

УДК 621.38

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ГИБКИЕ ПРОВОДА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Баран А.Г., Васильева А.А., Журкевич В.В., Туманов П.С., Зарихта К.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

В результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) происходит сближение и даже схлестывание гибких проводов, сопровождаемые ударными нагрузками на элементы и опорные конструкции электроустановок энергосистем. При схлестывании токи КЗ ведут к пережогу проволок проводов, что может явиться причиной их обрыва. Более вероятное первичное КЗ на воздушных ЛЭП, устраняемое, как правило, во время бестоковой паузы АПВ, сопровождается вторичным КЗ на гибких шинах РУ высокого напряжения, вызванным их недопустимым сближением при колебаниях, обусловленных электродинамическими усилиями (ЭДУ) от токов первичного КЗ. Следующее за этим отключение системы шин РУ дифференциальной защитой ведет к тяжелым последствиям для энергосистемы в целом.

Под электродинамической стойкостью гибких проводов электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ в течение времени автоматического отключения цепи без повреждений. В соответствии с ГОСТ 30323-95 критериями электродинамической стойкости проводов являются их максимальные отклонения и тяжения при КЗ. Согласно ПУЭ проверку электродинамической стойкости проводов необходимо выполнять при токах КЗ 20 кА и более. Существующие токи КЗ значительно превышают это значение в сетях 110–330 кВ.

Еще более актуальной проблема электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода является для стран Западной Европы и Северной Америки, где уровни токов КЗ достигают 40–100 кА (40 кА – в Бельгии, 63 кА – во Франции, 100 кА – в Германии и Канаде). При указанных токах КЗ их электродинамическое действие – ключевой фактор, влияющий на размеры и прочность токоведущих конструкций с гибкими проводами, учет которого необходим при проектировании.

На рисунках 1 и 2 на примере одной из энергосистем Европы ( $P_{уст} \approx 14$  млн. кВт) можно проследить динамику роста токов КЗ за период с 1950 по 1992 годы [1].

Проследить за уровнями токов КЗ и закономерностями их формирования для энергосистемы Республики Беларусь не представляется возможным. По данным специалистов РУП «ОДУ» после введения в эксплуатацию БелАЭС уровни токов КЗ на шинах 110 и 330 кВ системообразующей подстанций «Северная 330» вырастет примерно на 5 кА, а на электростанциях г. Минска рост составит от 200 А до 1,5 кА (таблица 1). Поэтому проблема динамики проводов уже теперь становится актуальной для энергосистемы Беларуси.

В связи с реконструкциями уже действующих станций и, в перспективе, вводом новых генерирующих источников ожидается и дальнейший рост уровней токов КЗ.

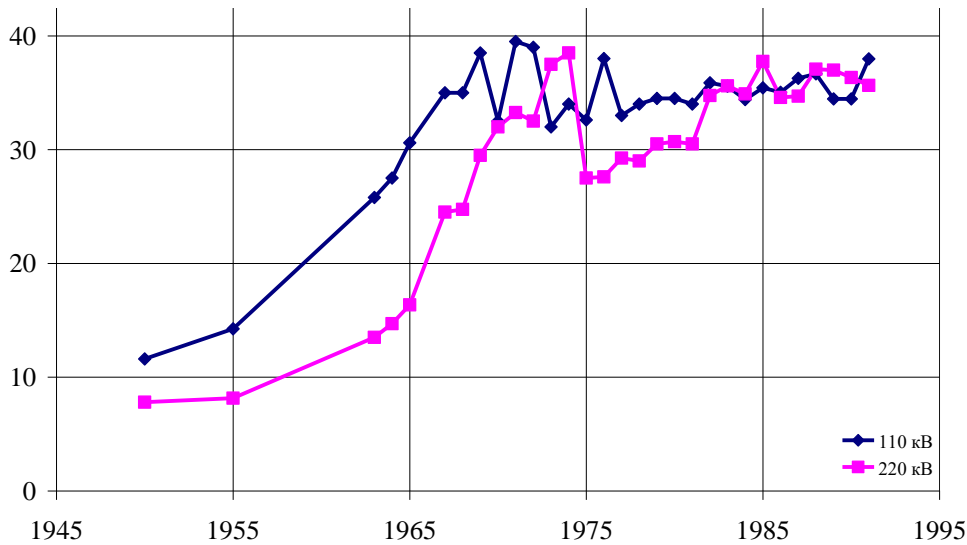


Рисунок 1 – Динамика изменения тока трехфазного КЗ

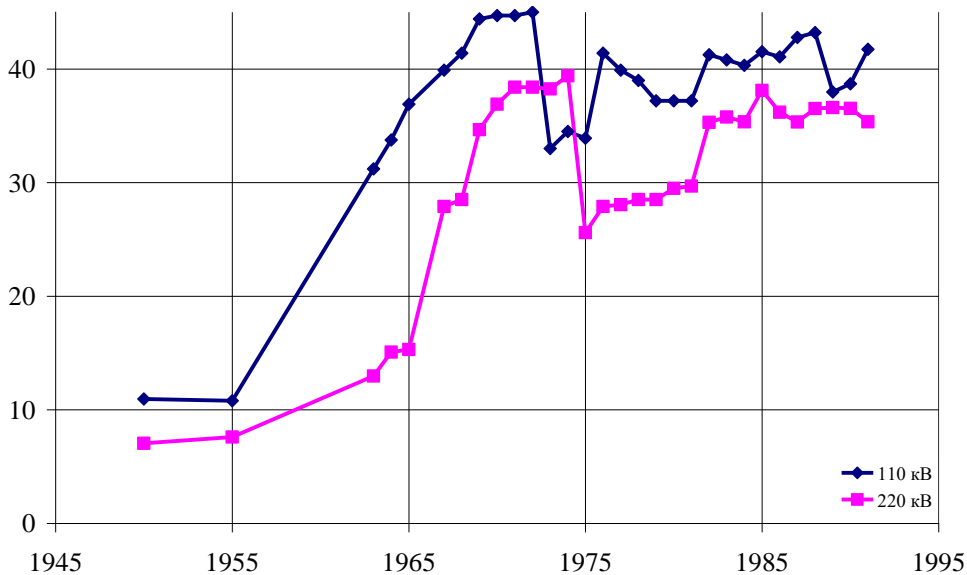


Рисунок 2 – Динамика изменения тока однофазного КЗ

Таблица 1 – Уровни токов трехфазного КЗ на шинах электростанции и подстанций, кА

Объект	До ввода АЭС		После ввода АЭС		Рост уровня тока КЗ	
	110 кВ	330 кВ	110 кВ	330 кВ	110 кВ	330 кВ
ПС Северная	22,556	19,581	26,801	24,207	4,245	4,626
ПС Восточная	17,831	17,565	18,090	18,449	0,259	0,884
ПС Колядичи	20,809	21,082	21,055	21,924	0,246	0,842
Минская ТЭЦ-2	22,162	–	22,345	–	0,183	–
Минская ТЭЦ-3	34,815	–	35,243	–	0,428	–
Минская ТЭЦ-4	40,571	25,346	41,346	26,855	0,775	1,509
Минская ТЭЦ-5	11,730	23,097	11,893	23,735	0,163	0,638

Для выбора габаритов и механических характеристик токоведущих конструкций нужно знать не только максимальные отклонения и тяжения

проводов, но и их изменение во времени при наиболее неблагоприятных условиях КЗ. Для определения динамических характеристик токоведущих конструкций с гибкими проводами необходимо теоретически исследовать движение упругой механической системы с бесконечно большим числом степеней свободы под воздействием распределенных ЭДУ. Нелинейные зависимости ЭДУ от мгновенного положения проводов усложняют решение этой задачи.

Актуальность и сложность проблемы электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода электроустановок привели к объединению усилий специалистов ряда стран под эгидой международных энергетических организаций СИГРЭ и МЭК.

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. Прежде всего, выделяются две стадии движения проводов: вынужденное – под воздействием ЭДУ и свободное – после отключения КЗ. Траектории вынужденного движения средних точек трехфазной системы горизонтально расположенных проводов напоминают траекторию движения маятника. Однако при увеличении тока КЗ из-за влияния упругих и температурных удлинений проводов, упругой податливости опорных конструкций, а также изменения формы проводов и гирлянд изоляторов траектории их движения приобретают более сложную форму.

Собственные частоты колебаний проводов реальных пролетов РУ не превышают нескольких Гц, поэтому основное влияние на характер их вынужденного движения при КЗ оказывают низкочастотные составляющие ЭДУ. В связи с этим при трехфазном КЗ под действием ЭДУ крайние фазы движутся от средней фазы наружу. Горизонтальное перемещение средней фазы весьма ограничено. Направление ее движения определяется фазой включения тока КЗ. Наибольшие отклонения характерны для крайних фаз, в составе ЭДУ которых содержатся значительные постоянные составляющие. При двухфазном КЗ между крайней и средней фазами они отклоняются в противоположные стороны. Наибольшие отклонения крайних фаз при двух- и трехфазном КЗ близки. В случае неуспешного АПВ в траектории движения провода появляется второй участок вынужденного движения. Характер движения провода после неуспешного АПВ зависит от продолжительности бестоковой паузы. Существенное влияние на характер вынужденного движения оказывают спуски к электрическим аппаратам и гирлянды изоляторов, ограничивающие отклонения проводов. В опыте вертикально присоединенные спуски в пролете длиной 36 м привели к уменьшению отклонения проводов примерно на 40 %.

Указанным выше разновидностям движения проводов при КЗ соответствуют характерные максимумы тяжения. В общем случае выделяются три сдвинутых во времени максимума тяжений в проводах при КЗ. Первый максимум  $T_{1\max}$  возникает только в РФ и обусловлен сильным внутрифазным взаимодействием. Он наступает уже через несколько периодов тока промышленной частоты и характеризуется большой величиной. Существенное влияние на величину этого максимума оказывают ударные явления при

схлестывании проводов фазы. В опытах максимум этого тяжения в 4–6 раз превышал тяжение РФ до КЗ. Величина  $T_{1\max}$  не зависит от продолжительности тока, исключая очень малые токи, так как он наступает раньше момента отключения КЗ. Поэтому  $T_{1\max}$  представляет серьезную опасность для конструктивных элементов РУ.

Второй максимум тяжения  $T_{2\max}$  наступает позже и обусловлен отклонением проводов под действием междуфазных ЭДУ. Этот максимум возникает в момент времени, близкий к наибольшему горизонтальному отклонению провода. Опытные зависимости  $T_{2\max}$  от токов КЗ в интервале 20–50 кА имеют вид показательных функций. Величина  $T_{2\max}$  может в несколько раз превышать тяжение провода в нормальном режиме. К примеру,  $T_{2\max}$  при токе 50 кА в пролете длиной 36 м в 5 раз превысил тяжение до КЗ, равное 5 кН. Упругая податливость порталов уменьшает величину тяжения при КЗ. Порталы в большей степени влияют на тяжение средней фазы с увеличением начальных тяжений проводов до КЗ растут и  $T_{2\max}$ .

Стадии свободного движения провода после отключения КЗ соответствует третий максимум тяжения  $T_{3\max}$ . Кинетическая энергия провода, его положение в пространстве в конце КЗ определяют путь, по которому провод возвращается в исходное состояние. Этот максимум наступает при возврате провода в положение равновесия в момент прохода наиболее низкой точки траектории. В идеальном случае наибольшее тяжение свободного падения может быть достигнуто в том случае, если вся запасенная в процессе вынужденного движения механическая энергия преобразуется при вертикальном падении провода в энергию упругой деформации. В зависимости от геометрических размеров пролета  $T_{3\max}$  может быть больше или меньше  $T_{2\max}$ .

Указанные сведения об электродинамическом воздействии токов КЗ на гибкие провода и влиянии различных факторов и конструктивных элементов токоведущих конструкций, полученные с помощью опытов, не являются исчерпывающими. Однако они дают ясное представление о динамике гибких проводов при КЗ и показывают всю сложность этой проблемы.

#### Литература

1. Система повышения надежности и живучести ЕЭС России / А.Ф. Дьяков, В.В. Жуков, В.Б. Козлов и др.: Под ред. А.Ф. Дьяков. – М. : Издательство МЭИ, 1996.