5 внеплановых остановок в год, каждая в среднем по 2 часа — итого 10 часов простоя. По проектному варианту прогнозируется снижение до 1 остановки в год (2 часа простоя).

Чистая прибыль завода от часа работы пресса (выпуск посуды) по данным экономической службы составляет ориентировочно 8 000 руб./час. Дополнительная прибыль от сокращения простоев:

$$\Delta \text{Прибыль} = (10 - 2) \times 8000 = 64\,000 \text{ руб./год.}$$

Суммарный экономический эффект и срок окупаемости.

Годовая экономия с учётом прямых затрат и сокращения простоев:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 76499 + 64000 = 140499 \text{ руб.}$$

Простой срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{год}}} = \frac{333000}{140499} \approx 2,37 \text{ года.}$$

Выводы.

1. Внедрение системы плавного пуска на базе «Русэлком RS-RM-55-4» взамен прямого пуска позволяет ежегодно экономить не менее 140 тыс. рублей. Все это благодаря сокращению расходов на обслуживание механической и электрической части пресса, а также снижения простоев.
2. Срок окупаемости проекта составляет около 2,4 лет.
3. Добились снижения просадок напряжения и улучшение условий труда обслуживающего персонала.
4. Обосновали экономическую эффективность. [9,19]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускной квалификационной работы выполнена разработка и обоснование системы плавного пуска и защиты для асинхронного двигателя 250М4-В3-55-1500-У2, эксплуатируемого на фрикционном прессе 1300 TON FP в ООО «Лысьвенский завод металлоизделий».

На основании анализа текущей схемы управления (прямой пуск) и инструментального обследования оборудования выявлены следующие недостатки: превышение пусковых токов до 690 А (кратность 6,7 $I_{ном}$), просадки напряжения до 9,2 %, повышенный износ ремённой передачи и подшипников из-за ударных нагрузок, а также ограниченные защитные функции теплового реле РТЛ-1000.

Расчёт приведённого момента инерции системы ($J_{сум} = 74,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) и времени разгона (45–55 секунд) показал, что привод относится к категории особо тяжёлых пусковых режимов ($J_{сум}/J_{дв} \approx 34$). Это обусловило требования к УПП: номинальный ток не менее 110 А, перегрузочная способность 350 % $I_{ном}$ в течение 60 секунд, трёхфазное управление, встроенный байпасный контактор.

В результате сравнительного анализа моделей различных производителей выбран УПП Русэлком RS-RM-55-4 (Россия). Устройство полностью соответствует расчётным параметрам: $I_{ном} = 110 \text{ А}$, перегрузка 350 % $I_{ном}$ — 60 с, шесть режимов пуска, встроенные защиты (тепловая модель I^2t , контроль обрыва и чередования фаз, защита от заклинивания, от затянутого пуска), интерфейс Modbus RTU. Выбор отечественного оборудования обеспечивает технологическую независимость и возможность оперативного сервисного обслуживания.

Разработана принципиальная электрическая схема, включающая УПП, автоматический выключатель ВА47-125 с характеристикой С, быстродействующие предохранители ППН-37 (125 А, aR), рубильник-

переключатель РПБ-125/3П для аварийного прямого пуска и резервный контактор КТ-60115. Выполнен расчёт и выбор силового кабеля ВВГнг(А)-LS 3×35+1×16 с допустимым током 135 А.

Экономическая оценка показала, что годовая экономия от внедрения УПП составит не менее 140 500 рублей (прямая экономия — 76 500 руб., сокращение простоев — 64 000 руб.). Срок окупаемости капитальных вложений (333 000 руб.) — 2,4 года. Дополнительный эффект достигается за счёт увеличения ресурса ремней и подшипников, снижения числа аварийных остановов и улучшения качества электроэнергии в цеховой сети.

Рекомендованы следующие настройки УПП для данного привода:

- начальное напряжение — 40–50 % от $U_{ном}$;
- время разгона — 45–55 секунд;
- ограничение тока — 350 % $I_{ном}$;
- режим управления — Torque Control.

Из расчетов мы видим, разработанная система плавного пуска и защиты позволяет повысить надёжность работы двигателя, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить стабильность технологического процесса на участке диффузионной сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2004. – 47 с.
2. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – М.: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
3. ГОСТ Р МЭК 60947-4-2-2017. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-2. Контактторы и пускатели. Устройства плавного пуска. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.
4. Иванов А.А., Петров В.И., Сидоров Н.К. Анализ динамических нагрузок в электроприводах прессов при прямом пуске // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 3. – С. 45–50.
5. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Академия, 2017. – 496 с.
6. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 607 с.
7. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
8. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Академия, 2013. – 368 с.
9. ООО «Русэлком». Устройство плавного пуска RS-RM-55-4. Руководство по эксплуатации. – Чебоксары, 2023. – 45 с. – URL: https://ruselcom.ru/upload/iblock/RS-RM_55_4_manual.pdf (дата обращения: 12.04.2026).
10. ООО «Энерджисейвер». Устройство плавного пуска ES55-110. Технический каталог. – М., 2022. – 28 с.
11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: Энергосервис, 2021. – 784 с.
12. Сидоров В.В., Кузнецов А.Л. Сравнительный анализ способов снижения пусковых токов асинхронных двигателей // Электротехника. – 2016. – № 8. – С. 12–18.
13. Фёдоров А.А., Старкова Л.Е. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2019. – 416 с.

- 14.Шеховцов В.П. Справочник по электрооборудованию и электроснабжению промышленных предприятий. – М.: Форум, 2021. – 352 с.
 - 15.Altistart 48 ATS48C11Q. User manual / Schneider Electric. – 2019. – 84 p. – URL: <https://www.se.com/ww/en/product/ATS48C11Q> (дата обращения: 10.04.2026).
 - 16.Instart SSI-55/110-04. Soft starter. Installation and operation manual. – 2022. – 36 p.
 - 17.Siemens 3RW5534-6HA14. SIRIUS soft starter. Manual. – 2021. – 48 p.
 - 18.Электродвигатель ESQ SDN 250M4-B3-55-1500-Y2. Технический паспорт / ESQ Motor. – 2015. – 12 с.
 - 19.Иванов П.С., Смирнов В.К. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин: учебное пособие для вузов / П.С. Иванов, В.К. Смирнов; под ред. П.С. Иванова. – М.: Машиностроение, 2020. – 280 с.
- Русэлком RS-RM-55-4. Устройство плавного пуска. Руководство по эксплуатации (печатное издание) / ООО «Русэлком». – Чебоксары, 2023. – 45 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Полная таблица характеристик двигателя 250М4-В3-55-1500-У2

1.	Тип изделия - Электродвигатель
2.	Вариант исполнения электродвигателя - общепромышленный
3.	Тип электродвигателя - асинхронный
4.	Напряжение - 380В, 660В
5.	Модель привода - 250М-SDN
6.	Тип крепления - лапы
7.	Серия - SDN
8.	Частота - 50 Гц
9.	Тип тока питания - Переменный
10.	Номинальная мощность - 55 кВт
11.	КПД - 93.0
12.	Нормативный документ - DIN EN 50347:2003
13.	Номинальный ток - 103/59.46 А
14.	Количество полюсов - 4
15.	Количество фаз - 3
16.	Класс нагревостойкости изоляции по IEC 60034-18-21:2012 - F
17.	Степень защиты по IEC 60034-5:2006 - IP55
18.	Вид ротора электропривода - короткозамкнутый
19.	Частота вращения - 1500 об/мин
20.	Конструктивное исполнение по IEC 60034-7:2001 - В3
21.	Отношение максимального момента к номинальному - 2,3
22.	Отношение пускового момента к номинальному - 2,2
23.	Отношение пускового тока к номинальному - 7,2
24.	Диаметр вала электродвигателя - 65 мм
25.	Способ охлаждения по IEC 60034-6:1991 - IC411
26.	Страна производитель - Китай
27.	Вес - 310 кг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технические параметры устройства плавного пуска *Русэлком RS-RM-55-4*

Параметр	Значение
Общие сведения	
Модель	RS-RM-55-4
Производитель	ООО «Русэлком» (Россия)
Назначение	Плавный пуск и останов трёхфазных асинхронных двигателей
Исполнение	Встроенный байпасный контактор
Электрические параметры силовой части	
Номинальное напряжение питания	380–480 В АС (-15% / +10%), 50/60 Гц
Номинальный ток (I_e)	110 А
Рекомендуемая мощность двигателя ($U=400$ В)	55 кВт (нормальный и тяжёлый режимы)
Максимальная мощность двигателя ($U=400$ В, лёгкий режим)	75 кВт
Количество фаз управления	3 фазы (симметричное тиристорное управление)
Коммутируемое напряжение	400 В АС
Частота ШИМ (типовое значение)	Не применяется (фазовое управление тиристорами)
Пусковой ток (настраиваемый)	$0,5 \dots 7 \times I_e$
Перегрузочные характеристики	
Перегрузочная способность (холодное состояние)	350 % I_e — 60 с; 400 % I_e — 30 с
Перегрузочная способность (горячее состояние)	300 % I_e — 30 с
Класс тепловой защиты двигателя	Настраиваемый: 10, 15, 20, 25, 30
Режимы пуска	
Доступные режимы	6 режимов: – Пуск с ограничением тока (Current Limit) – Пуск с линейной рампой напряжения – Пуск с квадратичной рампой напряжения – Пуск с контролем момента (Torque Control) – Толчковый пуск (Kick Start) – Пуск с плавным разгоном до номинальной скорости
Начальное напряжение (рампа)	20...80 % от $U_{ном}$
Время разгона (рампа)	1...60 с (регулируемое)
Толчковый импульс (Kick Start)	Длительность 0,1...2 с, уровень 70...100 % $U_{ном}$
Режимы останова	
Тип останова	Свободный выбег или плавный останов
Время плавного останова	1...60 с (регулируемое)
Конечное напряжение останова	0...40 % $U_{ном}$

Защитные функции	
Защита двигателя	– Электронное тепловое реле (память нагрева) – Защита от обрыва фазы двигателя – Защита от заклинивания ротора – Защита от недогрузки (контроль обрыва ремня/нагрузки) – Защита от затянувшегося пуска (тайм-аут) – Ограничение количества пусков в час
Защита УПП	– Защита от перегрева тириستоров (встроенный датчик температуры радиатора) – Защита от неправильного чередования/обрыва фаз на входе – Защита от пониженного/повышенного напряжения – Защита от короткого замыкания тиристоров
Условия эксплуатации	
Степень защиты оболочки	IP20 (для установки в шкафу)
Климатическое исполнение	УХЛ3.1 (или У2, от -10°C до +40°C)
Допустимая относительная влажность	до 95 % (без конденсации)
Высота над уровнем моря	до 1000 м без снижения номинальных характеристик
Охлаждение	Естественное воздушное (конвекционное)
Рабочее положение	Вертикальное (допускается наклон до 30°)
Механические параметры	
Габаритные размеры (В×Ш×Г)	350 × 240 × 220 мм (ориентировочно, уточняется по каталогу)
Масса	≈ 9,5 кг
Материал корпуса	Сталь с полимерным покрытием
Монтаж	На DIN-рейку или монтажную панель винтами
Соответствие стандартам	
Стандарты	ГОСТ Р МЭК 60947-4-2-2017, ТР ТС 004/2011, ТР ТС 020/2011
ЭМС	Соответствует требованиям по электромагнитной совместимости
Сертификация	Декларация о соответствии ЕАЭС