

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 621.31

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-39-48

Влияние отклонений действующего напряжения воздушных линий от номинального значения на относительные потери электроэнергии и удельные дисконтированные затраты на ее передачу

А.А. Геркусов

Сниженное качество электроэнергии — одна из основных причин роста потерь электроэнергии в электрических сетях, ведущая к росту удельных дисконтированных затрат и тарифов на отпускаемую электроэнергию. Цель настоящей работы — анализ влияния отклонений действующего значения напряжения воздушных линий электропередачи (ВЛ) 35...500 кВ от номинального на условно-постоянные и нагрузочные потери электроэнергии при различных значениях плотности графика нагрузки, а также влияние отклонений напряжения на удельные суммарные дисконтированные затраты, как для случая повышения напряжения, так и при его понижении. Путем использования статических характеристик нагрузки по активной и реактивной мощностям для линий напряжением 35...500 кВ доказываемся, что любое отклонение напряжения от номинального неминуемо ведет к росту технических потерь электроэнергии и нарушению нормальной работы действующих электроустановок энергосистем и потребителей.

Проанализировано изменение условно-постоянных и нагрузочных потерь при изменении действующего напряжения для ВЛ 500 кВ для различных значений плотности графика нагрузки линии. В связи с тем, что суммарные дисконтированные затраты не определяют полностью реальных затрат на передачу одного киловатт-часа электроэнергии по ВЛ и не могут быть критерием при сопоставлении вариантов с различными передаваемыми мощностями или различным сроком расчетного периода, предложена оригинальная экономико-математическая модель ЛЭП, построенная на основании суммарных дисконтированных удельных затрат, с помощью которой рассматривается их изменение при варьировании действующего напряжения линии. Результаты исследования могут быть использованы для создания детальной методики по выявлению основных причин, вызывающих потери электроэнергии в воздушных линиях электропередачи, а также для экономической оптимизации режима рабочих напряжений эксплуатируемых ЛЭП с различными значениями плотности графика их нагрузки.

Ключевые слова: действующее напряжение, статическая характеристика нагрузки, потери электроэнергии, активная и реактивная мощности, суммарные удельные дисконтированные затраты, линия электропередачи.

Для цитирования: Геркусов А.А. Влияние отклонений действующего напряжения воздушных линий от номинального значения на относительные потери электроэнергии и удельные дисконтированные затраты на ее передачу // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 39—48. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-39-48.

The Influence of Overhead Power Line Effective Voltage Deviations from the Nominal Value on Relative Power Losses and on Specific Discounted Costs for Power Transmission

A.A. Gerkusov

Degraded quality of electric power is one of the main factors causing increased loss of electric power in electric networks and, as a consequence, a growth of specific discounted costs and tariffs for the electricity supplied. The purpose of this study is to analyze how deviations of the 35...500 kV overhead transmission lines effective voltage from the nominal value affect conditionally constant and load losses of electricity at different load curve density values, and how voltage deviations alter the specific total discounted costs both for increased and decreased voltage levels. It is demonstrated, by using static load active and reactive power characteristics for 35...500 kV lines, that any voltage deviation from the nominal level inevitably leads to a growth of technical energy losses and upsetting of normal operation of existing electrical installations of power systems and consumers.

The change of conditionally constant and load losses caused by a change of the 500 kV overhead line effective voltage for different power line load curve density values is analyzed. In view of the fact that the total discounted costs do not fully determine the real cost for transmitting

1 kW·h of electricity via an overhead line and cannot serve as a criterion in comparing versions with different transmitted power levels or with a different reporting period, an original power line economic-mathematical model is proposed, which was developed based on the total discounted specific costs. By using this model, the change of these costs in varying the power line effective voltage is considered. The obtained study results can be used for elaborating a detailed methodology for identifying the main factors causing electric power losses in overhead power lines and for economically optimizing the operating voltage regimes of existing power lines with different values of their load curve density values.

Key words: effective voltage, static load characteristic, electric power, active and reactive power, total specific discounted costs, power line.

For citation: Gerkusov A.A. The Influence of Overhead Power Line Effective Voltage Deviations from the Nominal Value on Relative Power Losses and on Specific Discounted Costs for Power Transmission. Bulletin of MPEI. 2020;1:39—48. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-39-48.

Введение

Одним из основных элементов электросетевого комплекса являются воздушные и кабельные линии электропередачи, обеспечивающие транспорт электроэнергии от источников мощности до потребителей. Наибольший удельный вес в структуре распределительных электрических сетей выполняют линии напряжением 110 кВ и ниже, однако, в связи с ростом электрических нагрузок потребителей и межсистемных перетоков мощности все чаще эти функции ложатся на линии напряжением 220 и даже 330 кВ.

Потери электроэнергии в сетях — важнейший показатель работы сетевой компании. Они отражают техническое состояние и качество эксплуатации электрических сетей, уровень их морального и технического старения, совершенство систем сбора и учета информации и прямо влияют на экономические показатели сетевых предприятий.

В стоимость услуг по передаче и распределению электроэнергии входит и стоимостная оценка ее потерь. При установлении ее тарифа региональные энергетические комиссии (РЭК) анализируют обоснованность потерь, что также требует всеобъемлющей информации о параметрах электрических сетей и режимах их работы.

Уменьшение потерь электроэнергии в сетях различного назначения — одно из основных направлений реализации энергосберегающей политики в стране, а проведение полного и всестороннего анализа причин, вызывающих потери электроэнергии, является актуальной задачей развития и моделирования энергосберегающих технологий.

Однако эффективное снижение потерь в электрических сетях путем внедрения соответствующих технико-экономических обоснованных мероприятий невозможно без достоверной информации о величине и, в первую очередь, структуре потерь. По этой причине разработке, внедрению и развитию методов расчета уделяется большое внимание [1 — 3].

Снижение качества электроэнергии и, в частности, отклонения уровня действующего напряжения от номинального, неминуемо ведут к росту потерь электроэнергии [2, 4, 5]. Для полного анализа картины изменения потерь при отклонении напряжения необходимо наличие полной и достоверной информации как о режимных параметрах сети (уровнях напряжения в узлах

и нагрузках в ветвях), так и параметрах самой сети (действительных активных сопротивлений элементов электрических сетей, климатических условиях их работы, техническом состоянии).

Несмотря на то, что развитие методологии по влиянию качества электроэнергии на технические потери в сетях актуально и необходимо, научно-исследовательских работ по этой тематике явно недостаточно [2, 4]. Поэтому необходимо дальнейшее развитие и уточнение теоретических основ и методов решения данной важнейшей народно-хозяйственной задачи.

Цель настоящей работы — анализ влияния отклонений рабочего напряжения воздушных линий (ВЛ) от номинального (как в сторону понижения, так и повышения) на потери электроэнергии и удельные суммарные дисконтированные затраты при ее передаче при различных значениях плотности графика нагрузки линии.

Рассмотрим виды технических потерь электроэнергии и методы их расчета.

Согласно [1, 2, 3, 6], технические потери электроэнергии состоят из условно-переменных (нагрузочных) и условно-постоянных потерь. Нагрузочные, или переменные потери — это потери электроэнергии на нагрев в продольных элементах воздушных и кабельных линий при передаче по ним тока нагрузки. К ним относятся: потери в линиях, шинпроводах, трансформаторах, токоограничивающих реакторах.

Нагрузочные потери ΔW_n электроэнергии в воздушной линии длиной L , согласно методу числа часов наибольших потерь мощности [1, 2], определим как

$$\Delta W_n = 3I_{нб}^2 r_0 L \tau, \quad (1)$$

где $I_{нб}$ — ток максимума нагрузки ВЛ, А; r_0 — удельное активное сопротивление линии, Ом/км; τ — время максимума потерь, ч, определяемое по эмпирической формуле (формуле Кезевича) [1, 2, 6],

$$\tau = (0,124 + 10^{-4} T_{нб})^2 \cdot 8760.$$

Здесь $T_{нб}$ — число часов использования максимума нагрузки, ч.

Условно-постоянные потери — это часть технических потерь в элементах электрических сетей (поперечных ветвях схем замещения), условно не зависящие от передаваемой по элементам сети мощности. К ним относят три вида климатических потерь, т. е. потерь, зависящих от погодных условий. Это потери на корону,

потери от токов утечки в линейной изоляции и расход электроэнергии на плавку гололеда.

Допущение 1. Согласно [2, 3], для отдельно взятой ВЛ сечением 95...330 мм² расчетный расход электроэнергии на плавку гололеда равен 24...74 кВт·ч/км, что соответствует 0,2% от суммы климатических потерь. Вследствие чего данную составляющую в дальнейших расчетах не учитываем.

Потери электроэнергии на корону в линиях ΔW_k согласно [1, 2, 6, 7] определяют, исходя из данных об удельных потерях мощности, приведенных в справочной технической литературе [1, 2, 6], и продолжительности видов погоды в течение расчетного периода по формуле:

$$\Delta W_k = L \sum_{i=1}^4 \Delta P_{ki} T_{pi} k_{икор},$$

где T_{pi} — продолжительность i -го вида погоды, ч; ΔP_{ki} — удельные потери мощности на корону при i -м виде погоды, кВт/км.

При отсутствии данных о продолжительности видов погоды в течение расчетного периода потери электроэнергии на корону в линии находят в зависимости от региона расположения линии по среднегодовым значениям потерь мощности $\Delta P_{к.ср}$ [1, 2]:

$$\Delta W_k = 8760L \Delta P_{к.ср} k_{икор}, \quad (2)$$

где $k_{икор}$ — поправочный коэффициент на рабочее напряжение линии U , определяемый, согласно [5], как

$$k_{икор} = 4,65U_{отн}^{2*} - 3,65U_{отн}^*,$$

где $U_{отн}^*$ — отношение фактического напряжения линии U к его номинальному значению U_n .

Основной фактор, характеризующий потери на корону в воздушных линиях, — отношение напряженности электрического поля на поверхности проводов к начальной напряженности короны, зависящей от рабочего напряжения, сечения и количества проводов в фазе, типа опоры и электрической характеристики воздуха.

Потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам воздушных линий

В нормальном эксплуатационном режиме по изоляторам течет так называемый фоновый ток утечки. Длительный фоновый ток утечки в условиях увлажнения изоляторов практически одинаков для линий любого класса напряжения и составляет 0,5...1 мА.

Потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам для ВЛ $\Delta W_{из}$ при варьируемом фактическом напряжении U , согласно [1, 2, 6, 8] вычислим по следующей формуле:

$$\Delta W_{из} = \frac{U^2}{3R_{из} N_{из}} T_{вл} L N_{гир}, \quad (3)$$

где $T_{вл}$ — продолжительность влажной погоды в расчетном периоде, ч; $N_{гир}$ — число гирлянд изолято-

ров, шт./км; $R_{из}$ — сопротивление изоляторов в зависимости от уровня степени загрязнения атмосферы (СЗА) (для принятого третьего уровня СЗА $R_{из} = 915$ кОм); $N_{из}$ — число изоляторов в фазе линии.

В оценочных расчетах при поиске числа гирлянд (табл. 1) рекомендуется использовать средние значения числа опор на 1 км для ВЛ различных классов напряжений [1, 8].

Таблица 1

Удельное число гирлянд для ВЛ различных напряжений

Напряжение ВЛ, кВ	$N_{гир}$, шт./км
500	11,3
220	9,8
150	11,2
110	12,9
35	23,4
6...20	46,8

Годовые суммарные относительные потери электроэнергии в заданной ВЛ $\Delta W_{\Sigma}/W$ выразим через выражение [8]:

$$\frac{\Delta W_{\Sigma}}{W} = \frac{\Delta W_n + \Delta W_k + \Delta W_{из}}{W} = \frac{3I_{нб}^2 r_0 L \tau + 8760L \Delta P_{к.ср} + \frac{U^2}{3R_{из} N_{из}} T_{вл} L N_{гир}}{\sqrt{3} U I_{нб} T_{нб} \cos \varphi}, \quad (4)$$

где W — объем передаваемой электроэнергии; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности подключенных потребителей.

Таким образом, зависимость (4) $\Delta W_{\Sigma}/W = f(I_{нб}, r_0, \tau, L, U, \Delta P_{к.ср}, R_{из}, N_{из}, N_{гир}, T_{вл}, \cos \varphi)$ концентрирует в себе целую серию технических параметров как самой линии, так и параметров ее режима, меняя которые, можно добиться настраивания рассматриваемой линии на режим передачи электроэнергии с минимальными относительными потерями.

Влияние отклонения напряжения на потери электроэнергии и удельные дисконтированные затраты

Отклонение напряжения от номинального ΔU — один из основных показателей качества электроэнергии, в нормальном установившемся режиме электрической системы в абсолютных единицах равен $\Delta U = U - U_n$ и связан с изменением нагрузки у потребителей и возникающим вследствие этого нарушением баланса генерируемой и потребляемой в системе активной и реактивной мощностей. В результате меняются токи источников электроэнергии, трансформаторов, межсистемных связей. Сверхдопустимые отклонения напряжения ведут к возникновению дополнительных

потерь электроэнергии, снижению качества и надежности работы технологических комплексов вплоть до аварийных режимов, сбоем и нарушению работы в системах информатизации и автоматизации, падению экономических показателей электротехнических комплексов, негативному воздействию на людей [5, 9 — 11].

Источниками отклонений напряжения являются электроприемники с резкопеременным характером потребления активной и реактивной мощностей. Среди них основными считаются термические печи, электродвигатели большой мощности, осветительные приборы [9, 11].

Допущение 2. Условно примем, что защита от понижения и повышения напряжения на питающих подстанциях выведена, а потребители жестко соединены с источниками питания (без автоматических выключателей, магнитных пускателей, контакторов и предохранителей).

Рассмотрим влияние отклонения фактического напряжения линии от номинального на характер изменения и величину годовых суммарных относительных потерь (4). Для определения токовой нагрузки линии при отклонении рабочего напряжения воспользуемся усредненными статическими характеристиками нагрузки (СХН) линии по напряжению, представляющими собой зависимости потребляемой активной и реактивной мощностей приемника от напряжения. Выражения, описывающие указанные зависимости, примут следующий вид:

$$P = P_{\text{но}} \left[a_p + b_p \frac{U}{U_{\text{н}}} + c_p \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right];$$

$$Q = Q_{\text{но}} \left[a_q + b_q \frac{U}{U_{\text{н}}} + c_q \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right],$$

где $P_{\text{но}}$, $Q_{\text{но}}$ — активная и реактивная мощности, потребляемые линией при номинальном напряжении.

Коэффициенты a_p , b_p , c_p , a_q , b_q , c_q характеризуют вид статических характеристик нагрузки и зависят от вида и состава нагрузки. Их значение определяется экспериментально или путем подбора аппроксимирующего полинома, например методом наименьших квадратов. Данные коэффициенты должны удовлетворять условиям:

$$a_p + b_p + c_p = 1; \quad a_q + b_q + c_q = 1.$$

Весьма распространены следующие наборы:

$$a_p = 0,45; \quad b_p = 0,4; \quad c_p = 0,15;$$

$$a_q = 6,7; \quad b_q = -15,3; \quad c_q = 9,6.$$

Таким образом, согласно имеющимся СХН, изменение действующего напряжения линии ведет к варьированию потребляемой линией активной и реактивной мощностей, а, следовательно, коэффициента мощности и наибольшего нагрузочного тока, определяемых как:

$$I_{\text{ног}} = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{3U^2}}; \quad (5)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (6)$$

Подставив рассчитанные по (5), (6) значения $I_{\text{ног}}$ и $\cos \varphi$ в (4) при принятых марке провода, значениях $T_{\text{ног}}$, L и других параметрах ВЛ, получим годовые суммарные относительные потери электроэнергии в заданной ВЛ.

Результаты проведенного расчета сведены в табл. 2, на основании которой построена графическая зависимость $\Delta W_{\Sigma}/W = f(U)$, хорошо аппроксимируемая полиномом шестого порядка и являющаяся по сути математической моделью относительных потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи при следующих исходных данных: номинальное напряжение ВЛ — $U_{\text{н}} = 35, 110$ кВ; длина воздушных линий — $L = 50, 150$ км; число часов использования максимума нагрузки — $T_{\text{ног}} = 3000, 5000, 7900$ ч; ВЛ эксплуатируются в третьем районе по СЗА ОЭС Центра, представлена проводами марки АС при сечениях $F = 70$ и 240 мм² (рис. 1, 2).

Как следует из данных табл. 2 и рис. 1, 2 величина суммарных относительных потерь $\Delta W_{\Sigma}/W$ с ростом приложенного напряжения U резко снижается до некоторого минимального значения $(\Delta W_{\Sigma}/W)_{\text{мин}}$, и при $U/U_{\text{н}} > 1,032 \dots 1,043$ намечается тенденция к медленному и незначительному росту суммарных относительных потерь, что объясняется возрастанием составляющих потерь на корону и в линейной изоляции.

Проведем аналогичный анализ влияния текущего напряжения на потери электроэнергии с учетом условно-постоянных потерь на корону и в линейной изоляции для ВЛ-500 кВ длиной 280 км, выполненной проводами марки ЗАС-330/43 при указанных исходных данных. Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов для ВЛ-500 кВ возьмем в соответствии с [10, 12, 14]:

$$a_p = 0,83; \quad b_p = -0,3; \quad c_p = 0,47;$$

$$a_q = 3,7; \quad b_q = -7; \quad c_q = 4,3.$$

Активную и реактивную мощности, потребляемые линией при номинальном напряжении, примем в пределах 25% от пропускной способности линии: $P_{\text{но}} = 200$ МВт, $Q_{\text{но}} = 66$ МВАр при $\cos \varphi = 0,95$.

По результатам выполненных расчетов нагрузочных относительных потерь электроэнергии (1) $\Delta W_{\text{к}}/W$, потерь на корону (2) $\Delta W_{\text{к}}/W$, потерь в линейной изоляции (3) $\Delta W_{\text{из}}/W$, суммарных относительных потерь (4) $\Delta W/W$ и принятых значениях $T_{\text{ног}} = 3000$ и 7900 ч построим графические зависимости $\Delta W_{\text{к}}/W = f(U)$, $\Delta W_{\text{к}}/W = f(U)$, $\Delta W_{\text{из}}/W = f(U)$ и $\Delta W/W = f(U)$ (рис. 3), из которых следует, что для слабо загруженных линий 500 кВ и выше в связи с отсутствием короны при глубоких снижениях напряжения основным источником

Таблица 2

Относительные потери электроэнергии в ВЛ-35, 110 кВ

Номинальное напряжение ВЛ $U_{ном}$, кВ	Марка провода	Фактическое напряжение линии U , кВ	Относительные потери электроэнергии, $\Delta W/W$ при $T_{нб}$, ч		
			3000	5000	7900
35	АС-70	17	0,72395	0,94046	1,27684
		20	0,41034	0,53282	0,72324
		23	0,27999	0,36333	0,49303
		27	0,20441	0,26496	0,35936
		35	0,15560	0,20124	0,27266
		38	0,15641	0,20219	0,27389
		41	0,16707	0,21593	0,29248
		45	0,19689	0,25456	0,34484
110	АС-240	60	0,27714	0,35966	0,44881
		65	0,21549	0,27948	0,37916
		75	0,15001	0,19425	0,26334
		90	0,10925	0,14106	0,19097
		100	0,09682	0,12471	0,16864
		110	0,09134	0,11739	0,15859
		115	0,09099	0,11683	0,15776
		128	0,09754	0,12509	0,16882
		130	0,09952	0,12763	0,17224

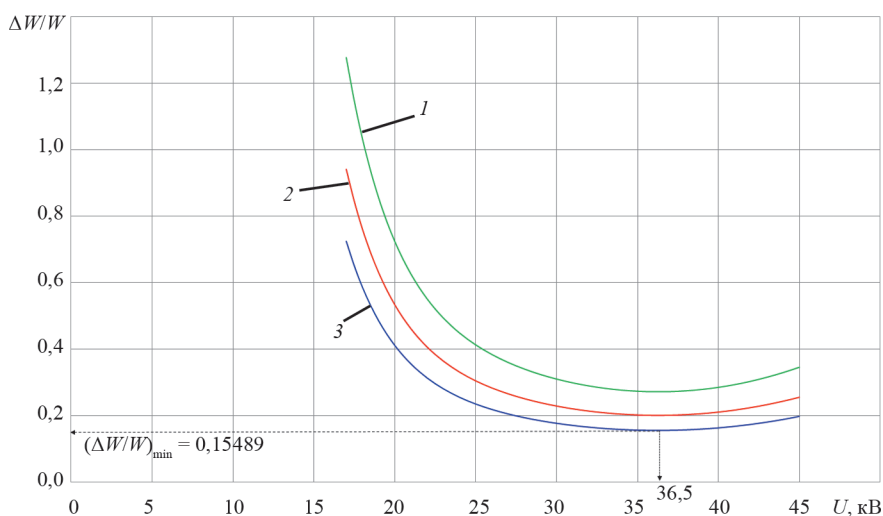


Рис. 1. Зависимость суммарных относительных потерь электроэнергии от действующего напряжения для ВЛ-35 кВ длиной $L = 50$ км, сооружаемой сталеалюминиевыми проводами марки АС-70 в третьем районе по СЗА; $T_{нб} = 7900$ (1), 5000 (2), 3000 (3) ч

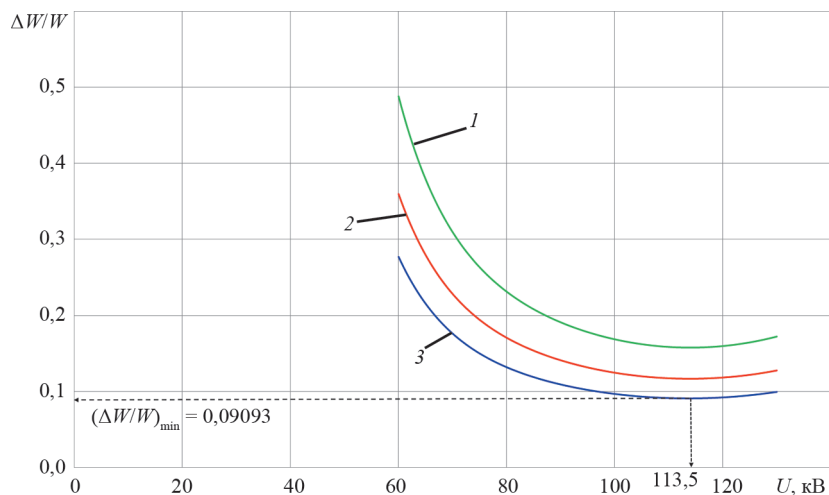


Рис. 2. Зависимость суммарных относительных потерь электроэнергии от действующего напряжения для ВЛ-110 кВ длиной $L = 150$ км со сталеалюминиевыми проводами марки АС-240 в третьем районе по СЗА; $T_{нб} = 7900$ (1), 5000 (2), 3000 (3) ч

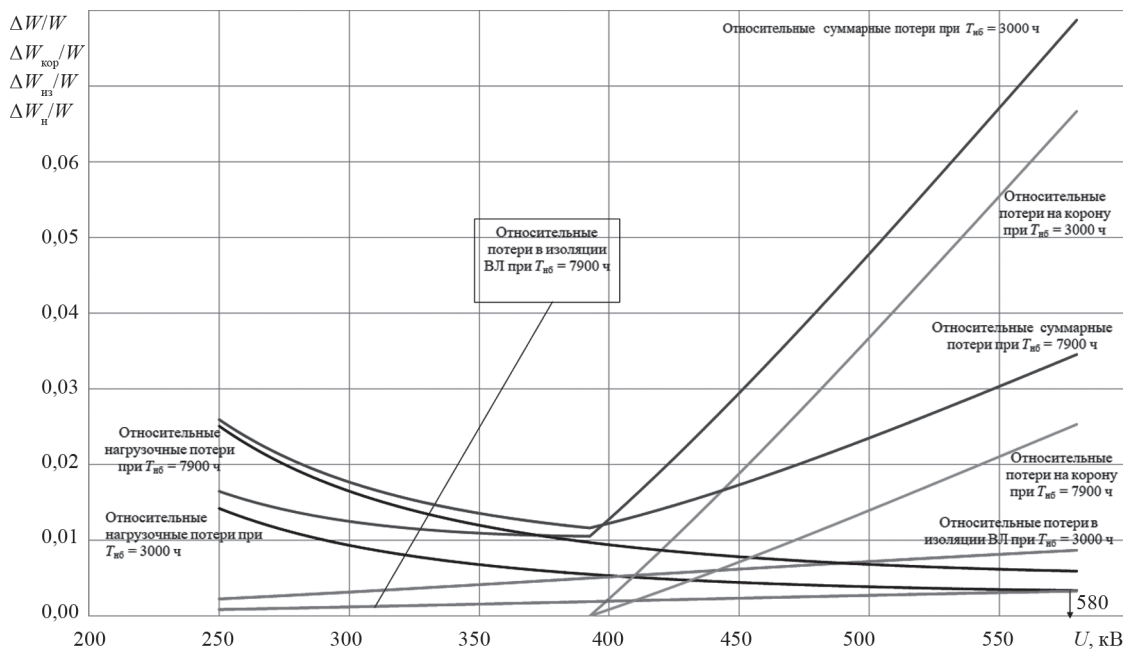


Рис. 3. Зависимости относительных нагрузочных потерь, потерь на корону, потерь в линейной изоляции и суммарных относительных потерь электроэнергии от действующего напряжения для ВЛ-500 кВ длиной $L = 280$ км, сооружаемой сталеалюминиевыми проводами марки ЗАС-330 в третьем районе по СЗА ОЭС Центра при различных плотностях графика нагрузки

потерь электроэнергии остаются нагрузочные потери. По мере нарастания напряжения в линии и появления в проводах короны главной причиной потерь электроэнергии оказывается корона вокруг проводов ВЛ.

Увеличение плотности графика нагрузки снижает уровень суммарных относительных потерь в связи с ростом передаваемых объемов электроэнергии (увеличение числителя в (4)) и ведет к росту КПД линии.

Классическим приемом технико-экономического сопоставления сравниваемых вариантов технических решений различных инженерных задач, различающихся по производительности, является использование удельных дисконтированных затрат $Z_{уд.д}$, рассчитанных на единицу объема продукции [15, 16, 17]. При сравнении и ранжировке проектов по данному показателю предпочтение отдается тому варианту, у которого это значение окажется минимальным. Применим указанный подход для анализа влияния отклонения напряжения линии от номинального и рассчитаем удельные дисконтированные затраты на передачу 1 кВт·ч электроэнергии для ВЛ-35, 110 кВ при различных значениях фактического напряжения линии в условиях его отклонения от номинального. Согласно [15, 16, 18, 19], формула для расчета удельных дисконтированных затрат имеет вид:

$$Z_{уд.д} = \frac{Z_d}{\sum_{t=0}^{T_p} W_t (1 + E_{cp})^{-t}}, \quad (7)$$

где Z_d — дисконтированные затраты за расчетный период T_p строительства и срок службы ЛЭП, условно равный 50-и г., руб.; W_t — отпуск электроэнергии по годам расчетного периода, кВт·ч/г., E_{cp} — средний норматив дисконтирования, условно равный 0,1.

Полученные значения $Z_{уд.д}$ достаточно полно отражают затраты на передачу энергии по линии, поэтому их также можно сравнивать со средними тарифами на электроэнергию в районе сооружения проектируемой ЛЭП. В случае, если $Z_{уд.д}$ превышает этот тариф, то при дефиците энергии и в условиях отсутствия конкуренции может встать вопрос о пересмотре тарифов в сторону увеличения.

Допущение 3. Условно принимаем, что все капиталовложения в сооружаемую линию осуществляются в течение одного года.

Знаменатель формулы (7) показывает суммарный за расчетный период T_p «дисконтированный» отпуск электроэнергии, в величину которого заложено изменение ценности результата для потребителей при изменении времени его получения. Действительно, для реальных секторов экономики важно быстрее получить электроэнергию, поскольку она — основа открытия любого нового объекта или расширения действующего проекта на новые территории, охваченные электрификацией, а для жилого сектора и социальной сферы — возможность быстро повысить качество жизни населения.

С учетом потерь на корону и в линейной изоляции выражение (7) для воздушных линий заданной длины L примет вид [18, 19]:

$$Z_{уд.д} = \frac{K_0 L + \left[\sum_{t=0}^{50} \left(P_{об.рем} K_0 + 0,003 I_{нб}^2 r_0 \tau \Pi + +8760 \Delta P_{кор} \Pi + \frac{U^2 T_{вл} N_{гир} \Pi}{3 N_{из} R_{из}} \right) (1 + E_{ср})^{-t} \right] L}{\sum_{t=0}^{50} \sqrt{3} U I_{нб} T_{нб} \cos(\varphi) (1 + E_{ср})^{-t}}$$

или

$$Z_{уд.д} = \frac{\left[K_0 + D \left(P_{об.рем} K_0 + 0,003 I_{нб}^2 r_0 \tau + +8760 \Delta P_{к} \Pi + \frac{U T_{вл} N_{гир} \Pi}{3 N_{из} R_{из}} \right) \right] L}{\sqrt{3} U I_{нб} T_{нб} \cos \varphi D},$$

где K_0 — удельные капиталовложения в сооружение воздушных линий, руб./км; Π — действующий тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; $\Delta P_{кор}$ — удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, кВт/км; $P_{об.рем}$ — амортизационные отчисления на обслуживание и ремонт ВЛ; D — дисконтирующий множитель, представляющий собой безразмерную величину, определяемую по формуле суммы убывающей геометрической прогрессии по [18, 19]:

$$D = \frac{1 - (1 + E_{ср})^{-t}}{E_{ср}}. \tag{9}$$

При сравнении двух или более вариантов проектирования и сооружения ЛЭП критерием выбора оптимального варианта является минимум $Z_{уд.д}$. Таким образом, этот показатель может служить критерием выбора оптимального решения конкретной инженерной задачи (например, выбора сечения проводов, числа цепей

и конструкции фазы воздушных и кабельных линий, номинального напряжения ЛЭП), т. е. быть основой для технико-экономической модели, используемой при проектировании ЛЭП.

Выражение (8) с учетом (9) представляет собой многофакторную экономико-математическую модель, которую следует использовать для технико-экономического анализа сооружаемых ЛЭП. Она определяет зависимость удельных дисконтированных затрат на передачу электроэнергии от действующего напряжения U , максимального тока нагрузки $I_{нб}$, числа часов использования максимума нагрузки $T_{нб}$, сечения и конструкции фазы, района гололедности прохождения линии, степени загрязнения атмосферы, нормы дисконтирования $E_{ср}$, тарифа на электроэнергию Π и ряда других технико-экономических параметров.

Исследуем с ее помощью вид зависимости $Z_{уд.д} = f(U)$ при различных значениях времени $T_{нб}$ и фиксированных значениях Π , $\cos\varphi$, сечения провода, района гололедности и СЗА. По результатам проведенных расчетов для ВЛ-35, 110 кВ построим серии кривых $Z_{уд.д} = f(U)$ (рис. 4, 5) из которых следует, что при значительных снижениях напряжения ВЛ, в частности, при его лавинах, наблюдается резкий рост удельных дисконтированных затрат, а следовательно, и рост тарифов на электроэнергию. При стабилизации уровня напряжения, близкого к номинальному, затраты $Z_{уд.д}$ снижаются, и уменьшается их зависимость от плотности графика нагрузки.

Для эффективного устранения отклонений напряжения и ликвидации связанных с ним последствий следует разрабатывать и применять специальные технические мероприятия, которыми могут быть [11, 12, 20]:

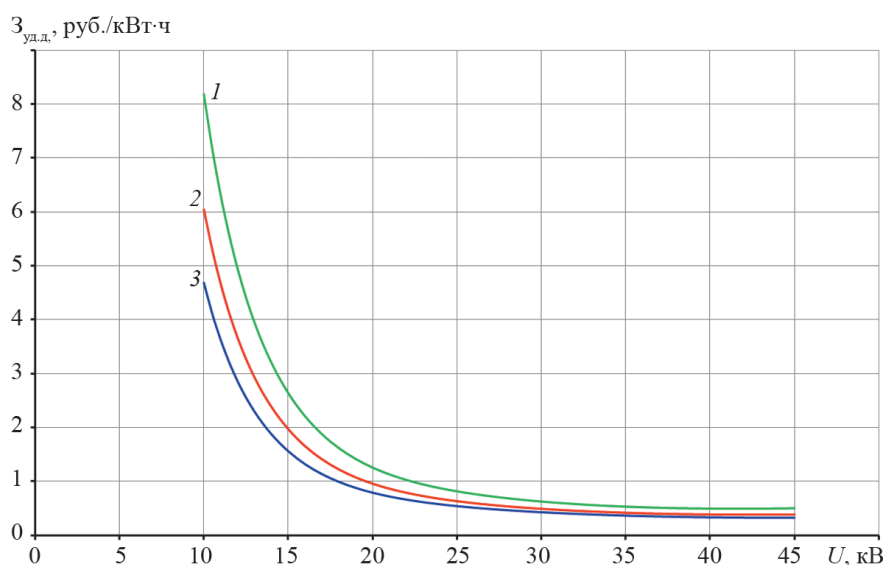


Рис. 4. Зависимость относительных суммарных дисконтированных затрат от действующего напряжения ВЛ-35 кВ развернутой длины 50 км, выполненной сталеалюминиевыми проводами марки АС-70 в первом и втором районах гололедности и третьем районе по СЗА; $T_{нб} = 7900$ (1), 5000 (2), 3000 (3) ч

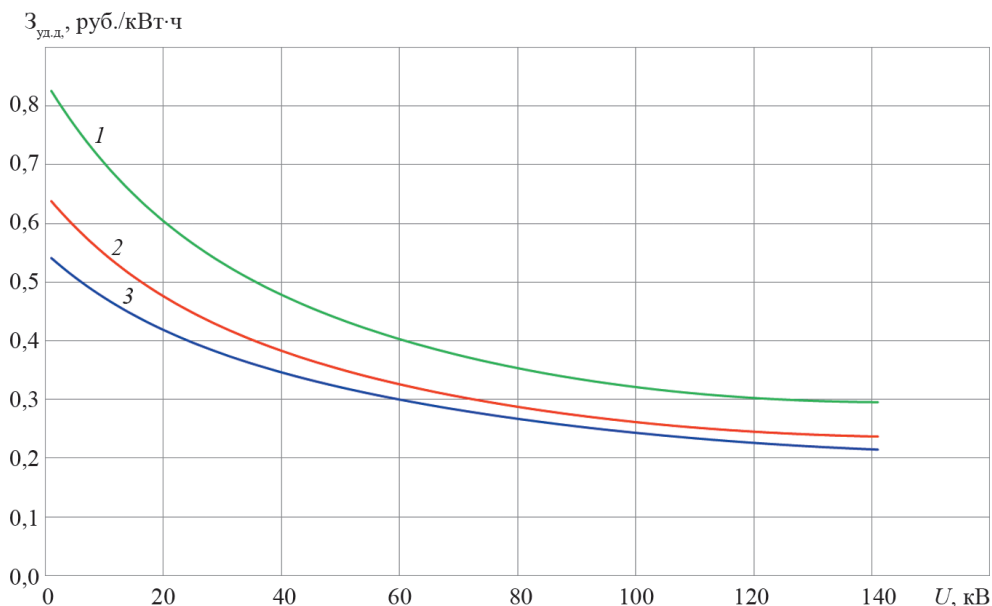


Рис. 5. Зависимость относительных суммарных дисконтированных затрат от действующего напряжения ВЛ-110 кВ развернутой длины 150 км, выполненной сталеалюминиевыми проводами марки АС-240 в первом и втором районах гололедности и третьем районе по СЗА; $T_{\text{нб}} = 7900$ (1), 5000 (2), 3000 (3) ч

- использование оптимально спроектированных и установленных батарей статических конденсаторов (БСК);

- включение в узлы нагрузки синхронных компенсаторов;

- перевод части синхронных генераторов электростанций в компенсаторный режим;

- добавление устройств РПН с использованием в них коммутации современных силовых электронных ключей, позволяющих проводить многократные переключения с практически неограниченным количеством коммутаций;

- применение компенсатора реактивной мощности емкостного и индуктивного характеров типа СТАТКОМ, включаемого параллельно с нагрузкой.

Комбинация рассмотренных способов регулирования напряжения — наиболее эффективный метод устранения недопустимых отклонений напряжения на сборных шинах нагрузки.

Литература

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2009.
3. Воротницкий В.Э. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. М.: Теплоэнергетик, 2016.
4. Сафонов Д.Т., Люtareвич А.Г., Долингер С.Ю., Бiryukov С.В. Влияние отклонения напряжения на

Заключение

Отклонение действующего напряжения ВЛ от номинального, как в сторону повышения, так и понижения, ведет к возрастанию суммарных относительных потерь электроэнергии, причем понижение напряжения в разы увеличивает потери, нежели повышение.

Для слабо загруженных линий сверхвысокого напряжения основной причиной потерь электроэнергии является корона вокруг проводов воздушной линии.

Построена экономико-математическая модель ЛЭП, определяющая зависимость суммарных дисконтированных относительных затрат от действующего напряжения, позволяющая сопоставить сравниваемые варианты сооружаемых ЛЭП, различающихся по производительности (объемам передаваемой электроэнергии).

При понижении напряжения в линии удельные дисконтированные затраты резко возрастают, причем возрастание тем значительнее, чем больше число часов использования максимума нагрузки заданной линии.

References

1. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, Analiz i Normirovanie Poter' Elektroenergii v Elektricheskikh Setyakh. M.: Izd-vo NTS ENAS, 2005. (in Russian).
2. Zhelezko Yu.S. Poteri Elektroenergii. Reaktivnaya Moshchnost'. Kachestvo Elektroenergii. Rukovodstvo dlya Prakticheskikh Raschetov. M.: Izd-vo NTS ENAS, 2009. (in Russian).
3. Vorotnitskiy V.E. Energoberezhenie i Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti v Elektricheskikh Setyakh. M.: Teploenergetik, 2016. (in Russian).
4. Safonov D.T., Lyutarevich A.G., Dolinger S.Yu., Biryukov S.V. Vliyaniye Otkloneniya Napryazheniya na

потери мощности в электрооборудовании электрических сетей и потребителей // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 203—206.

5. **Петрова Е.Г.** Определение потери мощности при потере напряжения в радиальных сетях с учетом характеристик нагрузки и других параметров электрических систем. М.: Изд-во МЭИ, 1996.

6. **Железко Ю.С., Шаров Ю.В., Зарудский Г.К., Сипачева О.В., Шведов Г.В.** Потери электроэнергии в электрических сетях: основные сведения, расчет и нормирование. М.: Издат. дом МЭИ, 2011.

7. **Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г.** Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения // Электро. 2010. № 3. С. 19—23.

8. **Геркусов А.А.** Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям напряжением 110 кВ и выше // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 1 (214). С. 89—96.

9. **Лисина Л.Ф.** Балансы реактивной мощности и их составляющие // Вестник Ангарской гос. техн. академии. 2013. № 7. С. 62—67.

10. **Воротницкий В.Э., Рабинович М.А., Краковский С.К.** Оптимизация режимов электрических сетей 220...750 кВ по реактивной мощности и уровням напряжения // Энергия единой сети. 2013. № 3(8). С. 50—59.

11. **Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем М.: Изд-во МЭИ, 2012.

12. **Горожанкин П.А., Майоров А.В., Макаровский С.Н., Рубцов А.А.** Управление напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах. Европейский опыт // Электрические станции. 2008. № 6. С. 40—47.

13. **Кониюхова Е.А.** Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2004.

14. **Статические** характеристики электрических нагрузок [Электрон. ресурс] www.5fan.ru/wievjob.php?id=74337 (дата обращения 14.01.2019).

15. **Барановский А.И. и др.** Экономика промышленности. Т. 1. Общие вопросы экономики. М.: Изд-во МЭИ, 1997.

16. **Барановский А.И. и др.** Экономика промышленности. Т. 2. Экономика и управление энергообъектами. М.: Изд-во МЭИ, 1998.

17. **Improved Decision Aid Methods and Tools to Support Evaluation of Investment for Transport and Energy Networks in Europe. Deliverable 3.2. Methodological Developments** [Электрон. ресурс] www.eva-tren.eu/Documenti/D3.2_final.pdf (дата обращения 14.01.2019).

18. **Геркусов А.А., Макаров В.М.** Технико-экономическое обоснование выбора параметров и режимов работы проектируемых линий электропередачи // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2016. Т. 20. № 2. С. 66—73.

Poteri Moshchnosti v Elektrooborudovanii Elektricheskikh Setey i Potrebiteley. Omskiy Nauchnyy Vestnik. 2013;2 (120):203—206. (in Russian).

5. **Petrova E.G.** Opredelenie Poteri Moshchnosti pri Potere Napryazheniya v Radial'nykh Setyakh s Uchetom Kharakteristik Nagruzki i Drugikh Parametrov Elektricheskikh Sistem. M.: Izd-vo MEI, 1996. (in Russian).

6. **Zhelezko Yu.S., Sharov Yu.V., Zarudskiy G.K., Sipacheva O.V., Shvedov G.V.** Poteri Elektroenergii v Elektricheskikh Setyakh: Osnovnye Svedeniya, Raschet i Normirovanie. M.: Izdat. Dom MEI, 2011. (in Russian).

7. **Sharov Yu.V., Gadzhiev M.G.** Izmerenie Poter' Moshchnosti na Koronu v Liniyakh Sverkhvysokogo Napryazheniya. Elektro. 2010;3:19—23. (in Russian).

8. **Gerkusov A.A.** Optimizatsiya Poter' Elektroenergii, Peredavaemoy po Vozdushnym Liniyam Napryazheniem 110 kV i Vyshe. Nauchno-tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU. 2015;1 (214):89—96. (in Russian).

9. **Lisina L.F.** Balansy Reaktivnoy Moshchnosti i Ikh Sostavlyayushchie. Vestnik Angarskoy Gos. Tekhn. Akademii. 2013;7:62—67. (in Russian).

10. **Vorotnitskiy V.E., Rabinovich M.A., Krakovskiy S.K.** Optimizatsiya Rezhimov Elektricheskikh Setey 220...750 kV po Reaktivnoy Moshchnosti i Urovnyam Napryazheniya. Energiya Edinoy Seti. 2013;3(8):50—59. (in Russian).

11. **Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G.** Upravlenie Potokami Elektroenergii i Povyshenie Effektivnosti Elektroenergeticheskikh Sistem M.: Izd-vo MEI, 2012. (in Russian).

12. **Gorozhankin P.A., Mayorov A.V., Makarovskiy S.N., Rubtsov A.A.** Upravlenie Napryazheniem i Reaktivnoy Moshchnost'yu v Elektroenergeticheskikh Sistemakh. Evropeyskiy Opyt. Elektricheskie Stantsii. 2008;6:40—47. (in Russian).

13. **Konyukhova E.A.** Elektrosnabzhenie Ob'ektov. M.: Akademiya, 2004. (in Russian).

14. **Staticheskie** Kharakteristiki Elektricheskikh Nagruzok [Elektron. Resurs] www.5fan.ru/wievjob.php?id=74337 (Data Obrashcheniya 14.01.2019). (in Russian).

15. **Baranovskiy A.I. i dr.** Ekonomika Promyshlennosti. T. 1. Obshchie Voprosy Ekonomiki. M.: Izd-vo MEI, 1997. (in Russian).

16. **Baranovskiy A.I. i dr.** Ekonomika Promyshlennosti. T. 2. Ekonomika i Upravlenie Energoob'ektami. M.: Izd-vo MEI, 1998. (in Russian).

17. **Improved Decision Aid Methods and Tools to Support Evaluation of Investment for Transport and Energy Networks in Europe. Deliverable 3.2. Methodological Developments** [Elektron Resurs] www.eva-tren.eu/Documenti/D3.2_final.pdf (Data Obrashcheniya 14.01.2019).

18. **Gerkusov A.A., Makarov V.M.** Tekhniko-ekonomicheskoe Obosnovanie Vybor Parametrov i Rezhimov Raboty Proektiruemykh Liniy Elektroperedachi. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2016; 20;2:66—73. (in Russian).

19. **Геркусов А.А., Габдулвалиева Е.И.** Экономическая коррекция плотностей тока в проводах действующих воздушных линий 110...220 кВ // Известия вузов. Серия «Проблемы энергетики». 2018. № 9 — 10. С. 25—32.

20. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) электропередач переменного тока в энергосистемах. М.: Изд-во Торус Пресс, 2011.

19. **Gerkusov A.A., Gabdulvalieva E.I.** Ekonomicheskaya Korrektsiya Plotnostey Toka v Provodakh Deystvuyushchikh Vozdushnykh Liniy 110...220 kV. Izvestiya Vuzov. Seriya «Problemy Energetiki». 2018;9 — 10: 25—32. (in Russian).

20. **Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G.** Primenenie Gibkikh (Upravlyaemykh) Elektropredach Peremennogo Toka v Energosistemakh. M.: Izd-vo Torus Press, 2011. (in Russian).

Сведения об авторе:

Геркусов Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и информационных технологий Зеленодольского института машиностроения и информационных технологий (филиал КНИТУ-КАИ), e-mail: gerkusov_alex@mail.ru

Information about author:

Gerkusov Aleksey A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Mechanical Engineering and Information Technology Dept., Zelenodolsk Institute of Mechanical Engineering and Information Technology (branch of Kazan State Technical University), e-mail: gerkusov_alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 14.03.2019

The article received to the editor: 14.03.2019