



OPERATIVE MODELLING OF A TRANSMISSION LINE REGIME BASED ON CURRENT REGIME PARAMETRES

A.B. BALAMETOV, E.D. HALILOV, T.M. ISAYEVA
Azerbaijan Research and Design Institute of Energetic

Abstract: Questions of increase of accuracy of modeling of regimes of a transmission line of ultrahigh voltage according to traditional measurements SCADA, the specialized and synchronized vector measurements are investigated. Approaches to a choice of mathematical models of calculation of regime parameters depending on accuracy of the initial information are offered. The technique of modeling of regimes of ultrahigh voltage air-line taking into account real characteristics of corona losses and corona reactive effect additional conductivity is offered. By design procedure working out the approach based on representation of an air-line by π -shaped chained schemes has been used. Results on an example of a line 500 kV with different lengths of sites are presented. Modeling errors of regime parameters modeling of a transmission line of ultrahigh voltage are investigated by different methods.

Keywords: air-line, ultrahigh voltage, SCADA measurements, vector measurements, corona losses, corona reactive effect, π -shaped cascade scheme of a line, modeling of a regime, the equation with the distributed parameters, modeling errors.

MODELAREA OPERATIVĂ A REGIMULUI LINIEI ELECTRICE ÎN BAZA PARAMETRILOR CURENȚII AI REGIMULUI

A.B. BALAMETOV, E.D. HALILOV, T.M. ISAYEVA
Institutul de Cercetări și Proiectări în Energetică din Azerbaijan

Rezumat: Sunt studiate problemele creșterii preciziei de modelare a regimurilor liniei electrice de tensiune supraînaltă (LE TSA) în baza măsurătorilor tradițională SCADA, măsurători vectoriale specializate sincronizate. Sunt propuse abordări la selectarea modelelor matematice pentru calculul regimurilor parametrilor în dependență de precizia informației inițiale. Se propune metodologia de modelare a regimurilor LE TSA cu considerarea pierderilor caracteristice reale la efectul corona și efectul coronei cu conductibilitate adițională. La elaborarea metodei de calcul a fost utilizată abordarea, bazată pe reprezentarea liniei aeriene în formă de circuite de tip Π . Sunt prezentate rezultatele la exemplul liniei 500 kV cu lungimi diferite ale sectoarelor. Sunt studiate erorile de modelare a parametrilor regimului LE TSA prin diferite metode.

Cuvinte-cheie: linie aeriană, tensiuni supraînalte, măsurători vectoriale, pierderile în urma efectului de coronă, efectul reactiv al coronei, circuitul pe trepte de tip Π al liniei, modelarea regimului, ecuații cu parametri distribuți, erori de modelare.

ОПЕРАТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ТЕКУЩИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

A.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов, Т.М. Исаева
Азербайджанский Научно-Исследовательский и
Проектно-Изыскательский Институт Энергетики

Реферат: Исследованы вопросы повышения точности моделирования режимов линии электропередачи сверхвысокого напряжения по данным традиционных измерений SCADA, специализированных и синхронизированных векторных измерений. Предложены подходы к выбору математических моделей расчета режимных параметров в зависимости от точности исходной информации. Предлагается методика моделирования режимов ЛЭП СВН с учетом реальных характеристик потерь на корону и реактивного эффекта короны дополнительной проводимостью. При разработке методики расчета был использован подход, основанный на представлении воздушной линии Π -образными цепочечными схемами. Представлены результаты на примере линии 500 кВ с разными длинами участков. Исследованы погрешности моделирования параметров режима ЛЭП СВН разными методами.

Ключевые слова: воздушная линия, сверхвысокие напряжения, измерения SCADA, векторные измерения, потери на корону, реактивный эффект короны, Π -образная каскадная схема линии, моделирование режима, уравнения с распределенными параметрами, погрешности моделирования.

Для эффективного управления ЛЭП СВН требуется полная и точная информация о параметрах режима, которая характеризует текущее состояние.

Параметры воздушной линии электропередачи, активное сопротивление, активная и емкостная проводимость линии, потери мощности на нагрев проводов и на корону в реальных условиях меняются в зависимости от температуры окружающей среды и метеорологических условий трассы линии. Сопротивление провода является функцией плотности тока, температуры окружающей среды, скорости ветра и интенсивности осадков. В связи с этим оперативное моделирование параметров режима воздушной линии с учетом реальных условий работы имеет большое значение [1-7].

В задачах расчета, идентификации электрических параметров, оперативного управления и оптимизации режимов линии электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) возникает задача выбора модели расчета, соответствующей точности исходных данных.

Измерение потерь мощности на корону на действующих ЛЭП СВН необходимо для исследования потерь на корону; оптимального управления режимами ВЛ по напряжению и реактивной мощности; оперативного уточнения параметров модели ВЛ; технико-экономического анализа работы воздушной линии электропередачи, при обмене электрической энергией между энергосистемами.

Для эффективного управления электроэнергетической системой (ЭЭС) требуется полная и точная информация о параметрах режима, которая характеризует текущее состояние ЭЭС. В оперативно-информационный комплекс (ОИК) диспетчерского центра такая информация поступает с помощью средств телемеханики в виде телесигналов (ТС) и телеизмерений (ТИ) параметров режима.

В качестве измерений для оценки состояния (ОС) ЭЭС до недавнего времени в основном использовались ТИ переменных режима и ТС о состоянии коммутационного оборудования, получаемые от системы SCADA. Основные проблемы, возникающие при решении задачи ЭЭС, связаны с недостаточным объемом и низким качеством измерительной информации, поступающей от системы SCADA. Это приводит к ошибкам и низкой точности получаемых оценок.

Улучшить свойства решения задачи ОС позволяет использование измерений комплексных электрических величин, поступающих от PMU (Phasor Measurement Units) - основного измерительного оборудования системы WAMS (Wide-Area Measurement System), позволяющего контролировать состояние ЭЭС синхронно и с высокой точностью, с учетом новых возможностей и способов контроля и управления режимами на основе полученной информации от SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Оборудование PMU, установленное в узле, может обеспечить измерение модуля U_j и фазы δ_j напряжения в этом узле, модуля тока и значения угла

между напряжением и током φ_{ui} во всех примыкающих к этому узлу ветвях. Качественно новая информация предоставляет специалистам дополнительный инструмент для повышения надежности управления электрическими режимами энергосистемы.

Для этого требуется использование возможности современных автоматизированных информационно-измерительных систем (ОИК, SCADA, PMU), микропроцессорных измерительных приборов (счетчиков), которые позволяют выделение составляющих потерь на базе измерения текущих значений параметров режима ВЛ СВН и проверки точности систем измерения энергии по концам ЛЭП. Эти системы и комплексы для измерения параметров режима позволяют решить многие проблемы измерения, усреднения и хранения информации, а совместная работа с ЭВМ для моделирования режимов ВЛ, коронирования проводов и т.д., позволяют организовать измерения на качественно новом уровне. В связи с внедрением информационно-коммуникационных технологий в электроэнергетике в последнее время большее внимание уделяется определению суммарных потерь активной мощности в воздушной линии по измерениям активных мощностей по концам линии и выделению из них потерь мощностей на корону и на нагрев проводов [8-14].

Для оперативной оценки суммарных потерь активной мощности воздушной линии и выделения составляющей потерь на корону предложены специализированная измерительная система с использованием многофункциональных датчиков и персональных компьютеров для сохранения в памяти синхронизированных измерений текущих параметров режима на концах ВЛ.

В [8-14] излагаются вопросы о системе оперативного измерения потерь мощности по разнице активных мощностей по концам линии. В этих работах, основное внимание уделяется упрощенным подходам моделирования систематических погрешностей системы измерения. С другой стороны имеется возможность более точного моделирования систематической погрешности в системе измерения потерь активной мощности по текущим параметрам режима на концах ВЛ СВН.

В [15] на основе анализа оперативно рассчитываемых потерь на корону и емкостной проводимости линии в сочетании с информацией о погодных условиях по трассе линии предлагается методика мониторинга и прогнозирования гололедных образований.

Несмотря на довольно многочисленные исследования данного вопроса, оперативная оценка потерь активной мощности и выделение составляющих потерь в ВЛ пока еще полной определенности не достигли. Сейчас благодаря разработанным и внедренным техническим и программным средствам появилась возможность оперативного измерения на действующих ВЛ,

накопления статистики по определению потерь активной мощности.

Режим ЛЭП СВН определяется перетоками активной и реактивной мощности по линиям электропередачи и другим элементам системы, токами в них, напряжениями в узлах, изменяемыми в процессе управления ЭЭС.

Уравнения длинной линии получены из условия представления потерь на корону проводимостью. В практических расчетах обычно используется П-образная схема замещения. Разделение линии на участки длиной по 100-150 км и менее считается приемлемым [4,5,7]. А в [7] отмечено, что потери на корону, возникающие в установившихся режимах воздушных линий 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, может не учитываться.

Современные приборы измерения имеют точность по активной мощности класса 0,2, по напряжению 0.1 и выше.

Моделирование режима ЛЭП СВН может быть выполнено по уравнениям линии с распределенными параметрами [4,7,16]. Однако уравнения линии с распределенными параметрами получены представлением потерь мощности на корону проводимостью. Поэтому при учете реальных характеристик от напряжения, которые являются функцией 4-8 степени, представление потерь мощности на корону в виде проводимости приводит к погрешности моделирования. Погрешности связаны также с неучетом реактивного эффекта короны, который приводит к увеличению емкости линии. Для реальных линий характерно наличие погрешностей в моделировании режима ЛЭП СВН, которые проявляются особенно сильно в условиях плохой погоды, когда потери на корону растут на один - два порядка. В связи с этим важным становится обоснование и обеспечение точности моделирования режима ЛЭП СВН на основе телеизмерений, ОИК и данных векторных измерений.

Уравнения длинной линии для установившихся режимов имеют вид [4,7,16]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 \ell + \sqrt{3} \cdot \dot{I}_2 \dot{Z}_a \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 \ell; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 \ell + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \dot{Z}_a} \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 \ell, \end{aligned} \quad (1)$$

где Z_b - волновое сопротивление линии, $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ - коэффициент распространения волны на единицу длины, $Z_0 = r_0 + jx_0$ - удельное сопротивление линии, $Y_0 = g_0 + jb_0$ - удельная проводимость линии.

Уравнения длинной линии (1) получены из условия представления потерь проводимостью

$$g_0 = \frac{\Delta P_{k0}}{U_{\text{нм}}^2}, \text{ где } \Delta P_{k0} - \text{удельные потери на корону}$$

ВЛ, соответствующие номинальному напряжению линии $U_{\text{нм}}$.

Потери на корону ЛЭП необходимо представить реальной характеристикой от напряжения вида

$$\Delta P_k = \Delta P_{k0} \cdot \left(\frac{U_k}{U_{\text{нм}}} \right)^p \quad (2)$$

где U_k - фактическое напряжение в узле k , p - показатель степени.

С другой стороны, потери мощности можно определить как потери в равномерно распределенной проводимости линии по формуле

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

Реальная характеристика потерь на корону от напряжения линии имеет вид

$$\Delta P_k = g_0 \cdot L \cdot U_{\text{нм}}^2 \cdot \left(\frac{U_k}{U_{\text{нм}}} \right)^p \quad (4)$$

где $U_{\text{нм}}$ - номинальное напряжение линии, U_k - напряжение конца линии, L - длина линии в км, p - показатель степени.

Потери активной мощности на корону ВЛ, полученные интегрированием напряжения вдоль линии с учетом характеристики потерь на корону от напряжения при произвольной p -ой степени имеют вид

$$\Delta P_{kp} = \Delta P_{k0} \cdot \int_0^L \left(\frac{U_\ell}{U_{\text{нм}}} \right)^p d\ell \quad (5)$$

Аналитическое интегрирование (5) при произвольной p -ой степени не представляется возможным, поэтому используются численные методы.

МОДЕЛИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМА ЛЭП СВН.

Для повышения точности моделирования режимов ЛЭП СВН предлагается методика расчета с учетом потерь на корону реальной характеристикой от напряжения и реактивного эффекта короны, основанная на делении ЛЭП СВН на цепочечные участки. Если всю длину линии разделить на более короткие участки, и для каждого из них определить параметры по упрощенным формулам, а затем рассматривать всю линию как последовательное (каскадное) соединение П-образных схем замещения участков, в таком случае параметры эквивалентной П-образной схемы всей линии получаются достаточно близкими к параметрам определенным по уравнениям длинной линии. При этом появляется возможность

учета охвата участков ВЛ разными погодными условиями.

Наиболее часто используется П-образная схема замещения ЛЭП СВН. Обычно разделение линии на участки длиной по 100-150 км и менее считается практически приемлемым для того, чтобы не считаться с распределенным характером параметров. ЛЭП СВН имеют в среднем длину около 250-300 км и более. Если линию разделить на участки, для каждого из которых допустимо не считаться с распределенным характером параметров, то в таком случае параметры П-образной схемы замещения можно определить по упрощенным формулам. Однако эти схемы не вполне эквивалентны и расхождение результатов уменьшается с уменьшением длины каждого участка.

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.

Известно, что линию электропередачи можно представить эквивалентной П-образной схемой замещения. Если ВЛ разделить на короткие участки и для каждого из них определить параметры по формулам участка линии, а затем рассматривать ВЛ как последовательное (каскадное) соединение П-образных схем замещения участков, то появляется возможность учета различных погодных условий на всех участках ВЛ.

На рис. 1 представлена расчетная схема замещения участка ВЛ.

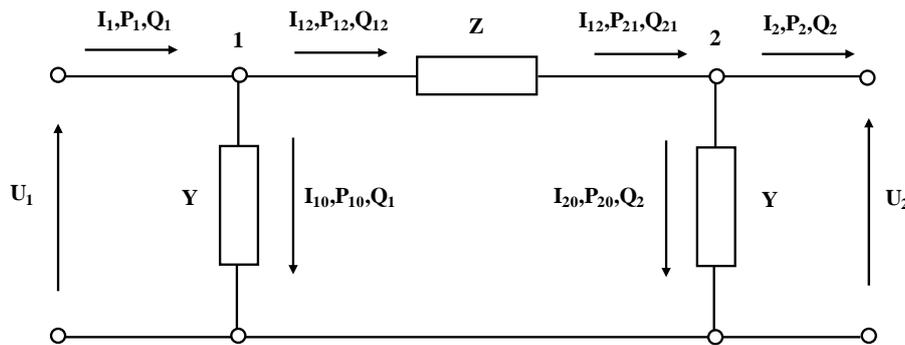


Рис.1. Расчетная схема участка линии.

Математическая модель расчета режима участка линии.

Определяется ток нагрузки в конце ВЛ

$$I_{наз} = \frac{S_{наз}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad I_2 = I_{наз}$$

Ток в линии

$$I_{12} = I_2 + U_2 \cdot \underline{Y} \quad (6)$$

$$I_{21} = I_1 - U_1 \cdot \underline{Y} \quad (7)$$

Напряжение в начале ВЛ

$$\Delta U_{12} = I_{12} \cdot \underline{Z}_{12} \quad (8)$$

Здесь $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_{12}$, Z - сопротивление участка; $Z_0 = r_0 + jx_0$; Y_0 - удельная проводимость линии, $Y_0 = g_0 + jb_0$.

Уравнения (1) получены при условии представления потерь проводимостью $g_0 = \frac{\Delta P_{к0}}{U_{ном}^2}$, где

$\Delta P_{к0}$ — удельные потери на корону ВЛ, соответствующие номинальному напряжению линии $U_{ном}$.

Параметры схемы замещения по измерениям комплексов тока и напряжения на концах линии

определяются из уравнений ВЛ описывающих режим линии продольных и поперечных параметров (рис. 1):

Комплексная поперечная проводимость линии рассчитывается как

$$\underline{Y} = G + jB = 2 \frac{I_1 - I_2}{U_1 + U_2} \quad (9)$$

тогда полное комплексное продольное сопротивление линии представляется в виде

$$\underline{Z} = R + jX = \frac{U_2 - U_1}{I_{12}} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - 0.5 \cdot \underline{Y} \cdot U_1} \quad (10)$$

Для более точного моделирования режима схема замещения ЛЭП СВН представляется последовательно соединенными цепочными (каскадными) участками (рис. 2).

Погрешности моделирования режима ЛЭП СВН зависят от длины ВЛ, количества последовательно соединенных участков, режима работы линии.

В связи с возможностью измерения параметров режима современными регистрирующими измерительными приборами с высокой точностью (0.1-0.2%) далее на примерах конкретной ЛЭП анализируются уровни погрешностей моделирования результатов расчета установившегося режима на основе П-образной схемы.

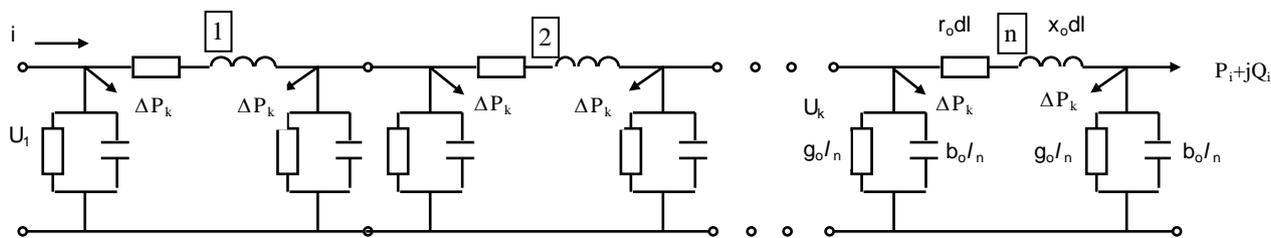


Рис.2. П-образная цепочечная схема замещения линии передачи.

Погрешности моделирования П-образными цепочечными схемами замещения ЛЭП СВН были рассмотрены в работах [3, 4, 7, 16].

Предлагаемая методика основана

- на представлении ЛЭП СВН П-образными каскадными четырехполюсниками;
- на моделировании потерь мощности на корону характеристиками от напряжения ρ -ой степени по данным режима конца участка,
- на определении реактивного эффекта короны как дополнительной реактивной проводимости,
- на представлении потерь мощности на корону и дополнительной реактивной нагрузки в концах участка ЛЭП в виде эквивалентной нагрузки в узлах П-образного четырехполюсника;
- на последовательном расчете режима П-образных каскадных четырехполюсников от конца к началу ЛЭП СВН с уточнением и повторением.

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 характеристике потерь мощности на корону и углу сдвига первой гармоники коронного тока относительно напряжения [10,12]

$$\Delta C = \frac{\Delta P_k}{\omega \cdot U^2} \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (11)$$

где ΔP_k - потери мощности на корону в линии; ω - угловая частота; U - напряжение линии; ψ - фазовый угол сдвига первой гармоники тока короны относительно напряжения.

При моделировании режима ЛЭП СВН в предлагаемой методике и программе в отличие от существующих подходов учитывается влияние потерь на корону в ρ -ой степени и реактивный эффект короны.

ПРОГРАММИРОВАНИЕ. Моделирование режима ЛЭП СВН с учетом потерь на корону характеристикой от напряжения основано на базе уравнений П-образной схемы линии. Алгоритм расчета заключается в следующем:

1. Задание исходных данных о ЛЭП СВН, характеристик потерь на корону и показателя степени напряжения ρ для групп погодных условий.
2. Представление потерь на корону с вычислением их характеристик от напряжения ρ -ой степени и задание в виде дополнительной нагрузки на концах линии.
3. Моделирование реактивного эффекта короны участка линии и представление дополнительной емкостью на концах линии.
4. Расчет режима участка ЛЭП СВН по уравнениям П-образной схемы линии.
5. Уточнение мощностей в конце и начале участка линии.

На основе этой методики разработана программа моделирования режима ЛЭП. Блок-схема программы приведена на рис. 3.

Расчеты по программе могут быть проведены в реальном времени процедуры оценивания состояния СВН.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Для моделирования режима ЛЭП СВН и влияния дополнительной емкости на результаты расчета установившихся режимов электрических сетей были проведены расчеты для ВЛ 500 кВ с конструкцией фазы 3хАС-330/43, $r_0=0.029$ Ом/км, $x_0=0.299$ Ом/км, $v_0=3.74 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Расчеты проводились при делении линии на участки длиной до 5 км при задании удельных потерь на корону 4, 100 и 360 Вт/м при показателе степени характеристики потерь от напряжения $\rho=4, 5, 6$.

Для определения максимально возможных значений дополнительной емкости при короне были использованы максимальные значения потерь на корону, полученные длительными измерениями на действующей линии 500 кВ с проводами 3хАС-330/43 при дожде и изморози, что соответственно составляет 360 и 374 кВт/км. (9). Наиболее вероятные значения дополнительной емкости имеет при изморози и составляет 3-10% рабочей емкости линии и при этом относительные максимальные значения дополнительной емкости для ВЛ 500 кВ составляют 27% [18].

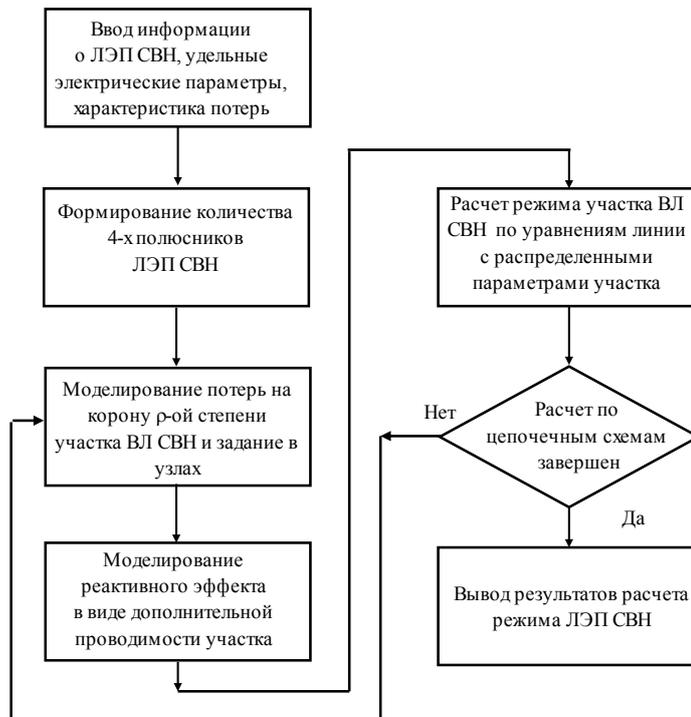


Рис. 3. Программа расчета режима ЛЭП СВН с учетом характеристики потерь от напряжения ρ -ой степени

В таблице 1 приведены параметры конца ВЛ и результаты расчета потерь мощности и напряжения в начале линии по уравнениям длинной линии при параметрах режима конца ВЛ: напряжении 490 кВ, активной мощности 900 МВт и реактивной мощности 50 МВАр.

Результаты моделирования режима по исходным данным для режима №2 табл. 1, при удельных потерях на корону $\Delta P_{\text{к0}}=100$ Вт/м соответствующих номинальному напряжению линии, $\rho=2$ и $\Delta C=0\%$ по разработанной программе при каскадном соединении П-образной схемы в зависимости от длины участков, приведены в табл.2.

Таблица 1. Результаты моделирования режима ВЛ по уравнениям линии с распределенными параметрами.

№	Длина ВЛ, км	Удельные потери на корону, Вт/м	Показатель степени	Результаты расчета потерь мощности, МВт			Зарядная мощность линии, МВАр	Напряжение начала ВЛ, кВ
				Нагрузочные, $\Delta P_{\text{н}}$	На корону, $\Delta P_{\text{к}}$	Суммарные, ΔP_{Σ}		
1	250	4	2	24.1724	1.0039	25.1808	234.6517	512.1080
2	250	100	2	24.8032	25.1102	49.9134	234.7807	512.5911
3	250	360	2	26.5669	90.5329	117.0997	235.1340	513.9183
4	350	4	2	33.6183	1.4308	35.0492	334.4595	521.0206
5	350	100	2	34.8505	35.8177	70.6682	334.8960	522.1886
6	350	360	2	38.3406	129.4074	167.7480	336.0999	525.4191

Таблица 2. Результаты расчета ЛЭП 500 кВ длиной 250 км

Параметры режима	По каскадным П-образным схемам при длине участков ВЛ, км						
	250	125	83.333333	50	25	10	5
$\Delta P_{\text{к}}$, МВт	25.1874	25.1331	25.1219	25.1149	25.1115	25.1105	25.1103
$\Delta P_{\text{н}}$, МВт	25.2324	24.9092	24.8492	24.8194	24.8072	24.8038	24.8034
$\Delta P_{\text{СВМ}}$, МВт	50.4198	50.0423	49.9711	49.9343	49.9187	49.9143	49.9136
U_1 , кВ	513.4663	512.9929	512.7938	512.6706	512.6121	512.5946	512.592

Зависимость методической погрешности расчета по П-образной схеме замещения ЛЭП 500 кВ длиной 250 км при $\Delta P_{к0}=100$ Вт/м, $\rho=2$, $\Delta C=0\%$ от длины цепочечных участков линии приведена в табл. 3.

Таблица. 3. Зависимость методической погрешности расчета по П-образной схеме замещения ЛЭП 500 кВ от длины цепочечных участков линии.

Параметры режима	По каскадным П-образным схемам при длине участков ВЛ, км						
	250	125	83.333333	50	25	10	5
$\Delta P_{к}, \%$	0.3073	0.0911	0.0465	0.0186	0.0051	0.0011	0.0003
$\Delta P_{н}, \%$	1.7304	0.4274	0.1854	0.0653	0.0161	0.0024	0.0008
$\Delta P_{сум}, \%$	1.0145	0.2582	0.1155	0.0418	0.0105	0.0017	0.0003
$U_1, \%$	0.1707	0.0784	0.0395	0.0155	0.0041	0.0007	0.0002

При представлении ЛЭП СВН одним участком длиной 250 км, потери на корону и нагрузочные потери равны 0.215%, 1.73%, соответственно, а напряжение конца линии 0.17%.

Сопоставление результатов расчета режима ЛЭП СВН по уравнениям линии с распределенными параметрами с учетом потерь на корону характеристикой от напряжения 2-ой степени табл. 1 и по предлагаемой методике показывает, что модель расчета при представлении участков линии длиной 5 км имеет точность больше $8 \cdot 10^{-4}\%$ или же больше

$8 \cdot 10^{-6}$ в о.е. Таким образом, по предлагаемой методике в зависимости от длины участков достигается точность и достоверность моделирования. Хотя для достижения необходимой точности, требуется уменьшить длину звеньев участков цепочечных П-образных схем.

Результаты моделирования режима ЛЭП 500 кВ по исходным данным для режима №2 табл. 1 при $\rho=4$, $\Delta C=10\%$ по программе в зависимости от длины участков приведены в табл.4 и на рис. 4.

Таблица. 4. Зависимости методических погрешностей расчета режимных параметров по П-образной схеме замещения от длины цепочечных участков линии.

Параметры режима	По каскадным П-образным схемам при длине участков ВЛ, км					
	250	125	83.333333	50	25	10
$\Delta P_{к}, \text{МВт}$	25.2561	25.1623	25.1426	25.13	25.1235	25.1215
$\Delta P_{н}, \text{МВт}$	25.2522	24.9199	24.8591	24.829	24.8167	24.8133
$\Delta P_{сум}, \text{МВт}$	50.5083	50.0822	50.0017	49.9589	49.9402	49.9348
$U_1, \text{кВ}$	511.838	511.3409	511.1324	511.0023	510.9399	510.9211

Из рис. 4 следует, что с уменьшением длины участка уменьшается методическая погрешность расчета составляющих потерь. В частности, уменьшение длины участка в 10 раз приводит к уменьшению методической погрешности расчета нагрузочных потерь до 1.7%, потерь на корону до 0.6%.

Методическая погрешность определения нагрузочных потерь и потерь на корону при $\Delta P_{к0}=360$ Вт/м $\rho=4$, $\Delta C=27\%$ по сравнению с $\Delta P_{к0}=100$ Вт/м $\rho=4$, $\Delta C=10\%$ незначительно уменьшается, что объясняется большей дополнительной зарядной мощностью вызванной реактивным эффектом короны.

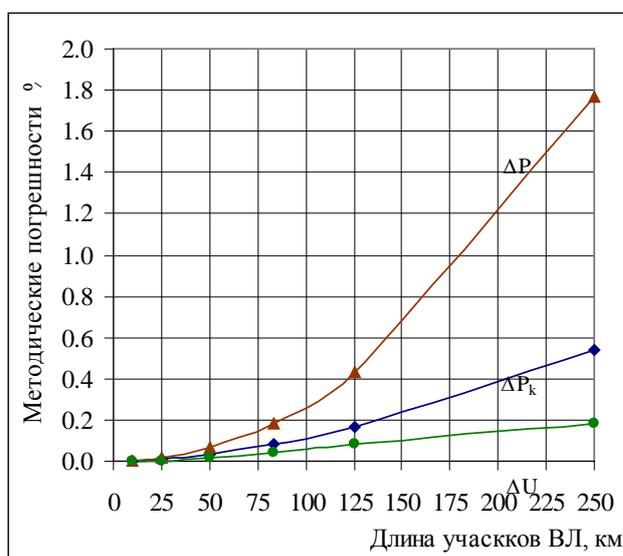


Рис. 4. Зависимости погрешностей от длины звеньев П-образной схемы

Результаты моделирования режима ЛЭП 500 кВ по исходным данным для режима №1 табл. 2, для

режима №3 табл. 1 при $\rho=4$, $\Delta C=27\%$ по программе в зависимости от длины участков, приведены на рис. 5.

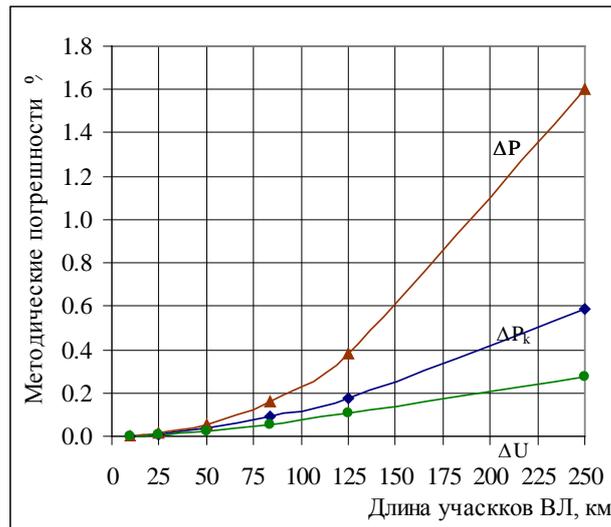


Рис. 5. Зависимости погрешностей от длины звеньев П-образной схемы

Зависимости методических погрешностей расчета ЛЭП 500 кВ длиной 350 км по П-образной схеме замещения при $\Delta P_{k0}=100$ Вт/м, $\rho=4$, $\Delta C=10\%$ приведены на рис. 6.

Данные на рис. 6 позволяют сделать вывод о том, что увеличение длины линии приводит к увеличению методической погрешности всех составляющих потерь почти в 2 раза.

Для анализа зависимости погрешности моделирования параметров режима от передаваемой мощности линии проведены расчеты режима по

методике каскадных П-образных схем при параметрах режима конца ВЛ: напряжении 490 кВ, активной мощности 500 МВт и реактивной мощности 150 МВАр.

Проведенное сравнение результатов расчета при нагрузках в конце линии 500 и 900 МВт показывает, что погрешности моделирования параметров режима при использовании П-образной схемы замещения с ростом передаваемой мощности увеличиваются.

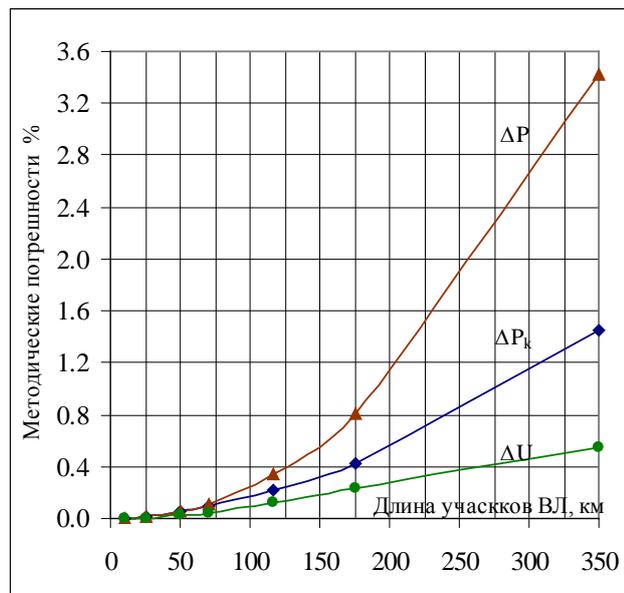


Рис. 6. Зависимости погрешностей от длины звеньев П-образной схемы

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ от неучета реактивного эффекта короны соответствующее дополнительной емкости 10% и 27% ЛЭП СВН в зависимости от длины линии приводит к изменению реактивной мощности: при 250 км $\Delta Q_{250-10\%}=22.89$ МВАр, $\Delta Q_{250-27\%}=61.67$ МВАр и при 350 км $\Delta Q_{350-10\%}=31.89$ МВАр, $\Delta Q_{350-27\%}=85.77$.

Погрешности моделирования режимных параметров по П-образной схеме замещения ЛЭП 500 кВ длиной 350 км и $P_2=900$ МВт, при допущении, что дополнительная зарядная мощность линии представлена на приемном конце линии в виде дополнительной нагрузки представлены в табл. 6.

Таблица 6. Погрешности моделирования режимных параметров по П-образной схеме замещения ЛЭП 500 кВ длиной 350 км и $P_2=900$ МВт, при пропорциональном распределении дополнительной реактивной мощности по концам ЛЭП.

Параметры режима	При удельных потерях на корону Вт/м				Погрешности моделирования при дополнительной емкости линии %	
	100	360	100	360		
	Без учета дополнительной емкости линии		Дополнительная емкость линии %			
ΔP_K , МВт	35.8177	129.4074	37.8873	142.0937	6.2395	11.0980
ΔP_H , МВт	34.8505	38.3406	35.8311	38.9785	2.5952	1.0256
$\Delta P_{Сум}$, МВт	70.6682	167.7480	73.7184	181.0722	4.4364	8.7637
U_1 , кВ	522.1886	525.4191	527.9035	537.2601	1.7153	3.9470
$Q_{зар}$, МВАр	334.8960	336.0999	366.7852	421.8725	31.8893	85.7727

Из табл. 6. следует, что погрешности моделирования ЛЭП 500 кВ по П-образной схеме замещения могут достигать: в напряжении 4%, в нагрузочных потерях 2.6%, в потерях на корону 11% и в зарядной мощности линии 27% и более.

Проведенные исследования позволяют выбрать модели расчета ЛЭП СВН соответствующие точности исходных данных путем выбора длины и количества звеньев каскадной П-образной схемы замещения. В нормальных режимах эксплуатации погрешности моделирования параметров режима ЛЭП равны: в нагрузочных потерях 5.2%; в потерях на корону 3.6%;

в напряжении конца линии 0.95%. Для неоптимальных режимов погрешности растут.

Методические погрешности в моделировании параметров режима по упрощенной методике на основе П-образной схемы линии для ВЛ СВН 500 кВ длиной 250 км и 350 км имеют значения достигающие в зависимости от режима передачи: по напряжению 0.7%, по нагрузочным потерям 3% и потерям на корону 5% и более:

Погрешности моделирования параметров режима ЛЭП сопоставимы с точностью современных микропроцессорных измерительных приборов.

Анализ результатов расчета режима ЛЭП СВН по П-образной схеме показывает, что погрешности модели могут достигать 0.2% и более. Для повышения точности моделирования режимов ЛЭП СВН рекомендуется представление П-образной схемы замещения звеньями длиной около 50 км. Преимуществом применения методики каскадных П-образных схем для моделирования режима ЛЭП СВН является отсутствие при вычислениях тригонометрических и гиперболических функций.

ВЫВОДЫ

1. Известные упрощенные модели расчета режима ЛЭП СВН имеют погрешности, превышающие точности исходных данных, получаемых из современных интеллектуальных систем измерения.

2. Повышение точности моделирования режима ЛЭП СВН может быть достигнуто с использованием реальных характеристик потерь на корону от напряжения и реактивного эффекта короны. Предложена методика моделирования режима ЛЭП СВН, основанная на делении на цепочечные схемы с учетом реальных характеристик потерь на корону от напряжения и реактивного эффекта короны.

3. Исследованы методические погрешности моделирования параметров режима ЛЭП СВН от длины цепочечных П-образных участков. Погрешности моделирования параметров режима в зависимости от длины цепочечных участков и от неучета дополнительной емкости линии равны: в напряжении 4%, в нагрузочных потерях 2.6%, в потерях на корону 11% и в зарядной мощности линии 27% и более.

4. Для повышения точности моделировании режимов ЛЭП СВН рекомендуется представление линии П-образной схемой замещения и выбор длины звеньев около 50 км.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. П/ред. Ю.Н. Руденко, В.А.Семенова. Изд-во МЭИ, 2000. - 648с.
- [2] Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. /Под ред. Веникова В.А. -М.: Высшая школа, 1972. - Т. 3.- 368 с.
- [3] Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. - Минск: Высшейшая школа, 1978. - 301 с.
- [4] Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 272 с.

- [5] 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.
- [6] Идельчик В. И. Электрические системы и сети. М., 1989, 592 с.
- [7] Зарудский Г.К. Анализ изменения режимных параметров воздушных линий сверхвысокого напряжения. — Электричество, 1998, №5, с. 2-8.
- [8] Тамазов А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. - М.: Спутник, 2002.
- [9] Тамазов А.И. Измерения текущих потерь мощности в ВЛ. Электрические станции -2005. - № 8. - с.53-57.
- [10] Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г. Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС». - ЭЛЕКТРО, 2010, № 3, с. 18-23.
- [11] Гаджиев М.Г. Анализ систематической погрешности измерения потерь на корону и в проводах в режиме реального времени. Электричество 2011 №3, с. 30-36.
- [12] П.А. Черненко, А.С. Волхонский. Оперативное определение потерь активной мощности (нагрузочных и на корону) в высоковольтных линиях. Техническая электродинамика. 2005. -№ 1.
- [13] Современные системы сбора, передачи, обработки и отображения информации на объектах электроэнергетики. Энергетик, 2008. № 10 - С.38-40.
- [14] Баламетов А.Б. Расчеты установившихся режимов энергосистемы в реальном масштабе времени по данным WAMS и SCADA. Известия НАНА, Наука и Инновация, Баку - «ЕЛМ»-2011, № 4(8), стр. 12-20.
- [15] Дьяков Ф. А., Кононов Ю. Г. Новый подход к мониторингу гололедообразования на ВЛ 330 - 750 кВ, Энергетик 2009 № 4, с 4-10.
- [16] Баламетов А.Б. Коронирование проводов ВЛ СВН. Моделирование в установившихся режимах. Монография. LAP Lambert Academic Publishing. 2013, 310 стр.
- [17] Степанова А.А., Кононов Ю.Г. Диагностика состояния ЛЭП на основе идентификации удельных электрических параметров. Известия вузов. Электромеханика. - 2013. - № 1. - С. 56-57.
- [18] Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Набиев Х. И, Илясов О.В. Измерение потерь активной мощности ВЛ по текущим параметрам

режима на концах линии. НАН Украины, Институт проблем моделирования в Энергетике им. Г.Е. Пухова. Электронное Моделирование 2013, №5, стр. 77-91.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Баламетов Ашраф Баламет оглы 1947 года рождения. Окончил факультет Энергетики Азербайджанского института Нефти и Химии им. М.Азизбекова в 1971 году по специальности «Электрические станции». В 1994 г. защитил докторскую диссертацию в Новосибирском техническом университете по теме «Модели и методы управления режимами электрических сетей с ВЛ СВН». Заведующий научно-исследовательским направлением АЗНИ и ПИ Института Энергетики.

Халилов Эльман Дамир оглы 1962 г. рождения. Окончил физический факультет Азербайджанского Государственного Университета в 1984 году по специальности физик. В 2000 году защитил кандидатскую диссертацию в АЗНИИ Энергетики и Энергетического Проектирования по теме «Оптимизация режимов электрических сетей по напряжению и реактивной мощности методом линейного аппроксимирующего программирования». Ведущий научный сотрудник АЗНИ и ПИ Института Энергетики.

Исаева Тарана Муса кызы 1969 года рождения. Окончила факультет Энергетики Азербайджанского института Нефти и Химии им. М.Азизбекова в 1991 году по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий и сельского хозяйства». В 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию в АЗНИИ Энергетики и Энергетического Проектирования по теме «Исследование влияния вклада нелинейной нагрузки на показатели качества электроэнергии в высоковольтных электрических сетях». Работает на кафедре Автоматика, телемеханика и Электроника Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности, к.т.н., доцент.