

---

УДК 621.311

**А.Б. Баламетов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
**Э.Д. Халилов**<sup>1</sup>, **Т.М. Исаева**<sup>2</sup>, кандидаты техн. наук

<sup>1</sup> Азербайджанский Научно-исследовательский  
и проектно-исследовательский ин-т энергетики, ООО «Азербээнержи»,

<sup>2</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности  
(Республика Азербайджан, Аз 1012 Баку, пр. Зардаби, 94,  
тел. (+99412) 4301551, e-mail: balametov.azniie@gmail.com)

## **Повышение точности моделирования режима линии электропередачи на основе текущих параметров**

Исследованы способы повышения точности моделирования режимов линии электропередачи сверхвысокого напряжения по данным векторных измерений. Рассмотрены возможности выбора математических моделей расчета параметров режима, соответствующих исходной информации. Предложена методика моделирования режимов линии электропередачи с учетом реальных характеристик потерь на корону и реактивного эффекта короны, основанная на представлении воздушной линии каскадными схемами. Моделирование выполнено на примере линии 750 кВ. Исследованы погрешности моделирования различными методами.

Досліджено способи підвищення точності моделювання режимів лінії електропередачі надвисокої напруги згідно з даними векторних вимірювань. Розглянуто можливості вибору математичних моделей розрахунку параметрів режиму, відповідних вихідній інформації. Запропоновано методика моделювання режимів лінії електропередачі з урахуванням реальних характеристик втрат на корону і реактивного ефекту корони, яка базована на представленні повітряної лінії каскадними схемами. Моделювання виконано на прикладі лінії 750 кВ. Досліджено похибки моделювання різними методами.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* воздушная линия, сверхвысокие напряжения, векторные измерения, потери на корону, реактивный эффект короны, каскадная схема линии, уравнения с распределенными параметрами, погрешности моделирования.

Для эффективного управления линией электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) требуется полная и точная информация о параметрах режима, характеризующих текущее состояние линии. Активное сопротивление, активная и емкостная проводимости, потери мощности на нагрев проводов и на корону воздушной линии (ВЛ) электропередачи в реальных условиях изменяются в зависимости от температуры окружающей среды и метеорологических условий трассы. Сопротивление провода зависит от плотности тока, температуры окружающей среды, скорости и

© А.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов, Т.М. Исаева, 2016

направления ветра и интенсивности осадков. В связи с этим является актуальным оперативное моделирование параметров режима ВЛ с учетом реальных условий [1—7].

Для решения задачи расчета, идентификации электрических параметров, оперативного управления и оптимизации режимов ЛЭП СВН требуется модель расчета, соответствующая исходным данным синхронизированных векторных измерений. На ЛЭП СВН измерение потерь мощности на корону необходимо для оптимального управления режимами ВЛ по напряжению и реактивной мощности, оперативного уточнения параметров модели ВЛ, технико-экономического анализа работы ВЛ при обмене электрической энергией между энергосистемами (ЭЭС).

В оперативно-информационном комплексе (ОИК) диспетчерского центра полная и точная информация о параметрах режима, характеризующая текущее состояние ЭЭС, поступает с помощью средств телемеханики в виде телесигналов (ТС) и телеизмерений (ТИ) параметров режима, современных автоматизированных информационно-измерительных систем (ОИК, SCADA, PMU (Phasor Measurement Units)), микропроцессорных измерительных приборов (счетчиков). Эти системы и комплексы для измерения параметров режима позволяют решить многие проблемы измерения, усреднения и хранения информации, а работа с ЭВМ для моделирования режимов ВЛ, коронирования проводов и других процессов дает возможность организовать измерения на качественно новом уровне.

Для получения необходимой информации о состоянии ЭЭС до недавнего времени использовались ТИ переменного режима и ТС о состоянии коммутационного оборудования, получаемые от системы SCADA. Основные проблемы, возникающие при решении данной задачи, связаны с недостаточным объемом и плохим качеством измерительной информации, поступающей от системы SCADA, что приводит к ошибкам и низкой точности получаемых оценок.

Оборудование PMU, установленное в узле, может обеспечить измерение модуля  $U_j$  и фазы  $\delta_j$  напряжения в этом узле, модуля тока и значения угла между напряжением и током  $\varphi_{ii}$  во всех примыкающих к этому узлу ветвях. Использование измерений комплексных электрических величин, поступающих от PMU — основного измерительного оборудования системы WAMS (Wide-Area Measurement System) — позволяет контролировать состояние ЭЭС синхронно и с высокой точностью. При этом повышается точность решения задач оценки состояния, установившегося режима, оптимизации. Информация повышенной точности обеспечивает повышение надежности управления электрическими режимами ЭЭС.

В связи с внедрением современных информационно-коммуникационных технологий в электроэнергетике в последнее время большое вни-

мание уделяется определению суммарных потерь активной мощности в ВЛ по измерениям активных мощностей на ее концах и выделению из них потерь мощностей на корону и на нагрев проводов [8—17]. Для оперативной оценки суммарных потерь активной мощности ВЛ и выделения составляющей потерь на корону разработана специализированная измерительная система с использованием многофункциональных датчиков и персональных компьютеров для сохранения в памяти синхронизированных измерений текущих параметров режима на концах ВЛ.

В работах [9—13, 15, 17] исследованы возможности системы оперативного определения потерь мощности по разнице активных мощностей на концах линии. В этих работах, основное внимание уделено упрощенному моделированию систематической погрешности системы измерения. Однако, как свидетельствуют результаты различных исследований, проблема оперативной оценки потерь активной мощности и выделения составляющих потерь в ВЛ полностью не решена. В настоящее время с помощью разработанных и внедренных технических и программных средств появилась возможность оперативного измерения на действующих ВЛ и накопления статистических данных по определению потерь активной мощности.

Режим ЛЭП СВН определяется перетоками мощности и токами в элементах системы, напряжениями в узлах, изменяемыми в процессе управления ЭЭС.

Уравнения длинной линии основаны на представлении потерь на корону в виде проводимости. Для практических расчетов используется П-образная схема замещения. При этом разделение линии на участки длиной по 100—150 км и менее считается приемлемым [4, 5, 7]. Согласно [8] потери на корону, возникающие в установившихся режимах ВЛ электропередачи сверхвысокого напряжения протяженностью меньше 400 км, не оказывают заметного влияния на изменение вдоль линии значений режимных параметров. При этом взаимодействие составляющих потерь активной мощности, связанных с нагреванием и коронированием проводов, можно не учитывать. Современные приборы позволяют измерять активную мощность и напряжение с точностью соответственно 0,2 и 0,1 [1, 2].

**Моделирование режима ЛЭП СВН** может быть выполнено с помощью уравнений линии с распределенными параметрами [3—7, 15, 16]. Однако эти уравнения получены посредством представления потерь мощности на корону в виде проводимости. Поэтому при учете реальных зависимостей от напряжения, которые являются функцией четвертой— восьмой степени, представление потерь мощности на корону в виде проводимости приводит к погрешности моделирования. Погрешности могут быть связаны также с неучетом реактивного эффекта короны, что приводит к

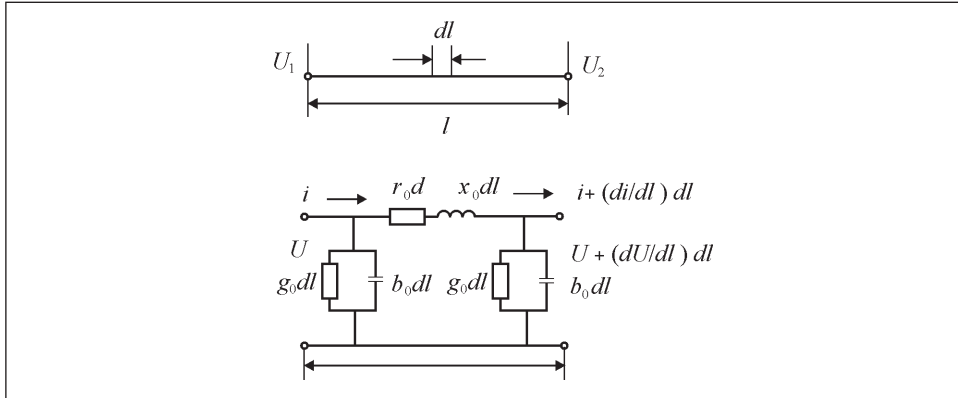


Рис. 1. Схема элементарного участка ЛЭП СВН с распределенными параметрами

увеличению емкости линии. Для реальных линий характерно наличие погрешностей моделирования режима ЛЭП СВН, которые наиболее существенно проявляются в условиях плохой погоды, когда потери на корону возрастают на один-два порядка. В связи с этим важным является обоснование и обеспечение точности моделирования режима ЛЭП СВН на основе ТИ, ОИК и результатов векторных измерений.

ЛЭП СВН можно представить в виде цепи с распределенными параметрами (рис. 1). Уравнения длинной линии для установившихся режимов имеют вид [3—7]:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma_0 \ell + \sqrt{3} I_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma_0 \ell, \quad I_1 = I_2 \operatorname{ch} \gamma_0 \ell + \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_{Z_B}} \operatorname{sh} \gamma_0 \ell, \quad (1)$$

где  $Z_B$  — волновое сопротивление линии;  $\gamma_0$  — коэффициент распространения волны на единицу длины,  $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ ;  $Z_0$  — удельное сопротивление линии,  $Z_0 = r_0 + jx_0$ ;  $Y_0$  — удельная проводимость линии,  $Y_0 = g_0 + jb_0$ . Уравнения (1) получены при условии представления потерь проводимостью  $g_0 = \Delta P_{к0} / U_{ном}^2$ , где  $\Delta P_{к0}$  — удельные потери на корону ВЛ, соответствующие номинальному напряжению линии  $U_{ном}$ .

Удельные потери на корону можно представить зависимостью от напряжения:

$$\Delta P_k = \Delta P_{к0} (U_k / U_{ном})^\rho, \quad (2)$$

где  $U_k$  — фактическое напряжение в узле  $k$ ;  $\rho$  — показатель степени. В то же время, потери мощности можно определить как потери в равномерно

распределенной проводимости ВЛ по формуле

$$\Delta P_k = 3g_0 \int_0^L U_\ell^p d\ell. \quad (3)$$

Реальную характеристику потерь на корону ЛЭП представим в виде

$$\Delta P_k = g_0 L U_{\text{ном}}^2 (U_k / U_{\text{ном}})^p, \quad (4)$$

где  $L$  — длина ВЛ, км.

Потери активной мощности на корону ВЛ, полученные интегрированием напряжения вдоль линии с учетом характеристики потерь на корону от напряжения при произвольной  $p$ -й степени, определяем по формуле

$$\Delta P_{\text{кр}} = \Delta P_{\text{кр}0} \int_0^L (U_\ell / U_{\text{ном}})^p d\ell. \quad (5)$$

Поскольку аналитическое интегрирование (5) при произвольной  $p$ -й степени не представляется возможным, использованы численные методы. Для решения задачи рассмотрим определение электрических параметров ЛЭП по уравнениям длинной линии согласно измерениям на концах ВЛ, полученным с использованием устройств измерения комплексных электрических величин РМУ [15, 17]. Увеличение точности оценки состояния ВЛ обеспечивает более надежное представление ЛЭП СВН и лучшие решения при управлении ЭЭС.

Разработаны две методики повышения точности моделирования режима ЛЭП СВН.

**М е т о д и к а 1** основана на представлении ВЛ в виде П-образной цепи участков, моделировании потерь мощности на корону с помощью зависимостей от напряжения  $p$ -й степени, определении реактивного эффекта короны, представлении потерь мощности на корону и дополнительной реактивной нагрузки на концах участка ЛЭП и последовательном расчете напряжения в начале каждого участка по данным на ее конце.

**М е т о д и к а 2** основана на представлении ВЛ в виде цепи участков, решении уравнения с распределенными параметрами для этого участка, моделировании потерь мощности на корону зависимостями от напряжения  $p$ -й степени с заданным значением  $g = 0$ , а также на определении реактивного эффекта короны. Представление потерь мощности на корону в виде эквивалентной нагрузки в узлах, уточнение реактивной проводимости в соответствии с реактивным эффектом короны и расчет режима выполняется для участков ВЛ СВН по уравнениям (1).

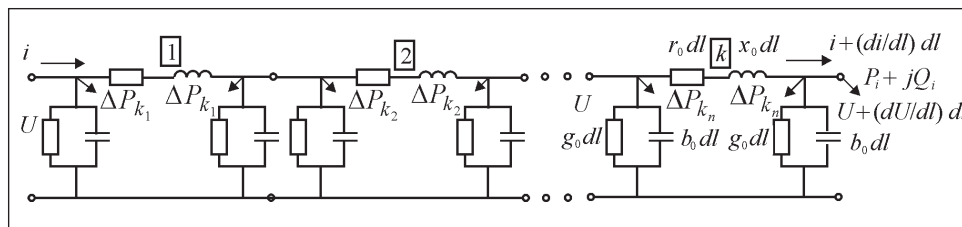


Рис. 2. Схема цепи замещения линии передачи

Наиболее часто используется П-образная схема замещения ЛЭП СВН, которая имеет длину 250 км и более. Разделение линии на участки длиной по 100—150 км и менее обычно считается практически приемлемым и позволяет определять параметры П-образной схемы замещения по упрощенным формулам. Однако при различном числе участков и различной их длине параметры схем замещения будут различными. При этом различие уменьшается с уменьшением длины каждого участка.

Для повышения точности моделирования режимов ЛЭП СВН предлагается методика расчета с учетом потерь на корону с помощью реальной зависимости от напряжения и реактивного эффекта короны, основанная на делении ЛЭП СВН на участки. Если всю ЛВ разделить на короткие участки и для каждого из них определить параметры по упрощенным формулам, а затем рассматривать всю ЛВ как последовательное (каскадное) соединение П-образных схем замещения участков, то появляется возможность учета различных погодных условий на всех участках ВЛ.

В процессе нормальной эксплуатации ЭЭС значения перетоков мощностей и напряжения на приемном и передающем концах ЛЭП связаны между собой аналитическими соотношениями, в которые входят искомые параметры ЛЭП. На рис. 2 для более точного моделирования режима ЛЭП СВН цепь замещения представлена в виде последовательно соединенных (каскадно) участков. Погрешности моделирования режима ЛЭП СВН П-образными схемами замещения зависят от длины ВЛ, числа последовательно соединенных участков и режима работы линии [8—12, 15, 16].

**Уточнение реактивной проводимости в соответствии с реактивным эффектом короны.** В уравнениях линии с распределенными параметрами (1) генерация реактивной мощности ВЛ учитывается погонной реактивной проводимостью. Дополнительная емкость определяется по известной формуле потерь мощности на корону и углу сдвига первой гармоники коронного тока относительно напряжения [6, 15]:

$$\Delta C = \frac{\Delta P_k}{\omega U^2} \operatorname{tg} \psi, \quad (6)$$

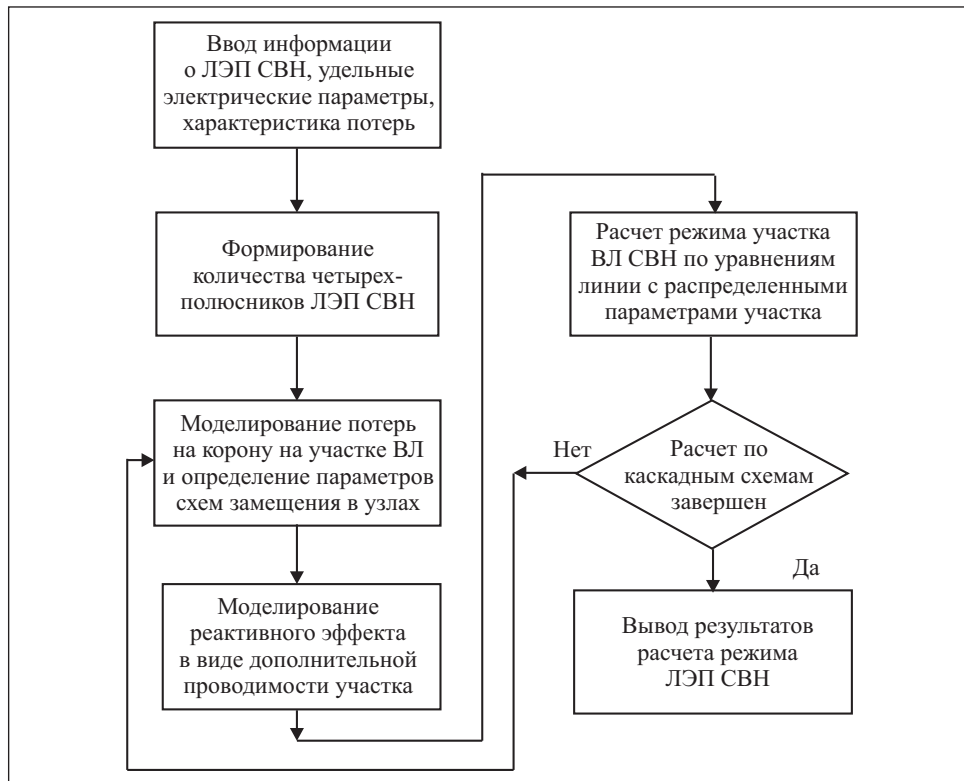


Рис. 3. Блок-схема программы расчета режима ЛЭП СВН с учетом характеристики потерь от напряжения  $\rho$ -й степени

где  $\omega$  — угловая частота;  $U$  — напряжение линии;  $\psi$  — фазовый угол сдвига первой гармонике тока короны относительно напряжения.

При моделировании режима ЛЭП СВН по предлагаемым методикам в отличие от существующих подходов учитывается влияние потерь на корону в  $\rho$ -й степени и реактивный эффект короны.

Моделирование режима ЛЭП СВН с учетом потерь на корону как функции от напряжения основано на уравнениях с распределенными параметрами.

А л г о р и т м р а с ч е т а.

1. Задание исходных данных о ЛЭП СВН, характеристик потерь на корону и показателя степени напряжения  $\rho$  для группы погодных условий.

2. Моделирование потерь мощности на корону с использованием зависимостей (2)—(5) от напряжения по данным режима на концах участка и представление в виде дополнительной нагрузки на концах линии.



3. Моделирование реактивного эффекта короны участка линии как дополнительной реактивной проводимости на основе (6) и представление его в уравнениях линии в виде суммарной проводимости.

4. Расчет режима участка ЛЭП СВН по уравнениям с распределенными параметрами.

5. Последовательный расчет режима участков ВЛ по уравнениям (1) от конца к началу ЛЭП СВН с уточнением и повторением.

На основе предложенной методики разработана программа моделирования режима ЛЭП (рис. 3).

**Результаты численных экспериментов.** Для моделирования режима ЛЭП СВН и влияния дополнительной емкости на результаты расчета установившихся режимов электрических сетей проведены расчеты для ЛЭП СВН 750 кВ с конструкцией фазы 4\*АС 400/64,  $r_0 = 0,01875$  Ом/км,  $x_0 = 0,289$  Ом/км,  $b_0 = 4,12$  См/км, длиной 400 км,  $U_2 = 750$  кВ,  $P_2 = 1500$  МВт,  $Q_2 = 300$  МВАр,  $\Delta P_{к0} = 320$  Вт/м,  $\Delta C = 0$  % при  $\rho = 2$ . По результатам измерения потерь на корону ВЛ 750 кВ максимальные значения наблюдались при дожде,  $\Delta P_{к0} = 320$  кВт/км, и при изморози,  $\Delta P_{к0} = 900$  кВт/км [9]. Расчеты проводились на участках длиной до 10 км каждый при заданных значениях удельных потерь на корону 14, 30, 90, 150, 320, 600 и 900 Вт/м и  $\rho = 2 \div 8$ .

Для учета реактивного эффекта короны выполнены расчеты дополнительной емкости ВЛ 750 кВ при заданных удельных потерях на корону по формуле (6):

Удельные потери на корону, Вт/м	30	90	150	320	600	900
Дополнительная емкость, обусловленная короной, %	1	3	5	10	20	30

Значения дополнительной емкости находятся в пределах от одного до десяти процентов, максимальные значения дополнительной емкости для ВЛ 750 кВ могут составлять 30% при изморози [9, 15].

В табл. 1 приведены результаты расчета потерь мощности и напряжения в начале линии длиной 400 км по уравнениям (1) при следующих параметрах режима на конце ВЛ:  $U_2 = 750$  кВ, активная мощность  $P_2 = 1500$  МВт, реактивная мощность  $Q_2 = 300$  МВАр,  $\rho = 2$ .

В табл. 2 приведены результаты моделирования погрешностей параметров режима ЛЭП СВН по каскадной схеме, состоящей из звеньев одинаковой длины, для ВЛ 750 кВ при  $\Delta P_{к0} = 320$  Вт/м,  $\Delta C = 0\%$ ,  $\rho = 2$  и по П-образным каскадным схемам замещения.

Как видно из табл. 1, результаты полученные по уравнениям линии с распределенными параметрами (1) (строка 5), отличаются от результатов, полученных по предлагаемой методике. При длине каскадных участков 10 км различие по напряжению составляет  $10^{-4}$  %, по потерям на нагрев проводов  $2 \cdot 10^{-4}$  %, по потерям на корону  $9 \cdot 10^{-4}$  %. Полученные результаты



совпадают с точностью  $10^{-3}$  %, что подтверждает адекватность предлагаемой методики.

На рис. 4, а, представлены кривые погрешностей параметров режима ЛЭП СВН, полученные по каскадной схеме для ВЛ 750 кВ с применением уравнений линии с распределенными параметрами. Методические погрешности моделирования приведены на рис. 4, б.

Сопоставление результатов расчета по двум методикам показывает, что точность методики 2 выше. Результаты, полученные по методике 2, при длине каскадных участков 400 км, имеют методические погрешности моделирования 0,1 % по напряжению, 0,36 % по потерям на нагрев про-

Таблица 1

Номер п.п.	$\Delta P_{к0}$ , Вт/м	Потери мощности, МВт			Зарядная мощность ВЛ, МВАр	Напряжение в начале ВЛ, кВ
		на корону $\Delta P_{к}$ , МВт	на нагрузку $\Delta P_{н}$ , МВт	$\Delta P_{\Sigma}$		
1	14	5,8704	30,0333	35,9036	971,7528	772,5309
2	30	12,5805	30,1604	42,7408	971,8416	772,6585
3	90	37,7544	30,6403	68,3947	972,1755	773,1386
4	150	62,9457	31,1256	94,0713	972,5109	773,6216
5	320	134,4165	32,5295	166,946	975,076	775,0045
6	600	252,4469	34,9346	287,3815	975,076	777,3298
7	900	379,3531	38,0072	417,3603	976,8344	779,8861

Таблица 2

Параметр режима	Погрешность при длине участков ВЛ, км					
	Расчет по (1)	400	200	100	50	10
<i>Каскадные схемы</i>						
$\Delta P_{к}$ , МВт	134,4165	132,4867	133,941	134,2981	134,3869	134,4154
$\Delta P_{н}$ , МВт	32,5295	32,4115	32,5002	32,5222	32,5276	32,5294
$U_1$ , кВ	775,0045	775,8442	775,2132	775,0566	775,0176	775,0051
<i>П-образные схемы</i>						
$\Delta P_{к}$ , МВт		133,1169	134,1701	134,3915	134,4172	134,4168
$\Delta P_{н}$ , МВт		33,4107	32,7081	32,5677	32,5382	32,5298
$\Delta P_{\Sigma}$ , МВт		166,5276	166,8782	166,9591	166,9554	166,9466
$U_1$ , кВ		779,4054	777,07	775,7043	775,2062	775,0135

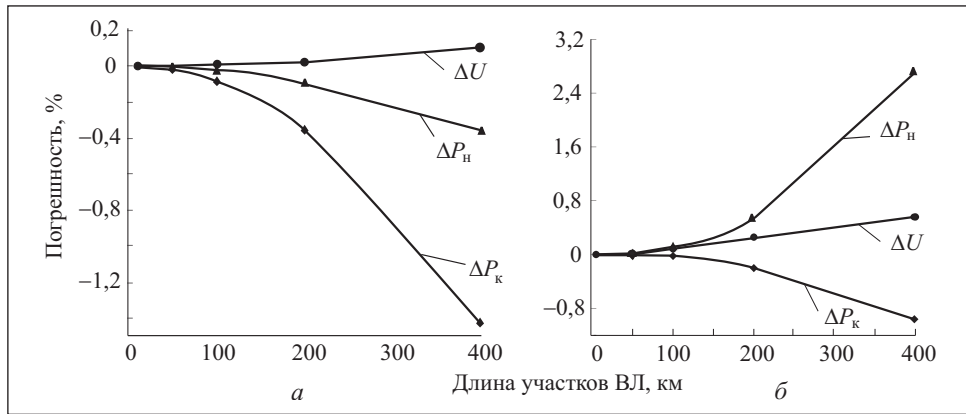


Рис. 4. Графики зависимости погрешностей от длины звеньев каскадной (а) и П-образной (б) схем

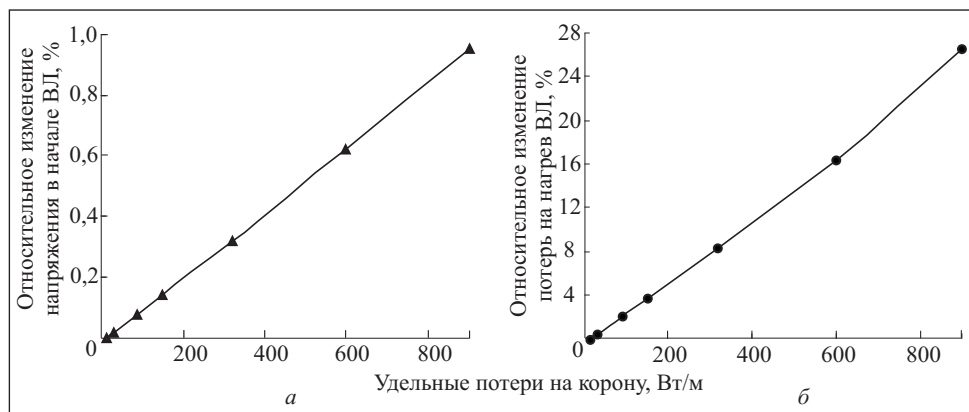


Рис. 5. Графики изменения напряжения в начале ВЛ (а) и потерь на нагрев проводов (б) в зависимости от удельных потерь на корону

водов и 1,43 % по потерям на корону. При использовании методики 1 эти погрешности составляют соответственно 0,57, 2,71 и 0,96 %.

При представлении ЛЭП СВН одним участком длиной 400 км методические погрешности потерь на корону, нагрузочных потерь и напряжения на конце линии составляют соответственно  $-1,4357$ ,  $-0,3626$  и  $0,108$  %. При увеличении числа участков и уменьшении их длины методические погрешности уменьшаются.

Результаты, представленные на рис. 4, б, позволяют сделать вывод о том, что при увеличении длины линии методические погрешности всех составляющих потерь увеличиваются почти в два раза. С уменьшением

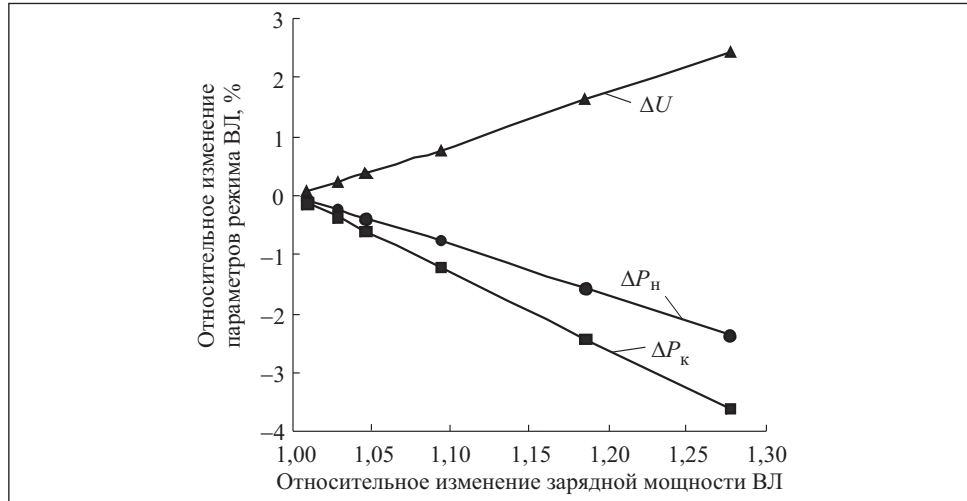


Рис. 6. Графики зависимостей погрешности моделирования параметров режима от дополнительной зарядной мощности ЛЭП 750 кВ

длины участка уменьшается методическая погрешность расчета составляющих потерь. В частности, уменьшение длины участка в 10 раз приводит к уменьшению методической погрешности расчета потерь на нагрузку до 1,7 %, потерь на корону до 0,6 %.

Сопоставление результатов расчета режима ЛЭП СВН по уравнениям линии с распределенными параметрами с учетом потерь на корону в зависимости от напряжения второй степени (см. табл. 2) и по предлагаемой методике позволяет сделать вывод о том, что модель расчета при представлении участков линии длиной 10 км имеет точность больше  $9 \cdot 10^{-4} \%$  или  $9 \cdot 10^{-6}$  о.е. Таким образом, по методике 2 достигается точность и достоверность моделирования.

Таблица 3

$\Delta P_{к0}$ , Вт/м	$\Delta C$ ВЛ, %	Потери мощности		Напряжение в начале ВЛ, кВ	Зарядная мощность ВЛ, МВАр
		$\Delta P_k$ , МВт	$\Delta P_n$ , МВт		
30	1	13,1772	30,1829	771,9666	980,96
90	3	39,4611	30,7099	771,0646	999,5
150	5	65,6514	31,2446	770,1671	1018,01
320	10	139,4703	32,7818	768,1084	1064,27
600	20	259,1663	35,4992	763,5846	1155,86
900	30	402,5689	38,9366	759,6897	1246,83

График изменения напряжения в начале ВЛ в зависимости от уровня удельных потерь на корону представлен на рис. 5, а. Из рис. 5, б, следует, что при неучете влияния удельных потерь на корону, методические погрешности потерь на нагрев проводов могут достигать более 26 %.

Результаты моделирования параметров режима ЛЭП 750 кВ длиной 400 км,  $P_2 = 1500$  МВт,  $Q_2 = 300$  МВАр, с учетом реактивного эффекта короны при  $\rho = 4$  представлены в табл. 3. На основе данных табл. 1 и 3 получены зависимости погрешности моделирования параметров режима от дополнительной зарядной мощности ЛЭП 750 кВ, представленные на рис. 6, из которого следует, что погрешности моделирования ЛЭП 750 кВ могут достигать по напряжению 2,5 %, по потерям на нагрузку 3,6 %, по потерям на корону 2,4 %, по зарядной мощности ВЛ 30 % и более.

Полученные результаты позволяют выбрать модели расчета ЛЭП СВН, соответствующие точности исходных данных о длине и числе звеньев каскадной П-образной схемы замещения. Для нормальных режимов ЛЭП погрешности моделирования параметров следующие: потери на нагрузку 5,2 %, потери на корону 3,6 %, на напряжение на конце линии 0,95 %; для неоптимальных режимов погрешности возрастают. Погрешности моделирования параметров режима ЛЭП сопоставимы с точностью современных микропроцессорных измерительных приборов. Анализ результатов расчета режима ЛЭП СВН по П-образной схеме замещения показывает, что погрешности модели могут достигать более 0,2 %. Преимуществом применения методики каскадных П-образных схем для моделирования режима ЛЭП СВН является отсутствие при вычислениях тригонометрических и гиперболических функций.

## Выводы

1. Установлено, что точность упрощенных моделей расчета режима ЛЭП СВН не соответствует точности исходных данных, получаемых с помощью современных интеллектуальных систем измерения.

2. Для повышения точности моделирования режима ЛЭП СВН необходимо использование реальных зависимостей потерь на корону от напряжения и реактивного эффекта короны.

3. Установлено, что неучет дополнительной емкости приводит к погрешности моделирования.

4. Для повышения точности моделирования режимов ЛЭП СВН рекомендуется представление П-образной схемы замещения звеньями длиной 50 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике* / Под ред. Ю.Н. Руденко, В.А.Семенова. — М. : Изд-во МЭИ, 2000. — 648с.
2. *Современные системы сбора, передачи, обработки и отображения информации на объектах электроэнергетики* // Энергетик. — 2008. — № 10. — С. 38—40.
3. *Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения* / Под ред. В.А. Веникова, Т. 3. — М. : Высшая школа, 1972. — 368 с.
4. *Поспелов Г.Е., Федин В.Т.* Проектирование электрических сетей и систем. — Минск: Вышшая школа, 1978. — 301 с.
5. *Веников В.А., Рыжов Ю.П.* Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 272 с.
6. *Мельников Н.А. и др.* Проектирование электрической части ВЛ электропередачи 330-500 кВ / Под общ. ред. С.С. Рокотяна. Изд. 2-е перераб. и доп. — М. : «Энергия», 1974. — 472 с.
7. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
8. *Зарудский Г.К.* Анализ изменения режимных параметров воздушных линий сверхвысокого напряжения // Электричество. — 1998. — № 5. — С. 2—8.
9. *Тамазов А.И.* Корона на проводах воздушных линий переменного тока. — М. : Спутник, 2002.
10. *Тамазов А.И.* Измерения текущих потерь мощности в ВЛ // Электрические станции. — 2005. — № 8. — С. 53—57.
11. *Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г.* Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС»// ЭЛЕКТРО. — 2010. — № 3. — С. 18—23.
12. *Гаджиев М.Г.* Анализ систематической погрешности измерения потерь на корону и в проводах в режиме реального времени// Электричество. — 2011. — № 3. — С. 30—36.
13. *Черненко П.А., Волхонский А.С.* Оперативное определение потерь активной мощности (нагрузочных и на корону) в высоковольтных линиях // Техническая электродинамика. — 2005. — № 1. — С. 31—33.
14. *Баламетов А.Б.* Расчеты установившихся режимов энергосистемы в реальном масштабе времени по данным WAMS и SCADA// Изв. НАНА. Наука и Инновация. — Баку — «ЕЛМ»-2011. — № 4 (8). — С. 12—20.
15. *Баламетов А.Б.* Коронирование проводов ВЛ СВН. Моделирование в установившихся режимах.— LAP Lambert Academic Publishing, 2013. — 310 с.
16. *Степанова А.А., Кононов Ю.Г.* Диагностика состояния ЛЭП на основе идентификации удельных электрических параметров // Известия вузов. Электромеханика. — 2013. — № 1. — С. 56—57.
17. *Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Набиев Х.И., Илясов О.В.* Измерение потерь активной мощности ВЛ по текущим параметрам режима на концах линии //Электрон. моделирование. — 2013. — 35, № 5. — С. 77—91.

*A.B. Balametov, E.D. Halilov, T.M. Isayeva*

INCREASING OF TRANSMISSION LINE REGIME MODELLING  
ACCURACY BASED ON CURRENT REGIME PARAMETRES

Methods of increasing the accuracy of modeling of regimes of ultrahigh voltage transmission line according to synchronized vector measurements have been investigated. Approaches to the choice of mathematical models of calculation of regime parameters depending on accuracy of initial information are offered. The technique of modeling regimes of ultrahigh voltage air-line allowing for real characteristics of corona losses and corona reactive effect based on the air line representation by cascade circuits is offered. Modeling was performed on the example of 750 kV line. Modeling errors are investigated by different methods.

*Keywords:* air-line, ultrahigh voltage, vector measurements, corona losses, corona reactive effect, cascade circuit line equation with distributed parameters, regime modeling, the equation with distributed parameters, modeling errors.

#### REFERENCES

1. *Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike* [Automation of supervisory control in power engineering] (2000), Ed by Rudenko, Yu.N. and Semenova, V.A., Power Engineering Institute Press, Moscow, Russia.
2. “Modern systems of information collection, transfer, processing and representation in electric power engineering objects” (2008), *Energetik*, no. 10, pp. 38-40.
3. *Elektricheskie sistemy. Peredacha energii peremennym i postoyannym tokom vysokogo napryazheniya* [Electric systems. Power transfer by direct and alternating high voltage current], (1972), Vol. 3, Ed by Venikov, V.A., Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
4. Pospelov, G.E. and Fedin, V.T. (1978), *Proektirovanie elektricheskikh setey i sistem* [Design of electrical networks and systems], Vysheyschaya shkola, Minsk, Belarus.
5. Venikov, V.A. and Ryzhov, Yu.P. (1985), *Dalnie elektroperedachi peremennogo i postoyannogo toka* [Long-distance power transfer of direct and alternate current], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
6. Melnikov, N.A. and et al. (1974), *Proektirovanie elektricheskoy chasti VL elektroperedachi 330-500 kV* [Design of the electric part of power transfer line 330-350 kV], Ed by Rokotyan, S.S., 2nd recast and suppl. edition, Energiya, Moscow Russia.
7. Idelchik, V.I. (1989), *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
8. Zarudskiy, G.K. (1998), “Analysis of change of regime parameters of airlines of superhigh voltage”, *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 2-8.
9. Tamazov, A.I. (2002), *Korona na provodakh vozduzhnykh liniy peremennogo toka* [Corona on wires of airlines of alternating current], Sputnik, Moscow, Russia.
10. Tamazov, A.I. (2005), “Measurement of current power loss in VL”, *Elektricheskie stantsii*, no. 8, pp. 53-57.
11. Sharov, Yu.V. and Gadzhiev, M.G. (2010), “Measurement of corona power losses in superhigh voltage lines of OAO FSK EES”, *Elektro*, no. 3, pp. 18-23.
12. Gadzhiev, M.G. (2011), “Analysis of systematic error of wire and corona loss measurements in real time conditions”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 30-36.
13. Chernenko, P.A. and Volkhonskiy, A.S. (2005), “Operational determination of active power losses (loaded and corona losses) in high voltage lines”, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, no. 1, pp. 31-33.
14. Balametov, A.B. (2011), “Design of sustainable conditions of power system in real time by WAMS and SCADA data”, *Izvestiya NAN Azerbajjana, Nauka i Innovatsiya*, no. 4(8), pp. 12-20, ELM, Baku, Azerbaijan.
15. Balametov, A.B. (2013), *Koronirovanie provodov VL SVN. Modelirovanie v ustanovivshikhsya rezhimakh* [Corona discharge of HVL of SHV. Modeling in sustainable conditions], Monograph, LAP (Lambert Academic Publishing), Saarbrücken, Germany.
16. Stepanova, A.A. and Kononov, Yu.G. (2013) “Electric power line diagnostics on the basis of identification of specific power parameters”, *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, no. 1, pp. 56-57.
17. Balametov, A.B., Halilov, E.D., Nabiev, H.I. and Ilyasov, O.V. (2013), “Active power loss measurement of HVL from current regime parameters at the line ends”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 35, no. 5, pp. 77-91.

Поступила 14.01.16

*БАЛАМЕТОВ Аираф Баламет оглы, д-р техн. наук, профессор, руководитель научного направления «Установившиеся режимы электроэнергетических систем» Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского института энергетики. В 1971 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — установившиеся режимы электроэнергетических систем.*

*ХАЛИЛОВ Эльмар Дамир оглы, канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр. Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 1984 г. окончил Азербайджанский госуниверситет. Область научных исследований — математическое моделирование в электроэнергетических системах.*

*ИСАЕВА Тарана Муса кызы, канд. техн. наук, доцент Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. В 1991 г. окончила Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — показатели качества электроэнергии в электроэнергетических системах.*



