

магничивающих токов соответствующих фаз трансформатора, что приводит к изменению гармонического состава токов.

При выявлении факта ПВ по отношению  $\frac{U}{f}$  необходимо оценить влияние следующих факторов: режим заземления нейтрали трансформатора; возможность контроля одного или всех линейных напряжений со стороны низшего напряжения трансформатора; целесообразность выполнения ИО от перевозбуждения односистемным.

Отстройка от режима ПВ может производиться на основе анализа кривой дифференциального тока: торможением от 3-й, 5-й и 7-й гармоники или по времени импульсному принципу.

Аналитические методы расчета режимов БНТ и ПВ отличаются высокой сложностью и трудоемкостью. Поэтому для сравнительного анализа и оптимизации характеристик цифровых защит целесообразно использовать методы вычислительного эксперимента на базе комплексных математических моделей, реализованных на ПЭВМ.

Для учета всех влияющих факторов необходимо, чтобы комплексная математическая модель включала не только математическую модель защищаемого объекта и измерительных трансформаторов, но и самой цифровой защиты.

В качестве основного математического аппарата модели используются дифференциальные уравнения, составленные на базе известных физических законов и решаемые численными методами. В основе математической модели целесообразно использовать физический и информационный подход. Физический базируется на замене реальных элементов упрощенными электрическими схемами, для которых расчет производится с помощью законов Кирхгофа. При информационном подходе описывается лишь преобразование входного сигнала в выходной, без отражения внутренних физических процессов и законов.

### Литература

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Засыпкин, А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Овчаренко, Н.И., Дьяков, А.Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Издательство МЭИ, 2000.
4. Линт, М.Г., Фурашов, В.С. Дифференциальные токовые защиты элементов энергосистем с применением цифровой техники. – М.: Информэлектро, 1990.
5. Романюк, Ф.А., Новащ, В.И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998.

УДК 621.315

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПЛЯСКИ ОДИНОЧНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

*Дерюгина Е.А.*

Научный руководитель – **КЛИМКОВИЧ П.И.**

Воздушные ЛЭП являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем. Серьезной проблемой их эксплуатации являются колебания проводов различных видов, один из которых – пляска проводов. Физическая сущность пляски заключается в аэродинамической неустойчивости сечения провода, покрытого ассиметричным гололедным осадком. Пляска относится к низкочастотным видам колебаний 0,15–1,0 Гц и характеризуется значительными амплитудами. В результате пляски происходят замыка-

ния между проводами и между проводами и тросами, обрывы проводов, ускоренный износ линейной арматуры и пр. [1]. Значительный ущерб от пляски инициировал работы по исследованию и моделированию этого явления и ограничению амплитуд колебаний различными методами.

В качестве расчетной модели провода для моделирования пляски может быть принята абсолютно гибкая упругая нить, сопротивляющаяся кручению и растяжению. Используя модель гибкой нити, на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработаны численный метод, алгоритм и компьютерная программа расчета пляски одиночных проводов. Достоверность расчетов по разработанной программе обоснована авторами сравнением их с данными японских исследователей, опубликованными в [2], для провода АС-95/16 в пролете длиной 100 м. Наблюдается подобие осциллограмм вертикальных колебаний и траекторий движения проводов. Разница в амплитудах пляски составляет не более 15 %.

Существенное влияние на динамические характеристики пляски проводов оказывает профиль гололеда. Выделяются четыре семейства профилей: эллипс, клин, трапеция и случайные профили [3]. В каждом из них различают серии одной и той же относительной кривизны (относительная кривизна профиля – отношение максимальной кривизны профиля к его высоте). Наибольшее применение в мировой практике получили аэродинамические характеристики (АДХ) первого типа, которые успешно используются в Бельгии, Японии и России. При этом наблюдается хорошее согласование результатов численного расчета с экспериментальными данными.

Вычислительный эксперимент проводится с помощью разработанной компьютерной программы GALSINGL, в которой реализован численный метод расчета пляски проводов воздушных ЛЭП. Она позволяет найти амплитуды колебаний проводов при пляске, максимальные и минимальные тяжения, а также определить характер процесса: развитие автоколебаний или их затухание. В целях определения аэродинамических коэффициентов используется каталог опытных АДХ:  $C_M = f(\theta_a)$ ;  $C_D = f(\theta_a)$  и  $C_L = f(\theta_a)$ . В расчетах параметров пляски одиночных проводов использованы две АДХ зарубежных авторов: Nigol [2] и Lilien [4]. Результаты расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП 35–220 кВ номинальных сечений, применяемых в пролетах 100–300 м, приводятся в таблице 1. Получены двойные амплитуды вертикальных колебаний  $Y_{\max}$ , максимальные тяжения  $T_{\max}$  и углы закручивания проводов  $\theta_{\max}$  для указанных пролетов различной длины  $l$  при разных начальных углах оледенения  $\theta_0$ , тяжениях  $T_0$  и скоростях ветра  $V$ .

Двойная амплитуда вертикальных колебаний в соответствии с данными таблицы 1 изменяется в диапазоне 0,5–4,0 м, а относительные изменения максимальных тяжений достигают двукратной величины. Максимальные углы закручивания проводов находятся в диапазоне 15–80°. Наибольшие колебания с аэродинамической характеристикой Nigol [2] имели место в пролете 300 м с проводом АС-300/39 при  $T_0 = 3000$  даН,  $\theta_0 = 98^\circ$  и  $V = 20$  м/с. Более существенными максимальными амплитудами колебаний и тяжениями проводов характеризуется пляска, полученная с использованием АДХ, заимствованной из [4]. Диапазон двойных амплитуд колебаний составляет 2–4 м, что соответствует наблюдаемым на ЛЭП 110–220 кВ величинам [5].

Вычислительным экспериментом по компьютерной программе получены параметры пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП напряжением 35–220 кВ, близкие к результатам измерений на реальных воздушных ЛЭП. Полученная база данных может быть использована при разработке технических требований на линейную арматуру, обеспечивающих ее надежную работу в условиях эксплуатации.

Таблица 1. Результаты исследования пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП

l, м	Марка провода	T <sub>0</sub> , даН	V, м/с	f <sub>0</sub> , м	θ <sub>0</sub> , град.	Результаты расчета			
						Y <sub>max</sub> /f <sub>0</sub> , о. е.	T <sub>max</sub> , даН	T <sub>min</sub> , даН	θ <sub>max</sub> , град.
С использованием АДХ [2]									
100	АС-70/11	270	20	1,5	93	0,8	470	160	27
120	АС-95/16	350	20	1,97	94	0,76	535	230	35
180	АС-95/16	500	20	3,12	98	0,49	770	310	50
100	АС-120/19	400	15	1,78	90	0,67	720	150	30
160	АС-120/19	750	20	2,43	95	0,57	1000	590	38
220	АС-150/24	1400	20	3,02	90	0,45	1880	1165	70
300	АС-150/24	2500	10	3,15	90	0,41	2675	2350	75
200	АС-240/56	1720	20	3,82	100	0,26	2230	1410	60
300	АС-240/56	2500	20	6,0	100	0,27	3290	2100	62
300	АС-300/39	3250	10	4,78	90	0,39	3850	2680	36
300	АС-300/39	3000	20	5,18	98	0,36	3850	2270	65
240	АС-300/39	2000	20	4,98	98	0,37	2890	1580	60
С использованием АДХ [4]									
100	АС-95/16	400	10	13,7	-140	0,91	735	100	17
200	АС-95/16	750	10	2,9	-140	0,64	1050	665	52
100	АС-150/24	400	10	2,2	-140	0,7	915	100	15
250	АС-150/24	1200	10	4,55	-140	0,67	1910	490	50
200	АС-240/56	2000	10	3,32	-140	0,98	3530	550	16
250	АС-240/56	3000	10	3,45	-140	1,1	4545	2040	25
300	АС-300/39	3500	10	4,45	-140	0,9	4955	2525	40
250	АС-300/39	3000	10	3,6	-140	0,94	4410	1080	25

### Литература

1. Wang, J., Lilien, J. L.. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span – 3-DOF – Model, some Application and design recommendations // IEEE Transactions on power Delivery. – Vol. 13, № 3. – 1998. – P. 909–916.
2. The Simulation Method of Galloping of Overhead Transmission Line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. – Joint Meeting of UNIPEDE, CORECH – Galloping, 1983, Kyoto, Japan.
3. Ржевский, С. С. Профиль гололеда // Электрические станции. – 1972. – № 4. – С. 44–46.
4. Lilien, J. L., Ericum, M., Wolfs, M. Overhead Line Galloping, field Experience during one event in Belgium on Last February 13th, 1997. IWAIS '98. International Conference, Reykjavik, Iceland, June 1998, proceedings. – P. 293–299.
5. Ловецкая, Е. Н., Савваитов, Д. С., Шкапцов, В. А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10–750 кВ // Электрические станции. – 1987. – № 2. – С. 36–40.