

Лекционные материалы

Дисциплина «Основы проектирования электроэнергетических объектов»

Разработаны доцентом кафедры «Электроэнергетические системы» ВятГУ Вычегжаниным А.В.

Основы проектирования электрических сетей

- Требования, предъявляемые к проводникам. Условия выбора сечения проводников.
- Технические факторы, влияющие на выбор сечений проводников.

Требования, предъявляемые к проводникам.

В ходе проектирования электрических сетей и систем электроснабжения потребителей энергии важное место занимает решение задачи, которая заключается в **выборе марки провода или кабеля**, а следовательно и конструктивного исполнения конкретного участка сети.

Такие решения основываются на **опыте проектирования и области преимущественного применения** той или иной **конструкции** линии в каждом конкретном случае.

Кроме того, принимая решение, следует руководствоваться рекомендациями и положениями **нормативных документов**.

Требования, предъявляемые к проводникам.

После принятия решения по конструкции участка сети необходимо выбрать **сечения** применяемых проводников.

Сечение является важнейшим параметром линий электропередачи, т.к. с его увеличением возрастают затраты на сооружение линии, отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание, но снижаются потери мощности и электроэнергии и связанные с ними затраты.

Все методики определения сечений проводов и кабелей так или иначе основаны на поиске экономически целесообразного сечения, соответствующего определенному критерию.

Требования, предъявляемые к проводникам.

Сечения проводов и кабелей выбираются в зависимости от ряда факторов.

Эти факторы можно разделить на две группы:

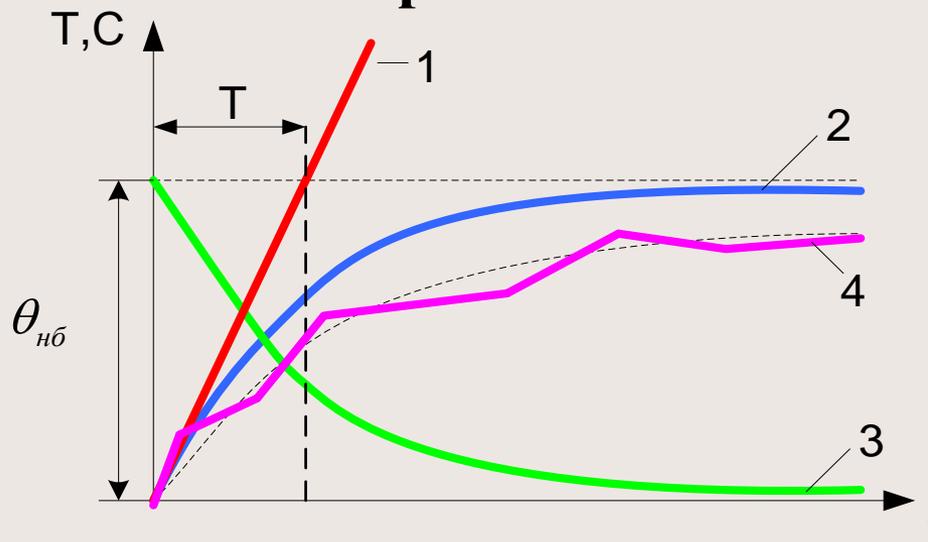
- **технические;**
- **и экономические.**

Технические факторы:

- **Нагрев** от длительного выделения тепла **током** послеаварийного установившегося режима.
- **Нагрев** от кратковременного выделения тепла **током короткого замыкания**.
- **Потери напряжения** в проводах ВЛ или в жилах КЛ от проходящего по ним тока **рабочего и послеаварийного режима**.
- **Механическая прочность** (устойчивость к внешним воздействиям).
- **Коронирование** – фактор, зависящий от величины применяемого номинального напряжения ВЛ, сечения провода и состояния окружающей среды.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока



$$P = 3I^2 R$$

1 - Закон изменения температуры при отсутствии охлаждения.

2 - Закон изменения температуры при охлаждении провода

$\theta_{нб}$ - наибольшая установившаяся разность температур при длительной нагрузке

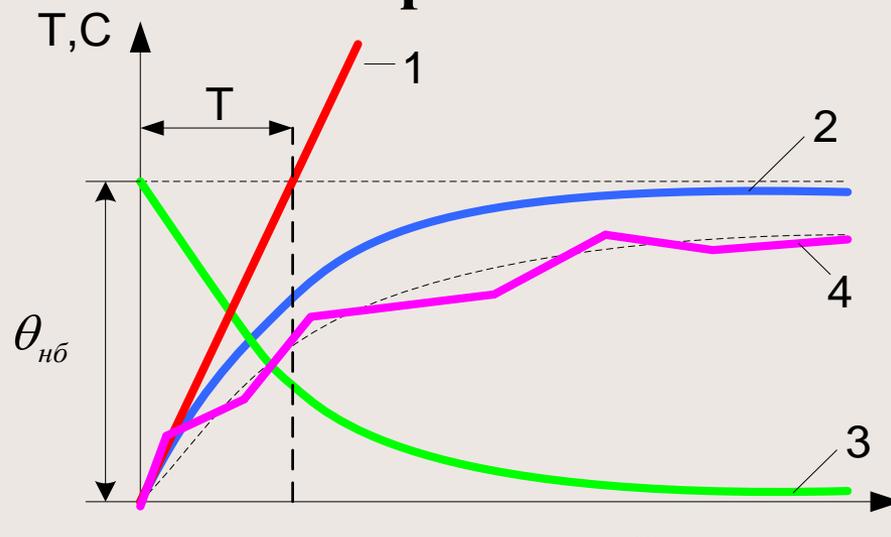
T – постоянная времени нагрева, время в течение которого проводник получил бы тот же нагрев над окружающей средой, если бы он не отдавал тепло последней

Закон нагревания: $\theta_{нб} = \theta_{нб} (1 - e^{-\frac{t}{T}})$ Закон охлаждения: (кривая 3)

$$\theta_{нб} = \theta_{нб} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

4 – кривая нагрева при повторно-кратковременной нагрузке током I

Технические факторы: Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока



$$P = 3I^2 R$$

4 – кривая нагрева при повторно-кратковременной нагрузке током I

I – такой же как и для кривых 1 и 2. При повторно-кратковременной нагрузке по проводнику можно пропустить больший ток.

$$I_{\partial}' = I_{\partial} \frac{0,875}{\sqrt{ПВ}}$$

$ПВ$ - продолжительность включения (рабочего режима) выраженная в о.е.

$$ПВ = \frac{t_p}{t_u},$$

t_p - время рабочего режима; t_u - время цикла.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

Чем опасно нагревание проводников?

Для голых проводов воздушных линий:

- Переходное сопротивление в местах соединения отдельных строительных кусков провода при протекании по соединению электрического тока приводит к дополнительному местному нагреву переходного контакта, что в свою очередь увеличивает интенсивность образования оксидной пленки, а это приводит к увеличению переходного сопротивления и т.д.
- При повышенных температурах ускоряются усталостные процессы в материалах конструкций, что приводит к разрушению провода в зажимах и т.д.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

Чем опасно нагревание проводников?

Для кабельных линий:

- Негативным воздействием температуры на изоляционные слои (при перегреве кабельная бумага разрушается, резиновая и полимерная изоляция теряет свои свойства).
- Образовани^{ем} вакуумных и газовых включений внутри изоляционных слоев кабеля, что приводит к ухудшению условий охлаждения токопроводящих жил.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

ПУЭ регламентирует предельно-допустимую температуру нагревания проводников при длительном протекании тока.

Для голых проводов ВЛ допустимая температура составляет $+70^{\circ}\text{C}$.

Допустимая температура жил кабеля зависит от вида изоляции и номинального напряжения кабеля и может составлять от $+50^{\circ}\text{C}$ до $+120^{\circ}\text{C}$.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

Из выше сказанного следует, что при конкретных условиях охлаждения (разность температуры провода и температуры окружающей среды) по проводу можно пропускать вполне определенный длительный ток (длительно-допускаемый ток по проводу).

$$I^2 R_t = k \cdot F (t_2 - t_1) \Rightarrow I = \sqrt{\frac{k \cdot F (t_2 - t_1)}{R_t}}$$

Исходя из приведенных рассуждений составлены таблицы допустимых токов для различных проводников.

Для ВЛ температура окружающей среды принимается +20°C.

Для КЛ при прокладке в земле - +15°C

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

В случае отличия температуры окружающей среды от нормированного значения на величину табличного значения допустимого тока вводится поправочный коэффициент, определяемый по справочникам.

Если в траншее проложен не один кабель, то допустимая нагрузка должна быть уменьшена, что достигается умножением на соответствующий поправочный коэффициент.

Технические факторы:

Нагревание проводов и кабелей при длительном протекании тока

Во всех случаях для выполнения рассматриваемого условия должно выполняться неравенство:

$$I_{нав} \leq k_t \cdot I_{доп,Т}$$

$I_{нав}$ - значение тока послеаварийного режима;

$I_{доп.Т}$ - табличное значение допустимого тока;

k_T - поправочный коэффициент на температуру окружающей среды.

Для кабельных линий, проложенных в траншее дополнительно:

$$I_{нав} = k_n \cdot I_{доп,Т}$$

k_n - поправочный коэффициент на количество проложенных в траншее кабелей

Технические факторы:

Нагрев от кратковременного выделения тепла **током короткого замыкания**

Несмотря на короткий промежуток времени существования короткого замыкания, значения токов в этих режимах достигают весьма больших значений.

В результате проводники подвергаются значительному термическому и динамическому воздействию.

Расчеты таких воздействий не рассматриваются в данной дисциплине, т.к. относятся не к установившимся, а к переходным режимам.

Однако существует общее правило, согласно которому описанные воздействия не достигают критических значений при токах короткого замыкания меньше 20 кА

Технические факторы:

Потери напряжения в проводах ВЛ или в жилах КЛ от проходящего по ним тока **рабочего и послеаварийного режима.**

Проверка по потере напряжения выполняется как для нормального, так и для послеаварийных режимов работы сети. Суммарные потери напряжения до наиболее удаленного пункта в сети одного номинального напряжения не должны превышать допустимые:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ j=2}}^m \Delta U_{ij} \leq \Delta U_{\text{дон}}.$$

Технические факторы:

Потери напряжения в проводах ВЛ или в жилах КЛ от проходящего по ним тока **рабочего и послеаварийного режима.**

Допустимые значения потери напряжения никакими нормативными документами не устанавливаются. Однако учитывая допустимые по ГОСТ отклонения напряжения у приемников электрической энергии и наличие устройств регулирования напряжения в сети, считают, что потеря напряжения в линиях не должна превышать следующих величин, %:

Воздушные линии напряжением 35-110 кВ	- 15
То же в послеаварийном режиме	- 20
Кабельные линии 6-35 кВ	- 6
То же в послеаварийном режиме	- 10
Воздушные линии 6-10 кВ	- 8
То же в послеаварийном режиме	- 12
Силовые сети до 1000 В	- 5-6
Осветительные сети	- 3

Технические факторы:

Потери напряжения в проводах ВЛ или в жилах КЛ от проходящего по ним тока **рабочего и послеаварийного режима.**

Если потери напряжения в сети 35-220 кВ будут больше указанных допустимых значений, то нужно предусмотреть дополнительные устройства регулирования напряжения или рассмотреть другой вариант сети.

В распределительных сетях возможности регулирования напряжения невелики и в случае невыполнения условия:

$$\Delta U > \Delta U_{дон}$$

следует выбрать большее сечение.

Технические факторы: Коронирование

Как отмечалось ранее, одним из условий выбора сечения провода является проверка этого провода по условию образования общей короны.

Существование коронного разряда около проводов ведет к увеличению потерь электроэнергии.

Исходя из этого, при выборе сечения проводов необходимо учитывать минимальные допустимые значения сечений для соответствующего номинального напряжения.

Такая информация приведена в справочной литературе.

Технические факторы:

Механическая прочность

Вопросы устойчивости элементов ВЛ к механическим воздействиям рассматриваются в дисциплине «Средства передачи электроэнергии».

Расчеты на механическую прочность всех элементов ВЛ производятся на последующих этапах проектирования линии.

Методики выбора сечения проводников

- Выбор сечений проводников:
- по экономической плотности тока;
- по экономическим интервалам;
- по допустимой потере напряжения;
- по допустимому току (по нагреву).

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Стоимость линии зависит от ее длины:

$$K = K_0 \cdot l$$

где l - длина линии, км;

K_0 - удельные капитальные затраты, руб/км, которые можно определить так:

$$K_0 = a + b \cdot F$$

где a - капитальные вложения в 1 км линии, не зависящие от сечения F (стоимость металла, опор, арматуры) руб / км ;

b - капитальные вложения в 1 км линии, зависящие от сечения F (стоимость проводников и т.д.), руб / км · мм²

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Издержки на обслуживание линии практически не зависят от сечения проводов, но стоимость потерь электроэнергии от рассматриваемого параметра зависит существенно:

$$I_{\Delta W} = \beta \cdot \Delta W = \beta \cdot \Delta P_{нб} \cdot \tau = \beta \cdot 3I_{нб}^2 \cdot R_{Л} \cdot \tau = \beta \cdot 3I_{нб}^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{F} \cdot \tau$$

где $I_{нб}$ - наибольший рабочий ток линии, А;

β - стоимость потерь электроэнергии, руб / (кВт·ч)

ρ - удельное сопротивление материала провода, Ом·мм² / м

τ - время наибольших потерь, ч.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Издержки на обслуживание линии практически не зависят от сечения проводов, но стоимость потерь электроэнергии от рассматриваемого параметра зависит существенно:

$$I_{\Delta W} = \beta \cdot 3I_{нб}^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{F} \cdot \tau$$

Эксплуатационные расходы на амортизацию и текущий ремонт также зависят от сечения:

$$I_{\text{э}} = I_a + I_p = \alpha_{\text{э}} \cdot K = \alpha_{\text{э}} \cdot (a + b \cdot F) \cdot l$$

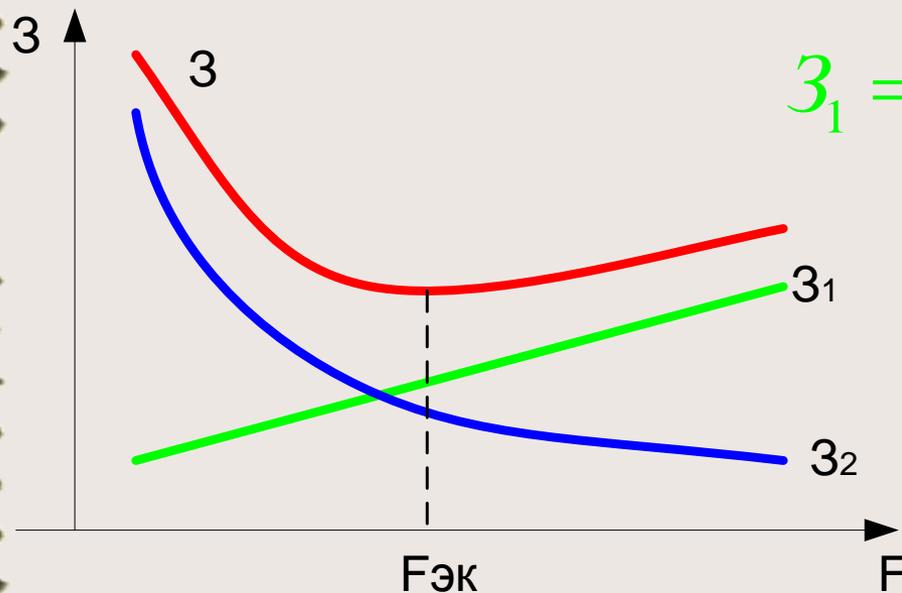
где $\alpha_{\text{э}}$ - ежегодные отчисления на амортизацию и текущий ремонт линии, $1/\text{год}$.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Тогда приведенные затраты, как функция от сечения:

$$Z(F) = I_{\Delta W} + I_{\Delta W} + p_H K = \alpha_{\Delta W} (a + bF)l + \beta 3 I_{нб}^2 \rho \frac{l}{F} \tau + p_H (a + bF)l$$

$$Z(F) = (\alpha_{\Delta W} + p_H)(a + bF)l + \beta 3 I_{нб}^2 \rho \frac{l}{F} \tau = Z_1 + Z_2$$

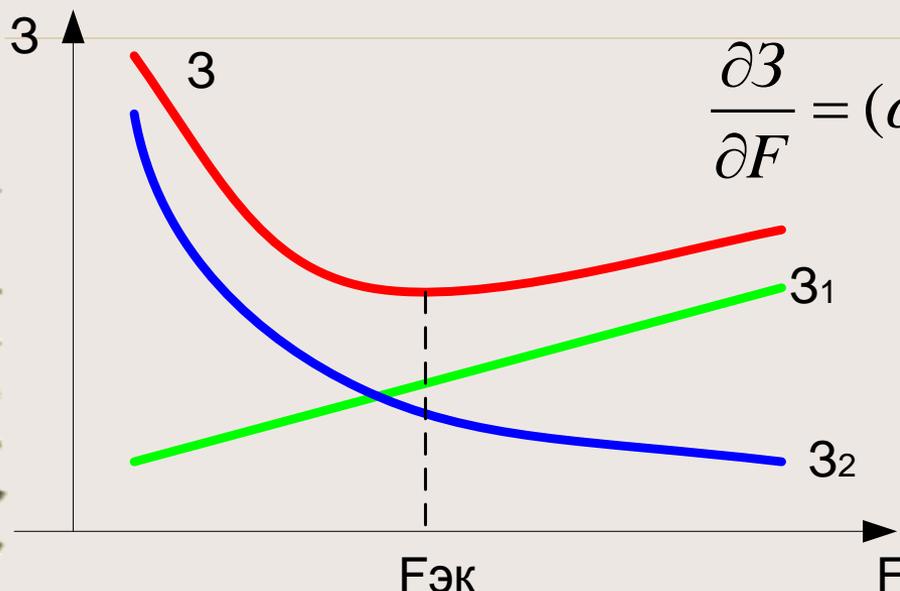


$$Z_1 = (\alpha_{\Delta W} + p_H)(a + bF)l$$

$$Z_2 = \beta 3 I_{нб}^2 \rho \frac{l}{F} \tau$$

$F_{\text{Эк}}$ – экономическое сечение.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока



$$\frac{\partial Z}{\partial F} = (\alpha_{\text{Э}} + p_H)bl - \frac{\beta 3 I_{\text{нб}}^2 \rho l \tau}{F_{\text{ЭК}}^2} = 0$$

$$F_{\text{ЭК}} = I_{\text{нб}} \sqrt{\frac{3\beta\rho\tau}{b(\alpha_{\text{Э}} + p_H)}}$$

Экономическая плотность тока (A/mm^2) – это отношение наибольшего протекающего в линии тока к экономическому сечению:

$$j_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{b(\alpha_{\text{Э}} + p_H)}{3\beta\rho\tau}}$$

Экономическая плотность тока не зависит от напряжения сети.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

ПУЭ рекомендует принимать значение $j_{ЭК}$ в зависимости от материала проводников и продолжительности использования наибольших нагрузок ($T_{НБ}$).

Проводники	Экономическая плотность тока $j_{ЭК}$ (А/мм ²) при значениях $T_{НБ}$ в год (ч)		
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000
Неизолированные провода и шины: медные	2,5	2,1	1,8
	1,3	1,1	1,0
алюминиевые	3,0	2,5	2,0
	1,6	1,4	1,2
Кабели с бумажной и провода с резиновой и поливинилхлоридной изоляция с жилами: медными	3,5	3,1	2,7
	1,9	1,7	1,6
алюминиевыми	3,5	3,1	2,7
	1,9	1,7	1,6

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Порядок выбора сечений по рассматриваемому методу:

- Рассчитывают величину тока $I_{нб}$.
- Определяют $j_{ЭК}$ по таблицам (ПУЭ) для соответствующего значения $T_{НБ}$.
- Определяют сечение $F_{ЭК}$ по формуле:

$$F_{ЭК} = \frac{I_{нб}}{j_{ЭК}} \cdot$$

- Округляют найденное $F_{ЭК}$ до ближайшего стандартного значения $F_{СТ}$.

Необходимо отметить

Ток $I_{нб}$ - ток **нормального режима**, т.е. ток наибольшей нагрузки длительно протекающий по линии. Возможные повышения нагрузки во время аварий или ремонтов (послеаварийные режимы), при определении сечения по методу экономической плотности тока не учитываются, т.к. эти режимы носят кратковременный характер.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Область применения:

В течение многих лет методика применялась для выбора сечений линий **35-500 кВ**.

В настоящее время по этому методу **выбирают** сечения кабельных линий при $U_{НОМ} > 1$ кВ и воздушных линий **6 – 750 кВ**.

Выбору по экономической плотности тока не подлежат:

- Сети промышленных предприятий напряжением до **1000 В**, если $T_{НВ}$ не превышает **4000-5000** час.
- Все **ответвления** к отдельным электроприемникам напряжением до **1000 В**, а также осветительные сети.
- Сети **временных сооружений** и сооружений сроком службы до 3 – 5 лет.

Выбор сечений проводников по экономической плотности тока

Недостатки метода:

- Не учитываются различия в стоимости потерь электроэнергии как по годам эксплуатации, так и по регионам строительства.
- Предположения, что K линейно зависит от длины линии не всегда справедливо. Линейная зависимость нарушается при переходе к строительству ВЛ на унифицированных опорах.
- В выражении $Z = f(F)$ предполагали, что F имеет непрерывные значения, но в действительности F дискретно, следовательно, определение экстремума указанной функции неправомерно.
- Метод не учитывает изменения значений $I_{нб}$ в линиях различных вариантов по годам эксплуатации.

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

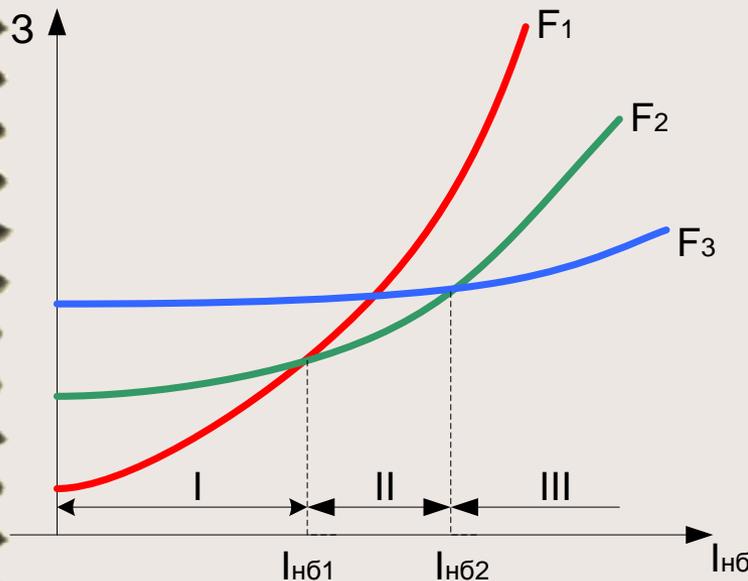
Для устранения ряда недостатков, имеющих место при определении сечения по **экономической плотности тока**, был разработан метод “**экономических интервалов**”.

Для различных стандартных сечений проводов ВЛ ($F_{СТ}$) построили зависимости приведенных затрат на линию от тока $I_{нб}$.

$$Z = (\alpha_{\text{Э}} + p_H)K + 3I_{нб}^2 \beta R_L \tau$$

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

В результате были получены семейства пересекающихся кривых, причем каждая из этих зависимостей соответствует стандартному значению $F_{СТ}$.



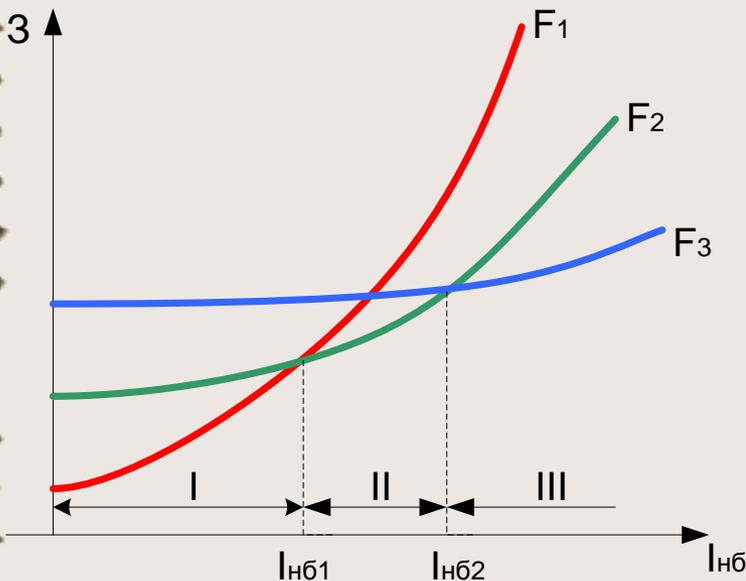
$$Z = (\alpha_{Э} + p_H)K + 3I_{нб}^2 \beta R_{Л\tau}$$

$$F_1 < F_2 < F_3$$

Кривые представляют собой **параболы**, т.к. зависят от квадрата тока, причем **чем больше сечение, тем больше пологость параболы**.

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

Точка пересечения кривых F_1 и F_2 определяет значение наибольшего тока, при котором приведенные затраты в варианте с F_1 равны приведенным затратам в варианте с F_2 .



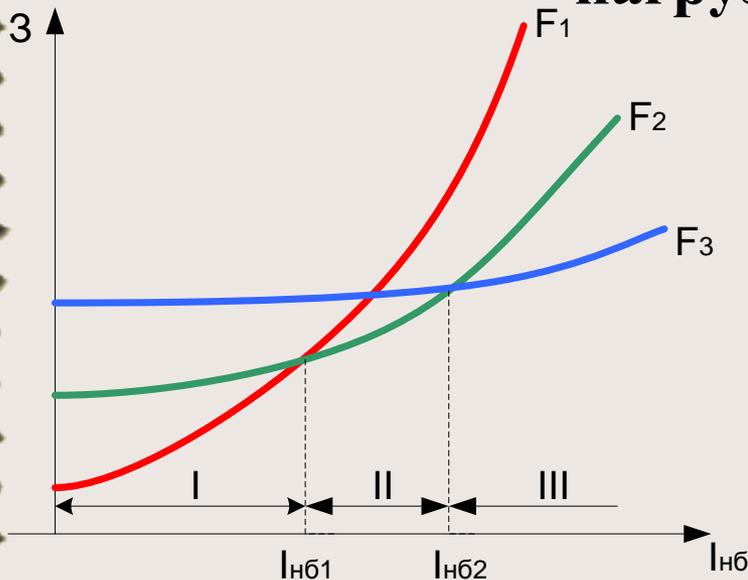
Значения тока от 0 до $I_{нб1}$ - экономический интервал для сечения F_1 (I)

II - экономический интервал для сечения F_2 .

III - экономический интервал для сечения F_3 .

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

При использовании экономических интервалов тока необходимо уточнение понятия наибольшего тока линии. Сечение проводов надо выбирать по **расчетной токовой нагрузке** линии I_p :



$$I_p = I_{нб} \cdot \alpha_i \cdot \alpha_t,$$

где α_i — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки по годам эксплуатации линии.

Для линий 35 кВ: $\alpha_i = 1,00$

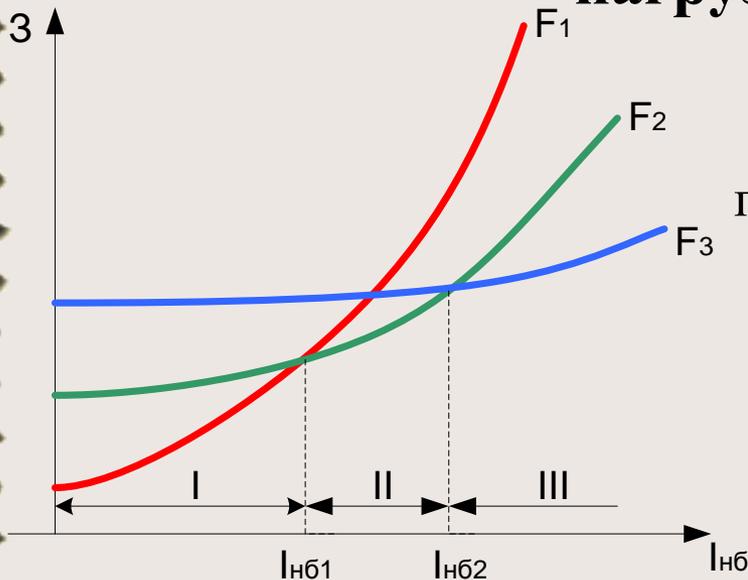
Для линий 110 – 220 кВ: $\alpha_i = 1,05$

Для линий **более** 220 кВ:

α_i определяется по специальным выражениям.

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

При использовании экономических интервалов тока необходимо уточнение понятия наибольшего тока линии. Сечение проводов надо выбирать по **расчетной токовой нагрузке** линии I_p :



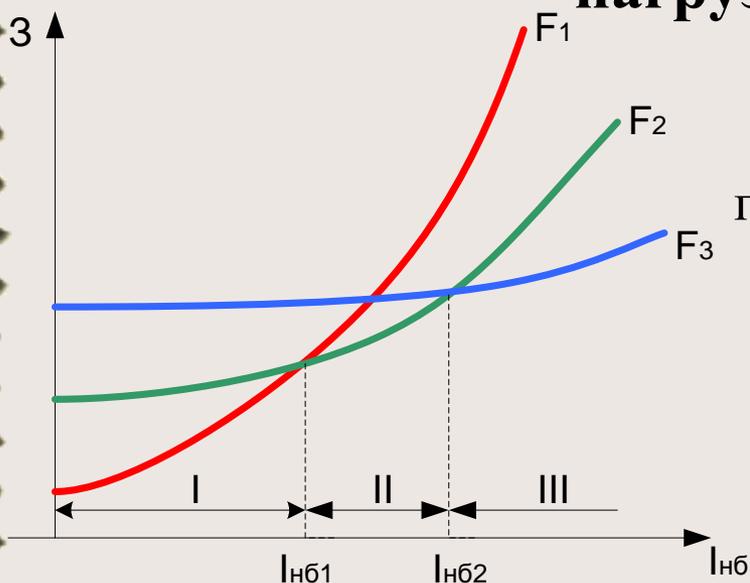
$$I_p = I_{нб} \cdot \alpha_i \cdot \alpha_t,$$

где α_t - коэффициент, учитывающий число часов использования максимальной нагрузки линии и коэффициент её попадания в максимум энергосистемы K_m .

При отсутствии информации значение K_m допускается принимать равным 1.

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

При использовании экономических интервалов тока необходимо уточнение понятия наибольшего тока линии. Сечение проводов надо выбирать по **расчетной токовой нагрузке** линии I_p :



$$I_p = I_{нб} \cdot \alpha_i \cdot \alpha_t,$$

где α_t - коэффициент, учитывающий число часов использования максимальной нагрузки линии $T_{НБ}$ и коэффициент её попадания в максимум энергосистемы K_m .

Тогда α_t определяется по таблице:

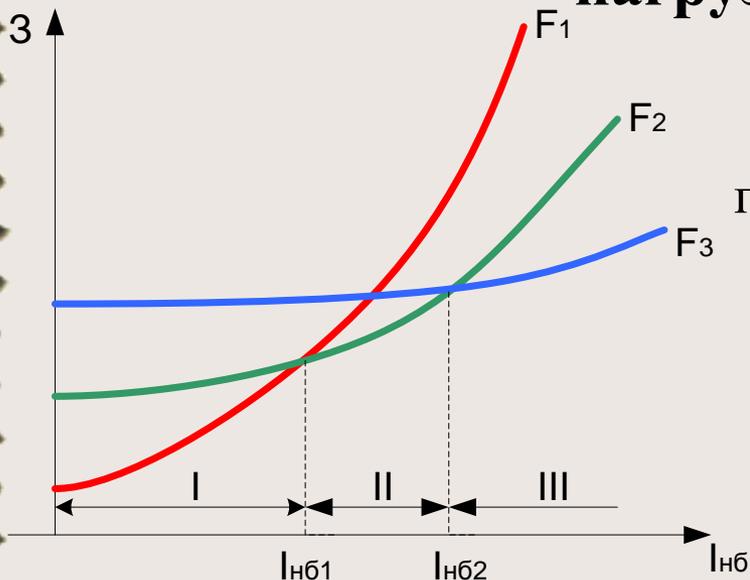
$T_{НБ}$	до 4000 ч	4000 – 6000 ч	более 6000 ч
α_t	0,8	1,0	1,30

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

При использовании экономических интервалов тока необходимо уточнение понятия наибольшего тока линии. Сечение проводов надо выбирать по **расчетной токовой нагрузке** линии I_p :

$$I_p = I_{нб} \cdot \alpha_i \cdot \alpha_t,$$

где $I_{нб}$ - ток в линии на пятый год ее эксплуатации в нормальном режиме, определяемый для линии из расчета режима, соответствующего максимуму нагрузки.



Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

Экономические интервалы тока для выбора сечений проводов ВЛ 35-750 кВ приведены в справочниках. Они даются в зависимости от:

- **номинального напряжения линии;**
- **расчетной токовой нагрузки I_p ;**
 - **района по гололеду;**
 - **материала опор;**
- **конструктивного исполнения линии (одноцепная или двухцепная).**

Аналогично экономическим интервалам токовых нагрузок для выбора сечений проводов ВЛ построены экономические интервалы мощностей.

Выбор сечений проводников методом экономических интервалов тока

$U_{ном},$ кВ	Тип опор	Материал опор	Район по го- лоледу	Предельная токовая нагрузка на одну цепь, А, при сечении, мм ²								
				70	95	120	150	185	240	300	400	
35	Одно- цепные	железобе тон	I-II III-IV	- -	100 95	155 140	200 200					
		сталь	I-II III-IV	70 -	125 115	135 125	200 200					
	Двух- цепные	железобе тон	I-II III-IV	80 65	115 90	170 165	180 180					
		сталь	I-II III-IV	75 55	125 100	140 120	180 180					
	110	Одно- цепные	железобе тон	I-II III-IV	55 -	- -	135 125	185 150	220 230	370 370		
			сталь	I-II III-IV	55 -	115 85	- 110	185 165	215 200	370 370		
Двух- цепные		железобе тон	I-II III-IV	65 55	105 80	150 150	190 170	215 210	340 340			
		сталь	I-II III-IV	60 45	115 90	- 110	205 180	220 210	340 340			
220		Одно- цепные	железобе тон, сталь	I-II III-IV						280	385	480
		Двух- цепные	сталь	I-II III-IV						305	375	460

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Рассматриваемая методика находит свое применение при выборе сечений проводников в **местных (распределительных)** сетях.

Такие сети часто не имеют специальных средств регулирования напряжения, поэтому для поддержания напряжения на зажимах электроприемников в определенных заданных границах, сечения проводов должны быть определены из условий допустимой потери напряжения, т.е. удовлетворять условию:

$$\Delta U_{нб} \leq \Delta U_{доп}$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

$$\Delta U_{нб} \leq \Delta U_{доп}$$

Наибольшая потеря напряжения $\Delta U_{нб}$ (потеря напряжения до наиболее удаленной точки сети) ее значение не должно превышать величину допустимой потери напряжения $\Delta U_{доп}$, которая для рассматриваемых сетей может быть определена из условия соблюдения требований по качеству электроэнергии у потребителей и может быть оценена на уровне 6-8%.

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Потеря напряжения зависит как от **активного**, так и **реактивного** сопротивления линии.

$$\Delta U = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U}$$

Известно, что x_0 **меняется в узких пределах** при изменении сечения провода, а r_0 **обратнопропорционально сечению проводника**.

Поэтому у $\Delta U_{\text{дон}}$ принято выделять два слагаемых:

$$\Delta U_{\text{дон}} = \Delta U_{\text{дон.а}} + \Delta U_{\text{дон.р}}$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Следовательно можно записать:

$$\Delta U_{\text{доп}} = \sum \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_{\text{ном}}} \Rightarrow \Delta U_{\text{доп.а}} = \sum \frac{P_i \cdot r_i}{U_{\text{ном}}}, \quad \Delta U_{\text{доп.р}} = \sum \frac{Q_i \cdot x_i}{U_{\text{ном}}}$$

$$\Delta U_{\text{доп.р}} = \frac{x_0 \sum Q_i \cdot l_i}{U_{\text{ном}}} \quad \Delta U_{\text{доп.а}} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{\text{доп.р}}$$

$$\Delta U_{\text{доп.а}} = \frac{1}{\gamma \cdot U_{\text{ном}}} \sum \frac{P_i \cdot l_i}{F_i}$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Для сети, имеющей только **один участок**, допустимая потеря напряжения однозначно определяет сечение проводов или жил кабелей.

Для сети с **несколькими участками** данная задача может иметь несколько решений, поэтому для однозначного выбора сечений **нужно принять дополнительные условия**, косвенно отражающие условия экономичности.

Таковыми условиями являются:

- равенство сечений на всех участках линии;
- минимум расхода цветного металла;
- минимум потерь активной мощности, что соответствует условию постоянной на всех участках плотности тока.

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Области применения дополнительных условий при выборе сечений по допустимой потере напряжения.

- В сетях с малыми значениями $T_{НВ}$ (характерны для сельских электрических сетей, при этом капитальные затраты относительно велики, т.е. составляют основную часть затрат) в качестве дополнительного условия используют условие минимального расхода проводникового материала ($V \rightarrow \min$).
- В сетях с большими значениями $T_{НВ}$ (промышленные сети, расположенные на ограниченной территории) в качестве дополнительного условия – условие $j = \text{const}$.
- Дополнительное условие $F = \text{const}$ используют в случае проектирование линий, питающих равномерно распределенную нагрузку.

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Порядок расчета следующий:

1. Определяют токи или мощности на участках сети.
2. Задаются средним значением удельного сопротивления x_0 .
3. Определяют реактивную составляющую потери напряжения от центра питания до удаленной точки сети:

$$\Delta U_p = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^m Q_{ij} \cdot x_0 \cdot l_{ij}}{U_{ном}} = \sqrt{3} \cdot x_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^m I_{ijp} \cdot l_{ij},$$

где Q_{ij} - реактивная мощность на участке ij ;

I_{ijp} - реактивная составляющая тока на участке ij ;

l_{ij} - длина участка ij ;

m - количество участков.

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Порядок расчета следующий:

4. Определяют активную составляющую допустимой потери напряжения:

$$\Delta U_{\text{доп}a} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_p.$$

5. Далее расчет зависит от выбранного дополнительного условия. При дополнительном условии $F = \text{const}$ сечение определяют по формуле:

$$F = \frac{\rho \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^m P_{ij} \cdot l_{ij}}{\Delta U_{\text{доп}a} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^m I_{ija} \cdot l_{ij}}{\Delta U_{\text{доп}a}},$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Порядок расчета следующий:

При условии **минимального расхода цветного металла** сначала определяют сечение последнего участка $F_{(m-1)m}$

$$F_{(m-1)m} = \frac{\rho \cdot \sqrt{P_{(m-1)m}}}{\Delta U_{\text{доп}} \cdot U_{\text{ном}}} \sum_{\substack{i=1 \\ j=2}}^m l_{ij} \sqrt{P_{ij}}$$

Сечения остальных участков могут быть найдены из соотношения:

$$\frac{F_{12}}{\sqrt{P_{12}}} = \dots = \frac{F_{ij}}{\sqrt{P_{ij}}} = \dots = \frac{F_{(m-1)m}}{\sqrt{P_{(m-1)m}}}$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Порядок расчета следующий:

При условии **минимума потерь активной мощности** определяют плотность тока $j_{\Delta U}$, выбираемую по допустимой потере напряжения:

$$j_{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{\rho \sqrt{3} \sum_{\substack{i=1 \\ j=2}}^m l_{ij} \cos \varphi_{ij}} .$$

По найденной плотности тока легко определяются расчетные сечения:

$$F_{ij} = \frac{I_{ij}}{j_{\Delta U}} = \frac{\sqrt{I_{ija}^2 + I_{ijp}^2}}{j_{\Delta U}} .$$

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

**Расчетные значения округляются до ближайших
стандартных.**

Определяются активные и реактивные сопротивления
на участках линии и **рассчитывается потеря
напряжения до удаленной нагрузки.**

**Если условие $\Delta U_{нб} \leq \Delta U_{доп}$ не выполняется, то
сечение необходимо увеличить.**

Выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения

Необходимо отметить, что окончательное решение по выбору сечений проводников принимают после анализа полученных значений!

Для суждения об экономичности решения необходимо сопоставить сечения, найденные по потере напряжения с сечениями, полученными по экономической плотности тока.

- Если $F_{\text{эк}} \geq F_{\Delta U}$, то принимают сечения, найденные по экономической плотности тока, т.е. $F_{\text{эк}}$.
- Если $F_{\text{эк}} < F_{\Delta U}$, то принимают сечения, определенные по допустимой потере напряжения, т.е. $F_{\Delta U}$.

Выбор сечений проводников по допустимому току (по нагреву)

Для сетей напряжением до **1 кВ** выбор сечений производится **по нагреву**, при этом условие должно выполняться как для нормального, так и для послеаварийного режимов.

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{нб}}$$

Для **ВЛ** перегрузка сверх допустимого тока не разрешается, для **кабельных линий до 10 кВ** можно превысить $I_{\text{доп}}$ при перегрузках или авариях, если наибольший ток предварительного нормального режима не превышал **80 %** от допустимого значения.

В послеаварийных режимах кабельных линий перегрузка допускается до 5 суток и определяется условием:

$$k_{\text{нав}} \cdot I_{\text{доп}} \geq I_{\text{нбав}},$$

где $k_{\text{нав}}$ - коэффициент перегрузки в послеаварийном режиме, зависящий от условий прокладки кабеля, предварительной нагрузки в нормальном режиме и длительности перегрузки.

Источники дополнительных сведений

- **Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 588 с.**
- **Электрические системы. Т. 2. Электрические сети/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.**
- **Герасименко А. А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – изд.2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715, [2] с. – (Высшее образование)**
- **Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Изд. 3-е, переработанное. Л., «Энергия», 1977.**
- **Черепанова Г.А., Вычегжанин А.В. Установившиеся режимы электрических сетей в примерах и задачах. - Киров: изд. ВятГУ, 2009 - 114 с.**



Спасибо за внимание!
