

Электроснабжение промышленных предприятий

Воронин С.В., Мокринский Е.И.

Интерактивное издание для курса KLM

Учебное пособие · переиздание

Содержание

- Гл. 1. Основы электротехники: ток, напряжение, сопротивление [стр. 1](#)
- Гл. 2. Переменный ток и трёхфазные системы [стр. 5](#)
- Гл. 3. Системы заземления TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT [стр. 10](#)
- Гл. 4. Расчёт электрических нагрузок [стр. 15](#)
- Гл. 5. Выбор сечения проводников [стр. 19](#)
- Гл. 6. Токи короткого замыкания [стр. 23](#)
- Гл. 7. Аппараты защиты и селективность [стр. 27](#)
- Гл. 8. Шинопроводы в системах электроснабжения [стр. 31](#)
- Гл. 9. Пожарная безопасность электроустановок и шинопроводов [стр. 35](#)

Гл. 1. Основы электротехники: ток, напряжение, сопротивление

§1.1. Электрический ток и его параметры

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц (для металлов — свободных электронов) под действием электрического поля. Количественно ток характеризуется силой тока I , измеряемой в амперах (А). Один ампер равен прохождению заряда в один кулон через поперечное сечение проводника за одну секунду.

Источник тока создаёт между своими полюсами разность потенциалов — напряжение U , измеряемое в вольтах (В). Именно напряжение «гонит» заряды по проводнику.

Любой проводник оказывает движению зарядов сопротивление R , измеряемое в омах (Ом). Сопротивление зависит от материала, длины и сечения проводника:

$$R = \rho \cdot L / S$$

где ρ — удельное сопротивление материала (Ом·мм²/м), L — длина (м), S — сечение (мм²). Для меди $\rho \approx 0,0175$, для алюминия $\rho \approx 0,028$.

Понимание этих трёх величин — ток, напряжение, сопротивление — фундамент всей электротехники и основа всех последующих расчётов в этом курсе.

— стр. 1 —

§1.2. Закон Ома

Закон Ома связывает три базовые величины:

$$I = U / R$$

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению. Из этой формулы выводятся ещё две практические формы:

$$\begin{aligned} U &= I \cdot R && \text{(падение напряжения на сопротивлении)} \\ R &= U / I && \text{(определение сопротивления по току и напряжению)} \end{aligned}$$

Пример. К сети 230 В подключён нагреватель сопротивлением 46 Ом. Ток в цепи:
 $I = 230 / 46 = 5$ А.

Закон Ома применим к участку цепи постоянного тока и — в скалярной форме — к участку с чисто активной нагрузкой при переменном токе. Для индуктивной и ёмкостной нагрузки понадобится понятие полного сопротивления (импеданса), к которому мы вернёмся в главе 2.

Этот закон лежит в основе всех расчётов: от выбора сечения провода до проверки чувствительности защит.

§1.3. Мощность и энергия

Электрическая мощность P — скорость передачи или потребления энергии:

$$P = U \cdot I \quad (\text{Вт})$$

Подставляя закон Ома, получаем эквивалентные формы:

$$P = I^2 \cdot R \quad (\text{тепловые потери в проводнике})$$

$$P = U^2 / R \quad (\text{мощность на нагрузке при заданном напряжении})$$

Энергия, потреблённая за время t :

$$W = P \cdot t \quad (\text{в Дж, либо в кВт}\cdot\text{ч в практических расчётах)}$$

Один киловатт-час — энергия, отпущенная мощностью 1 кВт за 1 час; именно в кВт·ч ведётся коммерческий учёт.

Формула $P = I^2 \cdot R$ объясняет, почему ****сечение провода так важно****: при недостаточном сечении сопротивление R растёт, тепловые потери становятся значительными, провод перегревается. Эта же формула — основа выбора шинпровода: чем больше ток, тем больше тепла, и тем массивнее должны быть шины.

§1.4. Единицы измерения и приставки

В электротехнике постоянно используются производные единицы. Запомните основные:

- ампер (А) — ток; килоампер (кА) = 1000 А (применяется при расчёте КЗ);
- вольт (В) — напряжение; киловольт (кВ) = 1000 В (для сетей 6/10/35 кВ);
- ом (Ом) — сопротивление; килоом, мегаом — в электронике;
- ватт (Вт) — мощность; киловатт (кВт) = 10^3 Вт; мегаватт (МВт) = 10^6 Вт;
- вольт-ампер (ВА) — полная мощность переменного тока; кВА, МВА;
- киловатт-час (кВт·ч) — энергия;
- герц (Гц) — частота переменного тока; в РФ стандарт 50 Гц.

При проектировании промышленного объекта инженер постоянно переводит величины: расчётная нагрузка цеха выражается в кВт, ток автоматического выключателя — в А, напряжение питания — в В или кВ, ток КЗ — в кА. Ошибка в порядке величин (например, кА вместо А) ведёт к катастрофическим последствиям, поэтому привычка указывать единицу обязательна.

Контрольные выводы главы 1: ток измеряется в амперах, напряжение — в вольтах, сопротивление — в омах; они связаны законом Ома $I = U/R$; мощность $P = U \cdot I$ и тепловые потери $I^2 \cdot R$ определяют требования к сечению проводников и шинпроводов.

Гл. 2. Переменный ток и трёхфазные системы

§2.1. Переменный ток. Частота 50 Гц

В отличие от постоянного, переменный ток (АС) меняет величину и направление по синусоидальному закону:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

где I_m — амплитуда, f — частота, φ — начальная фаза. В России и Европе принята промышленная частота **$f = 50$ Гц** (в США — 60 Гц). Это значит, что направление тока меняется 100 раз в секунду.

Для расчётов и измерений используют не амплитудные, а действующие (среднеквадратичные) значения:

$$I = I_m / \sqrt{2} \quad U = U_m / \sqrt{2}$$

Когда говорят «в розетке 230 В», имеют в виду именно действующее значение; амплитуда при этом ≈ 325 В.

Преимущества переменного тока, благодаря которым он стал стандартом промышленных сетей:

- 1) лёгкое преобразование напряжения трансформатором (передача на большие расстояния при высоком U и малом I — меньше потери);
- 2) простота асинхронных двигателей;
- 3) удобство отключения при переходе тока через ноль — на этом основана работа автоматических выключателей.

— стр. 5 —

§2.2. Трёхфазная система

Трёхфазная система — три синусоидальных напряжения одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые друг относительно друга на 120° . Её преимущества над однофазной:

- при равной передаваемой мощности требуется меньше меди;
- вращающееся магнитное поле естественно подходит для асинхронных двигателей;
- суммарная мощность во времени постоянна (нет пульсаций).

Различают два напряжения:

- **фазное U_f** — между фазой и нейтралью (L-N);
- **линейное U_l** — между двумя фазами (L-L).

Они связаны соотношением:

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_f \approx 1,732 \cdot U_f$$

Стандартная сеть 0,4 кВ: фазное 230 В, линейное 400 В. Бытовые приборы подключаются на фазное напряжение, мощные двигатели и шинопроводы — на линейное.

Маркировка фаз в РФ: L1 (А, жёлтый), L2 (В, зелёный), L3 (С, красный), N — нейтраль (синий), PE — защитный (жёлто-зелёный).

— стр. 6 —

§2.3. Соединения «звезда» и «треугольник»

Три фазы могут быть соединены двумя способами.

****Звезда (Y)**** — концы трёх обмоток объединены в общую точку (нейтраль), начала выведены на линейные клеммы. Получается четырёхпроводная (или пятипроводная с PE) система. На фазе — $U_{\text{ф}}$, между фазами — $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$. Линейный ток равен фазному: $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

****Треугольник (Δ)**** — обмотки соединены последовательно по кругу, нейтрали нет. Линейное напряжение равно фазному ($U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$), а линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного: $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$.

Шинопроводы KLM рассчитываются по линейным параметрам: ток в шине — это $I_{\text{л}}$, напряжение между шинами — $U_{\text{л}} = 400$ В для сети 0,4 кВ.

Активная мощность трёхфазной нагрузки:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi \quad (\text{Вт})$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \quad (\text{ВА})$$

Здесь $\cos \varphi$ — коэффициент мощности (см. §2.4).

— стр. 7 —

§2.4. Активная, реактивная, полная мощности

При переменном токе нагрузка может быть не только активной (R), но и индуктивной (L) или ёмкостной (C). Индуктивности (двигатели, дроссели) и ёмкости (конденсаторы) обмениваются энергией с сетью, не превращая её в полезную работу.

- ****Активная мощность**** $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ — превращается в тепло, свет, механическую работу. Единица — ватт (Вт).
- ****Реактивная мощность**** $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ — циркулирует между источником и нагрузкой. Единица — вар (вар).
- ****Полная мощность**** $S = U \cdot I$ — геометрическая сумма: $S^2 = P^2 + Q^2$. Единица — вольт-ампер (ВА).

****Коэффициент мощности $\cos \varphi$ **** — отношение активной мощности к полной. У современных двигателей $\cos \varphi \approx 0,85 \dots 0,9$, у разрядных ламп ниже. Низкий $\cos \varphi$

означает, что сеть и шинопровод нагружены большим током, чем требуется для полезной работы. Поэтому на промышленных объектах применяют ****компенсацию реактивной мощности**** (батареи конденсаторов).

Шинопровод выбирается по полному току $I = S / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi)$, а не по активной мощности — это критически важно при $\cos \varphi < 0,9$.

— стр. 8 —

§2.5. Симметричные и несимметричные режимы

Идеальный режим трёхфазной сети — ****симметричный****: токи в трёх фазах равны по величине и сдвинуты на 120° . Тогда сумма мгновенных токов равна нулю, и ток в нейтральном проводе N отсутствует.

В реальной сети 0,4 кВ нагрузка распределена неравномерно: офисы, освещение, бытовые приборы подключаются к разным фазам, и токи различаются. Возникает ****ток нейтрали I_n ****, иногда соизмеримый с фазными токами. Поэтому в современных шинопроводах KLM нейтраль рассчитывается на 100% (а в сетях с высшими гармониками — до 200%) от фазного тока.

При большой несимметрии напряжения на фазах «уплывают»: на загруженной фазе U снижается, на разгруженной — растёт. Это вредит оборудованию и считается нарушением ГОСТ 32144 «Нормы качества электрической энергии».

Контрольные выводы главы 2: трёхфазная сеть 0,4 кВ имеет фазное 230 В и линейное 400 В; мощность считается по полному току с учётом $\cos \varphi$; ток нейтрали в реальной сети не равен нулю — нейтральный проводник шинопровода должен быть полноценным.

— стр. 9 —

Гл. 3. Системы заземления TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT

§3.1. Зачем нужно заземление

Заземление решает три задачи:

- 1) **защитное** — ограничить напряжение прикосновения до безопасного при пробое изоляции на корпус;
- 2) **функциональное** — обеспечить нулевой потенциал для нормальной работы оборудования (АСУ, компьютеры);
- 3) **молниезащитное** — отвести в землю токи молнии и наведённые перенапряжения.

Безопасным для человека считается длительное напряжение прикосновения ≤ 50 В переменного и ≤ 120 В постоянного тока (ГОСТ 12.1.038). При пробое фазы на корпус незаземлённого оборудования весь корпус оказывается под фазным напряжением — это смертельно опасно.

ПУЭ 7-го издания (гл. 1.7) описывает пять основных систем заземления, отличающихся способом соединения нейтрали источника и открытых проводящих частей электроустановки с землёй: **TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT**. Их разбор — содержание этой главы.

— стр. 10 —

§3.2. Система TN-C

В системе **TN-C** функции защитного (PE) и нейтрального (N) проводников совмещены в одном проводнике **PEN** на всём протяжении сети.

Достоинства: простота, экономия меди (4 провода вместо 5).

Недостатки: при обрыве PEN корпус оборудования оказывается под фазным напряжением; невозможно применить УЗО (так как ток в PEN не равен нулю в нормальном режиме).

ПУЭ-7 п. 1.7.132 запрещает применение TN-C во вновь проектируемых жилых, общественных и административных зданиях. Система допустима только в старых промышленных сетях, питающих стационарное оборудование.

В шинопроводах KLM TN-C выполняется как 4-проводный (3L + PEN). Для современных проектов это исполнение не рекомендуется — переходите на TN-S или TN-C-S.

— стр. 11 —

§3.3. Системы TN-S и TN-C-S

****TN-S**** — нейтральный (N) и защитный (PE) проводники разделены на всём протяжении сети, начиная от источника. Это самая безопасная и современная система; рекомендована для всех новых проектов жилых и общественных зданий.

****TN-C-S**** — на участке от источника до главного распределительного щита (ВРУ) идёт совмещённый PEN, а далее N и PE расходятся. Это компромисс между экономичностью TN-C и безопасностью TN-S; широко применяется в РФ.

Точка разделения PEN на N и PE должна быть надёжно заземлена. После разделения ****повторное объединение N и PE категорически запрещено**** (ПУЭ п. 1.7.135) — это превратит часть сети обратно в TN-C со всеми её рисками.

Шинопроводы KLM в исполнении TN-S имеют 5 проводников: L1, L2, L3, N, PE. Сечение PE стандартизовано: при сечении фазы до 16 мм² — равно фазе; от 16 до 35 мм² — 16 мм²; свыше 35 мм² — половина сечения фазы (ПУЭ табл. 1.7.5).

— стр. 12 —

§3.4. Системы TT и IT

****TT**** — нейтраль источника заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземляются на собственный, ****независимый от источника**** заземлитель. Применяется там, где нельзя гарантировать качество PEN-проводника от источника: сельская местность, удалённые объекты, временное электроснабжение строительных площадок.

В TT при пробое на корпус ток замыкания возвращается к источнику через землю; этот ток обычно мал, и автомат не сработает — поэтому в TT обязательно применение УЗО.

****IT**** — нейтраль источника изолирована от земли (или заземлена через большое сопротивление), корпуса электроустановки заземлены. Особенность: первое замыкание фазы на корпус не приводит к опасному току и допускает продолжение работы. Применяется там, где недопустимо мгновенное отключение: операционные больницы, шахты, нефтехимия. Обязательны устройства контроля изоляции.

Сводная таблица применимости:

- TN-S, TN-C-S — современные жилые/общественные/промышленные здания;
- TN-C — старый фонд, только для стационарного оборудования;
- TT — объекты без надёжного PEN от источника;
- IT — где недопустимо отключение при первом замыкании.

— стр. 13 —

§3.5. Заземляющие устройства и СУП

Заземляющее устройство (ЗУ) — совокупность заземлителя (электродов в грунте) и заземляющих проводников. Сопротивление ЗУ нормируется ПУЭ: для

повторного заземления PEN на вводе в здание — не более 30 Ом; для системы молниезащиты — не более 10 Ом; для подстанций — индивидуально по расчёту.

Электроды бывают:

- вертикальные — стальные стержни длиной 2–3 м, забиваемые в грунт;
- горизонтальные — полосы или круглый прокат на глубине 0,5–0,7 м;
- естественные — фундаментные арматурные сетки, металлоконструкции зданий.

****Система уравнивания потенциалов (СУП)**** — соединение всех проводящих частей здания (РЕ-шина ВРУ, металлические трубопроводы, арматура, металлические воздуховоды) с главной заземляющей шиной (ГЗШ). Цель — исключить разность потенциалов между одновременно доступными проводящими поверхностями. Дополнительная СУП обязательна в ванных комнатах, бассейнах, медицинских помещениях.

Контрольные выводы главы 3: для новых объектов применяйте TN-S или TN-C-S; нейтраль и РЕ после разделения объединять нельзя; в шинопроводах KLM используйте 5-проводное исполнение.

Гл. 4. Расчёт электрических нагрузок

§4.1. Установленная и расчётная мощность

****Установленная мощность $P_{уст}$ **** — арифметическая сумма номинальных мощностей всех электроприёмников объекта. На крупном предприятии она может составлять десятки мегаватт, но реально такая мощность одновременно никогда не потребляется: часть оборудования стоит в резерве, часть работает попеременно.

****Расчётная мощность P_r **** — максимальная средняя мощность за наиболее загруженные 30 минут. Именно по ней выбирают трансформаторы, кабели и шинопроводы. P_r всегда меньше $P_{уст}$:

$$P_r = P_{уст} \cdot K_c, \quad \text{где } K_c \in (0; 1] \text{ — коэффициент спроса.}$$

Для типовых производств K_c ориентировочно:

- станочное оборудование — 0,18...0,25;
- сварочные посты — 0,30...0,40;
- офисы и освещение — 0,80...0,95;
- серверные — 0,80...0,90.

Ошибка в выборе K_c ведёт либо к перегрузу шинопровода (K_c занижен), либо к удорожанию проекта (K_c завышен). Поэтому методики расчёта строго регламентированы.

— стр. 15 —

§4.2. Метод коэффициента использования

Для группы из n электроприёмников разной мощности применяют ****метод упорядоченных диаграмм**** (СН 174-75, РТМ 36.18.32.4-92). Расчёт ведётся по средней нагрузке:

$$P_{см} = \sum (P_i \cdot K_{и.i})$$

где $K_{и}$ — коэффициент использования (типовые значения: краны 0,1-0,2; конвейеры 0,5-0,6; насосы 0,7-0,8; печи сопротивления 0,8).

Затем определяется эффективное число приёмников:

$$n_{эф} = (\sum P_i)^2 / \sum (P_i^2)$$

По $n_{эф}$ и средневзвешенному $K_{и.ср}$ по таблицам РТМ находят коэффициент максимума $K_{макс}$, и расчётная активная мощность:

$$P_r = K_{макс} \cdot P_{см}$$

Расчётный ток группы 3-фазных электроприёмников:

$$I_p = P_r / (\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \varphi)$$

Этот ток сравнивается с длительно допустимым током шинпровода или кабеля.

— стр. 16 —

§4.3. Учёт реактивной мощности и пиков

Расчётная реактивная мощность группы:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Полная расчётная мощность:

$$S_p = \sqrt{(P_p^2 + Q_p^2)} = P_p / \cos \varphi$$

Шинпровод выбирается по полному току $I_p = S_p / (\sqrt{3} \cdot U_{л})$. При $\cos \varphi = 0,7$ ток в 1,4 раза выше, чем при чистой активной нагрузке той же P!

****Пиковый ток $I_{пик}$ **** — кратковременный максимум, важен для расчёта потери напряжения при пуске двигателей и для проверки селективности. Для асинхронного двигателя:

$$I_{пуск} \approx (5...7) \cdot I_{ном}$$

Пиковый ток группы определяется как пуск самого крупного двигателя плюс расчётный ток остальной группы. Шинпровод должен выдержать $I_{пик}$ кратковременно (термическая стойкость), а защитный аппарат — не отключиться от него (отстройка по току мгновенного расцепителя).

— стр. 17 —

§4.4. Картограмма нагрузок и центр питания

При проектировании цеха или предприятия строится ****картограмма нагрузок**** — план объекта с обозначением каждой группы потребителей в виде круга, площадь которого пропорциональна расчётной мощности.

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) — точка с координатами:

$$X = \frac{\sum (P_i \cdot X_i)}{\sum P_i}$$
$$Y = \frac{\sum (P_i \cdot Y_i)}{\sum P_i}$$

В районе ЦЭН размещают цеховую трансформаторную подстанцию (ТП). Это минимизирует длину распределительных линий и потери. Когда ТП размещают в ЦЭН, а от неё расходятся магистральные шинпроводы, проект получается оптимальным как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным потерям.

Контрольные выводы главы 4: считайте P_p через коэффициенты K_i и $K_{макс}$, не путайте с $R_{уст}$; шинпровод выбирайте по полному току $S_p/(\sqrt{3} \cdot U_{л})$; проверяйте пиковый ток при пуске двигателей; ТП размещайте в центре нагрузок.

— стр. 18 —

Гл. 5. Выбор сечения проводников

§5.1. Условия выбора сечения

Сечение проводника (кабеля или шины) должно удовлетворять одновременно нескольким условиям:

1. **Нагрев длительным током**: $I_{\text{доп}} \geq I_p / K_p$, где K_p — поправка на условия прокладки (температура, способ прокладки, число параллельных линий). $I_{\text{доп}}$ берётся из таблиц ПУЭ гл. 1.3.
2. **Потеря напряжения**: $\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}$. Для силовых сетей — 5%, для освещения — 2,5%.
3. **Термическая стойкость к токам КЗ**: $S \geq I_k \cdot \sqrt{t_{\text{пр}}} / C$, где $t_{\text{пр}}$ — приведённое время КЗ, C — коэффициент материала (для меди 141, для алюминия 94).
4. **Соответствие защитному аппарату**: $I_{\text{доп}} \geq K_z \cdot I_z$ ($K_z = 1,0$ для автоматов с тепловым расцепителем; см. ПУЭ 3.1.10).
5. **Механическая прочность**: минимальные сечения 1,5 мм² (Cu) для освещения, 2,5 мм² (Cu) для розеток.

Окончательное сечение — наибольшее из полученных по этим пунктам. Игнорировать любое из условий нельзя: например, проводник может выдерживать длительный ток, но не выдержать ток КЗ и сгореть до отключения автомата.

— стр. 19 —

§5.2. Расчёт по нагреву

Длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ нормируется ПУЭ гл. 1.3 для разных условий прокладки. Базовое значение даётся для воздушной прокладки при +25 °С для одиночного кабеля. Для других условий применяют **поправочные коэффициенты**:

- температура среды (K_t): при +30 °С — 0,94; при +40 °С — 0,82;
- число параллельно проложенных кабелей (K_n): 2 кабеля — 0,85; 6 кабелей — 0,60;
- прокладка в трубе или коробе ($K_{\text{тр}}$): 0,85...0,90.

Итоговый коэффициент $K_p = K_t \cdot K_n \cdot K_{\text{тр}}$. Допустимый ток в реальных условиях:

$$I_{\text{доп.факт}} = I_{\text{доп.табл}} \cdot K_p$$

Условие выбора: $I_{\text{доп.факт}} \geq I_p$.

Пример. Расчётный ток $I_p = 200$ А; прокладка 4 кабелей в одной трубе при +30 °С. $K_p = 0,94 \cdot 0,80 \cdot 0,85 = 0,64$. Тогда $I_{\text{доп.табл}} \geq 200 / 0,64 = 313$ А. Подбираем кабель ВВГнг(А)-LS 4×95 ($I_{\text{доп}} = 320$ А) — подходит.

Для шинопровода KLM $I_{\text{доп}}$ указан в каталоге уже с учётом стандартных условий +35 °С; пересчёт по температуре делается по графикам производителя.

§5.3. Расчёт по потере напряжения

Потеря напряжения в трёхфазной линии:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi)$$

где L — длина линии (км), R_0 и X_0 — погонные активное и реактивное сопротивления (Ом/км). Для меди $R_0 \approx 18,5/S$, для алюминия $R_0 \approx 30/S$ (S — сечение в мм²).

В процентах от номинального напряжения:

$$\Delta U\% = (\Delta U / U_{ном}) \cdot 100\%$$

Нормы (ПУЭ, ГОСТ 32144):

- в нормальном режиме — не более 5% для силовых сетей и 2,5% для освещения;
- в аварийных и пусковых режимах — до 10%.

При недостаточном сечении $\Delta U\%$ превышает норму, особенно на длинных магистралях. Решения: увеличить сечение, разбить магистраль на участки, перенести ТП ближе к нагрузке. Шинопровод KLM имеет в 2–3 раза меньшее R_0 по сравнению с эквивалентным кабелем, поэтому на длинных стояках жилых зданий он часто оказывается выгоднее по ΔU .

§5.4. Сравнение меди и алюминия

Медь и алюминий — два основных материала для проводников силовых сетей.

****Медь****: $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м, плотность 8,9 г/см³, $\sigma = 200$ МПа.

- + высокая проводимость, малое сечение;
- + надёжный контакт, не «течёт» под нагрузкой;
- + механически прочнее.
- дороже в 3–4 раза;
- тяжелее.

****Алюминий****: $\rho = 0,028$ Ом·мм²/м, плотность 2,7 г/см³, $\sigma = 80$ МПа.

- + дешевле и легче;
- + при больших токах эффективнее по стоимости (шины алюминиевые);
- образует диэлектрическую плёнку Al_2O_3 — особые требования к контактам;
- «течёт» под давлением — нужна периодическая протяжка;
- ПУЭ запрещает алюминий сечением менее 16 мм² для стационарной электропроводки в зданиях (п. 7.1.34).

В шинопроводах KLM применяются оба материала: для распределительных шинопроводов 25–250 А — медь; для магистральных 400–6300 А — медь или алюминий по выбору заказчика. Алюминий при равной мощности тяжелее по сечению, но легче по массе и экономически выгоднее на больших токах.

Контрольные выводы главы 5: проверяйте сечение по 5 условиям; не забывайте поправки на температуру и число линий; при выборе материала учитывайте не только цену, но и эксплуатационные требования.

Гл. 6. Токи короткого замыкания

§6.1. Природа короткого замыкания

****Короткое замыкание (КЗ)**** — соединение точек цепи с разными потенциалами через сопротивление, существенно меньшее нормального. Виды КЗ в трёхфазных сетях:

- трёхфазное ($K^{(3)}$) — все три фазы замкнуты между собой; даёт наибольший ток;
- двухфазное ($K^{(2)}$) — две фазы; ток $\approx 0,87 \cdot I_{K^{(3)}}$;
- однофазное на землю ($K^{(1)}$) — фаза на PE/PEN; в системе TN — основной вид аварии;
- двойное замыкание на землю ($K^{(1,1)}$) — в системах IT.

Опасности тока КЗ:

1. ****Тепловое действие****: при КЗ проводник за доли секунды нагревается до сотен градусов, возможно расплавление и пожар.
2. ****Электродинамическое действие****: параллельные шины с противоположно направленными токами отталкиваются с силой $F \propto I^2$; при больших токах шины могут быть деформированы или вырваны из креплений.
3. ****Снижение напряжения**** в смежных участках сети, нарушение работы потребителей.

Расчёт токов КЗ выполняется на стадии проектирования по ГОСТ 28249-93. Расчётные точки: на шинах ТП, в начале каждой магистрали, у самых удалённых потребителей.

— стр. 23 —

§6.2. Расчёт тока трёхфазного КЗ

Ток трёхфазного КЗ в сети 0,4 кВ:

$$I_{K^{(3)}} = U_{л} / (\sqrt{3} \cdot Z_{к})$$

где $Z_{к}$ — суммарное полное сопротивление цепи КЗ от источника до точки замыкания:

$$Z_{к} = \sqrt{((R_{т} + R_{л})^2 + (X_{т} + X_{л})^2)}$$

$R_{т}$, $X_{т}$ — сопротивления трансформатора (берутся из паспорта); $R_{л}$, $X_{л}$ — линий (кабелей, шинопроводов) от ТП до точки КЗ.

Пример. Трансформатор 1000 кВА, 10/0,4 кВ, $u_{к} = 5,5\%$. Его приведённое сопротивление:

$$Z_{т} = u_{к} \cdot U_{л}^2 / S_{т} = 0,055 \cdot 400^2 / 1000 = 8,8 \text{ мОм}$$

Если сопротивление линии пренебрежимо мало (КЗ прямо на шинах ТП), то:

$$I_{K^{(3)}} = 400 / (\sqrt{3} \cdot 0,0088) = 26 \text{ 200 А} = 26,2 \text{ кА.}$$

Это значение определяет требования к отключающей способности автоматов и к электродинамической стойкости шинопровода. Например, для шинопровода KLM-1000 декларированная стойкость $I_{sw} = 50$ кА (1 с), $I_{pk} = 105$ кА — он выдерживает данное КЗ с запасом.

— стр. 24 —

§6.3. Ударный ток и термическая стойкость

В первый период КЗ ток несимметричен из-за апериодической составляющей.
****Ударный ток****:

$$i_{уд} = K_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_k^{(3)}$$

Ударный коэффициент $K_{уд} = 1,8$ для сетей с большой долей реактивности; $K_{уд} = 1,0 \dots 1,3$ для удалённых КЗ. При $I_k = 26,2$ кА получаем $i_{уд} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 26,2 \approx 67$ кА — это пиковое значение, на которое рассчитывается электродинамическая стойкость шин.

****Термическая стойкость**** проводника к КЗ:

$$I_{т.доп} = (C \cdot S) / \sqrt{t_{пр}}$$

где S — сечение (мм^2), $t_{пр}$ — приведённое время КЗ (с), C — материальный коэффициент: 141 для меди, 94 для алюминия. Условие: $I_{т.доп} \geq I_k^{(3)}$.

Пример. Кабель меди 95 мм^2 , время отключения автоматом $t_{пр} = 0,1$ с. $I_{т.доп} = 141 \cdot 95 / \sqrt{0,1} = 42\,400 \text{ А} \approx 42,4$ кА. Если $I_k = 26,2$ кА — сечение по термической стойкости проходит. Если бы I_k было 50 кА — кабель не выдержал бы, потребовалось бы сечение $\geq 113 \text{ мм}^2$.

— стр. 25 —

§6.4. Однофазное КЗ и петля «фаза-ноль»

В системе TN однофазное КЗ — самый частый вид аварии. Ток рассчитывается через ****сопротивление петли «фаза-ноль»****:

$$I_k^{(1)} = U_{ф} / (Z_{т.ф} + Z_{п})$$

где $Z_{т.ф}$ — сопротивление трансформатора при однофазном КЗ ($\approx Z_{т}/3$ для типовых трансформаторов схемы Д/Ун), $Z_{п}$ — полное сопротивление петли «фаза-нейтраль» от ТП до точки КЗ (включает фазный и нейтральный провода).

Условие чувствительности защиты (ПУЭ п. 1.7.79): автомат должен надёжно сработать при однофазном КЗ в самой удалённой точке защищаемой линии. Кратность тока КЗ к току уставки расцепителя:

$$I_k^{(1)} / I_{н.расц} \geq 3 \text{ (для автоматов с обратозависимой характеристикой)}$$
$$I_k^{(1)} / I_{н.расц} \geq 1,1 \text{ (для автоматов с электромагнитным расцепителем)}$$

Для распределительных шинопроводов KLM сопротивление петли указано в каталоге (для 100 А: $\approx 1,2 \text{ мОм/м}$), что позволяет быстро проверить чувствительность защиты на любой длине стояка.

Контрольные выводы главы 6: рассчитывайте $I_k^{(3)}$ и $I_k^{(1)}$ для всех расчётных точек; проверяйте отключающую способность автомата, термическую и электродинамическую стойкость кабеля/шинопровода; проверяйте чувствительность защиты к однофазному КЗ в самой удалённой точке.

Гл. 7. Аппараты защиты и селективность

§7.1. Автоматические выключатели

Автоматический выключатель (АВ) — главный аппарат защиты сетей до 1 кВ. Выполняет функции: коммутация в нормальном режиме, защита от перегрузки и КЗ.

Основные характеристики АВ:

- **I_n** — номинальный ток (16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000, 6300 А);
- **U_n** — номинальное напряжение (230/400 В для 0,4 кВ);
- **I_{cu} / I_{cs}** — отключающая способность (предельная и эксплуатационная), кА;
- **тип расцепителя** — тепловой (защита от перегрузки) и электромагнитный (защита от КЗ);
- **характеристика мгновенного расцепителя** — В (3-5· I_n), С (5-10· I_n), D (10-20· I_n).

Выбор характеристики:

- В — освещение, длинные линии с малыми I_k (квартирные щиты);
- С — универсальная, розеточные группы, общественные здания;
- D — двигатели, трансформаторы, конденсаторы (большие пусковые токи).

Селективность по току обеспечивается выбором уставок: автомат вышестоящий должен срабатывать при больших I_k , чем нижестоящий.

— стр. 27 —

§7.2. УЗО и дифференциальные автоматы

УЗО (устройство защитного отключения) реагирует на **дифференциальный ток** — разницу между током, ушедшим в нагрузку по фазе, и вернувшемся по нейтрали. В нормальном режиме эта разница равна нулю; при утечке (например, через тело человека) — отлична от нуля.

Уставки $I_{\Delta n}$:

- 10 мА, 30 мА — защита человека (обязательно для розеточных групп санузлов, кухонь, наружных розеток — ПУЭ п. 7.1.71);
- 100, 300 мА — противопожарная защита (на вводе);
- 500 мА — защита оборудования.

Типы по форме дифтока:

- АС — синусоидальный (бытовые приборы);
- А — синусоидальный + пульсирующий постоянный (стиральные машины с инверторами);
- В — все формы, включая постоянный (солнечные инверторы, частотники).

****Дифавтомат**** = автомат + УЗО в одном корпусе. Удобен для квартирной разводки.

УЗО ****не работает в системе TN-C**** (нет отдельного N) и крайне ограниченно работает в TT без дополнительных мер. В TN-S и TN-C-S — стандартное решение защиты человека.

— стр. 28 —

§7.3. Принцип селективности

****Селективность**** — свойство защиты отключать только повреждённый участок, не затрагивая исправные. На многоуровневой схеме (вводной автомат → магистральный → групповой) при КЗ в розетке должен сработать только групповой автомат, а вводной остаться включённым.

Виды селективности:

1. ****Токовая**** — уставки мгновенного расцепителя нижестоящего меньше, чем у вышестоящего; обеспечивает селективность для удалённых КЗ, но не для КЗ возле вышестоящего автомата;
2. ****Временная**** — задержка срабатывания вышестоящего на 0,1–0,3 с; гарантирует полную селективность;
3. ****Энергетическая (зональная)**** — для современных АВ с микропроцессорными расцепителями, по принципу «нет блокирующего сигнала снизу — сработай через Δt ».

Для распределительной системы KLM с шинопроводом и групповыми отводами оптимальна ****временная или комбинированная (токово-временная)**** селективность: вводной автомат с задержкой 0,2 с, групповые автоматы — мгновенные.

Селективность критична для жилых стояков: КЗ в одной квартире не должно отключать весь подъезд. Это техническое требование, проверяемое при пусконаладке.

— стр. 29 —

§7.4. Согласование защиты с проводником

Защитный аппарат должен ****защитить проводник**** от перегрузки и КЗ. Базовое условие согласования (ПУЭ п. 3.1.10):

$$I_p \leq I_z \leq I_{доп}$$

где I_p — расчётный ток нагрузки; I_z — ток уставки расцепителя; $I_{доп}$ — длительно допустимый ток проводника.

Для защиты от перегрева при перегрузке проверяется второе условие:

$$I_z \leq 1,45 \cdot I_{доп}$$

где I_2 — ток гарантированного срабатывания за условное время (для тепловых расцепителей АВ — $1,45 \cdot I_n$).

Пример. Шинопровод KLM-160 А ($I_{доп} = 160$ А) защищается автоматом 160 А (тепловой расцепитель). $I_2 = 1,45 \cdot 160 = 232$ А $\leq 1,45 \cdot 160 = 232$ А ✓. Расчётный ток проекта 140 А; $140 \leq 160 \leq 160$ ✓. Защита согласована.

Контрольные выводы главы 7: характеристика В/С/D подбирается под нагрузку; УЗО обязательно для защиты людей в сетях TN-S; селективность строится временной задержкой; защитный аппарат должен защитить именно проводник, а не «вообще нагрузку».

Гл. 8. Шинопроводы в системах электроснабжения

§8.1. Что такое шинопровод

Шинопровод — заводской комплект из медных или алюминиевых шин в защитном корпусе, соединяемых стандартными секциями. По существу, шинопровод заменяет силовые кабели, делая распределение электроэнергии модульным и переконфигурируемым.

Классификация:

- **магистральные** (Busbar Trunking, 400–6300 А) — для передачи мощности от ТП к распределительным щитам или этажам;
- **распределительные** (Busway, 25–630 А) — для подключения групп потребителей через отводные коробки в любой точке трассы;
- **осветительные** (Lighting Trunking, 25–63 А) — для подвода питания к ряду светильников;
- **троллейные** — для подвижных потребителей (краны).

В отличие от кабельной разводки, шинопровод позволяет **в любой момент** изменить расположение потребителей: достаточно переставить отводную коробку. Это критически важно для современных производств, где компоновка цеха часто меняется.

Шинопроводы KLM производятся по ГОСТ Р МЭК 61439-6 и ГОСТ 32395, имеют сертификаты ТР ТС 004/011, испытания на КЗ до 150 кА (I_{pk}).

— стр. 31 —

§8.2. Конструкция шинопровода KLM

Типовая прямая секция распределительного шинопровода KLM:

- **корпус** — алюминиевый профиль, степень защиты IP54 (стандарт), IP55/IP65 (опция);
- **шины** — медь или алюминий, прямоугольного сечения, изолированные плёнкой полиэтилентерефталата (Mylar);
- **число шин** — 4 (3L+PEN, TN-C) или 5 (3L+N+PE, TN-S); опция «двойной N» (3L+2N+PE) для сетей с высшими гармониками;
- **отводные окна** — каждые 0,5 или 1 м, закрыты крышками;
- **длина секции** — 1, 2, 3 м (стандарт).

Соединение секций — фланцевое, моментным болтом с цветовой индикацией затяжки. Соединение электрически сертифицируется на температурный режим IEC 61439-6.

Дополнительные элементы:

- угловые секции (плоские, рёбром, торцевые);

- Т- и крестовые секции;
- температурные компенсаторы (для трасс длиннее 60 м);
- концевые заглушки;
- фланцевые выводы для подключения кабелей к щитам.

Отводные коробки (plug-in units) с автоматами — главное преимущество системы. Их можно вставлять и снимать ****под напряжением**** (опция «hot swar») благодаря шторкам безопасности и блокировке.

— стр. 32 —

§8.3. Шинопровод против кабеля

Сравнительный анализ для магистрали 1000 А, длина 50 м, в условиях современного промышленного объекта.

****Кабель (4× ВВГнг(А)-LS 3×240+1×120)****

- + низкая стартовая стоимость материала;
- + знакомая технология монтажа.
- большое число параллельных кабелей, прокладка трудоёмка;
- перекомпоновка нагрузок невозможна без перепрокладки;
- потери активной мощности выше из-за поверхностного эффекта;
- пожарная нагрузка: горючая изоляция;
- отсутствие единой системы заземления экранов.

****Шинопровод KLM-1000****

- + унифицированные секции, монтаж в 4–6 раз быстрее;
- + любая точка трассы — потенциальная точка отбора через plug-in;
- + меньшие потери ($R_0 \approx 0,03$ мОм/м у меди 1000 А);
- + IP54, металлический корпус — низкая пожарная опасность;
- + 5-проводное исполнение с непрерывным РЕ-контуром.
- выше стартовая стоимость;
- требует точного проектирования трассы.

ТСО (стоимость владения за 25 лет с учётом потерь, монтажа, ремонтпригодности) для шинопровода обычно ниже на 15–30%. Для решения практических задач выбора — см. инструмент «Кабель vs шинопровод» в knowledge KLM.

— стр. 33 —

§8.4. Монтаж и эксплуатация

Требования к монтажу шинопроводов KLM (выдержки из инструкции производителя и СП 76.13330):

- шаг подвесов: горизонтально — не более 2 м, вертикально — не более 4 м;
- температурные компенсаторы — каждые 60 м прямой трассы или при пересечении деформационных швов здания;

- затяжка соединительных болтов — динамометрическим ключом до момента, указанного в паспорте секции (обычно 70 Н·м для 1000 А, 90 Н·м для 2000 А);
- после монтажа — измерение сопротивления изоляции мегомметром 1000 В, ≥ 20 МОм;
- прозвонка РЕ-контура между всеми секциями.

Эксплуатация:

- визуальный осмотр — раз в 6 месяцев;
- тепловизионное обследование соединений — раз в год (выявляет ослабленные контакты до отказа);
- протяжка болтовых соединений — через 1 год после ввода и далее по графику.

Plug-in коробки разрешено снимать/устанавливать только при выполнении блокировки безопасности; для версии «hot swap» — по специальной процедуре с применением СИЗ.

Контрольные выводы главы 8: шинопровод — современная альтернатива кабельным магистралям; KLM производит линейку 25–6300 А; выбор делается по полному току, ТСО и условиям эксплуатации; качественный монтаж и регулярное ТО — обязательны.

Гл. 9. Пожарная безопасность электроустановок и шинопроводов

§9.1. Пожарная безопасность электроустановок: законодательная рамка

Электрооборудование стабильно входит в первую тройку причин пожаров в зданиях по статистике МЧС России (порядка 25–30% возгораний ежегодно). Поэтому при проектировании любой электроустановки — и особенно магистральных шинопроводов, питающих критические потребители, — выполнение требований пожарной безопасности (ПБ) рассматривается наравне с требованиями ПУЭ.

Базовый документ — Федеральный закон №123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Для электротехника принципиальны три статьи:

- ст. 82 — требования ПБ к электроустановкам зданий и сооружений (противопожарные УЗО, защита от перегрузок, выбор изоляции);
- ст. 137 — требования ПБ к местам пересечения кабельными линиями и шинопроводами противопожарных преград (кабельные проходки);
- ст. 143 — требования к огнестойкости кабельных линий, питающих системы противопожарной защиты, дымоудаления, лифты для пожарных, аварийное и эвакуационное освещение.

Из №123-ФЗ напрямую следует: для систем, обязанных работать во время пожара, нельзя применять обычные электропроводки и шинопроводы — только в огнестойком исполнении с подтверждённым пределом E30...E120, и каждая проходка через противопожарную преграду должна быть заделана сертифицированным материалом с пределом EI не ниже предела огнестойкости пересекаемой конструкции.

— стр. 35 —

§9.2. Огнестойкость шинопроводов: пределы E30...E120

Предел огнестойкости электротехнического изделия — это время в минутах, в течение которого оно сохраняет свою функцию при стандартном температурном режиме пожара по ГОСТ 30247.0-94 (≈ 1000 °C к 90-й минуте). Для электропроводок и шинопроводов используется обозначение «E» (от англ. Electric — электрическая функция):

E30, E45, E60, E90, E120, E180

Подтверждение огнестойкости проводят двумя группами испытаний:

- ГОСТ Р 53316-2021 — испытание целой кабельной/шинопроводной линии в печи, под рабочим током и под нагрузкой, с фиксацией момента потери функции. Это основной стандарт, с которым работают на объекте.
- ГОСТ IEC 60331-1/2/3-2011 — испытание самого кабеля без линии: открытое пламя 750–830 °С, контроль целостности цепи. Это «материаловедческий» стандарт, нужный кабельным заводам.

Где в РФ обязательно применять огнестойкое исполнение (по СП 6.13130.2021):

- системы пожарной сигнализации и оповещения (СОУЭ);
- системы дымоудаления и подпора воздуха;
- лифты для пожарных подразделений (ГОСТ Р 53296-2009);
- аварийное и эвакуационное освещение;
- установки автоматического пожаротушения;
- питание противодымных и противопожарных задвижек, клапанов.

Типовой выбор предела:

- малоэтажные здания — E30;
- здания нормальной этажности — E60;
- высотные и уникальные объекты — E90 или E120.

В линейке шинопроводов KLM-S огнестойкое исполнение реализовано через дополнительный теплозащитный кожух, термостойкую изоляцию шин и сертифицированные соединительные элементы, рассчитанные на сохранение геометрии при +1000 °С.

— стр. 36 —

§9.3. Кабельные и шинопроводные проходки: предел EI

Кабельная (шинопроводная) проходка — это место пересечения линией ограждающей строительной конструкции: стены, перекрытия, противопожарной преграды. С точки зрения нормативов проходка является самостоятельным объектом пожарной защиты и требует отдельной сертификации.

Предел огнестойкости проходки обозначается двумя буквами и временем:

- E — целостность (отсутствие сквозных отверстий и трещин, через которые проходит пламя);
- I — теплоизолирующая способность (нагрев необогреваемой стороны не выше +140 °С среднего и +180 °С локального).

Стандартный ряд: EI 30, EI 45, EI 60, EI 90, EI 120, EI 150, EI 180.

Главное правило — установлено ст. 137 №123-ФЗ и СП 2.13130.2020:

Предел огнестойкости проходки должен быть не ниже предела огнестойкости пересекаемой конструкции.

То есть если стена имеет REI 90, заделка проходки обязана быть EI 90 и выше — иначе огонь и горячие газы пройдут через незаделанное отверстие, и

противопожарная преграда теряет смысл.

Методика испытаний проходок — ГОСТ Р 53310-2009 «Проходки кабельные, вводы герметичные и проходные коробки. Методы испытаний на огнестойкость». Параллельно действуют ПУЭ (пп. 2.1.58 — для зданий, 2.3.83 — для кабельных сооружений, 7.1.38 — для жилых и общественных зданий).

Сертифицированные материалы заделки:

- терморасширяющиеся подушки (PROMASTOP-FB, ОГРАКС-ПП, КП-1);
- огнестойкие мастики и герметики (Hilti CP 606, ОГРАКС-Л, CP 611A);
- огнестойкие монтажные пены (Hilti CP 660, Soudal Soudafoam FR);
- огнестойкие минераловатные плиты с покрытием (PROMASTOP-CC, CP 670);
- огнестойкие манжеты для пластиковых труб и кабелей (CP 643N, CP 644).

Категорически не допускается заделка обычной монтажной пеной — она горюча, EI ≈ 0.

— стр. 37 —

§9.4. Сводный реестр нормативов и порядок документирования

Действующая нормативная база по ПБ электроустановок и шинопроводов:

ФЗ:

- №123-ФЗ от 22.07.2008 — Тех. регламент о требованиях ПБ (ст. 82, 137, 143).

ГОСТ:

- ГОСТ Р 53310-2009 — методы испытаний проходок на огнестойкость;
- ГОСТ Р 53316-2021 — кабельные линии, сохранение работоспособности при пожаре;
- ГОСТ IEC 60331-1/2/3-2011 — целостность цепи кабелей под огнём;
- ГОСТ IEC 60332-1, -2, -3 — нераспространение горения;
- ГОСТ 30247.0-94 / 30247.1-94 — общие методы испытаний строительных конструкций на огнестойкость;
- ГОСТ Р 53296-2009 — лифты для пожарных подразделений;
- ГОСТ Р 50571.5.52-2011 (МЭК 60364-5-52) — электропроводки.

Своды Правил серии 13130 (МЧС России):

- СП 6.13130.2021 — Электрооборудование. Требования ПБ (заменяет СП 6.13130.2013);
- СП 2.13130.2020 — Обеспечение огнестойкости объектов защиты;
- СП 4.13130.2013 — Ограничение распространения пожара;
- СП 5.13130.2009 — Установки пожарной сигнализации и пожаротушения;
- СП 7.13130.2013 — Отопление, вентиляция, кондиционирование. ПБ.

СП по электроустановкам зданий:

- СП 256.1325800.2016, разд. 15 — пожарная безопасность электроустановок жилых и общественных зданий.

СНиП (актуализированные в виде СП):

- СНиП 21-01-97* — Пожарная безопасность зданий и сооружений (актуализирован в СП 112.13330.2011);
- СНиП 3.05.06-85 — Электротехнические устройства (актуализирован в СП 76.13330.2016).

ПУЭ, 7-е изд.:

- п. 2.1.58 — заделка кабельных проходок через стены и перекрытия;
- п. 2.3.83 — кабельные сооружения, проходки;
- п. 7.1.38 — проходки в жилых и общественных зданиях.

НПБ:

- НПБ 242-97 — классификация и методы определения пожарной опасности кабельных изделий (нг-LS, нг-HF, нг-FRLS).

Документы, которые формирует монтажная организация на каждую проходку:

1. Сертификат ПБ на материал заделки или на сам комплект для огнестойкой проходки (например, KLM-S FB).
2. Акт скрытых работ — подписывается до зашивки фальш-стеной/потолком.
3. Исполнительная схема с привязкой проходок.
4. Маркировочная табличка у проходки: номер, EI, материал, дата, исполнитель (СП 6.13130.2021, п. 16.4).

Контрольные выводы главы 9: пожарная безопасность шинопровода складывается из двух самостоятельных задач — огнестойкость самого изделия (Е-предел по ГОСТ Р 53316) и огнестойкость каждой проходки через противопожарную преграду (EI по ГОСТ Р 53310). Обе задачи документируются актами скрытых работ и подтверждаются сертификатами; ссылка в проектной документации делается на №123-ФЗ, СП 6.13130.2021, СП 2.13130.2020 и соответствующие пункты ПУЭ.