

О ПРОБЛЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ 0,4 ÷ 35 КВ

В.Г. Гольдштейн, П.В. Копырюлин, О.М. Севостьянова

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Разработан подход к построению уточненной математической модели электромагнитной передачи в элементах систем электроснабжения электромагнитных помех в виде импульсных грозовых и квазистационарных перенапряжений.

Ключевые слова: электромагнитные эксплуатационные физические воздействия, электромагнитная совместимость, импульсные грозовые и квазистационарные перенапряжения.

Для повышения энергоэффективности и энергосбережения как кардинального направления развития электроэнергетики необходима разработка эффективных средств, мероприятий и рекомендаций, позволяющих на основе обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) повысить надежность электротехнических комплексов (ЭТК) систем электроснабжения и электрических сетей (СЭЭС) 0,4 ÷ 35 кВ.

Важное место при решении названных проблем, характерных для современной электроэнергетики в целом, занимает обеспечение ЭМС силовых трансформаторов и электродвигателей (СТ и ЭД) с учетом физики внутренних процессов в этих элементах ЭТК при различных видах электромагнитных эксплуатационных физических воздействий (ЭФВ). Необходимо отметить, что при этом значительную роль играет отраслевая специфика ЭТК. Поэтому реализацию этой задачи, позволяющей обеспечить нормальную работу электроустановок, в частности при их значительном износе, будем рассматривать для нефтяной промышленности.

Физические особенности квазистационарных и переходных процессов в СТ и ЭД при внешних (грозовых) и внутренних воздействиях определяются *различными формами переходов электромагнитной энергии ЭФВ внутри, вне и через СТ и ЭД* [1, 2].

Обратим внимание на то, что большинство известных исследований, подробно проанализированных в [1, 2], ограничиваются только определением перенапряжений непосредственно на электроустановках при приходе на них ЭФВ, причем чаще всего только со стороны сети более высокого напряжения. Однако доля энергии ЭФВ, переходящей через СТ и другие электроустановки, весьма значительна, что в ряде случаев приводит к перенапряжениям, опасным особенно для электрооборудования с большими сроками эксплуатации.

Классифицируем передачу электромагнитных ЭФВ в виде перенапряжений через электроустановки СЭЭС 6 ÷ 35 кВ нефтедобычи по позициям 1 ÷ 5 (рис. 1).

1. ЭФВ инициируется в ЛЭП 1 – линейной части ступени 1 (ВН), приходит на СТ и, переходя на ступень 2 (НН), воздействует на изоляцию обмоток и нейтраль

Валерий Геннадьевич Гольдштейн (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Петр Владимирович Копырюлин, ассистент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Ольга Михайловна Севостьянова (к.п.н.), доцент кафедры «Инженерная графика».

СТ, все электроустановки НН, в том числе и на линии НН – ЛЭП 2.

2. То же, что поз. 1, но на ступени 2 находится электрическая машина ЭД. Обмотка НН выполняется на напряжения стандартные (0,4, 6, 10 кВ) и нестандартные ($U_{раб} = 0,5 \div 3$ кВ) для питания погружных электродвигателей (ПЭД) нефтедобычи. В последнем случае используются трехобмоточные СТ с напряжениями сторон $U_{ВН}/U_{раб}/U_{НН}$, где $U_{ВН} = 35, 10, 6, U_{НН} = 10, 6, 0,4$ кВ соответственно.

3. ЭФВ с ЛЭП 1 или 2 (10, 6, 0,4 кВ) приходит непосредственно на ЭД.

4. ЭФВ с ЛЭП 10, 6, 0,4 кВ приходит на сторону НН СТ.

5. ЭФВ приходит сторону 10, 6 кВ двухтрансформаторной (6÷10/0,4 кВ и 0,4/ $U_{раб}$) схемы питания ПЭД нефтедобычи.

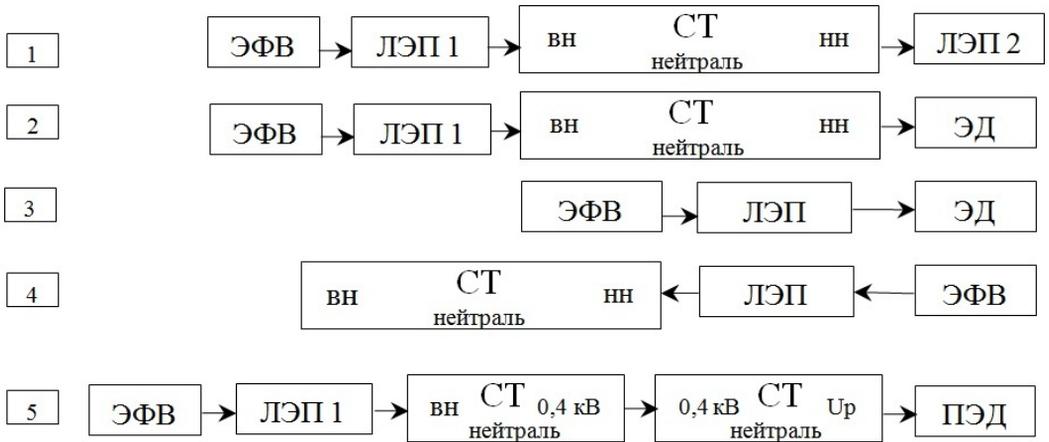


Рис. 1. Условные схемы передачи электромагнитных ЭФВ в СЭЭС 6 ÷ 35 кВ

В данных вариантах предполагается, что ЭФВ – это внешние (грозовые) или внутренние (феррорезонансные и др.) перенапряжения, то есть источниками ЭФВ могут быть энергия атмосферных процессов, а также внутренняя электромагнитная, электромеханическая и др. энергия элементов СЭЭС.

Кроме того, на ВН и НН сторонах СТ, а также ЭД могут быть установлены защитные аппараты (ЗА) – нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и вентильные разрядники (РВ). Здесь и далее рассматриваются только наиболее распространенные в СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ двухобмоточные трансформаторы (рис. 1, поз. 1, 2, 4, 5), так как процесс анализа передачи электромагнитных ЭФВ для других видов СТ во многом аналогичен.

В частности, это справедливо для СТ, питающих, например, в нефтяной отрасли ЭД буровых станков, компрессорных, перекачивающих и насосных станций, станков-качалок и специфических ПЭД (рис. 1, поз. 2 и 5). Последние выполняются и работают на нестандартных напряжениях $U_{раб} = 0,5 \div 3$ кВ, поэтому в зависимости от выбранной схемы электроснабжения СТ в двух- или трехобмоточном исполнении должны иметь обмотку с напряжением $U_{раб}$. При этом используются, например, схемы питания с двойной трансформацией 6 (10)/0,4 кВ и 0,4/ $U_{раб}$ и, соответственно, со специфической двойной передачей ЭФВ (рис. 1, поз. 5).

Проблема обеспечения ЭМС при передаче электромагнитной энергии разнообразных ЭФВ весьма остро стоит в СЭЭС 6 ÷ 35 кВ, элементы которых имеют тесные взаимные электрические и магнитные связи. Их распределительная часть выполнена воздушными и кабельными линиями (ВЛ и КЛ) электропередачи, имеющими значи-

тельную протяженность. В них возникают и по ним приходят к электроустановкам электроснабжения самые разнообразные ЭФВ. Значительная часть из них – перенапряжения – являются причиной высокой грозовой аварийности СТ, ЭД, других вращающихся электрических машин и иных электроустановок, связанных электрически или магнитно (через СТ) с воздушными сетями.

Это происходит несмотря на то, что на стороне ВН устанавливаются защитные средства, то есть даже при этом перенапряжения, возникающие на стороне ВН и переходящие через обмотку НН, в частности на ЭД, весьма значительны. Отметим, что в ряде случаев этому в немалой степени способствует наличие до сих пор в эксплуатации устройств защиты от перенапряжений, некорректно выбранных, устаревших морально и физически, а иногда все еще имеет место их полное отсутствие.

Например, на одном из предприятий ОАО «Самаранефтегаз» в процессе эксплуатации в 2007 – 2011 гг. имели место грозовые повреждения 18 из 170 (в среднем) ЭД, работавших непосредственно от воздушной сети (рис. 1, поз. 3). В результате этих аварий недоиспользовано более 65000 кВт·ч электроэнергии, недобор нефти составил 12400 т при стоимости ремонтно-восстановительных работ на 1 ЭД в среднем ~ 2200 долл. США.

Практика эксплуатации СТ 6 ÷ 10/0,4 кВ, связанных с ВЛ (рис. 1, поз. 1), также говорит о значительной повреждаемости вследствие воздействия атмосферных перенапряжений, особенно в безлесных сельских районах и в городских с одноэтажной застройкой. По данным ОАО «Самаранефтегаз», самарских, жигулевских, чапаевских, самарских городских электрических сетей повреждаемость СТ за грозовой сезон в названных районах достигает 5 % от общего числа установленных.

Другой причиной грозовой повреждаемости СТ 6 ÷ 10/0,4 кВ, которой в настоящее время необоснованно практически не уделяется внимания, является переход импульсных волн, приходящих по линиям НН, через обмотки СТ на сторону ВН (рис. 1, поз. 4). Кстати говоря, эта тенденция характерна и для сетей более высоких классов напряжения.

Прямые поражения ВЛ НН маловероятны, поскольку, как правило, их провода подвешены невысоко и часто экранированы строениями, деревьями и т. д. При этом амплитуда перенапряжений при отсутствии специальных мер для их ограничения может достигать 1,5 МВ.

В основном же внешние перенапряжения на ВЛ НН – индуктированные с амплитудой 10 ÷ 60 кВ при вероятности появления в среднем 1 раз в год на 1 км длины ВЛ, имеющих импульсную прочность изоляции около 5 кВ. В среднем это дает несколько десятков перекрытий изоляции в год на 1 км ВЛ [1].

Распространяясь по фазным проводам, они охватывают большую часть данной сети, что подтверждается случаями одновременного отключения нескольких СТ 6 ÷ 10/0,4 кВ. Практически при каждом разряде молнии на СТ сети будут воздействовать импульсные волны, опасность которых определяется их максимальными значениями, крутизной фронта и длительностью, а также одновременным приходом по нескольким ВЛ и др.

После перехода с обмотки НН в обмотку ВН импульсная волна в ряде случаев приводит к пробое изоляции обмотки и электроустановок на стороне ВН, также несмотря на наличие защитных устройств. Это говорит о необходимости уточнения анализа переходных процессов и обоснования мероприятий по защите СТ 6 ÷ 10/0,4 кВ при приходе волн перенапряжений с обеих его сторон.

С общих позиций теории электрических и магнитных явлений, представленной в классических работах Г.А. Гринберга [3], имеет место электромагнитная передача

энергии ЭФВ в виде импульсных и квазистационарных перенапряжений через СТ в переходных процессах, вызванных перераспределением электромагнитной энергии, накопленной внутри СЭЭС составляющими элементами, и пришедшей извне, чаще всего атмосферного электричества. Физика этой передачи в прикладной электротехнике изучена недостаточно. Ее определяют переходные процессы в электрически и магнитно связанных контурах с распределенными параметрами и емкостными и магнитными связями между обмотками.

Как и в большом числе моделей ферромагнитных электротехнических устройств и установок, она может быть условно разделена по физической природе на электрическую и магнитную составляющие, а именно:

- электрическая (емкостная) передача (ЭЭП), происходящая за счет емкостных связей между обмотками;
- колебательная (магнитная) передача (КМП), которая происходит за счет собственных колебаний в СТ и определяется взаимной индукцией между обмотками;
- квазистационарная (магнитная) передача (КСП), обусловленная сквозным нарастающим током.

Общий электромагнитный процесс передачи энергии ЭФВ в СЭЭС, в котором взаимосвязаны и объединены все ее виды, не имеет в настоящее время удовлетворительного универсального решения. Более того, его реализация в виде математических моделей весьма сложна даже с учетом все возрастающих возможностей вычислительной и экспериментальной техники. Поэтому был принят ряд упрощений и допущений, позволивших реализовать концепцию отдельного исследования названных видов передачи. Возможность такого подхода обоснована оценкой эксплуатационных условий в СЭЭС 6 ÷ 35 кВ (схемами соединений трехфазных электроустановок, состоянием нейтралей и др.), а также погрешностей моделирования, уровень которых не превосходит погрешностей задания параметров сети.

Кроме того, корректность этого подхода подтверждается данными эксплуатации и результатами сопоставления результатов приближенного моделирования с данными натурных экспериментов, выполненных при пониженных напряжениях зарубежными и отечественными исследователями.

В большинстве случаев для анализа процессов электромагнитной передачи в СЭЭС 6 ÷ 35 кВ в целом и, в частности, в СТ используется общепринятый метод моделирования с помощью схем замещения с сосредоточенными (рис. 2) параметрами (СЗСП).

В процессе анализа было сделано общепринятое допущение о пофазной симметрии и, соответственно, об использовании однофазных схем замещения с частичным учетом междофазных пассивных параметров в эквивалентных фазных. Исключение здесь было сделано при анализе неполнофазных режимов, где были приняты необходимые изменения.

В схемах на рис. 2 использованы обозначения: C , K_1 , K_2 , C_1 , C_2 , L_1 , L_2 и M – емкости соответственно междуобмоточная, продольные относительно земли, а также индуктивности рассеяния первичной, вторичной обмоток и взаимная между витками, расположенными в одной плоскости, – все на единицу длины обмотки; отнесенная на единицу длины; $L_{1g}(L_{s1})$, $L_{2g}(L_{s1})$ и $M_g(L_\mu)$ – собственные и взаимная индуктивности катушек, связанных общим магнитным потоком через сердечник; r_2 – активное сопротивление вторичной цепи. В схемах на рис. 2, ϵ параметр C_2 учитывает емкость нагрузки. Ниже приводится краткая характеристика эквивалентных СЗСП, представленных на рис. 2.

Емкостная СЗСП, приведенная на рис. 2, a , построена для электростатической

передачи импульсных грозовых ЭФВ. Она позволяет, как и все СЗСП, определять перенапряжения только в характерных точках СТ, как выводы обмоток и нейтрали. Это используется далее при анализе соответствующих процессов ЭЕП при приходе ЭФВ со стороны как ВН, так и НН. Но по определению в некоторых случаях эта схема не может быть использована при анализе феррорезонансных и градиентных перенапряжений.

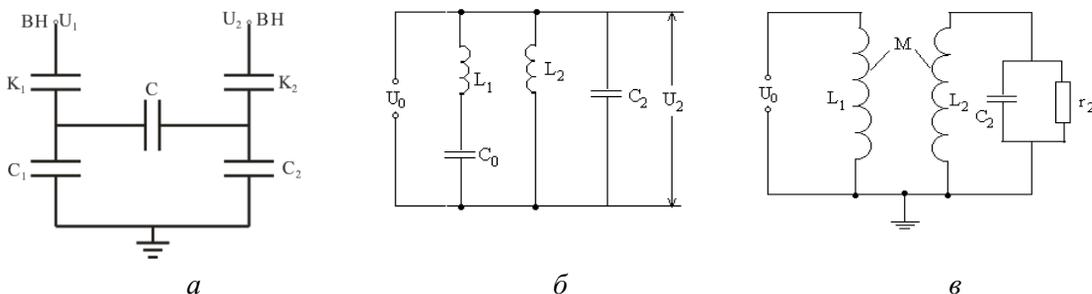


Рис. 2. Приближенные эквивалентные схемы замещения СТ с сосредоточенными параметрами для расчета различных видов передачи:
 а – ЭЕП («С»-схема); б – КМП («||»-схема); в – КСП («М»-схема)

СЗСП на рис. 2, б построена по основным физическим закономерностям электротехники для колебательных процессов *КМП* в СТ при внутренних и прежде всего феррорезонансных перенапряжениях, возникающих при неполнофазных режимах, особенно тех, которые связаны с неодновременностью работы коммутационных аппаратов – высоковольтных выключателей.

Взаимоиндуктивная «М»-схема, представленная на рис. 2, в, предназначена для приближенного описания в специфических задачах, связанных с феррорезонансными процессами *КСП* с трансформаторами напряжения, когда по этим маломощным измерительным устройствам протекают значительные токи, приводящие к их разрушению и авариям с серьезными последствиями.

В работе для решения этих задач рассматривается также упрощенная «Т»-образная схема (с электрическими связями). Обе схемы равноценны и дают практически одинаковые результаты. «М»-схема в большей степени отвечает физике процессов, у «Т»-схемы есть некоторое преимущество в простоте решений.

По этим схемам построены математические модели передачи перенапряжений: с одной обмотки СТ на другую и в его нейтраль включительно; через один и два (нестандартных) СТ на ЭД; при развитии феррорезонансных процессов; при возбуждении градиентных перенапряжений на обмотках СТ и др. Это позволяет при анализе обеспечения ЭМС электроустановок СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ оценить опасность и дать рекомендации по применению современных средств и мероприятий по защите от перенапряжений.

В эквивалентных СЗСП, представленных на рис. 2, в силу допущений, принятых при их построении, нет возможностей для анализа процессов внутри СТ. При этом в квазистационарных процессах чаще всего с существенными ограничениями возможны лишь приближенные решения для основной гармоники колебаний, что в значительной мере ограничивает области их использования, особенно в задачах, часто встречающихся при обеспечении ЭМС по направлениям, приведенным на рис. 1.

Магнитная квазистационарная передача перенапряжений имеет место при приложении импульсного напряжения, когда по обмотке начинает протекать сквозной ток, который для случая приложения постоянного напряжения и пренебрежения активными сопротивлениями определяется в виде $i = U_0 \cdot t / L$, где U_0 – величина приложенного напряжения; L – индуктивность обмотки; t – время.

Таким образом, сквозной ток нарастает пропорционально времени и одинаков во всех точках обмотки. Этот ток получил название квазистационарного, и ему соответствует определенная нарастающая индукция B в магнитопроводе и определенная ЭДС e_2 во вторичной обмотке. При принятых условиях она будет постоянной по величине.

Квазистационарная передача является одним из определяющих процессов при феррорезонансных явлениях. Ее анализ при заземленной нейтрали обмотки НН говорит о возбуждении собственных колебаний в контуре «индуктивность рассеяния – емкость первичной обмотки», которые интегрально могут быть представлены СЗСП (рис. 2, в).

Однако сам процесс возникновения этих колебаний, его развитие и распространение, приводящие к большим токам, особенно опасным для измерительных трансформаторов напряжения, могут быть отражены лишь в СЗРП (рис. 3, в). При этом должны быть учтены коэффициент связи между обмотками $\mu = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2}$, коэффициент полного рассеяния $\sigma = 1 - \mu^2 = 1 - M^2 / (L_1 \cdot L_2)$.

С учетом приведенных данных об аварийности в СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ, недостаточной проработки данного вопроса как в известных исследованиях, так и в директивных документах возникает необходимость физического обоснования математических моделей названных процессов электромагнитной передачи, приемлемых для практического использования.

Обратим внимание, что отдельное исследование каждого вида передачи, с одной стороны, можно использовать, поскольку в каждом конкретном случае с приближенной оценкой погрешностей определяющим является один, реже два из них. С другой стороны, на базе результатов моделирования и эксплуатационных соображений можно произвести их сопоставление и прогноз оценки их влияния в общем случае.

Математическая модель электростатической емкостной передачи перенапряжения строится на основе эквивалентной схемы (рис. 2, а). Эту модель можно практически одинаково использовать при приходе волн перенапряжений прямоугольной, косоугольной, аperiodической и другой формы с любой из сторон СТ (с соответствующим изменением индексов у параметров схемы и режима). В частности, для прямоугольного импульса с амплитудой U_0 , определяющего *граничные и начальные условия на входе первичной обмотки СТ*, можно написать следующие уравнения:

$$\frac{d^2 U_1}{dx^2} + C_{p1} \frac{U_1}{K_1} + \frac{C}{K_1} U_2 = 0; \quad \frac{d^2 U_2}{dx^2} + C_{p2} \frac{U_2}{K_2} + \frac{C}{K_2} U_1 = 0,$$

где $C_{p1} = C + C_1$; $C_{p2} = C + C_2$. Эти уравнения для удобства дальнейшего решения можно преобразовать к одному дифференциальному уравнению 4-го порядка:

$$\frac{d^4 U_2}{dx^4} = \frac{d^2 U_2}{dx^2} \left(\frac{C_{p1}}{K_1} + U_1 \right) + U_2 \cdot (C_{p1} C_{p2} - C^2) / (K_1 \cdot K_2) = 0.$$

Решая это уравнение, после преобразований и упрощений получим приближенное выражение $U_2(0) = C \cdot U_0 / \left[C_{p2} + \sqrt{(C_1 \cdot C_{p2} + C \cdot C_{p2}) \cdot K_1 / K_2} \right]$ для напряжения на выводе вторичной обмотки. Отметим, что аналогичный вид будет иметь выражение для напряжения на выводе первичной обмотки $U_1(0)$ при приходе волны U_0 на вторичную обмотку. При реальных значениях C, C_1, C_2, K_1, K_2 и $U_0 \sim 100 \div 150$ кВ для наиболее распространенных СТ в СЭС $6 \div 10$ кВ в тех случаях, когда к вторичной обмотке непосредственно подключены ЭД (в схеме замещения их также можно представить емкостями), и с учетом колебаний, возникающих во вторичной обмотке, амплитуды перенапряжений на выводе обмотки НН по данным компьютерных экспериментов составляют $U_2(0) / U_0 \sim 0,2 \div 0,4$ или $20 \div 60$ кВ, то есть не превышают амплитуду падающей волны U_0 , но будут опасными для изоляции ЭД.

На обмотку НН также могут быть подключены сопротивления. Их широкий диапазон определяется снизу относительно небольшими значениями, соответствующими недвижимой нагрузке, далее включенными параллельно волновыми сопротивлениями отходящих ЛЭП и в пределе разомкнутым состоянием в режиме холостого хода. Последний случай наиболее опасен по очевидным физическим соображениям. В целом можно констатировать существенно меньшую опасность этих вариантов состояния вторичной обмотки по сравнению с емкостным случаем.

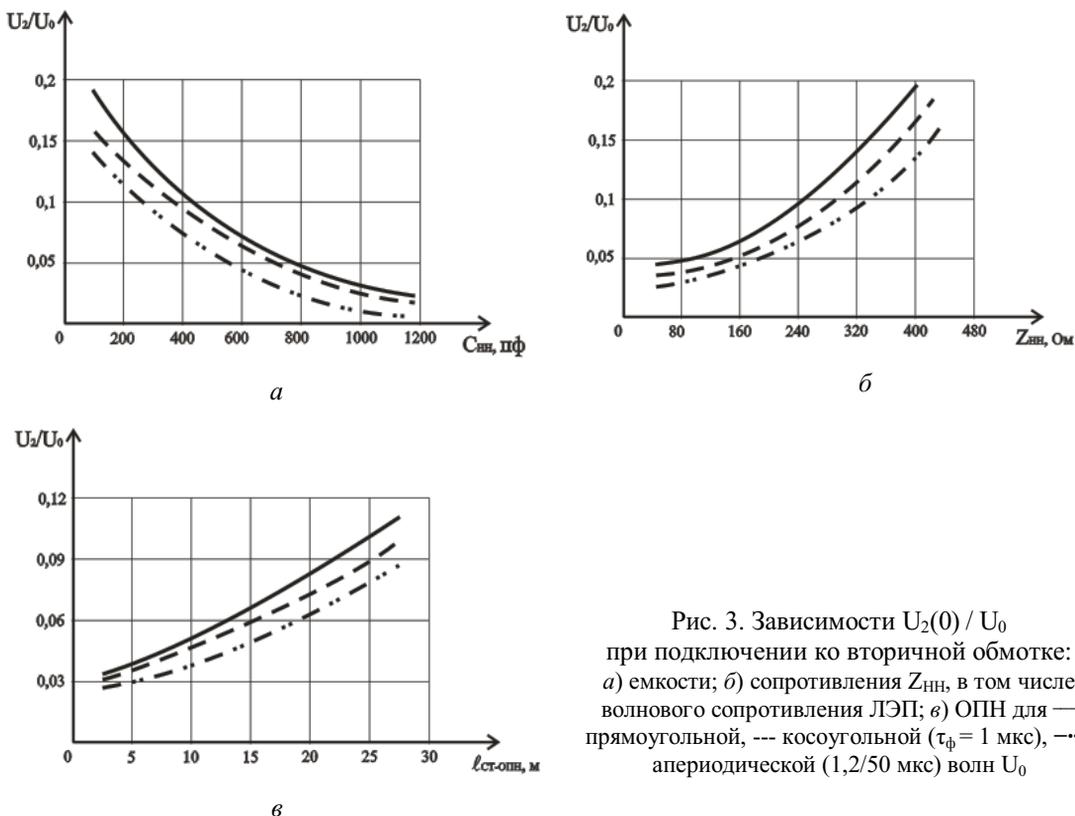


Рис. 3. Зависимости $U_2(0) / U_0$ при подключении ко вторичной обмотке: а) емкости; б) сопротивления $Z_{нв}$, в том числе волнового сопротивления ЛЭП; е) ОПН для — прямоугольной, --- косоугольной ($\tau_{\phi} = 1$ мкс), -·-·- аperiodической (1,2/50 мкс) волн U_0

Поэтому существует необходимость включения защитного аппарата (ОПН) на стороне НН через ошиновку длиной $\ell_{СТ-ЗА} \sim 5 \div 30$ м. Это равносильно включению весьма малого сопротивления, соответствующего рабочему участку ВАХ ОПН, что полностью предотвращает опасные перенапряжения (рис. 3, б в области малых значений $Z_{НН}$). Таким образом, включение сопротивления $Z_{НН}$ и ЗА резко уменьшает величину напряжения U_2 .

Уровни перенапряжений при приходе волн прямоугольной, косоугольной с фронтом 1 мкс и апериодической формы (импульсной испытательной волны 1,2/50 мкс) на трансформатор ТМ 630/10/0,4 показаны на рис. 3. Характерна тенденция снижения уровней перенапряжений в данной последовательности типов волн.

Аналогичные решения представленных выше уравнений можно записать и для импульса U_0 на вход обмотки НН. Амплитуды перенапряжений на выводе обмотки ВН также не превысят амплитуду волны $U_0 \sim 50 \div 60$ кВ, падающей на вход обмотки НН, но принципиально могут оказаться опасными теперь уже для изоляции для электроустановок на стороне ВН и самой обмотки, то есть $U_2(0) / U_0 \sim 0,4 \div 0,6$ или $20 \div 35$ кВ по очевидным физическим соображениям.

На рис. 4 показаны результаты расчетов, выполненных для этого случая аналогично рис. 3. Условия компьютерного эксперимента отличаются от предыдущего случая большими значениями эквивалентных емкостей, волновых сопротивлений и геометрическими расстояниями, характерными для стороны ВН по сравнению с НН. Отметим также, что включение ОПН полностью решает проблему подавления перенапряжений при прямой и обратной передаче через СТ.

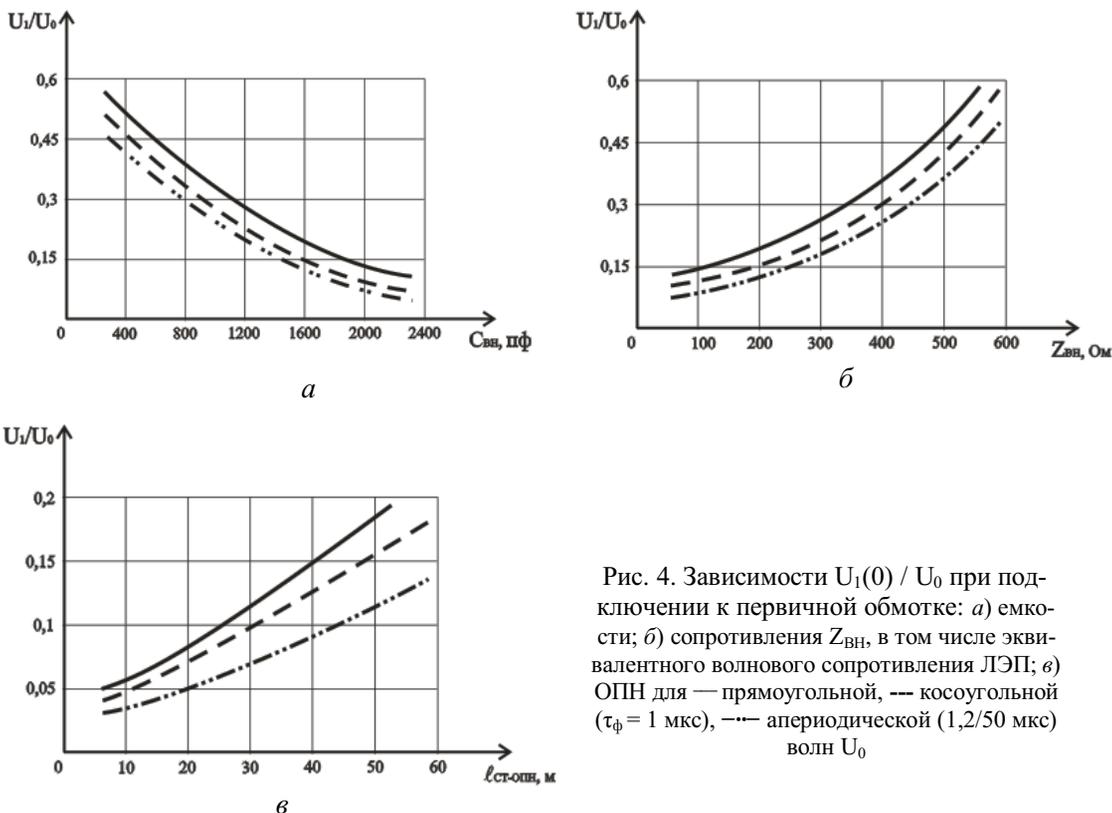


Рис. 4. Зависимости $U_1(0) / U_0$ при подключении к первичной обмотке: а) емкости; б) сопротивления $Z_{ВН}$, в том числе эквивалентного волнового сопротивления ЛЭП; в) ОПН для — прямоугольной, --- косоугольной ($\tau_\phi = 1$ мкс), -·-·- апериодической (1,2/50 мкс) волн U_0

Характерной особенностью физических процессов распространения волн грозových перенапряжений по воздушным ЛЭП является их деформация и искажение вследствие влияний импульсной короны и поверхностного эффекта в земле [1, 3]. Наибольшим образом это сказывается на фронтальной части волн перенапряжений. Поэтому были проведены расчеты, в которых это явление приближенно учитывалось изменением длины фронта τ_ϕ в пределах от 0, что соответствует рассмотренному выше случаю прямоугольной волны, и до 5 мкс. Эта величина была выбрана исходя из возможной по предварительным оценкам деформации фронта при пробеге волны расстояния $\sim 2 \div 3$ км.

На рис. 5, 6 показаны результаты расчетов, выполненных для условий, аналогичных исследованиям, представленным на рис. 3, 4, при фиксированных средних значениях емкостей $C_{НН}$, $C_{ВН}$, сопротивлений $Z_{НН}$, $Z_{ВН}$ (эквивалентного волнового сопротивления ЛЭП), а также при установке ОПН.

Условия компьютерного эксперимента определяются в этом случае выбором средних значений $C_{НН}$, $C_{ВН}$, $R_{НН}$, $R_{ВН}$, $\ell_{СТ-ОПН}$. Кроме того, принято как наихудший случай, что со стороны ВН и НН к трансформатору подключено только по одной ЛЭП. При их большем количестве величины передаваемых перенапряжений снижаются, так как уменьшается $R_{ВН}$ (см. рис. 3, б; 4, б).

Аналогичные эксперименты для апериодических волн также показывают снижение максимальных значений перенапряжений. Однако, как и в предыдущих случаях, они остаются опасными для электроустановок, установленных на стороне и НН, и ВН. Полученные результаты позволяют однозначно утверждать, что имеющее в некоторых случаях место отсутствие ЗА [1] вообще недопустимо, особенно для изношенных СТ и ЭД с большими сроками эксплуатации.

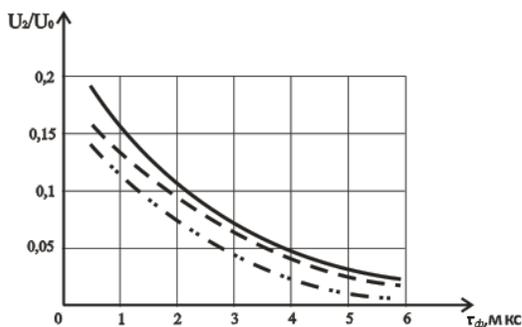


Рис. 5. Зависимости $U_2(0) / U_0$ при приходе на обмотку ВН косоугольных волн и подключении ко вторичной обмотке:
 — емкости $C_{НН} = 600$ пФ;
 --- сопротивления $Z_{НН} = 300$ Ом,
 равного волновому сопротивлению ЛЭП;
 -·-·- ОПН на расстоянии $\ell_{СТ-ОПН} = 15$ м
 от выводов обмотки НН

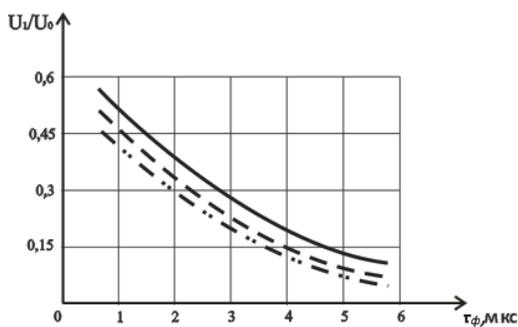


Рис. 6. Зависимости $U_1(0) / U_0$ при приходе на обмотку НН косоугольных волн и подключении к первичной обмотке:
 — емкости $C_{ВН} = 800$ пФ;
 --- сопротивления $Z_{ВН} = 400$ Ом,
 равного волновому сопротивлению ЛЭП;
 -·-·- ОПН на расстоянии $\ell_{СТ-ОПН} = 30$ м
 от выводов обмотки ВН

Проблема износа весьма актуальна и специфична и для аппаратов защиты от перенапряжений. В исследованиях, результаты которых представлены выше, предполагалось или отсутствие ЗА, или использование ОПН, характеристики которых приняты по данным фирм-изготовителей. В ряде известных публикаций [1, 3] констатируется, что вольтамперные характеристики ЗА (ОПН и РВ) после продолжительной

эксплуатации значительно изменяются, а это в подавляющем большинстве случаев приводит к ухудшению их защитных свойств.

С целью выяснения названного вопроса применительно к цели настоящей работы были проведены компьютерные эксперименты, в которых на сторонах ВН и НН моделировалась установка ЗА с ухудшенными в результате износа характеристиками.

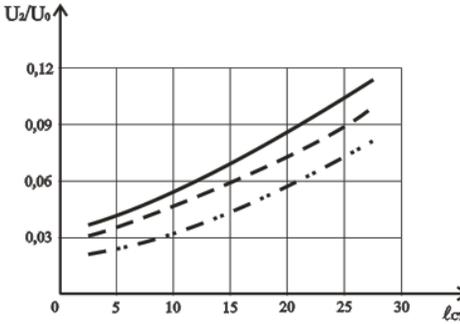


Рис. 7. Зависимости $U_2(0) / U_0$ при приходе на обмотку ВН косоугольных волн с $\tau_\phi = 1$ мкс и подключении на расстоянии от выводов обмотки НН $l_{\text{СТ-ОПН}} = 15$ м ОПН со средним смещением ВАХ: — +10%; --- 0%; -·-·- 10 %

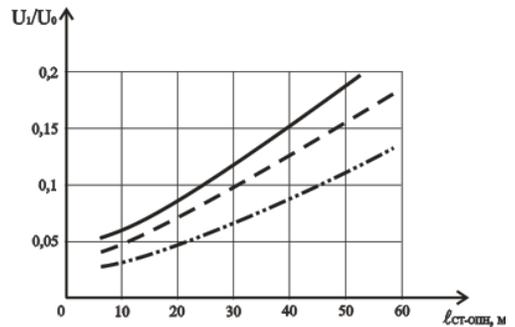


Рис. 8. Зависимости $U_1(0) / U_0$ при приходе на обмотку НН косоугольных волн с $\tau_\phi = 1$ мкс и подключении на расстоянии от выводов обмотки ВН $l_{\text{СТ-ОПН}} = 30$ м ОПН со средним смещением ВАХ: — +10%; --- 0%; -·-·- 10 %

На рис. 7, 8 показаны результаты расчетов, выполненных для условий, которые аналогичны исследованиям, представленным на рис. 3, 4. Характерная тенденция, отмеченная в этой серии компьютерных экспериментов, связана с повышением опасности возникающих перенапряжений при уходе вверх ВАХ ОПН, что является наиболее вероятным исходом ухудшения характеристик ЗА в результате износа.

Выводы

1. В работе рассмотрен подход к построению уточненных математических моделей электромагнитной передачи в элементах СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ электромагнитных помех в виде импульсных грозовых и квазистационарных перенапряжений.
2. Результаты исследований электромагнитной передачи перенапряжений через обмотки СТ могут быть использованы при проектировании и эксплуатации СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ с целью улучшения обеспечения ЭМС для повышения надежности и сокращения аварийности электрооборудования.
3. Отмечено устойчивое эффективное снижение при применении ОПН уровней перенапряжений до величин, безопасных для электрооборудования при наличии контроля смещения ВАХ ОПН вследствие износа этих ЗА.
4. Необходима систематическая диагностика технического состояния электромагнитно связанных элементов СЭЭС 0,4 ÷ 35 кВ – ЛЭП, силовых и измерительных трансформаторов, электрических машин, коммутационных и защитных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Гордиенко А.Н., Пухальский А.А. Повышение надежности работы электрооборудования и линий 0,4 – 110 кВ нефтяной промышленности при воздействиях перенапряжений. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 356 с.
2. Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Подпоркин Г.В., Степанов В.П. Электромагнитная совместимость и разработка мероприятий по улучшению защиты от перенапряжений электрооборудования сетей 6 ÷ 35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 344 с.
3. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – 728 с.

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2012 г.

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY POWER SURGES IN ELECTRICAL 0,4 ÷ 35 KV INSTALLATIONS

V.G. Goldstein, P.V. Kopyryulin, O.M. Sevostanova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The approach for deriving refined mathematical model of electromagnetic transmission in cell power systems in the form of electromagnetic interference and lightning impulse quasi surge is developed.

Keywords: *electromagnetic performance physical effects, electromagnetic compatibility, pulse and quasi-stationary storm surge.*

*Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Petr V. Kopyryulin, Postgraduate Student.
Olga M. Sevostanova (Ph.D. (Ped.)), Associate professor.*