

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ТОЧНОСТИ ДАННЫХ PMU

Баламетов А.Б. – д.т.н, профессор,  
руководитель научного направления,  
Халилов Э.Д. – к.т.н, доцент, заведующий отделом  
Азербайджанский Институт Энергетики  
г. Баку, Азербайджан

Исследованы вопросы выбора расчетной модели воздушной линии для анализа установившихся режимов в реальном времени по измерениям Phasor Measurement Unit (PMU). Повышение точности анализа режимов позволяет эффективно управлять линией электропередачи в реальном времени. На примере воздушной линии 500 кВ приведен сравнительный анализ погрешностей моделей.

Применение современных технологий управления является основной развития электроэнергетической системы. В последнее время находят развитие измерения комплексных величин PMU [1].

Для адекватного моделирования режимов ЛЭП СВН в электроэнергетической системе (ЭЭС) необходимо использование математических моделей соответствующих точности исходных данных [2].

Погрешности в результатах моделирования режимов определяются точностью: расчетной модели и режимных параметров измерения.

GPS-синхронизированное современное оборудование имеет способность измерять модуль напряжения с точностью 0,1 % и фазовый угол с точностью 0,2 град.

Суммарная погрешность по параметру  $U$  может быть приближенно представлена в виде суммы составляющих

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

где **мод** – отклонение, вызванное неадекватностью математической модели ВЛ, **изм** – составляющая, вызванная неточностью измерений.

Необходимая точность **мод** может быть определена из (1), если потребовать, чтобы **мод** было статистически незначимым фактором среди всех факторов.

Переходя от формулы к нормам, имеем

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

Отсюда при условии, что норма погрешности расчетной модели  $\|\text{мод}\|$  должна составлять заданную допустимую долю от нормы  $U$ , т. е.  $\|\text{мод}\| = \varepsilon \|U\|$ , получается

$$\| \text{мод} \| \leq \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (\| \text{изм} \|).$$

Например, при погрешности измерения 0,2 % методическая погрешность математической модели должна быть менее 0,2/3 %.

Представление расчетной модели ВЛ в виде уравнений длинной линии позволяет получить наиболее точную математическую модель.

Для моделирования режима ЛЭП СВН на основе СВИ были проведены расчеты для ВЛ 500 кВ с конструкцией фазы 3·АС-330/43,  $r_0 = 0,029$  Ом/км,  $x_0 = 0,299$  Ом/км,  $b_0 = 3,74 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Расчеты были произведены для расчетных моделей отличающиеся длиной последовательных П-образным схем: 70 км – 5 участков, 87,5 км – 4 участка, 116,67 км – 3 участка, 175 км – 2 участка и 350 км.

Мощность в конце линии электропередачи  $S_2 = 900 + j35$  МВА. За эталонные расчеты приняты результаты расчета по уравнениям длинной линии при задании конце линии  $U_2 = 500$  кВ и  $\delta_2 = 0$  град. В начале линии получается  $U_1 = 525,11$  кВ и угол напряжения  $\delta_1 = -20,91$  град.

Расчеты по уравнениям установившихся режимов линии произведены при задании напряжения в начале линии  $U_1 = 525,11$  кВ и  $\delta_1 = 0$ .

В таблице 1 приведены результаты расчета ВЛ по уравнениям длинной линии и для расчетных моделей отличающиеся длиной последовательных П-образным схем.

Таблица 1 – Результаты расчета режима ВЛ 500 кВ

Узлы	Ветви	$U_2$ , кВ	$\delta_2$ , град	$P_{\text{нач}}$ , МВт	$Q_{\text{нач}}$ , МВар	$\Delta P_{\text{н}}$ , МВт	$\Delta P_{\Sigma}$ , МВт
Расчет по уравнениям установившихся режимов по П-образным схемам ВЛ							
2	1	496,91	-21,48	-935,47	-43,54	34,00	35,47
3	2	499,30	-21,00	-934,34	-29,94	32,87	34,34
4	3	499,64	-20,91	-934,15	-28,22	32,67	34,15
5	4	499,78	-20,88	-934,08	-27,40	32,61	34,08
6	5	499,92	-20,87	-934,04	-26,35	32,57	34,04
Расчет по уравнениям длинной линии							
2	1	500	0	-934,11	-26,016	32,52	34,11

На рисунке 1 приведены графики результаты расчета режима при удельных потерях мощности на корону, соответствующих группе хорошая погода 4 Вт/м. Зависимость потерь мощности на корону от напряжения задана в виде шунта на землю.

Точность модели достигается сопоставлением результатов цепочечной П-образной схемы с разными длинами участков, с результатами, полученными по уравнениям длинной линии.

Погрешности расчетных моделей ВЛ в зависимости от длины по последовательным П-образным схемам с участками 70 км – 5 участков, 87,5 км – 4 участка, 116,67 км – 3 участка, 175 км – 2 участка и 350 км – 1 участок в условиях хорошей погоды имеют:

- (0,08–3,09) кВ или – (0,016–0,618) % по модулю напряжения;
- (0,08–3) градусов или –(0,12–3) % по углу.

Таким образом, установлено, что методические погрешности упрощенного моделирования режима ЛЭП СВН могут превышать погрешности измерений РМУ.

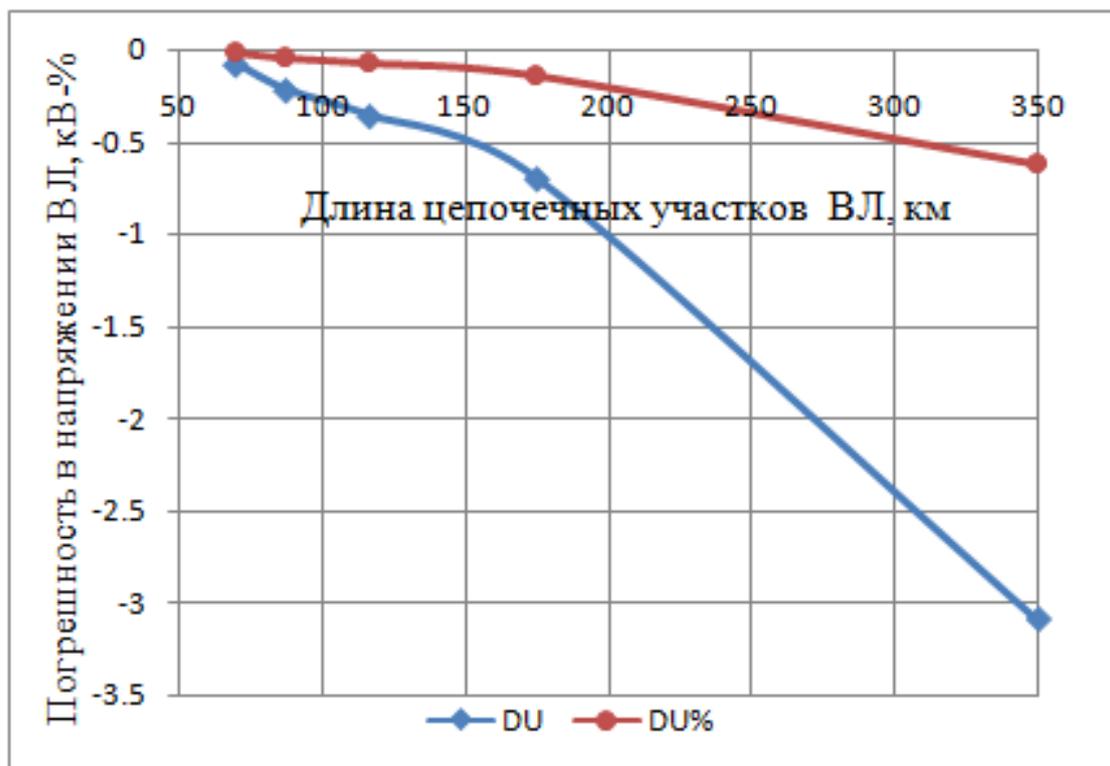


Рисунок 1 – Графики зависимости погрешностей от количества и длины участков последовательных П-образных схем

Представление ВЛ последовательными цепочечными участками менее 70 км позволяет получить расчетную модель, точность которой соответствует точности РМУ.

#### Список литературы

1. Phadke A.G. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. 2002, Vol.1, p.476-479.
2. Balametov, A. B., Halilov, E. D., & Isayeva, T. M. (2019). An Adequate Mathematical Model of an Ultrahigh-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Electrical Engineering. p-p. 1–9.