

Transmission Line Models for Real-Time Mode Estimation Based on Synchronized Vector Measurements

A.B. Balametov

Azerbaijan Scientific Research and Design Institute of Energy (Zardabi st., 94, Baku, AZ1012, Azerbaijan)

For correspondence:

Balametov Ashraf / e-mail: balametov.azniie@gmail.com

Abstract

The dispatch control centers received information about the power system mode from the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system, and from Phasor Measurement Units (PMU) in the form of telemetry and TV signals. Telemeasurements include information about the mode parameters. Traditionally, the EHV transmission line is presented in the form of a π -scheme, the results of which have methodological modeling errors. Representation of overhead lines in the form of equations with distributed parameters makes it possible to obtain the highest accuracy. These equations contain hyperbolic functions and, in real-time simulation, slow down the performance. The choice of an adequate mathematical model of overhead lines of the corresponding accuracy of synchronized vector measurements in real time when assessing the state is important. The article discusses the models of overhead lines by equations with distributed parameters, π -circuit, equivalent π -circuit and chain π -circuits, depending on the number of links. The results of calculating mode in terms of modeling accuracy are compared using the example of a 500 kV overhead line.

Keywords: overhead line, overhead line equations, simplified models, synchronized vector measurements, condition assessment.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_90_100

For citation:

Balametov A.B.

[Transmission line models for real-time mode estimation based on synchronized vector measurements]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 90-100 (in Russian)

Sinxron vektor ölçmələri əsasında elektrik verilişi xəttinin rejiminin operativ qiymətləndirilmə modelləri

A.B. Balametov

Azərbaycan Elmi Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu
(Zərdabi küç. 94, Bakı, AZ1012, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Balametov Əsrəf / e-mail: balametov.azniie@gmail.com

Xülasə

EVX vəziyyətini qiymətləndirərkən sinxron vektor ölçmələrinin (SVÖ) dəqiqliyinə uyğun olan hava xəttinin real vaxt ərzində adekvat riyazi modelinin seçilməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir. Məqalədə, HX paylanmış parametrlərlə tənliklər, π -sxem, bölmələrin sayından asılı olaraq ekvivalent zəncirvari π -sxemləri olan modellərə baxılır. Hesabat nəticələri modelləşdirmə dəqiqliyi baxımından 500 kV-lik bir hava xətti nümunəsində müqayisə edilir.

Açar sözlər: hava xətti, hava xətti tənlikləri, sadələşdirilmiş modellər, sinxron vektor ölçmələri, vəziyyətin qiymətləndirilməsi.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_90_100

УДК 621.311

Модели линии электропередачи для оперативной оценки режима по синхронизированным векторным измерениям

А.Б. Баламетов

Азербайджанский Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики
(ул. Зардаби, 94, Баку, AZ1012, Азербайджан)

Для переписки:

Баламетов Ашраф / e-mail: balametov.azniie@gmail.com

Аннотация

Выбор адекватной математической модели воздушной линии (ВЛ), соответствующей точности синхронизированных векторных измерений в реальном времени, при оценивании состояния имеет важное значение. В статье рассматриваются модели ВЛ уравнениями с распределенными параметрами, π -схемой, эквивалентной π -схемой и цепочечными π -схемами в зависимости от количества звеньев. Результаты расчета режима по точности моделирования сопоставлены на примере ВЛ 500 кВ.

Ключевые слова: воздушная линия, уравнения, упрощенные модели, синхронизированные векторные измерения, оценка состояния.

Введение

Надежность функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) зависит от успешного решения задач по планированию и ведению режимов энергосистем, к которым можно отнести и расчеты электрических режимов. Все эти задачи решаются на основе применения математических моделей энергосистем.

Параметры электрического режима в моделях энергосистем по данным телемеханической информации вычисляются путем оценки состояния (ОС) энергосистем, математическую основу которой составляет метод наименьших квадратов. После ОС выполняется расчет установившегося режима (РУР) ЭЭС, а полученные результаты используются для мониторинга, анализа и оперативного управления ЭЭС.

Измерения системы **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** не содержат измерений фазового угла.

С помощью глобальной системы позиционирования - GPS возможно измерение угла напряжения и синхронизация углов измерения.

В современных условиях управление ЭЭС требует выполнения в реальном времени ОС больших и сложных энергосистем. Комплексы SCADA принимают и обраба-

тывают телеинформацию один раз в секунду, без синхронизации измерений по астрономическому времени.

С созданием систем спутниковой связи появилось новое измерительное оборудование – **PMU (Phasor Measurement Units)**. PMU намного быстрее, чем традиционные методы, и способствуют повышению надежности и устойчивости оценки состояния (рис. 1).

В отличие от SCADA, измерениями PMU являются $Y=[U_i, I_{ij}, \delta_i, \phi_{ij}]$.

Измерительные системы мониторинга, управления и защиты энергосистемы, состоящие из устройств PMU, позволяют получить более реальное состояние энергосистемы [1-5].

Целью статьи является анализ погрешностей разных моделей воздушной линии (ВЛ) для возможности выбора адекватной модели оценки режима по синхронизированным векторным измерениям (СВИ).

Центры диспетчерского управления информацию о режиме электроэнергетической системы получали от системы SCADA и от устройств PMU в виде телеизмерений и телесигналов. Телеизмерения включают информацию о параметрах режима.

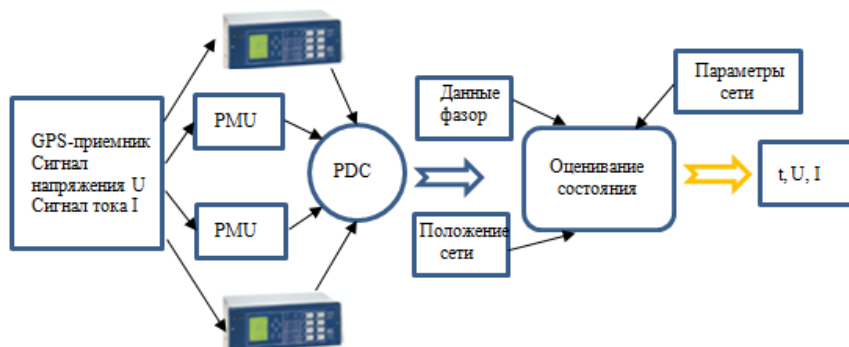


Рисунок 1 – Измерение и идентификация режима ВЛ
Figure 1 – Measurement and identification of the overhead line mode

Традиционно линии электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) представляются в виде π -схемы, результаты которых имеют методические погрешности моделирования. Представление ВЛ в виде уравнений с распределенными параметрами дает возможность получить наибольшую точность. Эти уравнения содержат гиперболические функции: при оперативном моделировании снижается быстродействие.

PMU – устройства синхронизированных измерений векторных величин. PMU регистрируют синусоиду напряжения и тока в сети с реальным сдвигом фаз между ними. Сдвиг между синусоидой 50 Гц и синусоидой напряжения сети определяет фазу напряжения δ . Точность регистрации: частота, 0.001 Гц, угол напряжения, (°) 0,1, действующее значение напряжения % 0,3-0,5; действующее значение тока, % 0,3-0,5; активная и реактивная мощности, % 0,3-0,5; дискретность АЦП, Гц 6400 -12800; время (GPS), 20 мкс.

SCADA - системы диспетчерского управления и сбора данных. Функции SCADA состоят в следующем: сбор, передача и обработка информации о технологическом процессе в управляющем центре и передача управляющих воздействий от центра к технологическому оборудованию.

В табл. 1 приведены характеристики систем измерения PMU и SCADA.

В Азербайджанском Научно-исследовательском и проектно-изыскательском институте энергетики (АзНИПИИЭ) для решения задачи расчета установившихся режимов (РУР) разработаны методы решения расчета установившегося режима электрической системы (РУРЭС), соответствующие данным PMU [6, 7].

Использование измерений комплексных электрических величин, поступающих от PMU, позволяет существенно улучшить результаты решения задачи РУР – снять проблемы, связанные с низкой избыточностью и точностью измерений, и существенно повысить эффективность решения задачи РУР электросети.

В связи с внедрением универсального измерительного комплекса (УИК), оперативного информационного комплекса (ОИК) и специализированных устройств измерения и регистрации параметров режима на основе персонального компьютера (ПК) в электроэнергетике в последнее время большое внимание уделяется определению суммарных потерь активной мощности в ВЛ по измерениям активных мощностей на концах линии и выделению из них потерь мощности на корону.

Таблица 1 – Показатели систем измерения PMU и SCADA

Table 1 – Indicators of PMU and SCADA measurement systems

Атрибуты	SCADA	PMU
Измерения	Аналоговое	Цифровое
Резолюция	2-4 образца за секунду	до 100 образцов за секунду
Наблюдаемость	Установившийся режим	Динамический/переходной
Мониторинг	Локальный	Широкомасштабный, зональный
Векторное измерение	Нет	Да

Для создания методики расчета потерь на корону в Аз НИ и ПИ ИЭ разработана автоматизированная система непрерывной регистрации по синхронизированным измерениям по времени ПК1 и ПК2 режимным параметрам потерь мощности на концах ВЛ и метеопараметрам (*температура, давление, влажность, скорость ветра, количество осадков, плотность тумана, объём отложений на проводе, тока линии, солнечной радиации*), с помощью которой проводятся непрерывные измерения в действующей ВЛ 500 кВ.

Выбор адекватной математической модели ВЛ для анализа установившихся режимов в реальном времени по синхронизированным векторным измерениям (СВИ) при оценивании состояния

Суммарная погрешность при ОС по параметру ΔU может быть приближенно представлена в виде суммы составляющих [3].

$$\Delta U = \Delta_{\text{мод}} + \Delta_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{мод}}$ - отклонение, вызванное неадекватностью математической модели ВЛ, используемой для вычисления оптимальных значений; $\Delta_{\text{изм}}$ – составляющая, вызванная неточностью измерений о текущем состоянии режима.

Необходимая точность $\Delta_{\text{мод}}$ может быть определена из (2), если потребовать, чтобы $\Delta_{\text{мод}}$ было статистически незначимым фактором среди всех факторов.

Переходя в (2) к нормам, имеем

$$\|\Delta U\| \leq \|\Delta_{\text{мод}}\| + \|\Delta_{\text{изм}}\| \quad (2)$$

Отсюда при условии, что норма $\|\Delta_{\text{мод}}\|$ должна составлять некоторую заданную

долю от нормы ΔU , т.е. $\|\Delta_{\text{мод}}\| = \varepsilon \|\Delta U\|$, получается

$$\|\Delta_{\text{мод}}\| \leq \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (\|\Delta_{\text{изм}}\|) \quad (3)$$

От этой нормы с помощью оптимальной модели ВЛ можно перейти к требованиям точности контролируемых параметров режима, для которых $|\Delta_{\text{изм}}|$ определяет необходимую точность математической модели при оценивании состояния. Например, при погрешности измерения 0.2% методическая погрешность математической модели в соответствии с (3) должна быть менее 0.05%.

Методы повышения точности моделирования режима ЛЭП СВН

Методические погрешности в зависимости от используемой модели и метода моделирования могут иметь значения, сопоставимые с погрешностями измерения параметров режима [3]. В связи с этим становятся актуальными требования к допустимым методическим погрешностям моделирования режима ВЛ.

Традиционно ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) представляется в виде схемы [4-8].

Представление ВЛ в виде уравнений с распределенными параметрами дает возможность получить наибольшую точность. Однако уравнения линии с распределенными параметрами содержат гиперболические функции и моделирование в вычислительных устройствах с ограниченными возможностями создает трудности и снижает быстродействие.

Известные методы моделирования режима основаны на представлении ВЛ в виде π -образной схемы участков. Обычно каждый участок ЛЭП имеет свои метеоро-

логические данные: высоту над уровнем моря, погодные условия, температуру воздуха, освещенность (солнечная радиация), облачность, интенсивность осадков. При использовании π -образной схемы объем задачи увеличивается в связи с формированием модели из нескольких звеньев, однако это позволяет использовать известные программные обеспечения. В работе для решения задачи определения электрических параметров ЛЭП рассматриваются разные уравнения ВЛ:

- использование уравнений длинной линии с гиперболическими функциями;
- упрощенная π -схема с сосредоточенными параметрами;
- эквивалентная π -схема с сосредоточенными параметрами для учета влияния распределенности, включающая вычисление поправочных коэффициентов;
- представление ВЛ цепочечными схемами (2 и более участка) с сосредоточенными параметрами меньшей длины.

В линиях большой протяженности и линиях сверхвысокого напряжения появляется необходимость учета волнового характера распространения энергии. При этом анализ режимов работы линии электропередачи основывается на представлении линии с распределенными параметрами.

Уравнения длинной линии для установившихся режимов имеют вид [4-6]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 \ell + \sqrt{3} \cdot \dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 \ell; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma}_0 \ell + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} \cdot \dot{Z}_B} \operatorname{sh} \dot{\gamma}_0 \ell, \end{aligned} \quad (4)$$

где Z_B - волновое сопротивление линии, $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ - коэффициент распространения волны на единицу длины.

Волновое сопротивление линии является функцией параметров линии

$$\begin{aligned} \dot{Z}_B &= \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{\dot{Z}_0}{\dot{Y}_0}} = \left| \dot{Z}_B \right| \cdot e^{-j\varphi_z} \\ &= \left| \dot{Z}_B \right| \cdot (\cos \varphi_z + j \sin \varphi_z), \\ \varphi_z &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{g_0 x_0 - r_0 b_0}{r_0 g_0 + x_0 b_0}. \end{aligned}$$

где $Z_0 = r_0 + jx_0$ - удельное сопротивление линии, $Y_0 = g_0 + jb_0$ - удельная проводимость линии.

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_0 &= \sqrt{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0} = \beta_0 + j \alpha_0 = \\ &= \left| \dot{\gamma}_0 \right| \cdot (\cos \varphi_z + j \sin \varphi_z). \end{aligned}$$

Здесь α_0 характеризует поворот вектора напряжения при распространении волны напряжения и называется коэффициентом изменения фазы, β_0 - характеризует затухание волны при распространении ее вдоль линии, φ_z - угол коэффициента распространения волны линии.

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \cdot \ell = \ell \cdot \sqrt{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0} = \beta_0 \ell + j \alpha_0 \ell.$$

Коэффициент распространения волны линии. Здесь $\alpha_0 \ell$ характеризует изменение фазы волны и называется волновой длиной линии: $\lambda = \alpha_0 \cdot \ell$.

Моделирование ВЛ эквивалентным четырехполюсником

Уравнения длинной линии позволяют получить все соотношения для анализа режимов линий электропередач.

В ряде случаев линии электропередачи удобно представлять в виде четырехполюсника, в виде π -образной схем замещения (рис. 2).

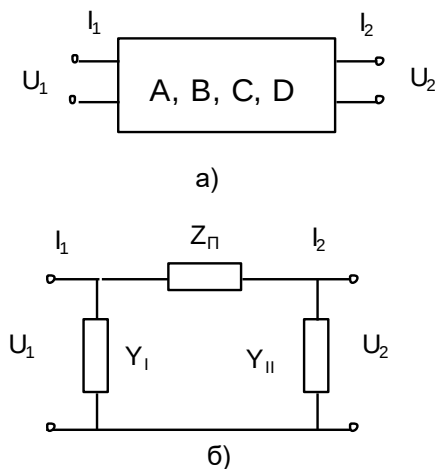


Рисунок 2 – Схемы замещения линии электропередачи:

а – четырехполюсник; б – π -образная схема.

Figure 2 – Electric transmission line equivalent circuits:
a – four-pole; b – π -shaped circuit.

Моделирование ВЛ эквивалентной π -образной схемой замещения

Этот метод называется также методом поправочных коэффициентов. С увеличением реальной длины линии ее кажущиеся электротехнические параметры будут существенно отличаться от их действительных значений. Для учета распределенности параметров в схемах с сосредоточенными параметрами замещения вводятся поправочные коэффициенты [4-6].

В практических расчетах для линий длиной 200 км поправочные коэффициенты обычно составляют 1-2%. Как известно, кажущиеся параметры схемы замещения линии будут отличаться от их действительных значений. Степень отличия кажущихся параметров от действительных определяется с помощью коэффициентов Кеннели. Чтобы точно оценить действительные значения токов и уровней напряжения в линии, необходимо в параметрах схем замещения эквивалентного четырехполюсника линии учесть физику волновых

процессов за счет ввода специальных поправочных коэффициентов. В этом случае совершенно обоснованно можно вести расчет режима ВЛ по схемам замещения с сосредоточенными параметрами, как для схем замещения с равномерно распределенными параметрами вдоль длины линии.

Введение в расчет поправочных коэффициентов позволяет оценить меру отклонения кажущихся параметров линии от их действительных значений, обусловленных влиянием физики волновых процессов в ней.

Для симметричной π -образной схемы замещения ЛЭП имеет следующие соотношения [4-6]:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= \underline{B} = \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 l) = \\ &= \underline{Z}_0 l \frac{\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 l)}{\underline{\gamma}_0 l} = \underline{Z}_0 l \underline{K}_z; \\ \underline{Y}_A &= \frac{2(\underline{A}-1)}{\underline{B}} = \frac{2(\operatorname{ch}(\underline{\gamma}_0 l)-1)}{\underline{Z}_B \operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 l)} = \\ &= \underline{Y}_0 l \frac{\operatorname{th}\left(\frac{\underline{\gamma}_0 l}{2}\right)}{\frac{\underline{\gamma}_0 l}{2}} = \underline{Y}_0 l \underline{K}_Y. \end{aligned} \quad (5)$$

где поправочные коэффициенты могут быть представлены в виде коэффициентов Кеннели $\underline{K}_z$ и $\underline{K}_Y$, численно равных:

$$\underline{K}_z = \frac{\operatorname{sh}(\underline{\gamma}_0 l)}{\underline{\gamma}_0 l}; \quad \underline{K}_Y = \frac{\operatorname{th}\left(\frac{\underline{\gamma}_0 l}{2}\right)}{\frac{\underline{\gamma}_0 l}{2}}. \quad (6)$$

Эквивалентные схемы замещения позволяют выявлять только соотношения между режимными параметрами по концам линии, но не позволяют найти параметры режима вдоль линии.

Если моделирование ВЛ цепочечной схемой замещения представить более короткими участками с сосредоточенными

параметрами, и для каждого из них определять параметры по упрощенным формулам, а затем рассматривать всю линию как последовательное соединение π -образных схем замещения участков (рис. 3), то в таком случае параметры эквивалентной π -образной схемы всей линии получаются достаточно близкими к параметрам, определенным по уравнениям (1).

Практически более целесообразной считается π -образная схема замещения.

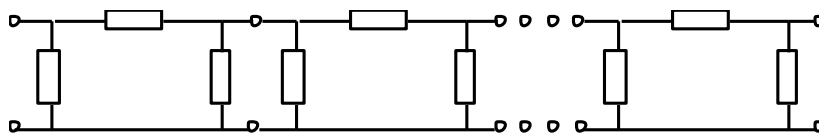


Рисунок 3 – Цепочечная схема замещения длинной ЛЭП
Figure 3 – A chain equivalent circuit for a long transmission line

Сопоставление методик расчета на примере ВЛ 500 кВ

Результаты расчета даны на примере ЛЭП 500 кВ с проводами 3*АС330/43, длиной 350 км, нагрузке в конце передачи 900 МВт, напряжении в начале $U_1=520$, конце $U_2=500$ и удельных потерях мощности на корону 4 кВт/км. Результаты расчета поправочных коэффициентов эквивалентной π -схемы приведены в табл. 2.

Проведены расчеты установившихся режимов для 2-узловой исходной и эквивалентных π -схем для разных значений передаваемой активной мощности при $P_2=900$ МВт, $U_1=520$, $U_2=500$. Удельные потери на корону приняты 4кВт/км. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

В математической модели ВЛ снижение активного сопротивления компенсируется возрастанием поперечной проводимости g_k и увеличением потерь активной мощности в ней. Потери мощности и энергии на корону учитываются не введе-

Разделение линии на участки длиной 100 км более приемлемо для того, чтобы не считаться с распределенным характером параметров [7 – 9].

Представление линии с распределенными параметрами в виде цепочечных схем с сосредоточенными параметрами (рис.3) позволяет имитировать волновой характер передачи энергии по протяженным линиям.

нием проводимости в схему замещения линии, а другими методами.

Проводились также расчеты режимов для ВЛ 350 км, представленной по цепочечной схеме с 1-7 участками с заданием активной мощности в конце передачи 900 МВт.

Для определения погрешности напряжения проводились расчеты режимов с заданием активной мощности 900 МВт и реактивной мощности на выходе ЛЭП -7,03 МВАр, представленной по цепочечной схеме с 1-7 участками (табл. 4).

Представление цепочечными схемами в зависимости от количества участков дает возможность достичь точности и достоверности моделирования ВЛ СВН. Результаты сравнения для π -схемы и эквивалентной π -схемы с поправочными коэффициентами показывают, что точность моделирования при использовании эквивалентной схемы близка к результатам, полученным из уравнений длинной линии.

Таблица 2 – Расчетные значения поправочных коэффициентов эквивалентной π -схемы

Table 2 - Calculated values of the correction factors for the equivalent π -circuit

<i>Параметры исходной π-схемы</i>			
R _p i, Ом	X _p i, Ом	B _p i, См	G _p i, См
10.15	104.65	1309*10 ⁻⁶	5.6*10 ⁻⁶
Параметры эквивалентной π -схемы			
9.681	102.301	1321*10 ⁻⁶	7.22*10 ⁻⁶
Отклонения параметров эквивалентной π -схемы в %			
4.618	2.245	-1.143	-22.441

Таблица 3 – Результаты расчета установившихся режимов ВЛ

Table 3 - The results of calculating the steady-state modes of overhead line

Параметры	По уравнениям с распределенными параметрами В гиперболических функциях	По уравнениям ВЛ с сосредоточенными параметрами			
		π -схеме		эквивалентной π -схеме	
		значения	погрешность %	значения	погрешность %
δ_2 , град	-21.125	-21.657	2.521	-21.123	-0.011
ΔP_{Σ} , МВт	34.277	35.53	3.656	34.28	0.009
ΔP_n , Вт	32.82	34.072	3.815	32.399	-1.283
$\Delta P_{кор}$, Вт	1.457	1.4571	0.007	1.8786	0.007
ΔQ , МВар	338.4	351.29	3.809	342.37	-2.636
$Q_{зар}$, МВар	340.57	-340.6	0.009	-344.50	1.154

Таблица 4 – Результаты расчета режима ВЛ 350 км представленной по цепочечной схеме

Table 4 - The results of calculating the overhead line mode of 350 km presented according to the chain scheme

Цепочечные участки		Результаты моделирования			Погрешности моделирования		
Кол-во	Длина, км	U ₁ ,	δ_2 ,	ΔP_n ,	ΔU_1 ,	$\Delta \delta_2$,	ΔP_n
		в о.е.	град	МВт	%	%	%
1	350	0.994	-21.758	34.30	-0.574	-2.958	4.430
2	175	0.998	-21.275	33.17	-0.128	-0.672	0.989
3	116.666	0.999	-21.189	32.97	-0.050	-0.264	0.387
4	87.5	0.99977	-21.159	32.90	-0.023	-0.122	0.180
5	70	0.99989	-21.145	32.87	-0.011	-0.057	0.085
6	58.333	0.99996	-21.138	32.85	-0.004	-0.021	0.033
7	50	1.00000	-21.133	32.84	0	-9.5E-05	0

Проведенные исследования позволяют выбрать модели расчета ЛЭП СВН, соответствующие точности исходных данных путем выбора длины и количества звеньев каскадных π -схем замещения. Погрешности моделирования параметров режима ЛЭП

сопоставимы с точностью современных измерительных приборов (PMU). Анализ результатов расчета режима ЛЭП СВН по π -схеме показывает, что погрешности модели могут достигать 0.2% и более.

Для повышения точности моделиро-

вании режимов ЛЭП СВН рекомендуется представление π -схемы замещения звенья-ми длиной около 50 км.

Преимуществом применения методики каскадных π -образных схем для моделирования режима ЛЭП СВН является отсутствие при вычислениях тригонометрических и гиперболических функций.

Области применения методик расчета

При оперативном моделировании режима, когда требуется ускоренное получение решения, рекомендуется применение π -схемы с сосредоточенными параметрами. Для получения высокой точности требуется представление ВЛ эквивалентной π -схемой или цепочечными π -схемами.

В настоящее время представление линии цепочечными участками длиной по 70 км и менее можно считать приемлемым. Это обеспечивает точность моделирования режима ЭЭС с точностью получения информации по СВИ.

Более точным при моделировании по измерениям РМУ является представление ВЛ цепочечными схемами длиной 70 км и менее, что позволяет получить точность

модели, адекватную измерениям РМУ.

Результаты сравнения для π схемы и эквивалентной π -схемы показывают, что точность моделирования при использовании эквивалентной π -схемы близка к результатам, полученным по уравнениям длинной линии.

Таким образом, эквивалентное представление ВЛ с использованием поправочных коэффициентов Кенелли приводит к повышению точности моделирования. Зависимость погрешности моделирования напряжения от длины участков цепочечных π -схем в % приведена на рис. 4.

Для получения высокой точности требуется представление ВЛ большим количеством цепочечных участков длиной 50 км (количеством 4-7) и применение комбинированных уравнений установившегося режима и теплового баланса для моделирования режимов [9].

Для моделирования режимов по РМУ измерениям представление линии цепочечными участками длиной около 50 км можно считать приемлемым. Это обеспечивает соответствие моделирования режима ЭЭС с точностью получаемой информации.

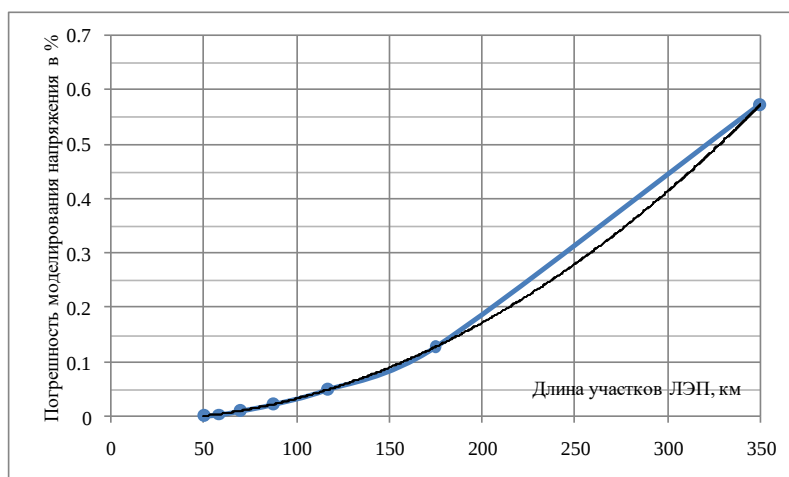


Рисунок 4 – Погрешность моделирования напряжения от длины участков цепочечных π -схем
Figure 4 – Error of voltage simulation from the length of sections of chain π -circuits

Заключение

Известные упрощенные модели ЛЭП СВН имеют погрешности, превышающие точности исходных данных, получаемые из интеллектуальных систем измерения.

Для учета распределенности параметров в схемах с сосредоточенными параметрами по измерениям РМУ замещения вводятся в эквивалентную π -схему поправочные коэффициенты.

Исследованы методические погрешности моделирования ЛЭП СВН по уравнениям длинной линии. Погрешности моделирования, связанные с учетом реальных

характеристик потерь на корону, могут достигать более 0.1% по напряжению, что неприемлемо для оценки состояния по данным РМУ.

В практических расчетах для линий длиной более 100 км предлагается использовать эквивалентную схему, используя поправочные коэффициенты Кеннели. Более точным при моделировании режимов ВЛ измерениям РМУ является представление ЛЭП цепочными схемами звеньями длиной 50 км и ниже, позволяющее получить адекватную измерениям РМУ точность модели.

REFERENCES

1. **Phadke A.G. and Thorp J.S.** Synchronized Phasor Measurements and Their Application. Thorp. Springer Science + Business Media, 2008. (in English)
2. **Gamm A.Z., Glazunova A.M., Grishin Y.A., Kolosok I.N., Korkina E.S.** Razvitie algoritmov ocenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskoy sistemy. *Elektrichestvo*, 2009, № 6. S.2-9 (in Russian)
3. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M.** Vybora matematicheskoy modeli vozdukhnoy linii pri modelirovani rezhima po sinhronizirovannym vektornym izmereniyam. *Elektrichestvo*, № 3, 2017, s.20-28. *Nacionalnyj izdatelskij universitet «MEI» (Moskva)*, ISSN: 0013-5380 (in Russian)
4. **Venikov V.A., Hudjakov V.V., Anisimova N.D.** Elektricheskie sistemy. T.3. M. Vysshaya shkola, 1972 (in Russian)
5. **Idelchik V.I.** Raschety ustanovivshisya rezhimov elektricheskikh sistem. M. *Energiya*, 1977. 192 s. (in Russian)
6. **Sulejmanov V.N., Kacadze T.L.** Elektricheskie seti i sistemy. K. NTUU «KPI», 2008. 504 s. (in Russian)
7. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M.** Extra high voltage Transmission line operation simulation using the actual corona-loss characteristics. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 26: 479-488 TUBITAKdoi:10.3906/elk-1703-84 (in English)
8. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M.** (2019). An Adequate Mathematical Model of an Ultra-high-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Electrical Engineering*. Pp. 1-9 (in English)
9. **Balametov A.B., Halilov E.D.** Primenenie kombinirovannykh uravnenij ustanovivshegosya rezhima i teplovogo balansa dlya modelirovaniya rezhimov elektricheskikh setej. *Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii*. 2019, T. 11, №2. S. 93-103. (in Russian)

Поступило: 21.09.2021
Доработано: 11.03.2022
Принято: 15.03.2022