

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

А.П. Андрукевич, Е.А. Дерюгина

*Учреждение образования «Белорусский национальный  
технический университет», г. Минск*

Научные руководители: И.И. Сергей, П.И. Климкович

Пляска возникает при асимметричных отложениях гололеда толщиной от 0,1 до 1,0 диаметра провода и скоростях ветра в диапазоне 7–20 м/с [1]. При увеличении толщины гололеда больше диаметра провода пляска обычно прекращается. Возникновение пляски зависит от формы и ориентации гололедного отложения относительно скорости ветра. Во время пляски провода движутся по эллиптическим траекториям с большой осью эллипса преимущественно в вертикальной плоскости, образуя в полете одну, две или три полуволны [2]. Четырехполуволновые и более колебания проводов при пляске встречаются редко и составляют не более 2 % от общего их числа [1]. При пляске с одной полуволной двойная амплитуда колебаний может достигать 1,4 стрелы провеса.

В результате пляски происходят замыкания между проводами и между проводами и тросами, обрывы проводов, износ линейной арматуры и пр. [3]. Значительный ущерб от пляски проводов инициировал ее теоретические, экспериментальные и полевые исследования. Теоретическое изучение пляски существенно усложнено нелинейными зависимостями между аэродинамическими силами, движением и кручением проводов многопролетных участков воздушных ЛЭП [1]. Согласованные программы комплексных исследований пляски проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ, США, Канаде, России и др. Важным элементом исследований является проведение вычислительного эксперимента реальных пролетов воздушных ЛЭП.

При исследовании эффективности устройств ограничения и подавления пляски используются численные методы. Они позволяют количественно оценить эффект ограничения амплитуд колебаний и найти оптимальную схему расстановки гасителей пляски в полете. Однако по оценкам СИГРЭ, правильная интерпретация статистических данных наблюдений на действующих линиях представляется предпочтительным способом определения эффективности различных устройств гашения пляски. Поэтому производятся полевые наблюдения и сбор статистических данных об эффективности различных гасителей пляски.

Ведущую роль в изучении пляски и выборе способов борьбы с ней сыграли специалисты ВНИИЭ. Определение наибольших возможных амплитуд пляски имеет большое практическое значение для выбора расположения проводов на опоре и определения возможного приближения проводов во время пляски к земле и пересекаемым объектам. В СССР были случаи, когда в результате сильной пляски на линиях 330–500 кВ было остановлено движение транспорта на автомагистралях.

Яковлевым Л.В. подробно описан и обоснован метод эксцентричных грузов для гашения пляски проводов и приведены примеры его положительного применения в энергосистемах СССР. Однако анализ эффективности разработанного в ОРГРЭС крутильного гасителя показал, что установка указанных гасителей дала положительный эффект только на ВЛ 35–330 кВ Киевэнерго. Использование гасителей в семи других энергосистемах оказалось неуспешным. При эксплуатации этих гасителей происходит самопроизвольное раскручивание провода, предварительно закрученного при установке гасителей. Отмечены многочисленные случаи излома ножки гаси-

теля и повреждения наружных повивов провода в месте установки гасителя. Для устранения отмеченных недостатков было предложено комбинированное применение вертикальных и горизонтальных маятников, которое имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с методом эксцентричных грузов. Комбинированное применение вертикальных и горизонтальных маятниковых гасителей пляски повышает надежность их работы при любых эксплуатационных воздействиях на элементы ВЛ. Массивные вертикальные маятники под проводом обеспечивают отстройку частот вертикальных колебаний от крутильных на 10–20 %. Более легкие эксцентричные грузы устанавливаются в горизонтальной плоскости так, что каждые два соседних маятника находятся по разные стороны от вертикали, проходящей через центр кручения провода и обладают эффектом возбуждения разнонаправленных крутильных колебаний провода, меняющих направление действия аэродинамической подъемной силы. Вертикальные маятники являются ограничителями закручивания провода, что решает техническую проблему предотвращения опрокидывания горизонтальных маятников в пассивное положение, существенно отличающиеся от горизонтального. В отчете ВНИИЭ указывается, что разнообразные способы механического демпфирования пляски проводов пока не вышли из стадии опытов и не получили широкого практического применения.

По мнению исследователей ВНИИЭ, для защиты от пляски можно использовать разработанный А.Я. Либерманом аэродинамический способ подавления пляски проводов. Узкие длинные пластмассовые пластины изменяют аэродинамические характеристики провода, придавая ему более устойчивую форму и создают силы, противодействующие пляске. Предложены схемы их рациональной установки в пролете ВЛ. Общая длина участков пролета, оборудованных аэродинамическими стабилизаторами составляет 20–25 % длины пролета. Несмотря на ряд случаев их успешной эксплуатации под действием солнца и разности температур, пластмассовые стабилизаторы деформировались, усугубляя пляску. Самозакрепляющиеся пластмассовые гасители Азглавэнерго со временем утрачивают способность сцепления с проводом, соскальзывают по проводу, располагаются в пролете хаотически, при этом сами часто становятся причиной перекручивания расщепленной фазы. Таким образом, существующие способы крепления стабилизаторов к проводу, в том числе и металлических, несовершенны и нуждаются в доработке. Установка протяженных гасителей на труднодоступных пролетах линий неоправдана из-за резкого возрастания затрат на монтаж [4].

Для ВЛ 110–220 кВ эффективным средством борьбы с пляской проводов является установка междуфазных распорок, широко применяемых в США, Канаде и Японии.

Рассмотренные способы гашения пляски практикуются и за рубежом. В докладе СИГРЭ (1982 г.) изложены результаты испытаний устройств и систем ограничения пляски проводов. Рассмотрены расстраивающие маятники, аэродинамические гасители Richardson, а также междуфазные распорки. Для приближенной оценки ограничивающего действия для каждого устройства подсчитаны значения относительных амплитуд пляски при наличии ограничивающих устройств и без них. Это отношение для расстраивающих маятников составило 45 %, для аэродинамических гасителей 30 % и для междуфазных распорок 46 %. Экономические факторы являются основным критерием при выборе решений относительно применения устройств ограничивающих пляску, но следует учитывать эстетическое воздействие ВЛ на ландшафт, общественное мнение, на которое влияет частота перерывов в электроснабжении и другие факторы.

В докладе СИГРЭ (1981 г.) Rowbottom оценил эффективность гасителя с механическим демпфированием тех видов колебаний, которые вызывают проблемы при пляске. Значительной трудностью использования гасителей-демпферов является оптимизация жесткости пружины и демпфирования для различных величин отложений гололеда. Выбор демпферного гасителя для конкретной ВЛ является задачей строгого вычислительного эксперимента.

Метод эксцентричных грузов был успешно использован японскими специалистами. На основе математической модели были сформулированы расчетные критерии действия компенсаторов колебаний проводов при их пляске и разработана компенсационная система для подавления пляски с помощью эксцентричных грузов. Этот метод прошел проверку в полевых условиях и был реализован в энергосистеме.

Для линий с одиночными проводами в горизонтальном положении был вмонтирован эксцентриковый противовес. Ориентация его выбрана с учетом крутильной жесткости провода, и он направлен противоположно относительно направления разворота провода. Конструктивно эксцентриковый противовес решен таким образом, чтобы создавался достаточно большой компенсационный момент вращения.

Для расщепленных проводов используются распорки с вращающимися зажимами, рядом с которыми установлены эксцентричные грузы. Внутренний и внешний зажимы, допускающие свободное вращение в распорке выполнены из стали. Благодаря этому их вращательная способность становится такой, как и для одиночного провода, что приводит к уменьшению действия аэродинамической силы на провод. Результаты полевых испытаний на опытной линии и анализ эксплуатации работающих ЛЭП в течение 10 лет подтвердили эффективность предложенной системы подавления пляски проводов.

В докладе технической лаборатории Хокайдо изложен численный метод расчета пляски одиночных и расщепленных проводов при наличии гасителей-демпферов. Приводятся многочисленные примеры численных расчетов, подтверждающие эффективность демпферов в ограничении и гашении пляски проводов.

По пути комбинации различных способов подавления пляски проводов идут Бельгийские ученые. В разработанной ими конструкции нового демпфера пляски расщепленных проводов ТДД сочетаются принципы расстройки и демпфирования крутильных колебаний. Указанный новый гаситель прошел успешные испытания в полевых условиях. Для теоретического обоснования гасителя использована новая теория эквивалентной крутильной жесткости расщепленной фазы [1].

Сравнительный анализ методов защиты проводов ВЛ от воздействий пляски показывает, что наиболее точно этот вопрос решается при обосновании метода использованием строгих математических моделей и вычислительного эксперимента. Для ВЛ 35–220 кВ эффективными способами защиты являются междуфазные распорки, а также комбинации вертикальных и горизонтальных маятников. Проблемы борьбы с пляской проводов изложены в монографии Р.М. Бекметьева [2]. Несмотря на выполненный большой комплекс исследований и положительный опыт применения различных типов гасителей по сведениям СИГРЭ, отсутствует общее решение проблемы создания единого метода для предотвращения пляски проводов. Поэтому в этой области требуются как теоретические, так и практические работы по применению устройств подавления пляски для воздушных ЛЭП с различными параметрами.

## Литература

1. Wang I., 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. Бекметьев, Р.М. Пляска проводов воздушных линий электропередачи /Р.М. Бекметьев, А.Т. Жакаев, Н.В. Ширинских. – Алма-Ата: Наука, 1979. – 215 с.
3. Зеличенко, А.С. Разработки и исследования по ВЛ 1000 кВ и выше за рубежом: обзор. информ. /А.С. Зеличенко, Б.И. Смирнов //Центр науч.-техн. информ. по энерг. и электрификации. – М.: Информэнерго, 1986. – 48 с. (Энергетика и электрификация. Сер. 4. Электрические сети и системы. – Вып. 1).
4. Ловецкая, Е.М. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов /Е.М. Ловецкая, Д.С. Савваитов, В.А. Шкапцов //Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 48-51.

### **ДАТЧИК ПОТЕРИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ**

**А.Г. Баранов**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель В.В. Курганов

В настоящее время большое внимание уделяется разработке быстродействующего автоматического включения резервного питания (БАВР) высоковольтных электродвигателей как наиболее эффективного способа обеспечения устойчивости узла нагрузки. Одно из направлений в этих исследованиях – задача оперативного обнаружения потери питания (ПП).

Для эффективной работы датчика потери питания (ДПП) требуется выполнение ряда требований по быстродействию, селективности и точности устройства. Так, инерционность устройства в целом не должна превышать 40...60 мс. За это время необходимо отфильтровать исходный сигнал тока или напряжения, выделить его информационные параметры, произвести математическую обработку результата. Устройство должно эффективно работать в переходных режимах энергосистемы, при высоком уровне помех.

Для построения схемы датчика потери питания электродвигательной нагрузки можно использовать различные признаки аварийного режима: реле минимального напряжения, реле направления мощности, реле скорости снижения частоты и другие. Однако ни одно из этих устройств в отдельности не может оперативно и достоверно определить факт потери питания. Наиболее перспективной представляется схема ДПП, содержащая блок реле направления мощности (РНМ) и реле скорости снижения частоты (ССЧ), построенные на основе цифровых методов обработки сигналов. Необходимость применения цифровых методов обработки сигналов в ДПП вызвана невозможностью обеспечения селективности и быстродействия средствами аналоговой электроники. Прежде всего это связано с инерционностью аналоговых фильтров. Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой имеют меньшую инерционность по сравнению с аналоговыми при схожих частотных свойствах. Особый интерес для ДПП представляет дискретное преобразование Фурье (ДПФ), вычисляемое по формуле (1).