



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе

**“ИССЛЕДОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ  
ФАЗ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ”**

по курсу “Перенапряжения в электроэнергетических системах”  
для студентов специальности 6.050701 – “Электрические сети и системы”

Утверждено  
редакционно- издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 06.12.12

Харьков  
НТУ «ХПИ»

2014

Методические указания к выполнению лабораторной работы “Исследование на физической модели перенапряжений при несимметричном отключении фаз линий электропередачи” по дисциплине “Перенапряжение в электрических системах” для студентов специальности 6.050701 – “Электрические системы и сети” / Сост. Нижевский В.И., Берёзка С.К. – Х: НТУ “ХПИ”, 2013. – 24 с.

Составители: В.И. Нижевский,  
С.К. Берёзка

Рецензент А.Г. Гурин

Кафедра передачи электрической энергии

## **ВСТУПЛЕНИЕ**

При проектировании и эксплуатации электрических сетей напряжением 6–35 кВ приходится считаться с возможностью возникновения в ней внутренних перенапряжений и ненормальных режимов работы, связанных с неполнофазными режимами работы сети. Перенапряжения и ненормальные режимы работы могут приводить к возникновению в сети аварий, сопровождающихся определенным недоотпуском электроэнергии потребителям, недопустимым ухудшением её качества и повреждением изоляции основного оборудования энергосистем. В большинстве случаев развитие перенапряжений может быть предотвращено путем применения определенных мероприятий в электрической сети, например, при помощи специальных мероприятий, что непосредственно связано со схемой электрической сети. Анализ схемных решений при возможных неполнофазных режимах в сети как при проектировании, так и при эксплуатации (реконструкции) является исключительно важным для обеспечения нормальной работы электрической сети. Поэтому для глубокого понимания студентами существа вопроса в данной лабораторной работе поставлены следующие цели: 1. Освоить метод исследования на физической модели перенапряжений при несимметричной коммутации фаз. 2. Исследовать феррорезонансные перенапряжения при неполнофазных режимах в системах 35 – 110 кВ.

### **1. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ В СИСТЕМАХ 35 ... 110 КВ**

#### **1.1. Теория феррорезонансных перенапряжений**

Опыт эксплуатации энергосистем свидетельствует о достаточно частом существовании неполнофазных режимов в электропередачах. Неполнофазные режимы могут наблюдаться при обрыве провода линии, который часто сопровождается падением на землю и заземлением одного или концов провода, при перегорании плавких вставок в одной или двух фазах, например, при отключении однофазного или двухфазного к.з. Возникновение неполнофазных режимов возможно также при отказе одной из фаз выключателя во время включения или отключения блока “линия –

трансформатор”. В таких случаях в силу различных причин может происходить насыщение магнитопроводов трансформаторов.

Например, для трансформатора при номинальном напряжении ток намагничивания не превышает 2...4 % его номинального тока, а при увеличении напряжения выше номинального резко возрастает, достигая значения номинального тока. При этом происходит искажение формы кривой тока, возрастает доля высших гармоник, так что амплитуда основной гармоники тока может составлять 50...70 % его максимального значения. Прохождение несинусоидального намагничивающего тока через элементы схемы создает несинусоидальное падение напряжения. Следовательно, на трансформаторе и в других точках электропередачи появляются напряжения высших гармоник.

В силу возрастания намагничивающего тока трансформатора при насыщении в некоторых случаях происходит ограничение напряжения промышленной частоты. Например, в схемах дальних передач трансформатор при насыщении может рассматриваться как нелинейный реактор, частично компенсирующий емкостный ток линии.

Если сопротивление схемы относительно ненагруженного или малонагруженного трансформатора носит емкостный характер, то при этом могут возникнуть значительные перенапряжения. Они являются типичным примером резонанса в нелинейных цепях (феррорезонанса) на промышленной частоте (гармонический резонанс) или на высших и низших гармониках (негармонический резонанс).

Теория затронутых вопросов кратко изложена в п. 1.2, а с достаточной полнотой изложена в литературных источниках [1–5], которые следует изучить до выполнения лабораторной работы.

При внезапной коммутации одной или двух фаз трехфазной линии в сети возможно возникновение явления нелинейного гармонического резонанса на основной гармонике. В процессе участвуют магнитные цепи трансформаторов, и явление называется феррорезонансным.

При феррорезонансе значительно повышается напряжение относительно земли на фазах, участвующих в коммутации, и смещается потенциальное положение нейтрали трансформатора нагрузки. Наибольшие перенапряжения достигают следующих оценочных значений: при обрыве и

заземлении одной фазы с предшествующим симметричным режимом – до  $3,75U_{\phi}$ ; при однофазном включении — до  $2,5U_{\phi}$  при двухфазном включении – до  $1,25U_{\phi}$ .

Изучение условий резонансных перенапряжений выполняется на модели участка электрической сети (рис. 1.1).

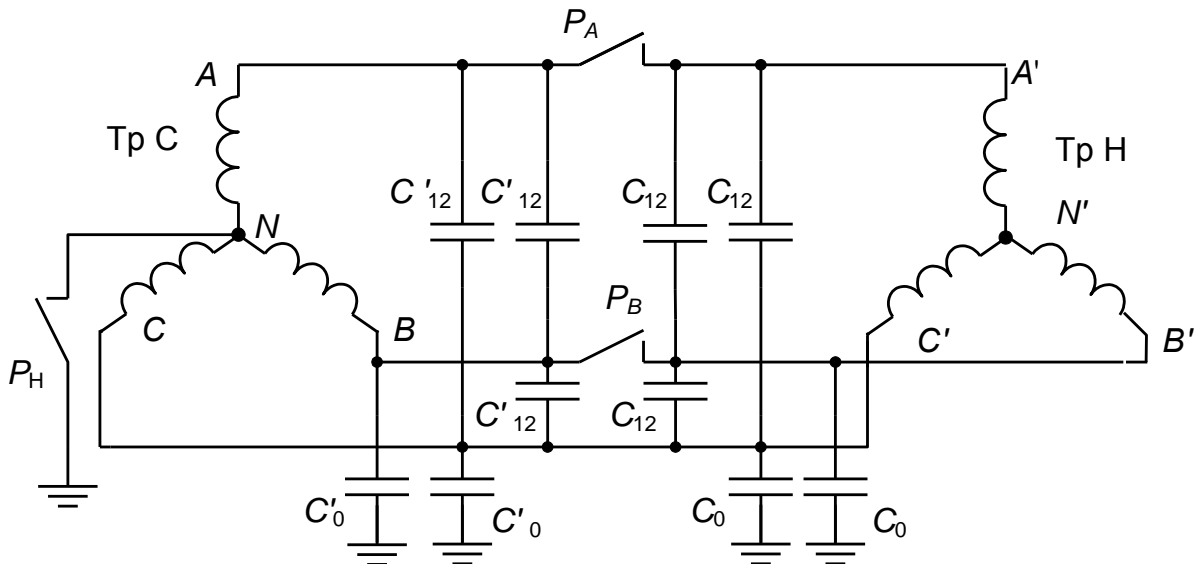


Рисунок 1.1

Модель воспроизводит типичные для возникновения рассматриваемых перенапряжений режимы: обрыв провода в одной из фаз с падением этого провода на землю; обрыв в одной или двух фазах без замыкания на землю, что соответствует перегоранию плавких вставок или неодновременному отключению фаз выключателя при пофазном управлении.

В электрической сети, представленной моделью, которая показана на рис. 1.1, трансформатор Н имеет незначительную нагрузку или работает в холостом режиме. Трансформатор С (система) намного мощнее, чем нагрузка, и по отношению к Т<sub>н</sub>, сопротивления фаз трансформатора Т<sub>с</sub> пренебрежимо малы. Емкости фаз на землю  $C_0$  и междуфазные  $C_{12}$  могут быть изменяемыми по величине. В первом приближении для линии с  $U_{н} = 35$  кВ емкости  $C_0$  и  $C_{12}$  приняты пропорциональными только длине линии. Режим нейтрали  $N$ , зависит от положения рубильника  $P_{н}$ , трансформатор Т<sub>н</sub> нагрузки имеет вторичную обмотку “треугольник”.

Анализ процесса возникновения рассматриваемых перенапряжений основывается на изучении случая несимметричной нагрузки в одной из фаз, в частности  $Z_2 = Z_3 = Z \neq Z_1$ , (рис. 1.2).

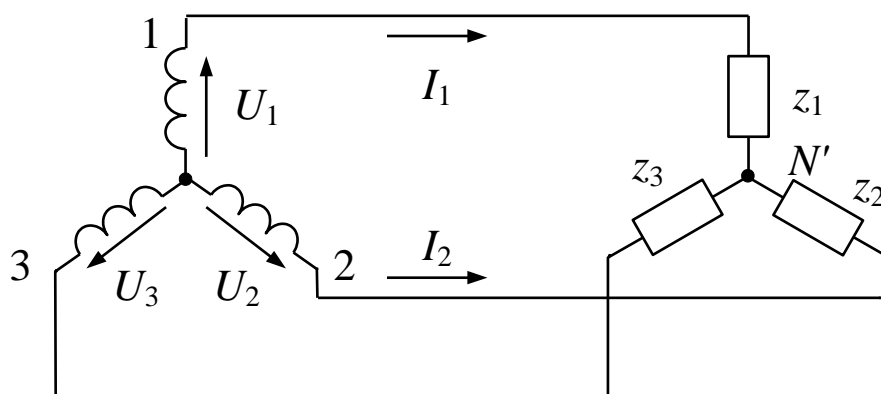


Рисунок 1.2

Ток  $I_1$  есть суммарный ток согласно выражению:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z}{2}} - \frac{U_2}{Z + \frac{Z_1 \cdot Z}{Z_1 + Z}} \cdot \frac{Z}{Z_1 + Z} - \frac{U_3}{Z + \frac{Z_1 \cdot Z}{Z_1 + Z}} \cdot \frac{Z}{Z_1 + Z} = \frac{U_1 - \frac{U_2 + U_3}{2}}{Z_1 + \frac{Z}{2}} \quad (1.1)$$

Схема на рис.1.3 соответствует расчетному выражению (1.1), содержит источник  $U_{\text{ЭКВ}}$ .

Выражение для  $U_{\text{ЭКВ}}$  при равенстве модулей векторов напряжений во всех фазах (рис. 1.4) имеет вид

$$U_{\text{ЭКВ}} = E = U_1 - \frac{U_2 + U_3}{2} = 1,5U_1 \quad (1.2)$$

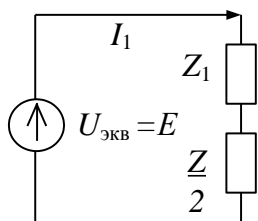


Рисунок 1.3

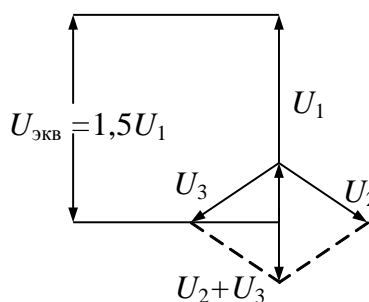


Рисунок 1.4.

Обратимся к схеме модели, показанной на рис. 1.1, и рассмотрим режим обрыва с замыканием на землю фазы  $A$  вблизи системы, т.е. емкостью  $C'_0$ , по сравнению с  $C_0$  можно пренебречь. Схема режима показана на рис. 1.5.

Отметим, что при симметрии емкостей  $C_{12}$  и индуктивностей  $L_T$  фаз трансформатора нагрузки  $T_H$  потенциалы нейтралей  $N$  и  $N'$  этих систем одинаковы. Пути от источника (системы) показаны стрелками.

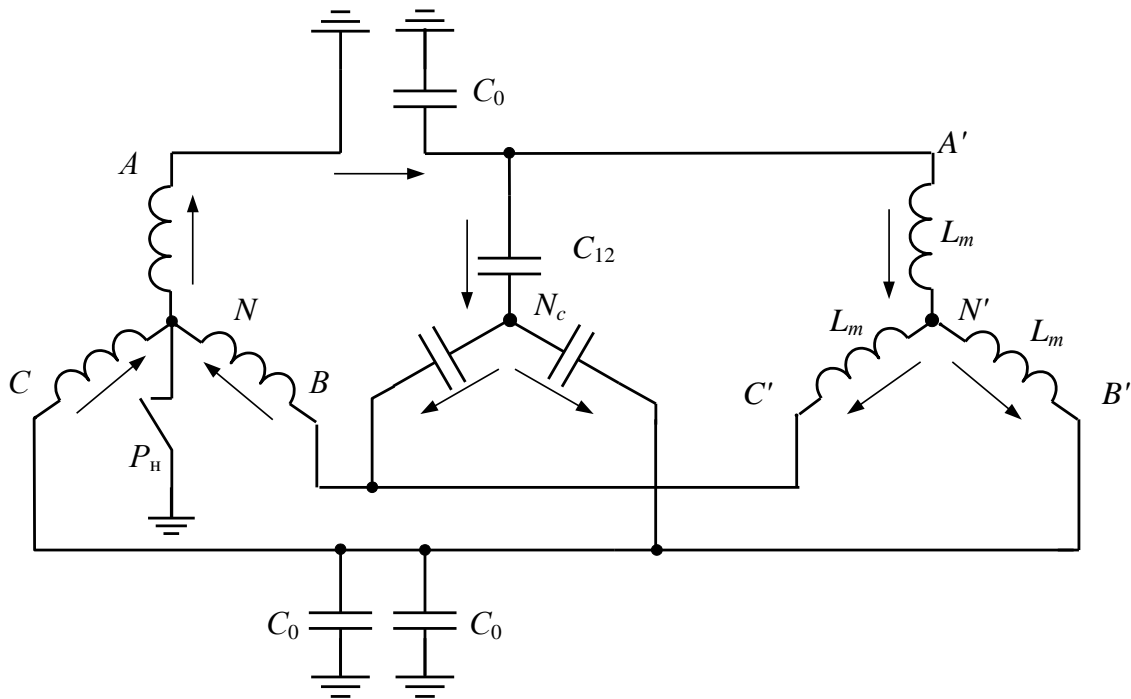


Рисунок 1.5

Для дальнейшего анализа используется однофазная схема замещения (рис. 1.6). В токовой однофазной цепи введена только емкость поврежденной фазы (в данном случае  $A$ ); емкости  $C_0$  на землю фаз  $B$  и  $C$  только дополнительно нагружают источник — систему, и в то же время не участвуют в токовой цепи нагрузочного трансформатора.

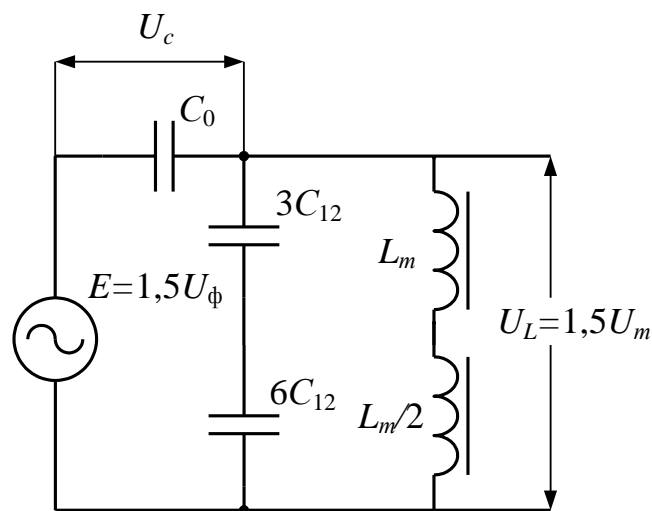


Рисунок 1.6



Переход от схемы, изображенной на рис. 1.1, к схеме, показанной на рис. 1.5, предусматривает преобразование треугольника межфазных емкостей  $C_{12}$  в звезду, вследствие чего емкость в каждой фазе увеличивается в три раза, т.е. цепь по рис. 1.6 допускает дальнейшее упрощение ее конфигурации до последовательного контура, причем эквивалентная емкость  $C_{\text{ЭКВ}}$  и эквивалентная ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$  определены с помощью теоремы об активном двухполюснике. Емкость

$$C_{\text{Э}} = C_0 + 2C_{12} = C_0 \left(1 + \frac{2C_{12}}{C_0}\right), \quad (1.3)$$

где согласно теореме эквивалентная емкость  $C_{\text{ЭКВ}}$  приравнивается емкости, измеренной между точками отключения из схемы индуктивности  $(L_T + 0,5L_T)$  и при замкнутом источнике питания, т.е. емкости последовательно соединенных  $C_0$  и  $C_{12}$ . В свою очередь, емкость  $2C_{12}$  является эквивалентной для цепи последовательно включенных емкостей  $3C_{12}$  и  $6C_{12}$ . Эквивалентная ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$  приравнивается к напряжению между точками отключенной индуктивности, т.е. напряжению на емкости  $2C_{12}$  делителя  $2C_{12} - C_0$ .

$$E_{\text{Э}} = E \cdot \frac{C_0}{C_0 + 2C_{12}} = 1,5U_{\phi} \frac{1}{1 + \frac{2C_{12}}{C_0}}. \quad (1.4)$$

Для последовательного контура на рис. 1.7 соблюдается равенство суммы падений напряжения на емкости и на индуктивности приложенной ЭДС  $E_{\text{ЭКВ}}$ .

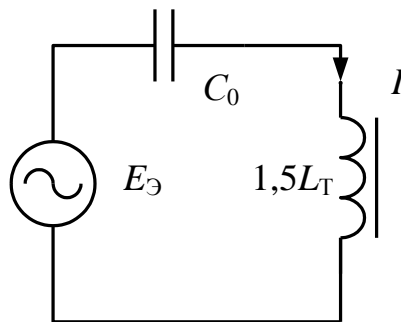


Рисунок 1.7

Падение напряжения на емкости  $C_0$  характеризует перенапряжение в исходной трехфазной цепи и составляет лишь часть напряжения на  $C_{\text{ЭКВ}}$ ; эта часть легко определяется для плеча емкостного делителя  $C_0 - 2C_{12}$  согласно выражению для  $C_{\text{ЭКВ}}$ . Частный случай, когда емкость  $C_{12}$  стремится к нулю,  $E_{\text{ЭКВ}}$  стремится к  $E$  и  $C_{\text{ЭКВ}}$  стремится к  $C_0$ , удовлетворяет уравнению:

$$U_C = U_L \pm E. \quad (1.5)$$

В емкостном режиме  $E_{\text{ЭКВ}}$  имеет знак “+”, в индуктивном “—”, соответственно изменяется характер тока в цепи: при  $U_L > U_C$  — индуктивный,  $U_L < U_C$  — ток емкостной.

Поскольку индуктивность в контуре определяется трансформатором  $T_H$  и имеет из-за отсутствия стального сердечника нелинейную вольтамперную характеристику (ВАХ), решение уравнения (1.5) производят графоаналитическим методом (рис. 1.8).

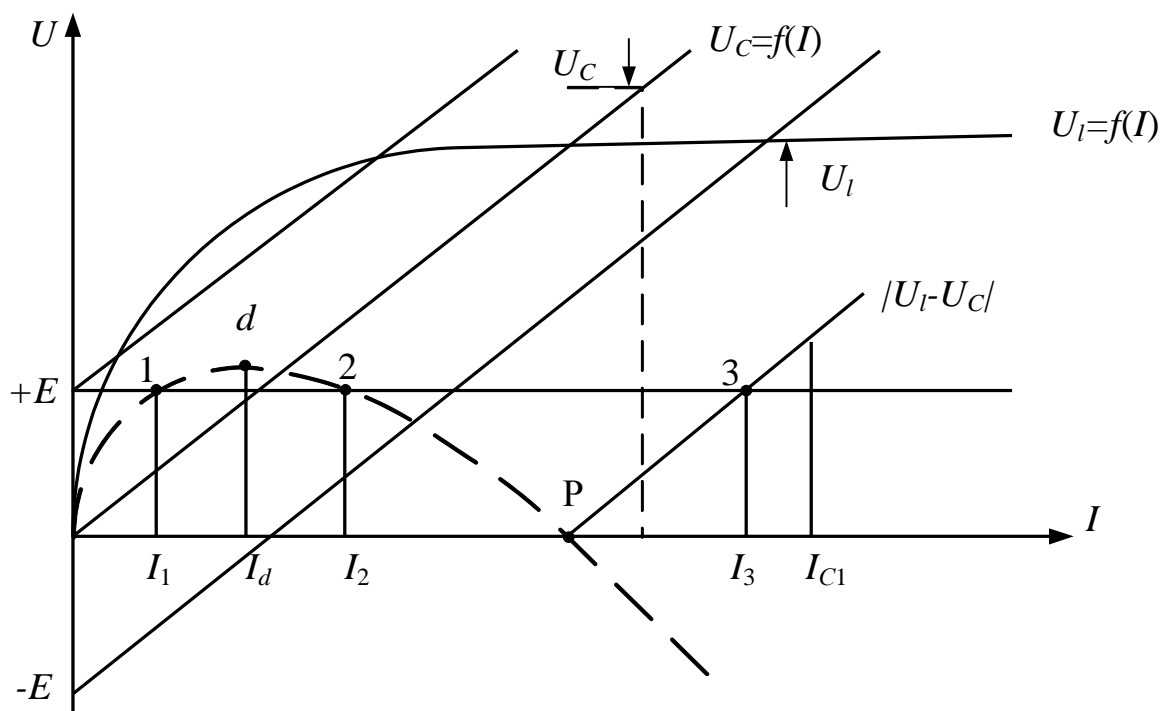


Рисунок 1.8

Наклон прямой  $U_C = f(I)$  определяется емкостью  $C_{\text{ЭКВ}}$  и в частном случае при  $C_{12} \rightarrow 0$  только емкостью  $C_0$ ; принимая одинаковой зависимость  $U_C = f(I)$  в нелинейной цепи и в установившемся режиме, мы не учитываем влияние в цепи высших гармоник и сохраняем только основную гармонику рабочей частоты. Для трансформатора ВАХ задана кривой  $U_L = f(I)$  в именованных или относительных единицах. На рис. 1.8 уравнение (1.5) выполняется при трех токах  $I_1, I_2, I_3$  на пересечении суммарной кривой  $|U_L - U_C|$  с прямой уровня напряжения  $E$ . При учете влияния межфазной емкости взамен  $E$  следует ввести  $E_{\text{ЭКВ}}$  согласно выражению (1.4).

Число пересечений для суммарной кривой  $|U_L - U_C|$  с уровнем  $E$  зависит от величины этого напряжения  $E$ : при касании кривой (точка  $d$ ) возможны два тока  $I_d$  и  $I_3$  при превышении  $E$  уровня максимума кривой в точке  $d$  остается один режим с током  $I_3$ .

Точка  $p$  соответствует резонансу напряжений для  $U_L$  и  $U_C$ . Это состояние для рассматриваемой цепи с некоторой емкостью и нелинейной индуктивностью  $L(I)$  может быть достигнуто при плавном повышении  $E$  и называется феррорезонансом. Техническая реализация этого состояния должна учитывать, что участок  $d-2-p-3$  характеризует область неустойчивых режимов. Дополнительно учтем, что реальная цепь обладает активным сопротивлением (эквивалент потерь) и имеют место высшие гармоники. Реальная характеристика цепи (рис. 1.9, кривая 1) становится более пологой по сравнению со случаем цепи с чисто реактивными элементами (рис. 1.9, кривая 2).

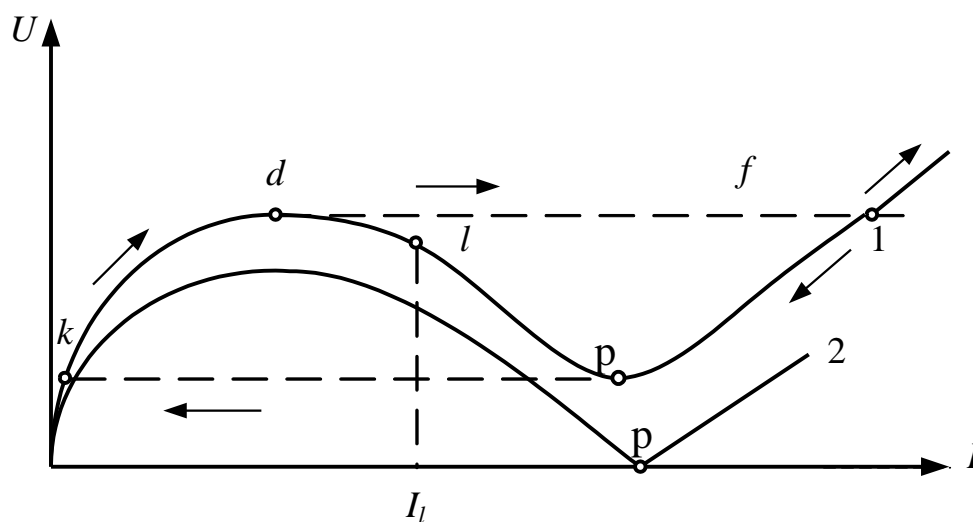


Рисунок 1.9

Исследование явления феррорезонанса было выполнено П.Л.Калантаровым [6]. Согласно этим исследованиям плавное повышение напряжения с нуля позволяет достичь точки  $d$  на восходящей части кривой (см. рис. 1.9, кривая 1), и далее ток скачкообразно возрастает до точки  $f$ , меняя при этом и фазу. Спуск по кривой 1 (см. рис. 1.9) по мере снижения напряжения от области  $U > U_f$  и ниже позволяет достичь точки  $p$  (резонанс в цепи с потерями), и ток срывается до точки  $k$ , изменяя при этом свою фазу.

В случае приложения стабильного напряжения устойчивость на падающем участке  $d - p$  все равно нереальна. Вообразим все же, что при

некотором напряжении режим цепи соответствует точке  $l$  (см. рис. 1.9, кривая 1). Любое случайное незначительное увеличение тока приводит к автоматическому снижению падения напряжения в цепи или при постоянстве приложенного напряжения ток должен возрасти дополнительно, стремясь к состоянию  $p$ , которое относится уже к восходящему участку характеристики цепи. Сходная картина получается при случайном уменьшении тока: падение напряжения должно по кривой  $p-d$  возрасти, и режим стабилизируется только в точке  $d$ .

Изменение емкости при фиксированном напряжении  $E$  на контуре влияет на форму итоговой характеристики  $|U_L - U_C| = f(I)$ . На базе построений, показанных на рис. 1.10, получены зависимости напряжений на емкости  $U_C$  и на индуктивности  $U_L$  контура без затухания при изменении емкости  $C$  (рис. 1.11).

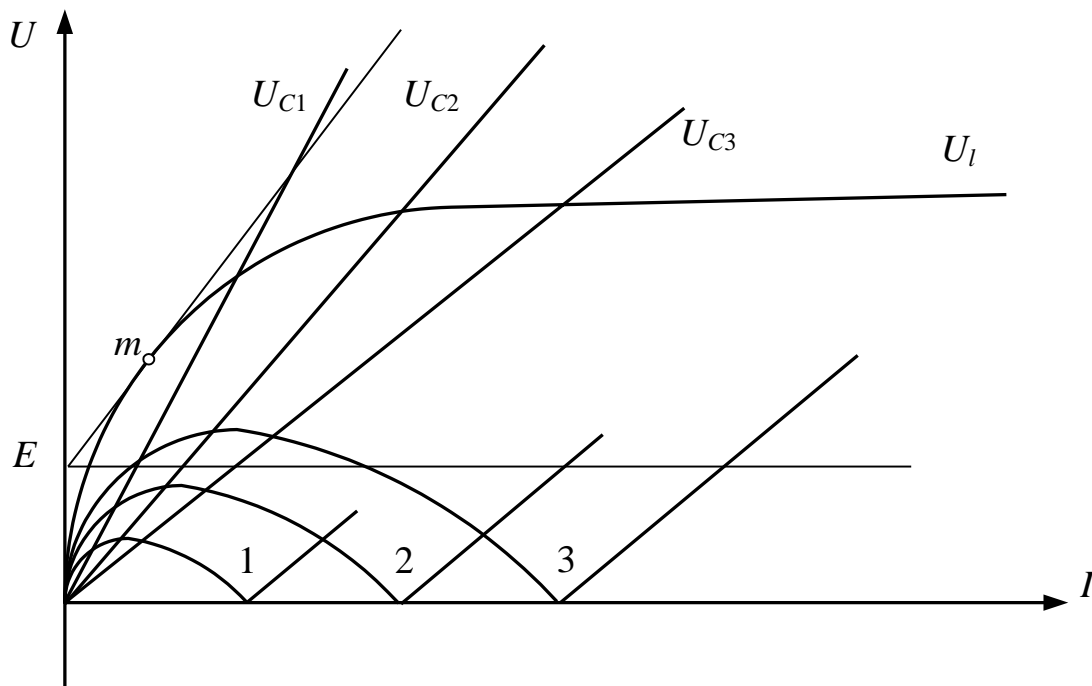


Рисунок 1.10

Емкость  $C_{кр}$  (критическая) соответствует по мере снижения  $C$  переходу к единственному устойчивому состоянию с емкостным режимом. Построение, используемое для расчета  $C_{кр}$ , показано на рис. 1.10: от точки  $E$ , характеризующей приложенное к контуру напряжение, проводим касательную к точке  $m$ . Для кривой  $U_L = f(I)$  наклон этой касательной характеризует емкостное сопротивление и емкость  $C_{кр}$ . Изменение  $E$  приводит к изменению  $C_{кр}$ .

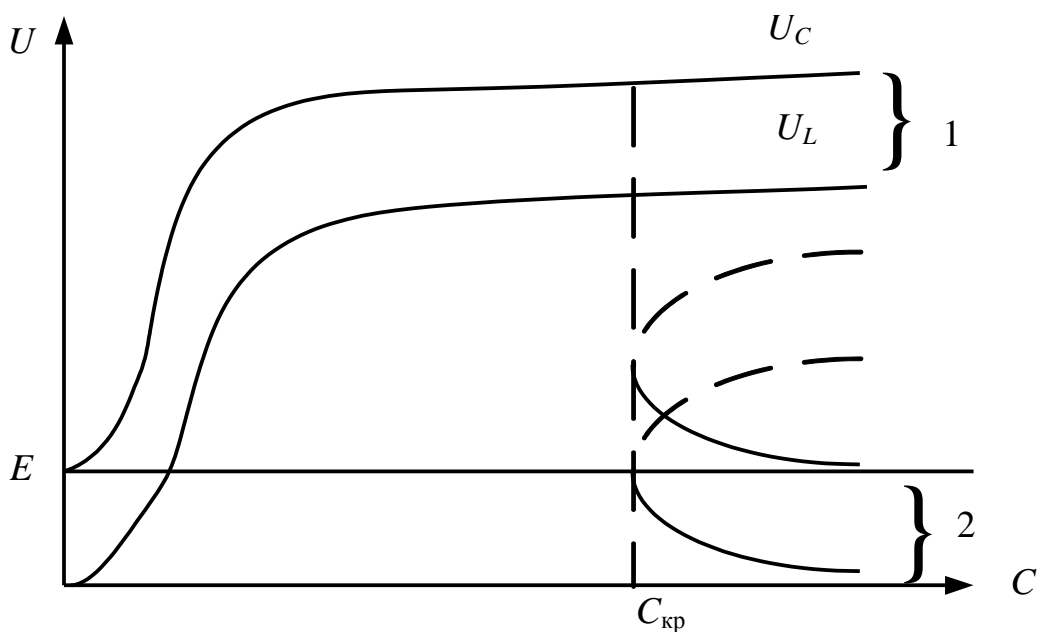


Рисунок 1.11

В реальном контуре с затуханием вследствие действия активного сопротивления  $r$  кривая изменения напряжения на реактивном элементе  $U_L = f(C)$  сглаживается. Характерное семейство кривых  $U_L = f(C)$  показано на рис. 1.12. Сходно по характеру влияние сопротивления  $r$  на зависимость  $U_C = f(C)$ .

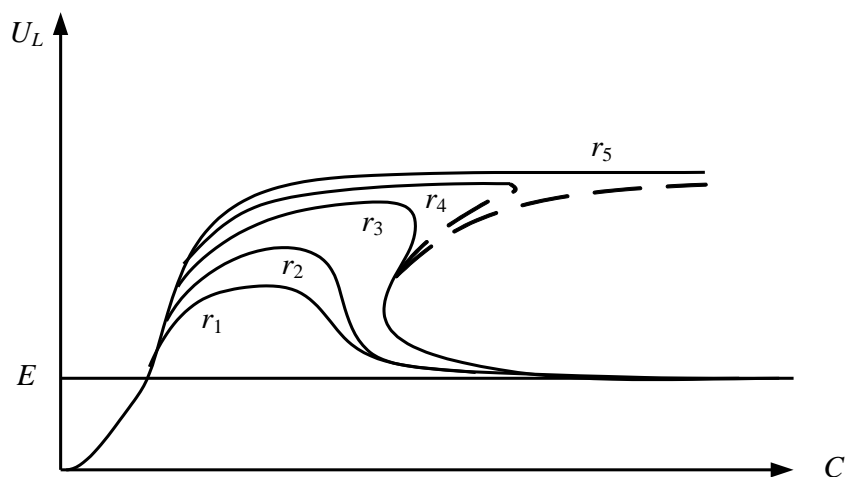


Рисунок 1.12

Наличие у трансформатора  $T_H$  нагрузки, даже небольшой, существенно снижает перенапряжения рассмотренных режимов. Представляет интерес режим заземления нейтрали  $T_H$  через высокоомный резистор, что также способствует снижению перенапряжений. Наиболее эффективно снижение

перенапряжений при уменьшении путем соответствующей тщательной регулировки разброса коммутации фаз выключателя в сети и исключения коммутаций холостого трансформатора с изолированной нейтралью.

## 1.2. Опрокидывание фазы

Перенапряжения при несимметричных режимах опасны не только тем, что они велики. Рассмотрим векторную диаграмму напряжений трехфазной схемы в условиях емкостного режима. На рис. 1.13 пунктиром показана звезда напряжений источника, которая также является звездой напряжений трансформатора в нормальном режиме.

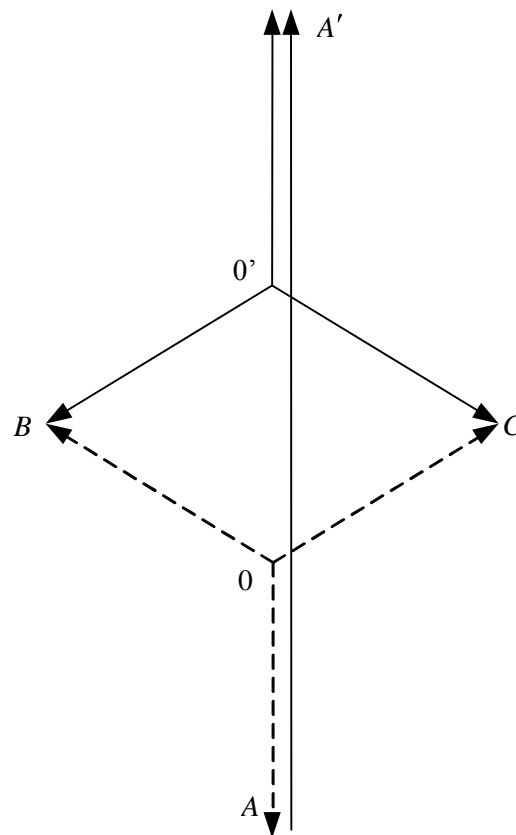


Рисунок 1.13 – Векторная диаграмма напряжений при опрокидывании фазы

После обрыва и заземления фазы точка  $A$  приобретает нулевой потенциал. Вектор  $AA'$  представляет собой напряжение на емкости. Откладывая вектор  $0'A'$  напряжения фазы  $A$  трансформатора, равный  $U_l/1,5$ , находим напряжение на нейтрали трансформатора (точка  $0'$ ). Звезда  $0'A'$ ,  $0'B$ ,  $0'C$  представляет собой звезду напряжения трансформатора в неполнофазном режиме. Порядок чередования фаз трансформатора изменился на обратный – произошло опрокидывание фаз. Поэтому если трансформатор имел

небольшую двигательную нагрузку, то после обрыва провода могут наблюдаться торможение двигателей, их останов или даже изменение направления вращения. Такие случаи неоднократно отмечались в эксплуатации.

Учитывая значительные повышения напряжения и эффект опрокидывания фаз при несимметричных отключениях ненагруженных и слабонагруженных трансформаторов, следует стремиться уменьшить вероятность подобных неполнофазных режимов путем отказа от применения плавких предохранителей и выключателей с пофазным управлением, а также путем рационального распределения нагрузок между трансформаторами сети.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Изучение перенапряжений при несимметричных режимах производится на стенде, на котором собрана и изображена схема рис. 2.1 модели участка электрической сети, т. е. модель трехфазной линии и включенного на ее приемном конце трансформатора с изолированной нейтралью.

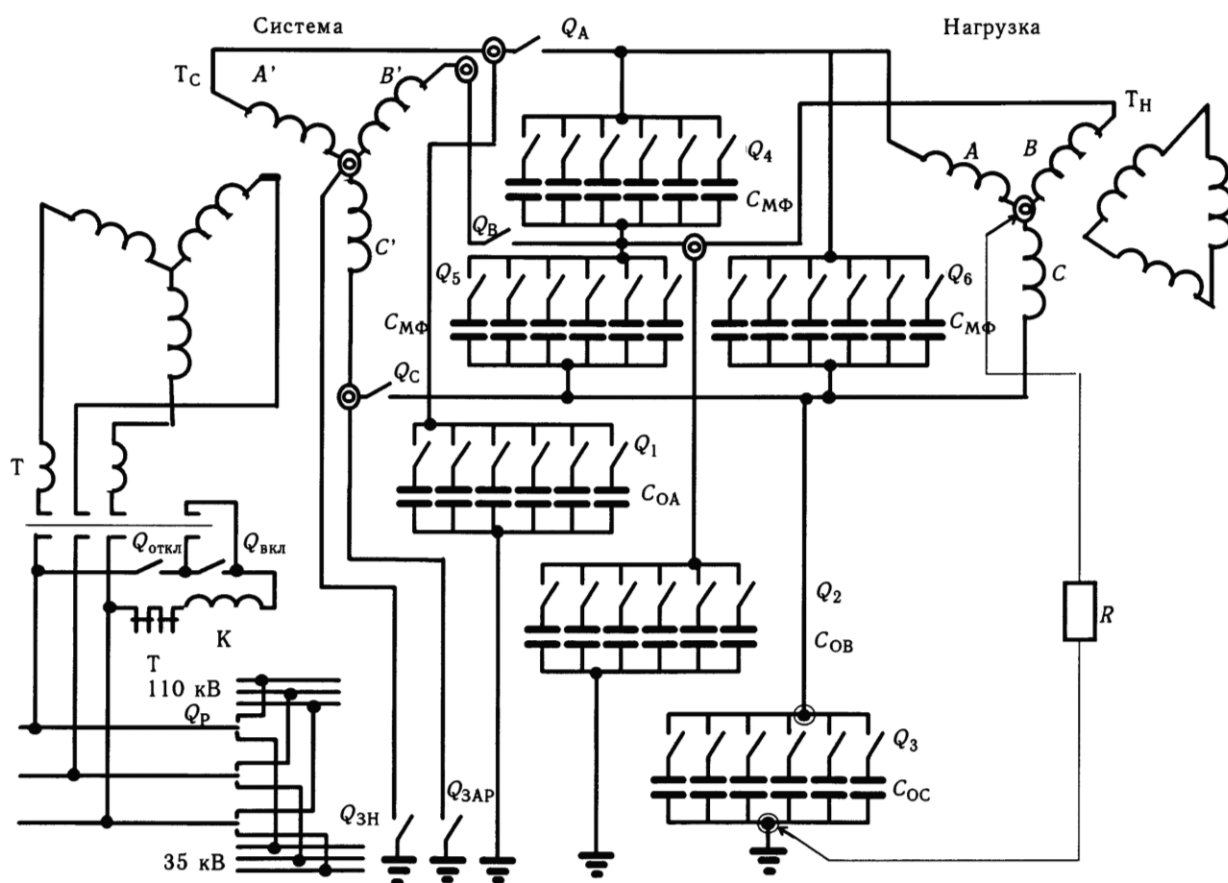


Рисунок 2.1

Модель линии и трансформатора нагрузки  $T_H$  питается через трансформатор системы  $T_C$ , обеспечивающий номинальное напряжение линии 9 В. Линия моделируется рядом параллельно включенных емкостей фаз на землю  $C_0$  и между фазами  $C_{MФ}$ . Суммарная емкость  $C_0$  может меняться по величине дискретно в пределах 2,0; 2,2; 5,0; 10; 20; 50 мкФ путем последовательного включения выключателей  $Q1 - Q3$ . Суммарная емкость  $C_{MФ}$  также может меняться по величине дискретно с помощью выключателей  $Q4 - Q6$ , причем величина  $C_{MФ}$  задается конкретным значением отношения  $C_{MФ}/C_0$ . Удельные емкости линий 35 – 110 кВ несколько отличаются между собой, но в среднем можно принять удельную емкость фаз на землю  $C_0' = 5000$  пФ/км и отношение междуфазной емкости к емкости на землю  $C_{MФ}/C_0 \approx 0,25$ . В первом приближении можно считать, что емкости  $C_0$  и  $C_{MФ}$  пропорциональны длине линии.

Трансформатор нагрузки  $T_H$  работает в холостом режиме и имеет вторичную обмотку “треугольник”, т. е. соединение обмоток  $\Delta$ . Трансформатор системы  $T_C$  намного мощнее, чем нагрузка и по отношению к трансформатору  $T_H$  сопротивления фаз трансформатора  $T_C$  пренебрежимо малы.

Коммутация фаз линии на модели осуществляется выключателями  $Q_A - Q_C$ , а замыкание фазы  $C$  на землю – выключателем  $Q_{3Ф}$ . Управление режимом нейтрали трансформатора  $T_C$  осуществляется выключателем  $Q_{3Н}$ . Нейтраль трансформатора  $T_H$  изолирована, но в модели предусматривается ее заземление через высокоомный резистор (магазин сопротивлений), имеющийся на стенде.

Включение стенда производится кнопкой  $Q_{вкл}$ , а отключение  $Q_{откл}$ . Измерения напряжений в исследуемых режимах производятся с помощью имеющегося на стенде электронного вольтметра путем подключения его входа к соответствующим точкам (гнездам) схемы сети.

С помощью одной и той же модели линии и трансформатора, используя различные масштабы, можно исследовать несимметричные режимы в системах 35 и 110 кВ. Напряжение в системе задается положением переключателя  $Q_P$ .



### 3. ВЫБОР МАСШТАБОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Режим электропередачи воспроизводится на модели в определенном масштабе. При этом токи, напряжения и мощности оказываются меньшими соответствующих параметров режима действительной системы. Степень уменьшения определяется выбранными для расчета масштабами модели или масштабными коэффициентами  $m$ .

Подготовка к работе начинается с выбора и определения масштабов моделирования. Масштабные коэффициенты должны выбираться так, чтобы ожидаемое напряжение во всех узлах расчетной схемы и возможные предельные значения тока во всех ее ветвях не превышали предельных значений, определяемых конструкцией модели. С учетом изложенного масштабы моделирования применительно к исследуемой системе 35 кВ определяются:

- по напряжению  $m_U = \frac{U_{\text{мод}}}{U_{\text{нат}}}$ ;
- по току  $m_I = \frac{I_{\text{мод}}}{I_{\text{нат}}}$ ;
- по сопротивлению  $m_Z = \frac{m_U}{m_I}$ ;
- по емкости  $m_C = \frac{1}{m_Z}$ .

Из четырех масштабных коэффициентов произвольно можно выбрать только два, а остальные должны вычисляться с помощью двух выбранных. Для расчета масштабных коэффициентов необходимо иметь конкретные параметры применяемых трансформаторов. В связи с этим в табл. 3.1 приведены необходимые данные трансформаторов типа ТМ с номинальным напряжением на высокой стороне  $U_{\text{ном}} = 35$  кВ.

Таблица 3.1 – Номинальная мощность и ток холостого хода моделируемых трансформаторов

$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	630	1000	1600	2500	4000	6300
$I_{\text{хх}}^*, \%$	2	1,5	1,4	1,1	1	0,9

Ток и сопротивление ненагруженного трансформатора, заданного руководителем по табл. 3.1, определяются как

$$I_{xx} = \frac{I_{xx}^* \cdot S_{ном}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}}; \quad X_T = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{xx}}.$$

Так как номинальные напряжения модели трансформатора  $U_{ном.мод}$  и натурального трансформатора  $U_{ном.нат}$  заданы, то коэффициент моделирования определяется как

$$m_U = \frac{U_{ном.мод}}{U_{ном.нат}}.$$

На рис. 3.1 приведена вольт-амперная характеристика модели трансформатора, которая позволяет определить модельный ток намагничивания  $I_{xx.мод}$  по номинальному фазному напряжению  $U_{ф.ном}$  модели трансформатора. В результате определяется коэффициент моделирования по току:

$$m_I = \frac{I_{xx.мод}}{I_{xx.нат}}.$$

Выбранные коэффициенты моделирования по напряжению и току однозначно определяют величину коэффициента моделирования сопротивления:

$$m_Z = \frac{m_U}{m_I},$$

а следовательно, и величину коэффициента моделирования емкости:

$$m_C = \frac{1}{m_Z}.$$

Таким образом, заданная величина емкости на модели соответствует реальной линии длиной

$$l = \frac{C_0}{C'_0 m_C}.$$

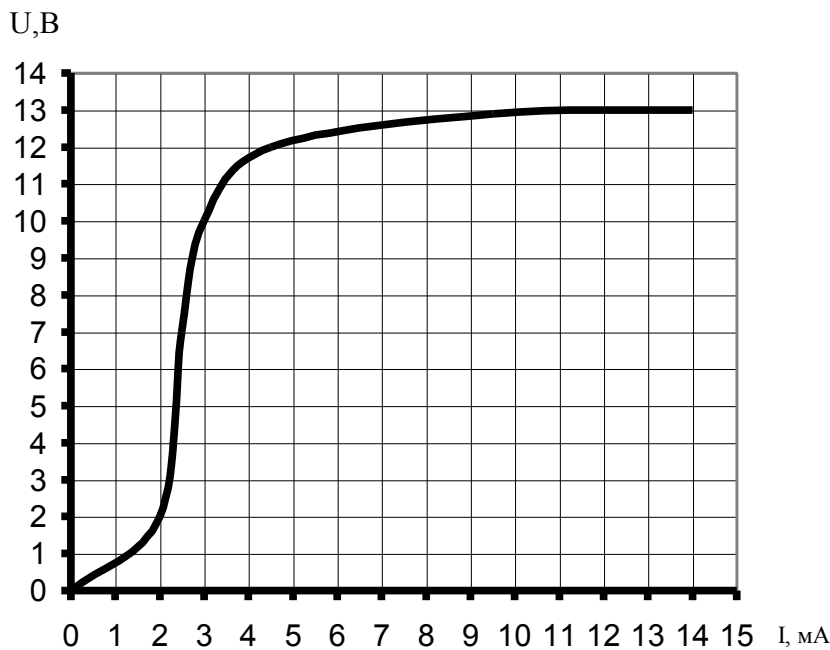


Рисунок 3.1

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

Критическая емкость  $C_{кр}$  электропередачи определяется графоаналитическим методом с использованием зависимости  $U_L = f(I)$ , приведенной на рис. 3.2. Для этого из точки на оси ординат, соответствующей значению напряжения  $U = E_{\text{ЭКВ}}$ , проводим касательную к кривой зависимости  $U_L = f(I)$ . В результате получаем точку касания с координатами  $(U_L, I)$ , соответствующую критической емкости  $C_{кр}$  системы передачи.

Эквивалентная э.д.с. источника  $E_{\text{ЭКВ}}$  при равенстве модулей векторов напряжения в однофазной схеме замещения определяется как

$$E_{\text{ЭКВ}} = 1,5 U_{\phi}.$$

Напряжение  $U_C$  на емкости поврежденной фазы определяется, с одной стороны, по выражению

$$U_C = U_L - E_{\text{ЭКВ}},$$

а с другой – по выражению

$$U_C = \frac{I}{\omega C_0},$$

исходя из которого критическая емкость  $C_{кр}$  определяется по формуле

$$C_{кр} = \frac{I}{\omega U_C} = \frac{I}{\omega(U_L - E_{\text{ЭКВ}})}.$$

## 5. МАТЕРИАЛ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ

5.1. Изучить вопросы по конспекту лекций, по литературе [1–5].

5.2. Рассчитать коэффициенты моделирования для заданной модели сети (заданного руководителем трансформатора).

5.3. Для случая обрыва одного провода с заземлением у шин питающей подстанции в системе с изолированной нейтралью 35 кВ рассчитать графоаналитическим методом, используя приведенную вольт-амперную характеристику, с учетом того, что  $U_L = 1,5 U_T$ :

а) критическую емкость  $C_{кр}$  при  $C_{МФ} = 0$  и  $C_{МФ} = 0,25 C_0$ ;

б) зависимость напряжения на емкости поврежденной фазы от длины линии  $U_C/U_{Ф.НОМ} = f(l)$  при  $C_{МФ} = 0$  (при расчете учесть, что  $C_0 = C'_0 l$ );

в) зависимость напряжения на индуктивности поврежденной фазы от емкости  $C_0$  при  $C_{МФ} = 0$ .

5.4. Определить при какой длине линии напряжение на емкости поврежденной фазы достигает  $3,5 U_{Ф.НОМ}$  при  $C_{МФ} = 0$  и  $C_{МФ} = 0,25 C_0$ .

После завершения предварительной подготовки показать результаты руководителю, разрешающему приступить к экспериментальному исследованию.

## 6. ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1. Ознакомиться со схемой модели сети, приведенной на стенде.

6.2. Исследовать режим, моделирующий процессы в сети с  $U_{НОМ} = 35$  кВ с изолированной нейтралью при обрыве одной фазы с заземлением оборванного провода вблизи шин подстанции в следующей последовательности.

6.2.1. Проверить симметрию фазных напряжений питающего трансформатора (трансформатора системы), данные измерений занести в табл.6.1.

Таблица 6.1 – Измерение величин фазных и линейных напряжений

Фаза			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>BC</i>	<i>CA</i>
$U_{ИЗМ}$	мод	В						
	нат	кВ						
$U_{ЗАД}$	мод	В						
	нат	кВ						

6.2.2. Исследовать влияние значения емкостей  $C_0$  фаз линии на землю при  $C_{MФ} = 0$  на величину напряжений  $U_L$  и  $U_C$  путем измерения последних при различных значениях  $C_0$ . При выполнении исследований оценить, как влияет изменение емкостей  $C_0$  в “здоровых” фазах на напряжения  $U_L$  и  $U_C$  при изменении емкости  $C_0$  в поврежденной фазе и при необходимости вывод учесть в выполнении экспериментов. Измерения  $U_C$  проводить сначала в емкостном режиме схемы, постепенно увеличивая емкость  $C$  до 50 мкФ, а затем в индуктивном режиме, постепенно уменьшая  $C$  от 50 мкФ до  $C_0 = C_{кр}$ . Индуктивного режима установки можно добиться после нескольких повторных включений стенда при  $C_0 > C_{кр}$ . Результаты исследования занести в табл. 6.2 и дать вывод о влиянии изменения емкостей  $C$  в здоровых фазах на напряжения  $U_L$  и  $U_C$  в поврежденной фазе.

Таблица 6.2 – Зависимость  $U_C = f(C_0)$  и  $U_L = f(C_0)$  (при изменении емкости  $C_0$  в поврежденной фазе

$C_0$	мод	мкФ	0	2	2,2	5	10	20	50
	нат	пФ							
$U_L$	мод	В							
	нат	кВ							
$U_C$	мод	В							
	нат	кВ							

По результатам выполненных исследований построить зависимости  $U_C = f(C_0)$ ,  $U_L = f(C_0)$  и  $U_C / U_{ф.ном} = f(I)$  при  $C_{MФ} = 0$  (на одном графике расчетной кривой по п. 6.3 б).

6.2.3. Исследовать влияние значения междуфазной емкости  $C_{MФ}$  на напряжения  $U_L$  и  $U_C$ . Изменение междуфазной емкости производить в пределах возможности модели начиная с  $C_{MФ} = 0$ . Результаты исследования занести в табл.6.3.

По результатам выполненных исследований построить зависимости  $U_C = f(C_0)$ ,  $U_L = f(C_0)$ .

Таблица 6.3 – Зависимость  $U_C = f(C_0)$  и  $U_L = f(C_0)$  при изменении междуфазной емкости

$C_0$	мод	мкФ	0	2	2,2	5	10	20	50
	нат	пФ							
$C_{MФ}$	мод	мкФ	0	0,5	0,55	1,25	2,5	5	12,5
	нат	пФ							
$U_L$	мод	В							
	нат	кВ							
$U_C$	мод	В							
	нат	кВ							

6.2.4. Объяснить ход экспериментальных кривых и расхождения с расчетом. Указать длину линии, начиная с которой напряжения на емкости превосходят  $3,5 U_{Ф.ном}$ .

6.2.5. Снять, построить и объяснить векторную диаграмму напряжений схемы, т. е. векторную диаграмму для “системы”, “нагрузки” и их взаимоположение, в емкостном режиме (при  $C_0 < C_{кр}$ ). для этого сначала построить звезду напряжений источника, измерив напряжения между точками:  $0'A'$ ;  $0'B'$ ;  $0'C'$ ;  $A'B'$ ;  $A'C'$ ;  $B'C'$ . После этого найти положение точек  $S$  и  $H$  на векторной диаграмме, измерив напряжения между точками:  $A'S$ ;  $B'S$ ;  $C'S$ ;  $0'H$ ;  $0'N$ ;  $C'0$ . для проверки могут быть измерены напряжения между точками  $0'0$ ;  $0'S$  и  $0C$ .

6.2.6. Исследовать характер влияния на перенапряжения заземления нейтрали “нагрузки” через относительно высокоомный резистор  $R$  при  $C_{MФ} = 0$ . Результаты измерений свести в таблицу, аналогичную табл. 6.2, а также представить на графике в виде зависимостей  $U_C = f(C_0)$ ,  $U_L = f(C_0)$ . Дать анализ полученных результатов.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. В отчете следует привести теоретическую часть, объясняющую условия возникновения перенапряжений при несимметричном отключении фаз с необходимыми иллюстрациями.

7.2. Краткое описание модели электрической сети.

7.3. Результаты исследования в виде таблиц, графиков, диаграммы напряжений в соответствии с приведенными указаниями.

7.4. Заключение о работе в целом.

## 8. Контрольные вопросы

1. Каковы условия возникновения перенапряжений при несимметричном отключении фаз?
2. Какова общая схема замещения при несимметричном режиме и как найти графоаналитически возможные режимы работы схемы?
3. Какие режимы работы схемы являются устойчивыми и почему?
4. Как перейти от трехфазной к однофазной схеме замещения при источнике бесконечной мощности и каковы будут однофазные схемы замещения для следующих случаев:
  - а) обрыва одного провода с заземлением в системе с изолированной нейтралью?
  - б) обрыва одного и двух проводов без заземления в системе с заземленной нейтралью?
5. Какие емкости в схеме замещения не влияют на значение перенапряжений при бесконечной мощности источника?
6. Указать местоположение на линии разрыва фазы, при котором перенапряжение на изоляции линии будет наибольшим.
7. Какова будет векторная диаграмма напряжений при обрыве одного провода с заземлением в системе с изолированной нейтралью:
  - а) в индуктивном режиме?
  - б) в емкостном режиме?
8. Как влияет активное сопротивление схемы на перенапряжения и как графоаналитически можно найти возможные режимы работы схемы?
9. Как влияет на перенапряжения индуктивная и активная нагрузки трансформатора?
10. Как влияет мощность трансформатора на перенапряжения из-за обрыва фаз?
11. Каковы меры борьбы с такими перенапряжениями?

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Техника высоких напряжений : учеб. пособ. для вузов / И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др. Под ред. Г.С. Кучинского – СПб: Изд. ПЭИПК, 1998.– 700с.: ил. [Разд. 12.3, с. 394 – 407].
2. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд. –М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464с. [Гл. 29, с. 370 – 376].
3. Техника высоких напряжений / под общ. ред. Д.В. Разевига. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1976. – 488с. [Гл. 21, с. 392 – 414].
4. Лабораторные работы по технике высоких напряжений : учеб. пособие для вузов / М.А. Аронов, В.В. Базуткин, П.В. Борисоглебский и др. – 2-е изд. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с. [Гл. 19, с. 232 – 245].
5. Гуль В.И. Перенапряжения в электрических системах по курсу Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах : конспект лекций / В.И. Гуль – Х.: ХПИ, 1991. – 64 с. [Разд. 3, с. 38 – 46].
6. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 3-х частях. / Л. Р. Нейман, П.Л. Калантаров – М. – Л: Гос. энергетич. изд-во, 1959. – 232 с.
7. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях : учеб. пособ. / В.И. Гуль , В.И. Нижегородский , И.В. Хоменко и др.; под ред. проф. В.И. Гуля – Х.: ЭДЭНА, 2009. – 270с. [Разд. 3, с. 59 – 70].



## Содержание

Вступление.....	3
1. Исследование феррорезонансных перенапряжений при неполнофазных режимах в системах 35...110 кВ.....	3
2. Описание установки .....	14
3. Выбор масштабов моделирования .....	16
4. Определение критической емкости.....	18
5. Материал на предварительную подготовку.....	19
6. Задание на исследование.....	19
7. Содержание отчёта .....	21
8. Контрольные вопросы.....	22
Список источников информации.....	23

## Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторної роботи  
“Дослідження на фізичній моделі перенапруг при несиметричному  
відключенні фаз лінії електропередачі”  
по курсу “Перенапруги в електроенергетичних системах”  
для студентів спеціальності 6.050701 – “Електричні системи та мережі”.

Російською мовою

Упорядники: **НІЖЕВСЬКИЙ** Віктор Іліч  
**БЕРЕЗКА** Сергій Костянтинович

Відповідальний за випуск **В.Є. Бондаренко**  
Роботу до видання рекомендував **Ю.М. Вепрік**

В авторській редакції

План в 2013 р., поз. 30

Підп. до друку 09.04.2013 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,4. Наклад 50 прим.  
Зам. № 188. Ціна договірна.

---

Видавець і виготовлювач  
Видавничий центр НГУ «ХП»,  
вул. Фрунзе, 21, Харків-2, 61002

---

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009р.