

## УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье проанализированы предельные режимы воздушных линий электропередачи по нагреву и по потерям напряжения. Получены уравнения, связывающие между собой температуру провода, потерю напряжения, мощности нагрузки, условия охлаждения и параметры линии. Показано, что в зависимости от длины можно выделить три характерные области, в которых предельные режимы определяются либо только нагревом, либо только потерей напряжения, либо и тем, и другим фактором. Отдельно рассмотрен комбинированный предельный режим, в котором температура провода и потеря напряжения одновременно принимают максимально допустимые значения. Получены новые уточненные критерии оценки допустимости режима линии. В качестве примера рассмотрена линия АС-240 напряжением 220 кВ варьируемой длины, для которой построен ряд зависимостей, характеризующих области существования и условия возникновения предельных режимов.

**Ключевые слова:** предельные режимы линий, уравнение теплового баланса, воздушные линии электропередачи, температура провода, потери напряжения, допустимый ток.

**Введение.** При передаче электроэнергии по воздушным линиям температура проводов и уровни напряжения не должны выходить за технические допустимые пределы. На практике получили распространение два способа оценки соответствующих предельных режимов. Первый способ использует упрощенные формулы и применяется при выборе сечений проводов [1–5]. Второй способ основан на точном электрическом расчете установившихся режимов сети и применяется на заключительных стадиях проектирования и при эксплуатации сети [6–10]. Коррекция сечений по данным точных электрических расчетов обычно не производится, а ввод режима в допустимую область осуществляется другими способами.

Использование такого подхода при проектировании сети обеспечивает выполнение технических ограничений, но полученное проектное решение может оказаться неэкономичным. Так, если выбранные по упрощенным формулам сечения окажутся завышенными, то в дальнейшем они уже не будут скорректированы. Точный электрический расчет может указать на необходимость установок дополнительных регулирующих и компенсирующих устройств, применение которых на самом деле

нецелесообразно. Возможен также неправильный выбор количества цепей воздушных линий и даже номинального напряжения.

Применение упрощенных формул при выборе сечений в значительной степени является вынужденным, поскольку параметры сети для точного электрического расчета еще неизвестны. Однако в действительности точный электрический расчет можно выполнить не для всей сети, а только для отдельно взятой линии, используя в качестве исходных данных напряжение в начале линии и мощность нагрузки в конце. Такой подход позволит устранить погрешности упрощенных методов оценки предельных режимов линий уже на начальных этапах проектирования сети. Кроме того, точные электрические расчеты отдельных линий дают возможность установить ряд закономерностей формирования предельных режимов. Такие закономерности могут быть эффективно использованы при решении проектных и эксплуатационных задач даже без проведения точного электрического расчета. Ниже в статье проведен анализ закономерностей и условий возникновения предельно допустимых режимов воздушных линий с неизолированными проводами. Приведенные выкладки справедливы для

напряжений от 35 до 220 кВ. Анализ линий 330 кВ и выше, требующий учета волновых процессов, расщепления фазы и других специфических особенностей, выходит за рамки данной статьи.

**Основные расчетные соотношения.** Предельные режимы воздушных линий с неизолированными проводами определяются падением напряжения, нагревом проводов, а также устойчивостью режима и погрешностями измерительных трактов. Последние два фактора выходят за рамки данной статьи, поскольку устойчивость определяется не отдельно взятой линией, а всей электрической системой, а погрешности измерительных трактов можно рассматривать как внешнее ограничение, не зависящее от параметров самой линии.

Температура провода определяется уравнением теплового баланса, которое может быть записано в различных формах [11–16]. Используем уравнение, приведенное в [16], которое для неизолированного провода имеет следующий вид:

$$I^2 r_{0,0} (1 + \alpha \Theta) = \pi d_{np} \left[ \alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) \right] \quad (1)$$

где  $r_{0,0}$  — погонное активное сопротивление при 0 °С;  $I$  — ток в проводе;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $\Theta$  и  $\Theta_{окр}$  — температуры провода и окружающей среды в °С;  $d_{np}$  — диаметр провода;  $\alpha_{вын}$  — коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией;  $\varepsilon_n$  — коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная излучения абсолютно черного тела;  $T$  и  $T_{окр}$  — абсолютные температуры провода и окружающей среды.

На основе уравнения (1) можно получить следующее выражение для предельно допустимой токовой нагрузки:

$$I_{гон} = \sqrt{\frac{\pi d_{np} \left[ \alpha_{вын} (\Theta_{гон} - \Theta_{окр}) + \varepsilon_n C_0 (T_{гон}^4 - T_{окр}^4) \right]}{r_{0,0} (1 + \alpha \Theta_{гон})}}, \quad (2)$$

где  $\Theta_{гон}$  и  $T_{гон}$  — максимально допустимая температура провода соответственно в °С и К.

Хотя допустимые токи проводов приводятся в справочной литературе, этих справочных значений для уточненного анализа недостаточно, так как они не учитывают ряд дополнительных факторов. Одним из таких факторов, например, является зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры окружающей среды [17]:

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (v P_{атм})^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}}, \quad (3)$$

где  $k_v$  — коэффициент угла атаки ветра;  $v$  — скорость ветра;  $P_{атм}$  — атмосферное давление.

При изменении температуры воздуха от –40 °С до +40 °С коэффициент теплоотдачи изменяется примерно на 12 %.

Для расчета падения напряжения используем П-образную схему замещения линии (рис. 1).

Напряжение в начале и конце линии связаны между собой соотношением:

$$U_1^2 = (U_2 + \Delta U_{np})^2 + \Delta U_{нон}^2. \quad (4)$$

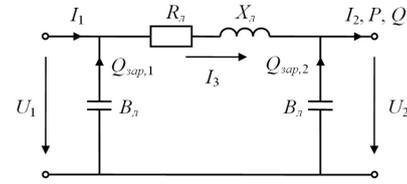


Рис. 1. Схема замещения линии

Здесь  $\Delta U_{np}$  и  $\Delta U_{нон}$  — продольная и поперечная составляющие падения напряжения [18], определяемые через мощности нагрузки  $P$ ,  $Q$  и зарядную мощность в конце линии  $Q_{зар,2}$  по формулам:

$$\Delta U_{np} = \frac{PR_{л} + (Q - Q_{зар,2})X_{л}}{U_2},$$

$$\Delta U_{нон} = \frac{PX_{л} - (Q - Q_{зар,2})R_{л}}{U_2}. \quad (5)$$

Предположим, что  $\frac{U_1 + U_2}{2} = U_{ном}$  (такой режим

можно назвать *нормированным по номинальному напряжению*) и введем обозначение  $\Delta U_{омн}$  — потеря напряжения в линии в относительных единицах (в долях номинального напряжения). Тогда напряжения в начале и конце линии:

$$U_1 = U_{ном} (1 + 0,5 \Delta U_{омн}),$$

$$U_2 = U_{ном} (1 - 0,5 \Delta U_{омн}). \quad (6)$$

Подставим формулы (5) и (6) в (4), разделив правую и левую части на квадрат номинального напряжения. При этом выразим зарядную мощность через емкостную проводимость, а параметры линии — через длину. В результате получим уравнение, связывающее потерю напряжения, мощности нагрузки и длину линии:

$$(1 + 0,5 \Delta U_{омн})^2 = \left[ (1 - 0,5 \Delta U_{омн}) \left( 1 - \frac{x_0 b_0}{2} l^2 \right) + \frac{Pr_{0,\Theta} + Qx_0}{U_{ном}^2 (1 - 0,5 \Delta U_{омн})} l \right]^2 + \left[ \frac{Px_0 - Qr_{0,\Theta}}{U_{ном}^2 (1 - 0,5 \Delta U_{омн})} l + (1 - 0,5 \Delta U_{омн}) \frac{r_{0,\Theta} b_0}{2} l^2 \right]^2. \quad (7)$$

Здесь  $r_{0,\Theta}$ ,  $x_0$  и  $b_0$  — погонные параметры линии (активное сопротивление, индуктивное сопротивление и емкостная проводимость). При этом погонное активное сопротивление вследствие температурной зависимости представляет собой не константу, а переменную:

$$r_{0,\Theta} = r_{0,0} (1 + \alpha \Theta). \quad (8)$$

Температура провода  $\Theta$  в этой формуле в соответствии с уравнением (1) представляет собой функцию тока, определяющего падение напряжения. В данном случае это будет ток  $I_3$  в продольной ветви схемы замещения (рис. 1), равный:

$$I_3 = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{\text{зпр},2})^2}}{\sqrt{3}U_2} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - 0,5b_0IU_2^2)^2}}{\sqrt{3}U_2}. \quad (9)$$

Необходимо заметить, что предельный режим по нагреву определяется не током в продольной ветви схемы замещения, а максимальным током в линии. Можно показать, что при достаточно большой мощности и активно-индуктивном характере нагрузки максимальным будет ток в конце линии:

$$I_2 = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_2}. \quad (10)$$

**Анализ предельных режимов.** С теоретической и практической точек зрения особый интерес представляет режим линии, предельный одновременно по нагреву и по падению напряжения. В дальнейшем в статье для этого режима используется название *комбинированный предельный режим*.

Допустимый ток, определяемый по формуле (2), будем рассматривать в уравнениях как константу. Приравняв этот ток к току  $I_2$ , получим уравнение связи активной и реактивной мощности нагрузки для комбинированного предельного режима:

$$P^2 + Q^2 = 3I_{\text{гон}}^2 U_2^2 = 3I_{\text{гон}}^2 U_{\text{ном}}^2 (1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}})^2. \quad (11)$$

Подставим формулу (9) в уравнение (1) с учетом (6):

$$\frac{P^2 + [Q - 0,5b_0IU_{\text{ном}}^2(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}})]^2}{3U_{\text{ном}}^2(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}})^2} r_{0,0}(1 + \alpha\Theta) = \pi d_{\text{пр}} [\alpha_{\text{вын}}(\Theta - \Theta_{\text{окр}}) + \varepsilon_n C_0(T^4 - T_{\text{окр}}^4)]. \quad (12)$$

Перепишем (7) с учетом (8):

$$(1 + 0,5\Delta U_{\text{отн}})^2 = \left[ \left(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}}\right) \left(1 - \frac{x_0 b_0}{2} I^2\right) + \frac{Pr_{0,0}(1 + \alpha\Theta) + Qx_0 I}{U_{\text{ном}}^2(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}})} \right]^2 + \left[ \frac{Px_0 - Qr_{0,0}(1 + \alpha\Theta)}{U_{\text{ном}}^2(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}})} I + \frac{(1 - 0,5\Delta U_{\text{отн}}) r_{0,0} b_0 (1 + \alpha\Theta)}{2} I^2 \right]^2. \quad (13)$$

Совокупность уравнений (11–13) можно рассматривать как систему относительно каких-либо двух параметров линии или нагрузки и температуры  $\Theta$ . Однако эта температура может изменяться лишь в небольших пределах, поскольку она всегда будет оставаться близкой к допустимой температуре провода по определению комбинированного режима. В результате система (11–13) относительно трех неизвестных (включая  $\Theta$ ) не всегда будет иметь решение. Действительно, комбинированный предельный режим может наблюдаться только при особых условиях.

Чтобы ввести систему (11–13) в область существования решения (т.е. ввести линию в область существования комбинированного предельного режима), следует использовать дополнительную четвертую переменную, которая будет рассматривать-

Исходные данные для расчета комбинированных предельных режимов

Марка провода	АС-240/32
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$	220 кВ
Погонное активное сопротивление при 20 °С $r_{0,20}$	0,1182 Ом/км
Погонное индуктивное сопротивление $x_0$	0,435 Ом/км
Погонная емкостная проводимость $b_0$	$2,604 \cdot 10^{-6}$ См/км
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	$0,0043$ °С <sup>-1</sup>
Диаметр провода $d_{\text{пр}}$	0,0216 м
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_n$	0,6
Скорость ветра $v$	0,6 м/с
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$	0,829087
Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$	100 кПа
Допустимая температура $\Theta_{\text{доп}}$	90 °С

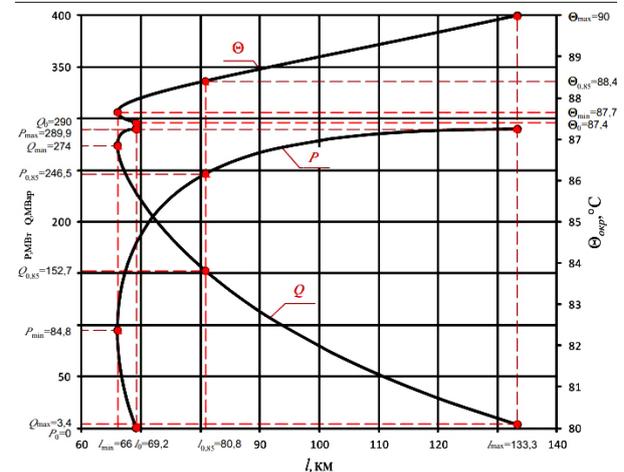


Рис. 2. Зависимости  $P$ ,  $Q$ ,  $\Theta$  от длины линии для провода АС-240/32 в комбинированном предельном режиме

ся как свободно варьируемый параметр. В качестве такого параметра удобно использовать длину линии  $l$ .

Ниже приведены результаты решения (11–13) относительно  $P$ ,  $Q$ ,  $\Theta$  при варьировании  $l$  для провода АС-240 при различных допустимых потерях напряжения и температурах окружающей среды. Исходные данные представлены в табл. 1.

Скорость ветра 0,6 м/с принята как минимальное значение, при котором определяются справочные допустимые токи. Коэффициент угла атаки ветра подобран так, чтобы при принятой формуле для коэффициента теплоотдачи и при нормированных условиях охлаждения допустимый ток провода, определяемый по формуле (2), был в точности равен справочному значению 610 А. Допустимая температура провода принята равной 90 °С для послеаварийных режимов согласно [19], поскольку именно такие режимы являются определяющими по пропускной способности.

На рис. 2 показаны зависимости  $P$ ,  $Q$ ,  $\Theta$  от длины линии при температуре окружающей среды  $\Theta_{\text{окр}} = 0$  °С и потере напряжения  $\Delta U_{\text{отн}} = 0,2$ .

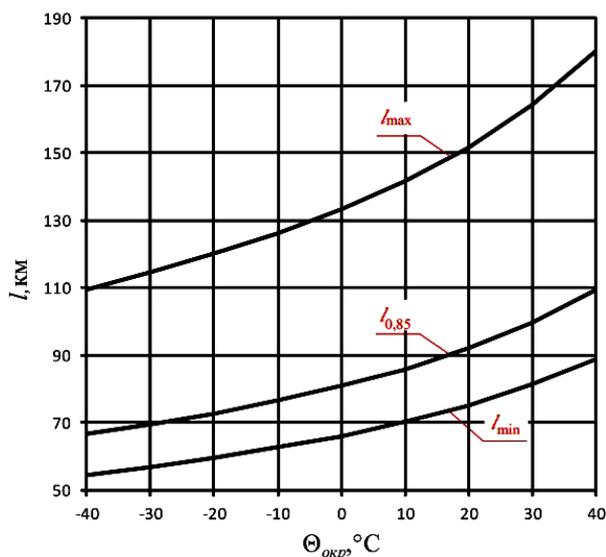


Рис. 3. Зависимости  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$ ,  $l_{0,85}$  для провода АС-240/32 от температуры окружающей среды при потере напряжения  $\Delta U_{\text{отн}} = 0,2$

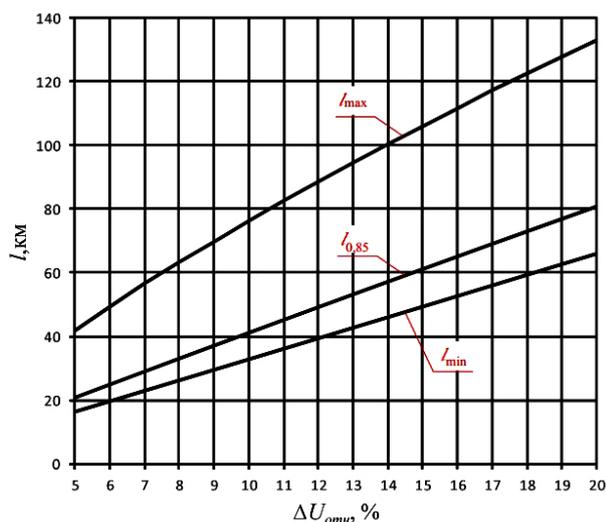


Рис. 4. Зависимости  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$ ,  $l_{0,85}$  для провода АС-240/32 от потери напряжения при температуре окружающей среды  $\theta_{\text{окр}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Из рис. 2 видно, что длина разделяет режимы линий на три характерных области. Первая область — длина линии  $l < l_{\min}$ . В этой области комбинированного предельного режима не существует, а существует только предельный режим, определяемый нагревом проводов. Во второй области  $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$  существуют все виды рассматриваемых предельных режимов. В третьей области  $l > l_{\max}$  комбинированного предельного режима снова не существует, а существует только предельный режим, определяемый потерей напряжения.

Использование значений  $l_{\min}$  и  $l_{\max}$  позволит одновременно упростить и уточнить инженерные расчеты при проектировании и эксплуатации линий электропередачи. Так, при  $l < l_{\min}$  линию достаточно проверить только по нагреву, а условие проверки по потере напряжения при этом выполнится автоматически, причем с гарантированной точностью. При  $l > l_{\max}$ , наоборот, достаточно проверить линию только по потерям напряжения, а условие проверки по нагреву выполнится автоматически.

Значения  $l_{\min}$  и  $l_{\max}$  зависят от марки провода, номинального напряжения, температуры окружающей среды и от допустимой потери напряжения. На рис. 3, 4 показаны зависимости этих длин от температуры окружающей среды и допустимой потери напряжения для провода АС-240/32 напряжением 220 кВ. На этих же рисунках показана также длина линии  $l_{0,85}$ , соответствующая комбинированному предельному режиму при типовом коэффициенте мощности обобщенной нагрузки  $\cos\varphi = 0,85$ . Эти зависимости могут быть легко параметризованы для каждого провода. Из рис. 4 видно, что зависимости длин  $l_{\min}$  и  $l_{0,85}$  от потери напряжения практически линейны, что дополнительно упрощает аппроксимацию.

Основная часть области существования комбинированного предельного режима характеризуется ростом предельной активной мощности и снижением предельной реактивной мощности с увеличением длины. Эти закономерности объясняются тем, что реактивная мощность влияет на потери напряжения гораздо сильнее, чем активная, а полная мощность от длины не зависит. Однако рост активной мощности с увеличением длины не следует понимать как повышение пропускной способности линии — это не более чем результат снижения реактивной мощности при условии постоянства полной мощности.

Одновременно с ростом активной мощности незначительно возрастает и температура провода  $\theta$ . Эта не максимальная температура провода, а температура, приблизительно осредненная по длине. Ее отличие от максимальной температуры провода обусловлено влиянием емкости линии на реактивный ток в продольной ветви схемы замещения. Рост активной мощности приводит к снижению доли реактивного тока в общем токе нагрузки. В результате влияние емкости на общий ток нагрузки становится слабее, что и приводит к сближению осредненной и максимальной температуры.

В области комбинированного предельного режима существует небольшой участок длин  $l_{\min} < l \leq l_0$ , на котором система (11–13) имеет не одно, а два решения, то есть при одной и той же длине существует два предельных режима. Первый из этих режимов характеризуется большей активной и меньшей реактивной мощностью по сравнению со вторым режимом. Различие активных мощностей больше, чем реактивных. Этим компенсируется более сильное влияние реактивной мощности на потери напряжения по сравнению с активной мощностью. Участок  $l_{\min} < l \leq l_0$  можно назвать областью неоднозначности предельных режимов. Его наличие приводит к тому, что рост активной мощности комбинированного предельного режима с увеличением длины начинается не от нуля, а сразу от некоторого начального положительного значения  $P_{\min}$ .

Следует также заметить, что верхняя граница области существования комбинированного предельного режима  $l_{\max}$  несколько условна. Это связано с тем, что при очень малых реактивных нагрузках ток  $I_3$  в продольной ветви схемы замещения становится больше тока  $I_2$  в конце линии за счет емкостного тока (зарядной мощности). Формально это приводит к увеличению температуры  $\theta$ . Однако в действительности зарядная мощность поглощается потерями реактивной мощности в продольной ветви схемы замещения линии и не приводит к физическому увеличению тока. На принятой схеме замещения этот процесс проявляется только в начале линии. Но в действительности он проис-

ходит по всей длине. Поэтому ток  $I_3$  перестает определять средний нагрев провода (хотя и продолжает определять потерю напряжения).

В данной статье длина  $l_{\max}$  определена при условии  $I_3 = I_2$ . Более точное определение этой длины требует учета распределенности параметров линии и выходит за рамки данной статьи. Однако из рис. 2 видно, что погрешность расчета этой длины не может быть значительной.

Обозначим мощности комбинированного предельного режима как  $P_{np}$ ,  $Q_{np}$ . Тогда режим линии будет гарантированно допустимым при выполнении условий:

$$P \leq P_{np}, \quad Q \leq Q_{np}. \quad (14)$$

Эти условия можно рассматривать как *достаточные условия допустимости режима линии*. Если одно из условий (14) выполнилось, а другое не выполнилось, то режим может быть как допустимым, так и недопустимым. Наконец, если оба условия (14) не выполнились, то режим является недопустимым.

Мощности  $P_{np}$ ,  $Q_{np}$  могут быть аппроксимированы как функции длины, потери напряжения и температуры окружающей среды, что позволит использовать их при практических расчетах.

В области неоднозначности условия (14) в принципе можно было бы проверять для обоих предельных режимов. Однако режим с меньшей активной мощностью крайне маловероятен, поскольку реактивная мощность в этом режиме как минимум в несколько раз больше активной. Таким образом, в области неоднозначности целесообразно рассматривать только предельный режим с большей активной и меньшей реактивной мощностью.

**Выводы.** В результате проведенных исследований получены новые критерии, которые могут быть использованы при выборе сечений и анализе пропускной способности линий электропередачи. К этим критериям относятся длины  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$ , а также мощности  $P_{np}$ ,  $Q_{np}$ . Длины представляют собой вспомогательные критерии, которые указывают на необходимость проведения тех или иных расчетов, а мощности определяют достаточное условие допустимости режима в диапазоне длин от  $l_{\min}$  до  $l_{\max}$ .

Если длина линии не превышает значение  $l_{\max}$ , а оба условия (14) одновременно выполняются либо одновременно не выполняются (при длине больше  $l_{\min}$ ), то указанные критерии позволяют обходиться без электрического расчета всей сети, не теряя при этом в точности. Более того, электрический расчет сети может ограничить пропускную способность линии по устойчивости. Однако такое ограничение справедливо лишь при определенном соотношении между нагрузками потребителей, которое на практике может оказаться другим, в результате чего оценка пропускной способности линий на основе данных расчета всей сети окажется неверной (точнее, заниженной).

Предлагаемый в статье подход лишен этого недостатка. Его использование будет способствовать повышению обоснованности проектных решений, а также более полному использованию пропускной способности линий в условиях эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А. [и др.]. Электрические системы. Электрические сети / под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. Москва: Высш. шк, 1998. 511 с.

2. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. Москва: КНОРУС, 2012. 648 с.

3. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. Москва: НЦ ЭНАС, 2012. 376 с.

4. Христофоров Д. А., Хужина З. Б., Варганова А. В., Дубина И. А. Методика выбора оптимальных сечений проводников электрических сетей 35–220 кВ // Энергетические и электротехнические системы. 2015. Вып 2. С. 124–129. EDN: VJYGMR.

5. Кабышев А. В., Обухов С. Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения: справочные материалы по электрооборудованию. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 168 с.

6. Данилов М. И., Романенко И. Г. Определение потоков мощности и температуры проводов электрической сети установившегося состояния энергосистемы // Электрические станции. 2022. № 7. С. 25–37. DOI: 10.34831/EP.2022.1092.7.005. EDN: TDESGC.

7. Колосок И. Н., Аксаева Е. С., Глазунова А. М. Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 3. С. 145–153. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153. EDN: YUUBFS.

8. Хомутов С. О., Поляков И. А., Чугунов Г. А., Капустин С. Д. Программа расчета области допустимых режимов работы в контролируемых сечениях энергосистемы // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. 2015. С. 175–181. EDN: VJZTPZ.

9. Васильковская А. В., Шепелев А. О., Шепелева Е. Ю. Определение максимально допустимого перетока активной мощности в сечении с учетом тепловых режимов линий электропередачи // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 131–138. DOI: 10.18822/byusu202301131-138. EDN: DUROBX.

10. Капустин С. Д., Поляков И. А. Определение допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем // Интеллектуальная энергетика: сб. науч. ст. 2021. С. 257–261.

11. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учетом сохранения их габарита // Хэйлунцзян-Приамурье: III Междунар. научно-образовательный форум: сб. материалов Междунар. науч. конф. 2019. С. 663–672. EDN: GQZHRU.

12. Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Харчевников В. И. Уточненная методика вычисления длительно допустимых токов неизолированных проводов воздушных линий электропередачи и контактных сетей // Электричество. 2021. № 2. С. 36–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-2-36-43. EDN: VZLLQQ.

13. Hu X., Cotton I. Impact of climate change on static ratings of overhead line in Edinburgh // 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714985.

14. Dong X., Wang C., Liang J. [et al.]. Calculation of power transfer limit considering electro-thermal coupling of overhead transmission line // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29, no. 4. P. 1503–1511. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2296553.

15. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И. [и др.]. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях // Энергия единой сети. 2021. № 3 (58). С. 44–53. EDN: OTRUNZ.

16. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А., Бигун А. Я. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 218. EDN: VIDWFF.

17. Петрова Е. В., Бигун А. Я., Птицына Е. В., Янишевская А. Г. Совершенствование расчетов потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем по результатам численного моделирования в условиях вариации нагрузки //

Омский научный вестник. 2012. № 1(107). С. 242–247. EDN: QVVFBF.

18. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 592 с. ISBN 5-283-01012-0.

19. ГОСТ 839–2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Введ. 01–05–2020. Москва: Стандартинформ, 2019. 40 с.

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

**ДЕЕВ Владислав Александрович**, магистрант гр. ЭЭМ-231 кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: vlad\_deev@inbox.ru

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

**КРОПОТИН Олег Витальевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4218-4900

AuthorID (РИНЦ): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

ResearcherID: H-4616-2013

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

**КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapovvladislav1998@gmail.com

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

#### Для цитирования

Гиршин С. С., Деев В. А., Петрова Е. В., Кропотин О. В., Криволапов В. А., Горюнов В. Н. Уточненный анализ предельных режимов воздушных линий электропередачи // Омский научный вестник. № 4 (192). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-83-90.

Статья поступила в редакцию 29.03.2024 г.

© С. С. Гиршин, В. А. Деев, Е. В. Петрова,

О. В. Кропотин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов

## REFINED ANALYSIS OF THE LIMIT MODES OF OVERHEAD POWER LINES

The article analyzes the limiting modes of overhead power transmission lines in terms of heating and voltage losses. The equations linking the wire temperature, voltage loss, load power, cooling conditions and line parameters are obtained. Depending on the length, three characteristic regions can be distinguished in which the limiting modes are determined either only by heating, or only by voltage loss, or both. A combined limit mode is considered separately, in which the wire temperature and voltage loss simultaneously assume the maximum permissible values. New refined criteria for assessing the admissibility of the line mode have been obtained. As an example, the AC-240 line with a 220 kV voltage of varying length is considered, for which a number of dependencies characterizing the areas of existence and conditions for the occurrence of limit modes are constructed.

**Keywords:** limit modes of lines, heat balance equation, overhead power lines, wire temperature, voltage losses, permissible current.

### References

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A. [et al.]. Elektricheskiye sistemy. Elektricheskiye seti [Electrical systems. Electric networks] // Ed. by V. A. Venikova, V. A. Stroyeva. Moscow, 1998. 511 p. (In Russ.).
2. Gerasimenko A. A., Fedin. V. T. Peredacha i raspredeleniye elektricheskoy energii [Transmission and distribution of electric energy]. Moscow, 2012. 648 p. (In Russ.).
3. Karapetyan I. G., Faybisovich D. L., Shapiro I. M. Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey [Handbook for the design of power networks] / Ed by D. L. Faybisovicha. Moscow, 2012. 376 p. (In Russ.).
4. Khristoforov D. A., Khuzhina Z. B., Varganova A. V., Dubina I. A. Metodika vybora optimal'nykh secheniy provodnikov elektricheskikh setey 35-220 kV [Effective line conductor cross-section procedure under the conditions electric networks 35–220 kV] // Energeticheskiye i elektrotekhnicheskiye sistemy. *Energy and Electrical Engineering Systems*. 2015. Issue 2. P. 124–129. EDN: VJYGMR. (In Russ.).
5. Kabyshev A. V., Obukhov S. G. Raschet i proyektirovaniye sistem elektrosnabzheniya: Spravochnyye materialy po elektrooborudovaniyu [Calculation and design of power supply systems: Reference materials on electrical equipment]. Tomsk, 2005. 168 p. (In Russ.).
6. Danilov M. I., Romanenko I. G. Opredeleniye potokov moshchnosti i temperatury provodov elektricheskoy seti ustanovivshegosya sostoyaniya energosistemy [Determination of Power Flows and Temperature of Electric Network Wires of the Power System Steady State] // Elektricheskiye stantsii. *Electrical Stations*. 2022. No. 7. P. 25–37. DOI: 10.34831/EP.2022.1092.7.005. EDN: TDESCG. (In Russ.).
7. Kolosok I. N., Aksayeva E. S., Glazunova A. M. Raschet maksimal'no dopustimyykh peretokov v kontroliruyemykh secheniyakh na osnove metodov otsenivaniya sostoyaniya [State estimation method-based calculation of maximum permissible flows in monitored sections] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. No. 3. P. 145–153. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153. EDN: YUUBFS. (In Russ.).
8. Khomutov S. O., Polyakov I. A., Chugunov G. A., Kapustin S. D. Programma rascheta oblasti dopustimyykh rezhimov raboty v kontroliruyemykh secheniyakh energosistemy [Program for calculating admissible operation modes in controlled power system sections] // Elektroenergetika glazami molodezhi: tr. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. *Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference «Electric Power Industry through the Eyes of the Youth»*. 2015. P. 175–181. EDN: VJZTPZ. (In Russ.).
9. Vaskovskaya A. V., Shepelev A. O., Shepeleva E. Yu. Opredeleniye maksimal'no dopustimogo peretoka aktivnoy moshchnosti v sechenii s uchetom teplovykh rezhimov liniy elektroperedachi [Determination of the maximum allowable active power flow in the section taking into account the thermal conditions of power transmission lines] // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 1 (68). P. 131–138. DOI: 10.18822/byusu202301131-138. EDN: DUROBX. (In Russ.).
10. Kapustin S. D., Polyakov I. A. Opredeleniye dopustimyykh peretokov aktivnoy moshchnosti v kontroliruyemykh secheniyakh energosistem [Determination of permissible overflows of active power in controlled sections of power systems] // Intellektual'naya energetika. *Smart Energy*. 2021. P. 257–261. (In Russ.).

11. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Pazenko N. P. [et al.]. Opredeleniye predel'nykh tokovykh nagruzok vozduzhnykh liniy elektroperedachi s uchetom sokhraneniya ikh gabarita [Determination of current limit loads of overhead power lines, taking into account the preservation of their size] // Kheyluntszyan-Priamur'ye: III Mezhdunar. nauchno-obrazovatel'nyy forum: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. *Proceedings of the III International Scientific and Educational Forum «Heilongjiang-Amur Region»*. 2019. P. 663–672. EDN: GQZHRU. (In Russ.).

12. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Kharchevnikov V. I. Utochnennaya metodika vychisleniya dlitel'no dopustimyykh tokov neizolirovannykh provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi i kontaknykh setey [Modified methodology of computation of admissible continuous currents of plain conductors of overhead transmission lines and catenaries] // *Elektrichestvo. Elektrichestvo*. 2021. No. 2. P. 36–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-2-36-43. EDN: VZLLQQ. (In Russ.).

13. Hu X., Cotton I. Impact of climate change on static ratings of overhead line in Edinburgh // 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714985. (In Engl.).

14. Dong X., Wang C., Liang J. [et al.]. Calculation of power transfer limit considering electro-thermal coupling of overhead transmission line // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29, no. 4. P. 1503–1511. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2296553. (In Engl.).

15. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Pukhova A. I. [et al.]. Algoritm kontrolya tokov v LEP v zadannykh ekspluatatsionnykh usloviyakh [Algorithm current control in the power line in the specified operational conditions] // *Energiya edinoy seti. Energy of Unified Grid*. 2021. No. 3 (58). P. 44–53. EDN: OTPUHZ. (In Russ.).

16. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A., Bigun A. Ya. Analiticheskoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provoda vozduzhnoy linii v usloviyakh vyzhdennoy konveksii [The analytical decision of the equation of thermal balance of the wire of the air-line in the conditions of compelled convection] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 1. P. 218. EDN: VIDWFF. (In Russ.).

17. Petrova E. V., Bigun A. Ya., Ptitsyna E. V., Yanishevskaya A. G. Sovershenstvovaniye raschetov poter' v vozduzhnykh liniyakh elektroenergeticheskikh sistem po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya v usloviyakh variatsii nagruzki [Calculation of losses in air lines of electrical power systems based on the results of numerical modeling under variation of load] // *Omskiy Nauchny Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2012. No. 1 (107). P. 242–247. EDN: QBVFBF. (In Russ.).

18. Idel'chik V. I. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow, 1989. 592 p. ISBN 5-283-01012-0. (In Russ.).

19. GOST 839–2019. *Provoda neizolirovannyye dlya vozduzhnykh liniy elektroperedachi. Tekhnicheskiye usloviya*

[Non-insulated conductors for overhead power lines. Specifications]. Moscow, 2019. 40 p. (In Russ.).

**GIRSHIN Stanislav Sergeyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

**DEEV Vladislav Aleksandrovich**, Undergraduate, gr. ЭЭМ-231 of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: vlad\_deev@inbox.ru

**PETROVA Elena Vladimirovna**, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

**KROPOTIN Oleg Vital'yevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4218-4900

AuthorID (RSCI): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

ResearcherID: H-4616-2013

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

**KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich**, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: krivolapovvladislav1998@gmail.com

**GORYUNOV Vladimir Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimircoryunov2016@yandex.ru

#### For citations

Girshin S. S., Deev V. A., Petrova E. V., Kropotin O. V., Krivolapov V. A., Goryunov V. N. Refined analysis of the limit modes of overhead power lines // *Omsk Scientific Bulletin*. No. 4 (192). C. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-83-90.

Received March 29, 2024.

© S. S. Girshin, V. A. Deev, E. V. Petrova,

O. V. Kropotin, V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov