

О ПРОБЛЕМЕ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В первой части статьи [1] проанализированы факторы, влияющие на уровень наведенного напряжения, и рассмотрены мероприятия по обеспечению безопасности работ на ВЛ при наведенном напряжении. Приведена классификация ВЛ по степени опасности наведенного напряжения, даны рекомендации по выбору оптимальной схемы заземления ВЛ. Во второй части статьи описываются математическая модель и программное обеспечение (ПО), разработанное для расчета наведенного напряжения на ВЛ 10 кВ и выше, а также рассматривается опыт выполнения измерений наведенного напряжения на отключенных линиях, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 110 кВ и выше.

Часть 2.

Э.И. ЁЧ,

инженер ТВН ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»

А.В. СЕРЕМЯЖКО,

заведующий ТВН ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»

М.А. ДРАКО,

м.т.н., заведующий ЭТЛ ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»

О.А. МОЙСЕЕНКО,

заместитель заведующего
ЭТЛ ОУКЭ РУП
«Белэнергосетьпроект»

Методика расчета значений наведенного напряжения

Предполагается, что отключенная ВЛ находится в зоне влияния электромагнитных полей, излучаемых работающими ВЛ. Для определения величины индуцированных на ней токов и напряжений необходимо разделить воздействие электромагнитного поля на электрическую и магнитную составляющие.

Данный подход является допустимым, так как расстояния между влияющими и подверженными влиянию проводами много меньше длины волны электромагнитного поля промышленной частоты [2].

Переменное электрическое поле оказывает влияние на провода, изолированные от земли и находящиеся в непосредственной близости от источника поля. Появление напряжения (емкостная составляющая) на отключенной ВЛ при этом обусловлено распределением зарядов между проводами отключенной и влияющей ВЛ. Составляющая наведенного напряжения, обусловленная переменным электрическим полем, зависит в основном от класса напряжения ВЛ, расстояний между проводами и взаимного расположения линий.

Переменное магнитное поле на отключенной ВЛ согласно закону электромагнитной индукции приводит к появлению ЭДС (индуктивная составляющая) в расположенных в данном поле контурах. Касательно наведенного напряжения источниками магнитного поля являются действующие ВЛ, а отключенная ВЛ представляет собой контуры, в которых появляется ЭДС.

Схема замещения, описывающая взаимодействие электрических и магнитных полей расчетной и влияющей ВЛ, представлена на рисунке 1. РВЛ и ВВЛ показаны в трехфазном исполнении, а при наличии на них тросов последние задаются как отдельные проводники. Сами РВЛ и ВВЛ разбиваются на элементарные однородные участки, имеющие П-образную схему замещения. Однородным участком может выступать пролет ВЛ или участок, объединяющий несколько пролетов.

Емкости, представленные на схеме замещения (рис. 1), определяются известными методами на основе уравнений Максвелла для системы проводников, в число которых входят провода и тросы РВЛ и ВВЛ. Вид формул для расчета потенциальных коэффициентов и соответствующих частичных емкостей зависит от формы проводников и их расположения в пространстве. В данном случае проводники можно считать тонкими параллельными бесконечными проводниками, так как их длина много больше радиуса.

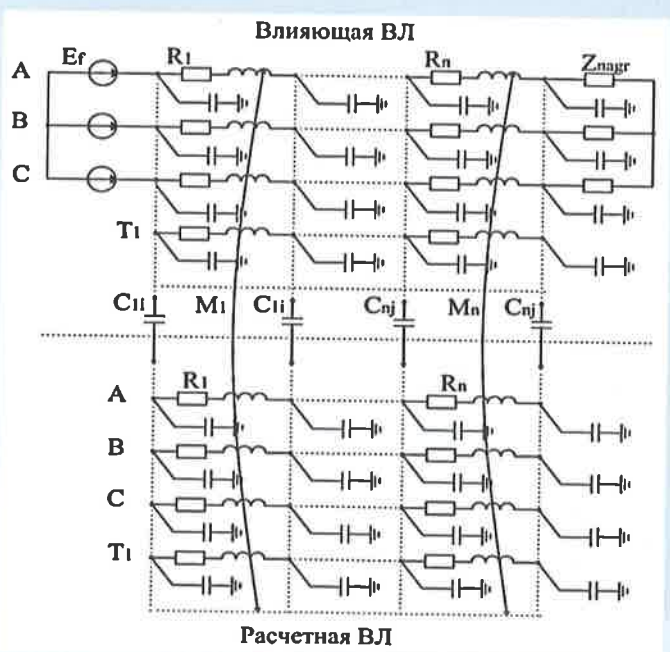


Рис. 1. Схема замещения расчетной модели: E_f – фазные ЭДС источников питания влияющих ВЛ (ВВЛ); R – активное сопротивление проводников ВВЛ и расчетной ВЛ (РВЛ); M – собственные и взаимные индуктивности проводов ВВЛ и РВЛ; C – собственные и взаимные емкости проводов ВВЛ и РВЛ; $Z_{нагр}$ – комплексное сопротивление нагрузки

Тогда формулы для собственных и взаимных потенциальных коэффициентов можно записать в явном виде [3]:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{(X_i - X_i)^2 + (H_i + H_i)^2}{r_i}, \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{(X_i - X_j)^2 + (H_i + H_j)^2}{(X_i - X_j)^2 + (H_i - H_j)^2}, \quad (2)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; X и H – векторы координат проводов относительно оси ВЛ по горизонтали и вертикали соответственно; m; d – матрица расстояний между проводами ВЛ, m; r – вектор радиусов проводов ВЛ, m.

Далее из матрицы потенциальных коэффициентов путем нахождения обратной матрицы можно получить матрицу удельной емкости ВЛ [3]:

$$C = \alpha^{-1}, \quad (3)$$

где α – матрица собственных и взаимных потенциальных коэффициентов.

Получив значение удельной емкости ВЛ (3), можно определить емкостную проводимость участка ВЛ [3] путем преобразования каждого элемента матрицы в проводимость:

$$Y_{c_{yч}} = 0,5 \cdot j \cdot \omega \cdot l_{yч} \cdot C, \quad (4)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с ($f = 50$ Гц – промышленная частота переменного тока); $l_{yч}$ – длина расчетного участка ВЛ, m; C – матрица удельной емкости ВЛ.

Собственные и взаимные сопротивления, представленные на схеме замещения (рис. 1), определяются для всех однородных участков ВЛ. Для этого на каждом таком участке провода и тросы ВЛ условно заменяются подвешенными над землей бесконечно длинными проводниками, диаметры и высота подвеса которых, а также расстояния между ними принимаются равными соответствующим параметрам, используемым при электрических расчетах [4]:

$$Z_{yч,ii} = R_{oi} \cdot l_{yч} \cdot 10^{-3} + \frac{j\omega\mu_0 l_{yч}}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{(X_i - X_i)^2 + (H_i + H_i)^2}}{r_i} + 2 \int_0^{\infty} \frac{R_n \cdot e^{-k \cdot v}}{R_n \cdot v + \sqrt{k^2 + v^2}} \cos(r_i \cdot v) dv \right), \quad (5)$$

$$Z_{yч,ij} = \frac{j\omega\mu_0 l_{yч}}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (H_i + H_j)^2}}{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (H_i - H_j)^2}} + 2 \int_0^{\infty} \frac{R_n \cdot e^{-(H_i + H_j)v}}{R_n \cdot v + \sqrt{k^2 + v^2}} \cos(|X_i - X_j| \cdot v) dv \right), \quad (6)$$

$$k = \sqrt{j\omega\mu_0} / \rho, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; R_o – вектор удельных сопротивлений проводов ВЛ, Ом/км; ρ – удельное сопротивление слоя земли, Ом·м; R_n – пространственная характеристика среды (для однослойной земли $R_n = 1$).

Расчет наведенных токов и напряжений по схеме замещения, представленной на рисунке 1, выполняется методом модифицированных узловых уравнений [5]. Метод предполагает формирование и расчет расширенной системы узловых уравнений, где неизвестными являются потенциалы узлов и токи ветвей. Система уравнений, реализующая данный метод, выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Y + K_{uu} & K_{ui} \\ A^T & Z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ E \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где Y – матрица узловых проводимостей; Z – матрица собственных и взаимных сопротивлений ветвей; A^T – транспонированная матрица графов; K_{uu} – матрица проводимостей источников напряжения, управляемых напряжением (ИНУН); K_{ui} – матрица коэффициентов источников напряжения управляемых током (ИНУТ); J – вектор узловых токов; E – вектор ЭДС ветвей; U – вектор потенциалов узлов; I – вектор токов ветвей.

Данная система уравнений решается известными методами.

Программное обеспечение для расчетов наведенного напряжения

Взяв за основу вышеизложенную методику, РУП «Белэнергосетьпроект» разработало программное обеспечение (ПО) VIVE (от англ. valuation induced voltage) для расчетов наведенного напряжения на ВЛ 10 кВ и выше.

Одним из основных достоинств указанного ПО является возможность автоматизированного расчета наведенного напряжения для ВЛ с топологией любой сложности. Результаты расчетов выводятся в виде отчетов в формате Word (.docx) и Excel (.xlsx), что позволяет получить наглядную и удобно воспринимаемую отчетную документацию.

Тестирование программного обеспечения

На основании [6] заинтересованными организациями разработана и утверждена внутренняя методика, устанавливающая порядок выполнения измерений наведенного напряжения на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Измеренные значения наведенных напряжений определяются для максимальных значений токов, протекающих по ВВЛ, путем пересчета.

Таблица 1. Погрешность ПО VIVE относительно Mathcad и MATLAB

Погрешности	Погрешность VIVE относительно Mathcad, %	Погрешность VIVE относительно MATLAB, %
Средняя относительная погрешность по произведенным расчетам, %	4,901·10 ⁻⁵	0,028552
Максимальная относительная погрешность по произведенным расчетам, %	0,0001113	0,30776

Таблица 2. Результаты расчетов и измерений на отключенных ВЛ 110 кВ

Исследуемая ВЛ, № опоры	Влияющие ВЛ	Мощности влияющих ВЛ, МВт (Мвар)	Источник данных	U, В	ΔU, В
ВЛ 110 кВ Миоры – ММПЗ № 1, оп. № 8	1. ВЛ 110 кВ Миоры – БПС «Дисна» 2. ВЛ 110 кВ Миоры – Верхнедвинск	$P_1 = -5,31$ $Q_1 = -0,7$ $P_2 = 3,35$ $Q_2 = 0,26$	Изм.	0,551	
			Vive	0,249	0,302
		$P_1 = -15,5$ $Q_1 = 1,55$ $P_2 = 3,23$ $Q_2 = 0,1$	Изм.	1,035	
			Vive	0,614	0,421
		$P_1 = 0,25$ $Q_1 = -1,55$ $P_2 = -12,4$ $Q_2 = 3,2$	Изм.	0,201	
			Vive	0,288	-0,087
		$P_1 = 0,25$ $Q_1 = -1,58$ $P_2 = -12,4$ $Q_2 = 3,3$	Изм.	0,117	
			Vive	0,282	-0,165
ВЛ 110 кВ Миоры – ММПЗ № 2, оп. № 8	1. ВЛ 110 кВ Миоры – БПС «Дисна» 2. ВЛ 110 кВ Миоры – Верхнедвинск	$P_1 = 0,28$ $Q_1 = -1,54$ $P_2 = -12,4$ $Q_2 = 3,7$	Изм.	0,419	
			Vive	0,401	0,018
		$P_1 = -16,5$ $Q_1 = 1,7$ $P_2 = 3,6$ $Q_2 = 0,26$	Изм.	0,143	
			Vive	0,389	-0,246
		$P_1 = -5,8$ $Q_1 = -0,6$ $P_2 = 3,7$ $Q_2 = 0,25$	Изм.	0,305	
			Vive	0,206	0,099
ВЛ 110 кВ Миоры – Долгиново, оп. № 8	ВЛ 110 кВ Миоры – БПС «Дисна»	$P = -13,07$ $Q = 1,65$	Изм.	0,35	
			Vive	0,712	-0,362
			Изм.	0,72	
			Vive	0,945	-0,255
		$P = -12,66$ $Q = 1,86$	Изм.	0,554	
			Vive	0,686	-0,132
	Изм.	3,3			
	Vive	3,402	-0,102		

Корректность работы алгоритма расчета наведенного напряжения, реализованного в программе Vive, была доказана путем сравнения получаемых результатов с данными расчетов в программах Mathcad и MATLAB (таблица 1), а также натурных измерений, выполненных непосредственно на РВЛ.

Для тестирования ПО в разных электросетевых филиалах ГПО «Белэнерго» проведена серия измерений значений наведенного напряжения на отключенных ВЛ (таблицы 2, 3).

Выводы

Сравнение результатов расчетов, полученных с использованием ПО Vive и программ Mathcad и MATLAB, показало, что погрешность в среднем не превышает 0,03 %. Это свидетельствует о корректной программной реализации алгоритма расчета наведенного напряжения.

Сопоставив эти же результаты с рядом значений, измеренных непосредственно на ВЛ, можно сделать вывод, что при сравнении малых величин наведенного напряжения абсолютная погрешность не превышает 0,5 В, а относительная может быть достаточно большой.

При сравнении значений наведенного напряжения, превышающих десятки вольт, средняя погрешность в сторону завышения от измеренного значения составила 22 %, а в сторону занижения – 6,37 %.

Приведенные результаты являются достаточно приемлемыми, так как на конечный результат оказывают влияние сложно учитываемые факторы: сезонное изменение сопротивления заземляющих устройств подстанций и опор ВЛ, изменение удельного сопротивления грунта вдоль трасс ВЛ, отклонение геометрии модели от геометрии реальной ВЛ и неопределенность измерений.

Таблица 3. Результаты расчетов и измерений на отключенной ВЛ 330 кВ

Исследуемая ВЛ	Влияющие ВЛ	Мощности влияющих ВЛ, МВт (Мвар)	Тип	U, В	ΔU, В
ВЛ 330 кВ № 446 Могилев-Северная – Могилев-330	1. ВЛ 330 кВ № 347 Могилев – Орша 2. ВЛ 110 кВ Могилев-330 – Мошенки 3. ВЛ 330 кВ № 336 Могилев-Северная – ГРЭС-20	$P_1 = 247$ $Q_1 = 7,8$ $P_2 = 4,6$ $Q_2 = 0$	Изм.	100	
				120	
		$P_3 = 145$ $Q_3 = 42$	Vive	99,45	1,55
				115,03	4,97
				136,92	23,08
				$P_1 = 257$ $Q_1 = 19$ $P_2 = 3,4$ $Q_2 = 0$ $P_3 = 145$ $Q_3 = 24$	Изм.
		20			
			Vive	37	
				17,07	-3,07
				22,94	-2,94
				47,87	-10,87
Vive*	Максимальный разброс значений	-10,87...+23,08 В		-29,38...+14,425 %	
	Средний разброс значений	-5,62...+9,53 В		-22,00...+6,37 %	

*Знак «+» – рассчитанные значения занижены относительно измеренных, знак «-» – рассчитанные значения завышены относительно измеренных.

Список литературы

1. Драко, М.А. О проблеме наведенного напряжения на отключенных линиях электропередачи. Часть 1 / М.А. Драко, О.А. Мойсёненко, А.В. Серемьяжко, Э.И. Ёч // Энергетическая стратегия. – 2019. – № 3. – С. 20–23.
2. Мольбаер, А.А. Особенности расчета наведенного напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи / А.А. Мольбаер // Научный вестник НГТУ «Энергетика». – 2016. – № 3. – С. 146–160.
3. Колечицкий, Е.С. Электромагнитное влияние высоковольтных линий электропередачи / Е.С. Колечицкий, И.В. Королев // Электричество. – 2016. – № 2. – С. 28–37.
4. Глушко, В.И. Расчет наведенного напряжения на линиях электропередачи и обеспечение безопасности работ на этих линиях / В.И. Глушко, О.Е. Ямный, Э.П. Ковалев, Н.А. Науменко // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 13–18.
5. Анализ электронных схем модифицированным методом узловых потенциалов: методические указания к лабораторной работе по курсу «Компьютерный анализ электронных схем» / Сост. В.В. Кийко, В.Ф. Кочкина, К.А. Вдовкин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 31 с.
6. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. СТО 56947007-29.240.55.018-2009. – Москва: ФСК ЕЭС, 2008. – 27 с.