

# Цена сечения: почему инженер, выбирающий кабель «по нагреву», тратит деньги заказчика

Статья для сайта «Школа для электрика» - <https://electricalschool.info/>

Есть в проектной практике инженерный рефлекс, воспроизводящийся из поколения в поколение: выбрать сечение кабеля по допустимому длительному току из таблицы ПУЭ — и на этом остановиться. Результат укладывается в норматив, автомат защиты не сработает, изоляция не расплавится. Всё правильно. Всё — и неправильно одновременно.

Потому что задача проектировщика не «выбрать кабель, который не сгорит», а «выбрать кабель, который обходится заказчику дешевле всего за весь срок службы». Это принципиально разные задачи. Для первой достаточно таблицы ПУЭ 1.3.5. Для второй нужна ещё одна таблица — 1.3.36 — и понимание того, почему кабель стоит дешевле, когда он дороже.

## Откуда взялась «экономическая плотность тока»

Метод экономической плотности тока появился не в последнем издании ПУЭ. Он был разработан в советской инженерной школе ещё в 1950–60-е годы и с тех пор принципиально не изменился — изменились лишь нормированные значения в таблице 1.3.36 при очередных редакциях ПУЭ. Сама идея метода, однако, значительно старше и восходит к работам по оптимизации электрических сетей, где ещё в начале XX века было показано: выбор сечения — это задача минимизации суммарных затрат, а не только задача теплового расчёта.

Экономическая логика метода прозрачна. Стоимость линии растёт со сечением практически линейно — большее сечение означает больший расход металла, а стоимость

кабеля определяется преимущественно ценой меди или алюминия в жилах. Стоимость потерь электроэнергии, напротив, убывает с ростом сечения по гиперболе — ведь активное сопротивление жилы обратно пропорционально сечению:  $r_0 = \rho/S$ , а потери мощности  $\Delta P = 3I^2 r_0 l$  убывают при росте  $S$  столь же быстро. Сложите две зависимости — убывающую гиперболу и восходящую прямую — и получите U-образную кривую суммарных приведённых затрат с отчётливым минимумом. Этот минимум и есть экономически оптимальное сечение, которое ПУЭ нормирует через экономическую плотность тока  $j_{\text{эк}}$ .

Почему именно «плотность тока», а не само сечение? Потому что оптимальное сечение зависит от тока в линии. Зная ток и разделив его на  $j_{\text{эк}}$ , получаем оптимальное сечение немедленно, без построения кривых и поиска минимума.  $j_{\text{эк}}$  — это просто удобная нормированная величина, упаковывающая в одно число результат оптимизационного расчёта для конкретного сочетания экономических условий.

### **Таблица 1.3.36: что за ней стоит**

Значения  $j_{\text{эк}}$  в таблице ПУЭ дифференцированы по двум параметрам: типу проводника и числу часов использования максимума нагрузки в год  $T_{\text{max}}$ . Оба параметра физически осмыслены.

Тип проводника определяет удельное сопротивление материала — а значит, потери при заданном токе. Для медных жил потери на 68% ниже, чем для алюминиевых, поэтому «экономика» не требует столь агрессивного увеличения сечения при переходе от алюминия к меди. Отсюда  $j_{\text{эк}}$  для меди примерно вдвое выше, чем для алюминия при тех же условиях — 2,5 против 1,4 А/мм<sup>2</sup> для кабелей с СПЭ изоляцией при  $T_{\text{max}}$  3000–5000 ч/год.

Число часов использования максимума  $T_{\text{max}}$  — это не просто ежегодный режим работы; это индикатор того, сколько электроэнергии «перекачает» линия за год и сколько на ней накопится потерь. Непрерывное производство с  $T_{\text{max}} = 7000$  ч/год накапливает в линии вдвое больше потерь, чем производство с двумя сменами и  $T_{\text{max}} = 3500$  ч/год. Поэтому для непрерывных производств оптимальное сечение выше — и  $j_{\text{эк}}$  ниже. При  $T_{\text{max}} > 5000$  ч/год для алюминиевых кабелей  $j_{\text{эк}} = 1,2$  А/мм<sup>2</sup>; при  $T_{\text{max}} < 3000$  ч/год — уже 1,6

А/мм<sup>2</sup>. Разница в 33% по  $j_{\text{эк}}$  означает разницу в 33% по экономически оправданному сечению.

### **Цифры, которые меняют проектное решение**

Абстрактные рассуждения о «минимуме суммарных затрат» убеждают значительно хуже, чем конкретные числа. Возьмём реальную задачу: питающий кабель ААБ 10 кВ от ГПП до цеховой ТП, расчётный ток 95 А, длина линии 600 м,  $T_{\text{max}} = 5500$  ч/год — типичные параметры для среднего машиностроительного завода, работающего в три смены.

По условию допустимого нагрева из ПУЭ таблица 1.3.7 (кабель в земле, алюминиевые жилы): минимально необходимое сечение — **35 мм<sup>2</sup>** (допустимый длительный ток 115 А при нормативных условиях прокладки). Условие выполнено с запасом 21%.

По экономической плотности тока при  $j_{\text{эк}} = 1,2$  А/мм<sup>2</sup>:

$$S_{\text{эк}} = I_p / j_{\text{эк}} = 95 / 1,2 = 79,2 \text{ мм}^2$$

Округление до ближайшего стандартного сечения — **95 мм<sup>2</sup>**.

Теперь подсчитаем, что скрывается за этой разницей в сечении. Активное сопротивление жилы кабеля ААБ: для 35 мм<sup>2</sup> —  $r_0 = 0,868$  Ом/км, для 95 мм<sup>2</sup> —  $r_0 = 0,306$  Ом/км. Потери активной мощности в трёхфазной линии:

$$\Delta P = 3I^2 r_0 l$$

Для 35 мм<sup>2</sup>:

$$3 \times 95^2 \times 0,868 \times 0,6 = 14,1 \text{ кВт.}$$

Для 95 мм<sup>2</sup>:

$$3 \times 95^2 \times 0,306 \times 0,6 = 5,0 \text{ кВт.}$$

Годовые потери при  $T_{\text{max}} = 5500$  ч/год: **77 554** и **27 340** кВтч соответственно. При тарифе 7 руб/кВтч стоимость годовых потерь составляет **543 тыс. руб** для 35 мм<sup>2</sup> против **191 тыс. руб** для 95 мм<sup>2</sup>. Ежегодная экономия — 352 тыс. рублей.

Разница в стоимости самих кабелей за 600 метров — порядка 660 тыс. рублей. Срок окупаемости: менее двух лет. А дальше — чистая экономия на протяжении 28–38 лет оставшегося срока службы, суммарно более **10 миллионов рублей**. Именно за этим стоит формула  $S = I/j_{\text{эк}}$ .

### **Почему метод устарел — и почему он всё ещё работает**

Критика метода ЭПТ существует давно, и она небезосновательна. Значения  $j_{\text{эк}}$  в таблице 1.3.36 рассчитывались при соотношении стоимости электроэнергии и стоимости кабеля, характерном для советской экономики 1970–80-х годов. За прошедшие десятилетия это соотношение существенно изменилось: тариф на электроэнергию для промышленности вырос значительно сильнее, чем стоимость кабельной продукции. Если пересчитать  $j_{\text{эк}}$  при современных ценах, оптимальные сечения окажутся ещё выше, чем предписывает действующий ПУЭ — то есть ПУЭ в своей нынешней редакции скорее занижает оптимальное сечение.

Это означает, что следование ПУЭ в части ЭПТ — минимальный экономически обоснованный стандарт, а не предел возможной оптимизации. Инженер, желающий максимально сократить потери заказчика, вправе — и при должной квалификации обязан — выполнить индивидуальный экономический расчёт с применением актуальных цен. Особенно это важно для длинных питающих линий крупных промышленных объектов, где разница между «табличным оптимумом» и «актуальным оптимумом» может составить ещё одну-две ступени стандартного сечения.

### **Контекст реальных потерь в сетях страны**

Задача выбора экономически обоснованного сечения — не абстрактный проектный ритуал. Суммарные технические потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4–10 кВ составляют значительную долю от всех сетевых потерь в стране. Относительные потери в электрических сетях России в настоящее время находятся на уровне около 10% от всей отпущенной в сеть электроэнергии — около 100 млрд кВтч в год. Для сравнения: в Германии этот показатель составляет 3,9%, в Финляндии — 4,1%, в США — 5,9%.

Значительная часть этих потерь — в распределительных сетях промышленных предприятий, где кабели со времён советского строительства несут нагрузки, при которых правильно выбранные сечения дали бы ощутимую экономию. Исследования показывают, что уровень износа силовых кабелей в сетях России достигает 70%, а потери электроэнергии в изношенных кабелях кратны нормативные. Когда такие кабели заменяются, это прямая возможность выбрать сечение не «как было», а экономически оптимальное.

### **Где метод неприменим: важные ограничения**

Честность изложения требует чётко сформулировать, когда ЭПТ не работает и применять его не следует. ПУЭ п. 1.3.28 устанавливает эти ограничения явно.

Для **ответвлений к отдельным электроприёмникам мощностью до 100 кВт** в сетях до 1 кВ метод не применяется. Физическое объяснение: короткие ответвительные линии (10–50 м) несут небольшие токи, годовые потери в них ничтожны — дополнительные затраты на увеличенное сечение не окупятся никогда. Здесь сечение определяется нагревом и потерей напряжения.

Для **сетей временного электроснабжения** — строительных площадок, временных зданий — метод также неприменим: срок использования кабеля слишком мал, чтобы накопленная экономия на потерях компенсировала разницу в стоимости.

Для **ответвлений в сетях 0,4 кВ при числе часов использования максимума менее 4000–5000 ч/год** ЭПТ практически не применяется, поскольку низкая загрузка линии в году означает малые годовые потери — и экономическое сечение в этом случае совпадает или незначительно превышает тепловое.

### **Четыре критерия и принцип «наибольшего»**

Выбор сечения в цеховой электросети — это всегда решение системы из четырёх неравенств, где каждое задаёт свою нижнюю границу. Тепловой критерий:  $I_{\text{доп}} \cdot \prod k_i \geq I_p$ . Экономический:  $S \geq I_p / j_{\text{эк}}$ . Допустимая потеря напряжения:  $\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}$ . Термическая стойкость к токам КЗ:  $S \geq I_{\text{кз}} \sqrt{t} / C$ .

Итоговое сечение принимается по **наибольшему** из четырёх значений. Никакого «главного» критерия не существует — в зависимости от конкретных условий линии каждый из четырёх может оказаться определяющим. Для длинных питающих кабелей 10 кВ высоконагруженных предприятий определяет, как правило, ЭПТ. Для коротких ответвлений 0,4 кВ к двигателям — нагрев. Для длинных ответвлений в сетях 0,4 кВ — потеря напряжения. Для кабелей в непосредственной близости от мощных трансформаторов — термическая стойкость.

Понимание этой иерархии критериев в зависимости от места линии в системе электроснабжения цеха и есть то, что отличает инженера-проектировщика от оператора таблиц ПУЭ. Первый проектирует систему. Второй заполняет формы.

### **Устаревшие $j_{эк}$ : что делать практику уже сегодня**

Пока нормы  $j_{эк}$  в таблице 1.3.36 ПУЭ не пересмотрены с учётом актуального соотношения цен, практикующий инженер может действовать двумя способами. Первый — консервативный: следовать ПУЭ, выбирать сечение по таблице 1.3.36. Это гарантированно лучше, чем выбор только по нагреву, хотя и не является абсолютным оптимумом при нынешних тарифах.

Второй — аналитический: выполнить индивидуальный расчёт с текущим тарифом на электроэнергию, реальными ценами на кабельную продукцию и нормой дисконта заказчика. Методика такого расчёта описана в: это метод дисконтированных денежных потоков, где в роли «инвестиций» выступает разница в стоимости кабеля при разных сечениях, а «доходом» — ежегодная экономия на стоимости потерь. Оптимальное сечение соответствует минимуму чистой приведённой стоимости суммарных затрат.

Результат такого расчёта при тарифе 7 руб/кВтч и норме дисконта 10% для рассмотренного примера (линия ААБ 10 кВ,  $I = 95$  А,  $L = 600$  м,  $T_{max} = 5500$  ч/год) — оптимальное сечение **120 мм<sup>2</sup>**, а не 95 мм<sup>2</sup>, которое даёт ПУЭ. Это на одну ступень больше «нормативного оптимума» — следствие того, что современный тариф на электроэнергию выше заложенного в нормах при их последнем пересмотре.

Разница в стоимости кабелей 95 и 120 мм<sup>2</sup> за 600 м — около 300 тыс. рублей. Дополнительная ежегодная экономия потерь при переходе с 95 на 120 мм<sup>2</sup> — около 37 тыс. рублей в год. При норме дисконта 10% и сроке службы 30 лет чистая приведённая стоимость этой экономии — около 350 тыс. рублей. Инвестиция окупается. Едва — но окупается. При более высоком тарифе или более длинной линии разрыв будет больше.

Именно этот расчёт — расчёт срока окупаемости и чистой приведённой стоимости — и должен лежать в основе технико-экономического обоснования выбора сечения для каждой питающей линии значимого промышленного объекта. Не вместо таблиц ПУЭ — в дополнение к ним. Норматив задаёт минимальную планку. Инженер обязан смотреть выше.

Повный Андрей Владимирович, преподаватель Филиала Белорусского государственного технологического университета «Гомельский государственный политехнический колледж», главный редактор сайта «Школа для электрика» - <https://electricalschool.info/>

Школа для электрика в Telegram - <https://t.me/electricalschool>