

# ПЕРЕМЕЖАЮЩАЯСЯ ДУГА КАК ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Иманакунова Ж.С.

Кыргызский технический университет им. И. Разакова,  
Кыргызская республика, E-mail:rector@ktu.aknet.kg

Сравнительно недавно, в последней четверти XX века во всех областях нелинейной динамики были обнаружены новые явления, главное из которых – динамический (детерминированный) хаос [1]. Разрабатываемые на основе этого понятия теории, открывают новые возможности в различных областях знаний, в том числе в электротехнике, электроэнергетике и информационных и коммуникационных технологиях.

Хаотические колебания – это возникновение неупорядоченных движений в совершенно детерминированных системах. Такие движения и раньше обнаруживались в механике жидкостей, но недавно их заметили в несложных механических и электрических системах и даже в простых задачах с одной степенью свободы. Вместе с этими открытиями пришло понимание того, что нелинейные разностные и дифференциальные уравнения могут иметь ограниченные непериодические решения, которые ведут себя случайным образом, хотя в этих уравнениях нет случайных параметров [3].

Исследования хаотических колебаний приносят с собой новые идеи, кроме того, они важны для инженерных исследований еще по нескольким причинам. Во-первых, хаос или шум в электрических и механических системах затрудняет предсказание времени работоспособности и анализ старения материала, поскольку оказывается неизвестной точная зависимость напряжений в твердых материалах от времени. Во-вторых, осознав, что простые нелинейности способны привести к хаотическим режимам, мы сталкиваемся с вопросами о предсказуемости. В рассматриваемой теории было убедительно показано, что даже для довольно простых детерминированных систем (в которых будущее однозначно определяется настоящим) существует *горизонт прогноза* [1]. Заглянуть за этот горизонт в общем случае нельзя, какую бы мощную вычислительную технику и какие бы эффективные алгоритмы исследователи не использовали. Это объясняется тем, что в нелинейных задачах с хаотической динамикой поведение системы чувствительно к начальным условиям, и точный расчет будущего поведения может оказаться невозможным даже в случае периодического движения. Поэтому, по нашему мнению, практически невозможно точно предсказать поведение перемежающейся дуги (ПД), которая возникает при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью и сопровождаются колебательными перезарядками емкостей сети и **перенапряжениями**. По данному вопросу существует две крайние гипотезы поведения дуги [2]. **По гипотезе Петерсена** дуга успевает погаснуть при первом проходе через нуль полного тока (с учетом высокочастотных колебаний). **По гипотезе Петерса и Слепяна** дуговой промежуток не успевает сколько-нибудь существенно восстановить свою электрическую прочность при быстром проходе через нуль высокочастотных колебаний. По этой гипотезе дуговой промежуток успевает восстановить свою электрическую прочность после затухания высокочастотных колебаний, когда медленно проходит через нуль сравнительно небольшой ток промышленной частоты, определяющийся емкостью сети.

Однако в большинстве случаев в реальных сетях дуга не следует ни той, ни другой гипотезе [2]. Поэтому решение проблемы моделирования ПД с привлечением, более совершенных методов исследования, которые бы способствовали решению задачи прогноза и величин перенапряжений в реальных сетях является **весьма актуальным**.

Для успешного решения поставленной задачи, необходимо сочетание компьютерного (математического) моделирования процессов при дуговых замыканиях в исследуемой сети

и проведение эксперимента на физических моделях для уточнения некоторых параметров модели.

В данной работе предлагается уточненный алгоритм поведения электрической дуги при однофазном замыкании в сетях с изолированной нейтралью, а также физическая модель установки для его исследования.

Предположим, что однофазное замыкание произошло в фазе  $C$ , в результате образовалось ряд связанных колебательных контуров, из них выделим три контура  $K_1, K_2$  и  $K_3$  (рис.1).

Сопротивление и индуктивность электрической дуги нелинейны, и их значения могут меняться случайным образом.

При таком подходе задача сводится к проблеме устойчивости нелинейных колебаний связанных контуров и поведение электрической дуги можно проанализировать путем совместного рассмотрения переменных состояния связанных контуров особенно  $K_1, K_2$  и  $K_3$ , так как вследствие электрической связи они могут обмениваться энергией. По-видимому, от баланса этих энергий и зависит устойчивость горения электрической дуги.

Для исследования эволюции, рассматриваемой системы, необходимо составить систему дифференциальных уравнений, описывающих колебательные процессы, с учетом нелинейности и стохастичности параметров электрической дуги  $R_D$  и  $X_D$ .

Уравнения электромагнитных колебаний в контурах получаются из уравнений Лагранжа [4]. Общий подход к исследованию поведения рассматриваемой системы с использованием системы дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_i}{dt} &= f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_N; \mu); \\ i &\in (1, \dots, N), \end{aligned} \right\}$$

полученных на основе схемы замещения (рис.1), заключается в следующем: необходимо исследовать систему в окрестностях особых точек, в частности, неустойчивого состояния колебательного процесса в контурах  $K_1, K_2$  и  $K_3$ .

Система эволюционирует в  $N$ -мерном пространстве состояний переменных  $Q_1, \dots, Q_N$ . В каждой точке траектории, заданной выбором конкретных начальных условий  $Q_1(0) = Q_{10}, \dots, Q_N(0) = Q_{N0}$ , наклон определяется величиной

$$\frac{dQ_{i+1}}{dQ_i} = \frac{f_{i+1}}{f_i}.$$

Особые точки (стационарные состояния) на траектории – это точки, в которых система нелинейных алгебраических уравнений

$$f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_N; \mu) = 0,$$

имеет вещественное решение.

С другой стороны, замкнутые траектории, соответствующие периодическому режиму, имеют основной период, определяемый по формуле

$$T = \int \frac{dQ_1}{f_1(Q_1, \dots, Q_N; \mu)}.$$

При превышении одним из управляющих параметров некоторого критического значения система может изменить свое состояние.

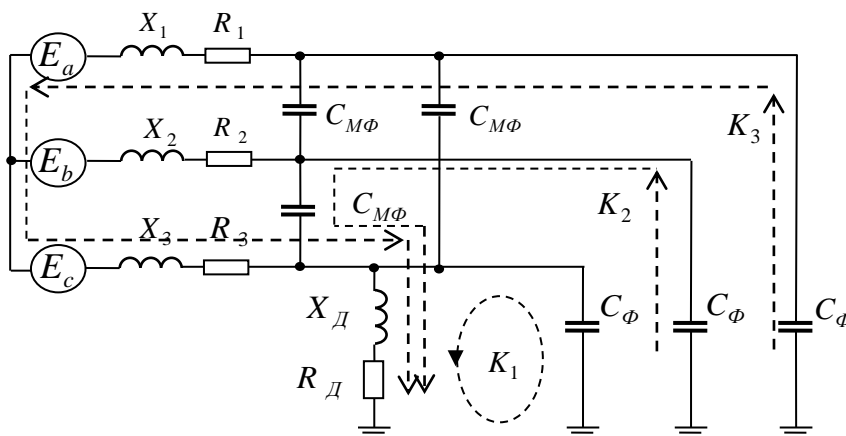


Рис.1. Схема для анализа дуговых перенапряжений

Чтобы определить, в какое из состояний она перейдет, необходимо снова решить систему взаимосвязанных алгебраических уравнений

$$f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_N; \mu) = 0,$$

и тем самым найти новую систему действительных решений (новый набор стационарных состояний), так как параметры  $\mu$  изменились. В новый набор входит стационарное состояние, бывшее прежде устойчивым, а теперь ставшее неустойчивым, но остальные - новые. Вследствие изменения состояния данной системы возможны следующие ситуации: "стартавав" из стационарного состояния, система равновероятно "приземлится" в любом из состояний нового набора, делая невозможным любое предсказание ее поведения. Для того, чтобы разобраться, как ведет себя система, необходимо рассмотреть более подробно "картографию" пространства состояний в окрестности каждого нового состояния.

В результате проведенного расследования может оказаться, что одни состояния имеют большую вероятность "заполучить" систему после того, как, будучи выведенной, из прежнего состояния, она вынуждена "приземлиться" в каком-то новом состоянии. Короче говоря, необходимо исследовать "линии тока" в окрестности всех имеющихся стационарных состояний в пространстве состояний в надежде, что это позволит оценить вероятность следующего предсказания.

Для реализации этого плана необходимы дополнительные исследования для установления математической модели электрической дуги [4].

Обычно дуговой промежуток в схемах замещения представляется в виде идеального ключа, который замыкается при достижении напряжением значения, равного пробивному, а размыкается при прохождении тока через нуль. Такое представление дугового промежутка вызывает принудительную коммутацию электрической сети и следовательно переходной процесс в нем протекает по иному, не характерной рассматриваемой нелинейной системе, к тому же величина пробивного напряжения дугового промежутка подвержено случайному разбросу и влиянию эффекта полярности (на переменном напряжении при сильнонеравномерном полях, пробой происходит всегда на положительной полярности электрода напряженность электрического поля вблизи которого намного больше чем у другого электрода) [5].

Электрическая дуга в промежутке и соответствующая электрическая сеть представляет собой единый «организм» и его поведение должно подчиняться внутреннему закону поведения нелинейной системы, точно предсказать поведение, которого, как сказано выше, невозможно, так как перемежающейся дуга ведет себе хаотично.

Представление дугового промежутка в схемах замещения в виде диода [6] учитывает нелинейность электрической дуги и эффект полярности.

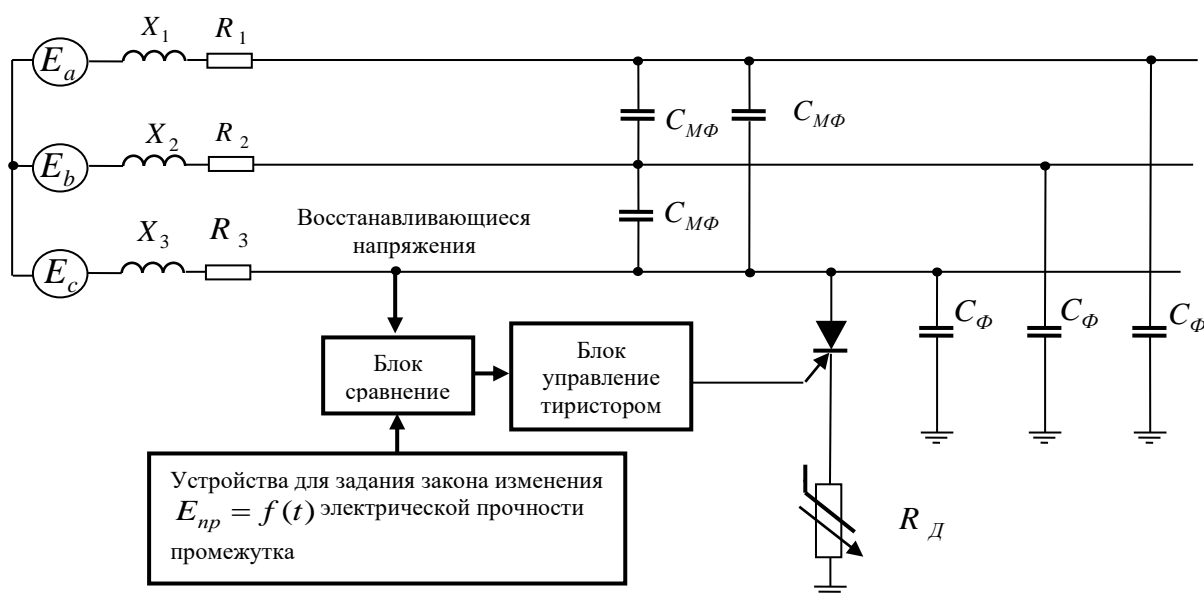


Рис.2. Физическая модель установки

В данной работе предложено физическая модель установки (рис.2), где дуговой промежуток представлен в виде управляемого нелинейного элемента, например тиристора. Такое представление позволяет учитывать все особенности поведения перемежающейся дуги и более точно исследовать переходной процесс в сети с изолированной нейтралью, приводящий к перенапряжениям в системе

### Литература

1. Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие. – М.: Наука, 2002. – 478 с. ил.
2. Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г. и др. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.: ил.
3. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 312 с., ил.
4. Апышев Д.А., Асанов М.С., Сатаркулов К.А., Узагалиев З.А. Аналитический метод исследования дуговых перенапряжений от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. // Токи короткого замыкания в энергосистемах. Всероссийская научная конференция: Тезисы докладов /под общей ред.. А.Ф.Дякова. М.: РАО «ЕЭС России», 1995-176 с.
5. Важов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин С.А. Техника высоких напряжений: курс лекций. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.
6. Сатаркулов К.А., Исакеева Э.Б. Гипотеза о природе возникновения перемежающегося дугового замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. // Проблемы автоматизации и управления: Докл. II междунар. конференции – Бишкек: 2007.