МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики и технологии металлов

РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсам «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» всех форм обучения, для студентов направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплины: «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах»

Составил: доцент В.И. Мошкин

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний к выполнению лабораторных работ «Расчёты на персональном компьютере токов симметричных и несимметричных коротких замыканий» по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» / Сост. В.Н. Серебряков — Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. — 32с.

Утверждены на заседании кафедры «27» декабря 2011 г.

Рекомендованы методическим советом университета « 19» октября 2012 г.

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с программой курса «Переходные процессы в электроэнергетических системах», выполняемые на персональном компьютере (ПК) с применением программы математического моделирования физических процессов *Electronics Workbench* пятой версии (*EWB 5.0*).

Указания содержат описание 4 лабораторных работ:

- работа 1 посвящена изучению методики работы на ΠK с программой EWB~5.0 и расчету тока трехфазного короткого замыкания (к.з.) в начальный момент времени (t=0).
- работа 2 расчету на ΠK тока трехфазного к.з. в произвольный момент времени ($t=\tau$).
- работа 3 расчету на ΠK несимметричного к.з. в начальный момент времени при однократной поперечной несимметрии.
- работа 4 расчету на ΠK несимметричного к.з. в произвольный момент при однократной поперечной несимметрии.

Использование программы EWB 5.0 при выполнении лабораторных работ на основе единого индивидуального задания помогает студенту наиболее полно понять методику расчетов симметричных и несимметричных к.з. в схеме конфигурации любой сложности. При этом существенно сокращается время расчетов, так как при моделировании схем замещения на ΠK отсутствует необходимость преобразования их к простейшему виду[6].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ ТОКОВ К.З. НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

1 ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Величины сопротивлений, набираемых на ΠK , в зависимости от характеристики самой сети, могут моделировать ее активные, индуктивные сопротивления и модули полных сопротивлений. В этом случае сопротивления и ЭДС источников могут быть представлены при моделировании на ΠK в виде активных сопротивлений и источников постоянного тока. Если на ΠK набираются сопротивления, содержащие активную и реактивную составляющие, то источники должны быть представлены как источники ЭДС переменного тока соответствующей частоты и начальной фазы.

Если результирующее активное сопротивление схемы замещения относительно места к.з. не менее чем в три раза меньше результирующего индуктивного сопротивления схемы относительно точки к.з., то высоковольтных сетях расчет токов к.з. обычно ведут с учетом только результирующего индуктивного сопротивления схемы.

В сельских электрических сетях очень часто расчет ведут с учетом только результирующего активного сопротивления сети из-за применения стальных проводов и малого сечения проводов из цветного металла.

При замене полного сопротивления элемента сети его активной или индуктивной составляющей при моделировании следует стремиться к тому, чтобы погрешность при измерении тока к.з. на ΠK не превышала 5-10%.

С учетом вышеуказанного, можно дать рекомендации:

- а) в сетях до 1 кВ трансформаторы можно учитывать их индуктивными сопротивлениями, принимая $Z_{\dot{\phi}}=X_{\dot{\phi}}$, а воздушные и кабельные линии активными сопротивлениями, принимая $Z_{\mathcal{I}}=R_{\mathcal{I}}$;
- б) в сетях 6 10 кВ трансформаторы и воздушные линии можно учитывать индуктивными сопротивлениями $Z_T=X_T$ и $Z_{\mathcal{I}}=R_{\mathcal{I}}$, а кабельные линии активными сопротивлениями $Z_{\mathcal{I}}=R_{\mathcal{I}}$;
- в) в сетях напряжением 35кВ трансформаторы и воздушные линии целесообразно учитывать модулями полных сопротивлений Z_T и $Z_{\mathcal{I}}$, однако допускается трансформаторы и воздушные линии с сечением проводов 95мм² и выше учитывать индуктивными сопротивлениями $Z_T = X_T$, $Z_{\mathcal{I}} = X_{\mathcal{I}}$;
- г) в сетях 110 кВ и выше трансформаторы и воздушные линии следует учитывать индуктивными сопротивлениями $Z_{\rm T} = X_{\rm T}$, $Z_{\it J} = X_{\it J}$.

При моделировании на ΠK ЭДС всех источников питания схемы замещения должны быть приведены к основной ступени напряжения сети и иметь фазные значения. Кроме того, сопротивления всех элементов схемы замещения также должны быть приведены к основной ступени напряжения.

2 ПОРЯДОК РАБОТЫ НА ПК С ПРОГРАММОЙ EWB 5.0

2.1 Характеристика программы EWB 5.0

В настоящее время существует ряд программ для схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых электрических и электронных устройств различного назначения.

В данной работе рассматривается применение программы *Electronics Workbench* (версия EWB 5.0), особенностью которой является наличие виртуальных контрольно-измерительных приборов на рабочем поле, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам. При этом после набора схемы замещения на ΠK моделирование начинается щелчком обычного выключателя, расположенного на рабочем поле.

2.2 Структура окна и система меню

Окно программы *EWB* 5.0 [5] содержит поле меню, линейку контрольноизмерительных приборов и линейку библиотек компонентов. В рабочем поле программы располагается моделируемая схема с подключенными к ней иконами контрольно-измерительных приборов и краткое описание на английском языке. При необходимости каждый из приборов может быть развернут для установки его работы и наблюдения результатов.

Рассмотрим команды меню программы *EWB* 5.0.

Меню File

Меню *File* предназначено для загрузки и записи файлов, получения твердой копии выбранных для печати составных частей схемы, а также для импорта/экспорта файлов в форматах других систем моделирования.

1 Первые 4 команды этого меню: *New, Open, Save, Save as...* - типичные для *Windows* команды работы с файлами, и поэтому пояснений не требует.

Схемные файлы программы EWB 5.0 имеют расширение - .ewb.

- 2 Revent to Saved... стирание всех изменений, внесенных в текущем сеансе редактирования, и составления схемы в первоначальном виде.
- 3 *Expoprt to SPICE* составление текстового описания схемы и задания на моделирование в формате *SPICE*.
- 4 *Import from SPICE* импорт текстовых файлов описания схемы и задания на моделирование в формате *SPICE* и автоматическое построение схемы по ее текстовому описанию.
- 5 Print... выбор данных для вывода на принтер: Schematic схемы (опция включена по умолчанию); Description описание к схеме; Part list перечень выводимых на принтер документов; Label list список обозначений элементов схемы; Model list список имеющихся в схеме компонентов; Sub circuits подсхемы (части схемы, являющиеся законченными функциональными узлами и обозначаемыми прямоугольниками с названием внутри); Instruments список приборов.

В этом же подменю можно выбрать опции печати (кнопка Setup). Предусмотрена возможность изменения масштаба выводимых на принтер (кнопка Print). Предусмотрена возможность изменения масштаба выводимых на принтер данных в пределах от 20 до 500%.

- 6 Print Setup... настройка принтера.
- 7 *Exit* –выход из программы.
- 8 *Install*... установка дополнительных программ с гибких дисков.

Меню Edit

Меню Edit позволяет выполнять команды редактирования схем и копирование экрана.

- 1 *Cut* стирание (вырезание) выделенной части схемы с сохранением ее в буфере обмена (*Clipboad*). Выделение одного компонента производится щелчком мыши на его изображении. Для выделения части схемы или нескольких компонентов необходимо поставить курсор мыши в левый угол воображаемого прямоугольника, охватывающего выделяемую часть, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, протянуть курсор по диагонали прямоугольника, контуры которого появляются уже в начале движения мыши, и затем отпустить кнопку. Выделенные компоненты окрашиваются в красный цвет.
 - 2 *Copy* копирование выделенной части схемы в буфер обмена.
 - 3 *Paste* вставка содержимого буфера обмена на рабочем поле программы.
 - 4 *Delete* стирание выделенной части схемы.
 - 5 Select all выделение всей схемы.
- 6 *Copy as Bitmap* команда превращает курсор мыши в крестик, которым по правилу прямоугольника можно выделить нужную часть экрана. После отпускания левой кнопки мыши выделенная часть копируется в буфер обмена.

Копирование всего экрана производится нажатием клавиши $Print\ Screen$: копирование активной в данный момент части экрана, например, диалогового окна — комбинацией $Alt+Print\ Screen$. Команда удобна при подготовке отчетов по моделированию.

Меню Circuit

Меню *Circuit* используется при подготовке схем, а также для задания параметров моделирования.

- 1 *Rotate* поворот выделенного компонента на 90° в направлении против часовой стрелки.
 - 2 Flip Horizontal зеркальное отображение компонента по горизонтали.
 - 3 Flip Vertical то же по вертикали.
- 4 Component Properties (свойства компонента). Команда выполняется также после двойного щелчка по компоненту. При выполнении команды открывается диалоговое окно из нескольких закладок: Label... ввод позиционного обозначения выделенного компонента (например, R1 для резистора, L5 для реактора и т.д.); Value... изменение номинального значения параметра компонента (номинальное значение параметра вводится на клавиатуре нажатием курсором мыши. Например, для конденсатора задается его емкость в пикофарадах

 $(n\Phi)$, нанофарадах $(n\Phi)$, микрофарадах $(m\kappa\Phi)$ или миллифарадах $(m\Phi)$; Model... - выбор модели компонента (полупроводникового прибора, операционного усилителя, трансформатора и др.). Fault - имитация неисправности выделенного компонента путем введения: Leakage - сопротивления утечки; Short - короткого замыкания; Open - обрыва. Команда выполняется также двойным щелчком по компоненту.

- 5 Create *Sub circuit*... преобразование предварительно выделенной части схемы в подсхему.
- 6 Zoom in раскрытие (развертывание) выделенной подсхемы или контрольно-измерительного прибора.
 - 7 Zoom out обратна по действию команде Zoom in.
- 8 Schematic options... выбор элементов оформления схемы; команда состоит из ряда закладок: Show grid показывать сетку для удобства рисования схемы (опция активна только при включенной опции Use grid использовать сетку); Show/hide состоит из ряда закладок: Show labels показывать позиционные обозначения компонентов, например, C1, C2, для конденсаторов; Show models показывать наименование моделей компонентов, например, типов транзисторов; Show values показывать номиналы компонентов, например, сопротивления резисторов; Show nodes показывать номера узлов схемы.

9 Analysis Options... - установка режимов моделирования:

Transient – расчет переходных процессов после включения источника питания (результаты представляются на экране осциллографа в графическом виде); *Steady-state* – расчет стационарного режима (режима по постоянному току); *Assume linear operation* – при расчете переходных процессов принимается линеаризованная модель активных элементов; *Pause after each screen* – пауза после заполнения экрана при выводе на осциллограф; *Store results for all nodes* – вывод результатов для всех контрольных точек (узлов) схемы;

Tolerance — задание допустимой погрешности моделирования (по умолчанию 1%): чем меньше погрешность моделирования, тем больше затраты времени на моделирование; *Time domain points per cycle* — выбор количества отсчетов отображаемого на экране осциллографа сигнала (по умолчанию — 100 точек на период (может быть увеличено в 100 раз). С увеличением количества отсчетов форма сигнала рассчитывается более точно при одновременном замедлении процесса моделирования. В некоторых случаях заниженное (установленное по умолчанию) значение параметра может привести к существенным искажениям результата моделирования.

Меню Windows

Меню Windows содержит следующие команды:

Arrange — упорядочивание информации в рабочем окне EWB путем перезаписи экрана, при этом исправляются искажения изображений компонентов и соединительных проводников;

Sircuit- вывод схемы на передний план;

Description – вывод на передний план описания схемы, если оно имеется, или окно – ярлык для его подготовки (только на английском языке).

Меню Help

Меню *Help* построено стандартным для *Windows* способом. Оно содержит краткие сведения по всем рассмотренным выше командам, библиотечным компонентам и измерительным приборам, а также сведения о самой программе.

2.3 Технология подготовки схем

Прежде чем создать чертеж принципиальной схемы средствами программы EWB 5.0, необходимо на листе бумаги подготовить ее эскиз с примерным расположением компонентов и с учетом возможности оформления отдельных фрагментов в виде подсхем.

В общем случае процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле EWB компонентов из библиотек программы в соответствии с подготовленным эскизом. Тринадцать разделов библиотеки программы EWB 5.0 поочередно могут быть вызваны с помощью меню Windows или с помощью иконок, расположенных под линейкой контрольно-измерительных приборов.

Каталог выбранной библиотеки располагается в вертикальном окне справа или слева о рабочего поля (устанавливается в любое место перетаскиванием стандартным способом – за шапку заголовка).

Для открытия каталога нужной библиотеки необходимо подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз ее левую кнопку.

Необходимый для создания схемы значок (символ) компонента переносится из каталога на рабочее поле программы движением мыши при нажатой левой кнопке. После чего кнопка отпускается (для фиксирования символа) и производится двойной щелчок по значку компонента.

В раскрывающемся диалоговом окне устанавливаются требуемые параметры (сопротивление резистора, тип транзистора и т.д.), и выбор подтверждается нажатием кнопки *Accept* или клавиши *Enter*.

На этом этапе необходимо предусмотреть место для размещения контрольных точек и контрольно-измерительных приборов.

Если в схеме используются компоненты одинакового номинала (например, резисторы с одинаковым сопротивлением), то номинал такого компонента целесообразно задать непосредственно в каталоге библиотеки, и затем переносить компоненты в нужном количестве на рабочем поле. Для изменения номинала компонента необходимо два раза щелкнуть мышью по символу его графического изображения и в раскрывающемся после этого окне внести изменения.

После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу компонента можно подключить только один проводник.

Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после появления круглой точки черного цвета нажимается левая кнопка. Появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такой же точки, после этого кнопка мыши отпускается. Соединение готово.

При необходимости подключения к этим выводам других проводников в библиотеке Passive выбирается точка (символ соединения) и переносится на ранее установленный проводник. Чтобы точка почернела (первоначально она имеет красный цвет), необходимо щелкнуть мышью по свободному месту рабочего поля.

Если эта точка действительно имеет электрическое соединение с проводником, то она полностью окрашивается черным цветом. Если на ней виден след от пересекающего проводника, то электрического соединения нет и точку необходимо установить заново.

Если соединение нужно разорвать, курсор подводится к одному из выводов компонентов или точке соединения и при появлении черной точки нажимается левая кнопка, проводник отводится на свободное место рабочего поля, после чего кнопка отпускается.

Если необходимо подключить вывод к имеющемуся на схеме проводнику, то проводник от вывода компонента курсором подводится к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопка мыши отпускается. Следует отметить, что прокладка соединительных проводников производится автоматически, причем препятствия – компоненты и другие проводники - огибаются по ортогональным направлениям (по горизонтали или вертикали).

Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка и после появления в вертикальной или горизонтальной плоскости двойного курсора производятся нужные перемещения.

Подключение к схеме контрольно-измерительных приборов производится аналогично. Причем для таких приборов, как осциллограф или логический анализатор, подсоединения целесообразно проводить цветными проводниками, поскольку их цвет определяет цвет соответствующей осциллограммы.

В заключении данного параграфа отметим, что работа на персональном компьютере с программой *EWB 5.0* проще работы при моделировании расчетных схем на расчетных столах постоянного и переменного тока. Эта работа быстрее и гораздо эффективнее с точки зрения экономии времени, сокращения числа предварительных процедур и практически неограниченных возможностей по числу применения активных и пассивных элементов схемы замещения.

В качестве примера применения программы EWB 5.0 на рис. 1,2 и 3 приведены, соответственно: расчетная схема электрической системы, ее схема замещения с приведением параметров всех элементов к основной ступени напряжения (6 кВ) при расчете трехфазного к.з. в точке K для момента времени t=0 и набор схемы замещения на ΠK .

Исходные данные:

генераторы
$$\Gamma_1(\text{T}\Gamma)$$
: $S_{HOM}=75\,\text{MB·A}$; $X_d^{''}=0,143\,\text{o.e.}$; $X_2=0,15\,\text{o.e.}$;
$$I_{*(0)}=k_3=1\;;\;\cos\phi_{HOM}=0,85\;;\;I_{*f(0)}=2,0\,\text{o.e.};\;\;\;\Gamma_2(\Gamma\Gamma)\;:\;S_{HOM}=67,3\,\text{MB·A};$$

$$X_{*d}^{"}=0.29 \text{ o.e.}; \ X_{2}=0.35 \text{ o.e.}; \ I_{*(0)}=k_{3}=1; \ \cos \phi_{HOM}=0.85; \ I_{*f(0)}=1.6 \text{ o.e.}; \ X_{0}=0.06;$$

трансформаторы T_1 : $S_{HOM}=80\,\mathrm{MB\cdot A}$; $u_{K}=10,5\%$; T_3 : $S_{HOM}=80\,\mathrm{MB\cdot A}$; $u_{K}=12\%$; T_2 : $S_{HOM}=160\,\mathrm{MB\cdot A}$; $u_{KBC}=11\%$; $u_{KBH}=18\%$; $u_{KCH}=6\%$; нагрузки H_1 : $S_{HOM}=20\,\mathrm{MB\cdot A}$; H_2 : $S_{HOM}=100\,\mathrm{MB\cdot A}$; H_3 : $S_{HOM}=40\,\mathrm{MB\cdot A}$.

Примечание. Все генераторы типовые с автоматическим регулированием возбуждения (APB). Для генераторов приведены данные, которые необходимы для последующих расчетов симметричного и несимметричного режимов.

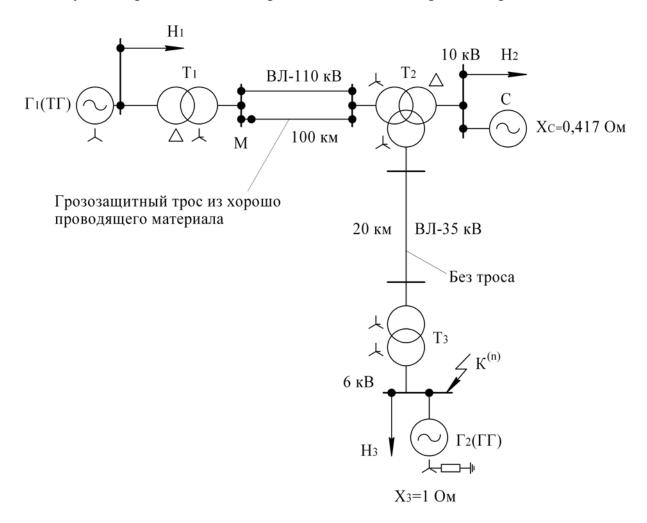


Рисунок 1 – Исходная расчетная схема электроснабжения

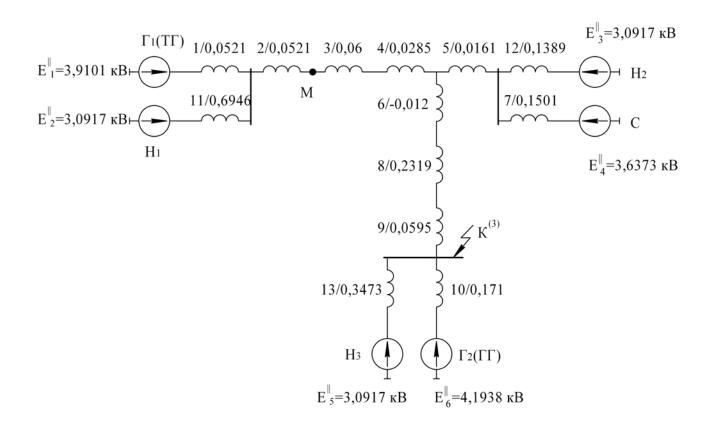


Рисунок 2 — Схема замещения при расчете трехфазного к.з. в точке K в начальный момент времени переходного процесса

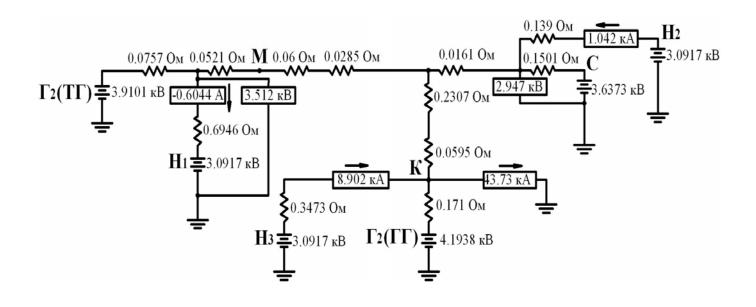


Рисунок 3 — Набор схемы замещения с результатами моделирования при расчете трехфазного к.з. в точке K в начальный момент времени переходного процесса при использовании программы $EWB \ 5.0$

Лабораторная работа 1

РАСЧЕТ ТОКА ТРЁХФАЗНОГО К.З. В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДИКИ РАБОТЫ НА ПК С ПРОГРАММОЙ EWB 5.0

Цель работы: освоить методику работы на ПК с программой EWB 5.0 при расчёте тока трёхфазного к.з. в начальный момент времени.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Рабочее задание

Для расчетной схемы, выданной преподавателем, необходимо выполнить:

- а) составить схему замещения для расчета тока трехфазного к.з. в начальный момент времени в заданной точке K;
- б) рассчитать параметры элементов схемы замещения в именованных единицах, приведенные к основной ступени напряжения;
 - в) набрать схему замещения на ΠK ;
 - г) измерить токи в ветвях источников, нагрузок и в месте к.з.;
 - д) рассчитать мощность трехфазного к.з.

Для успешного выполнения задания студенту нужно знать содержание и повторить теоретический материал [1] в следующем объеме:

- 1) система относительных единиц, §§ 2, 3;
- 2) составление схемы замещения, способы расчета и приведения сопротивлений элементов схемы замещения к основной ступени напряжения точно и приближенно, §§ 2, 4;
- 3) расчет сверхпереходного и ударного токов к.з., § 6.6.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Приступая к выполнению работы на ПК, необходимо предварительно изучить методику работы на ПК с программой EWB 5.0.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При выполнении лабораторных работ расчет сопротивлений элементов схемы замещения осуществляется в именованных единицах по формулам[1;2]:

линия:
$$X_{\mathcal{I}} = X_0 \cdot \ell \frac{U_{OCH.CT}^2}{U_{CP.CT}^2}$$
, Ом; (1)

трансформатор:
$$Z_T = \frac{u_K \%}{100} \cdot \frac{U_{OCH.CT}^2}{S_{HOM.T}}$$
, Ом; (2)

реактор:
$$X_P = \frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM.P} U_{OCH.CT}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{HOM.P} \cdot U_{CP.CT}^2}$$
, Ом; (3)

обобщенная нагрузка
$$X_{H\Gamma} = \underset{*}{X}_{H\Gamma} \cdot \frac{U_{OCH.CT}^2}{S_{H\Gamma}}$$
, Ом; (4)

генератор:
$$X_{\Gamma} = \underset{*}{X}_{\Gamma} \cdot \frac{U_{OCH.CT}^2}{S_{HOM.\Gamma}}$$
, Ом, (5)

где X_0- удельное индуктивное сопротивление линии длиной ℓ , Ом/км;

 U_{OCHCT} – линейное напряжение основной ступени, кВ;

 $U_{\mathit{CP.CT}}$ — среднее линейное напряжение ступени, на которой находится линия, кВ;

 $u_{\scriptscriptstyle K}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

 $S_{HOM.T}$, $S_{HOM.\Gamma}$, $S_{H\Gamma}$ — полная номинальная мощность трансформатора, генератора и обобщенной нагрузки соответственно, MB·A;

 $X_* \Gamma$, $X_{*H\Gamma}$ — относительное сопротивление генератора и обобщенной нагрузки для рассматриваемого момента времени соответственно, о.е.;

 X_{P} – индуктивное сопротивление реактора, %;

 $U_{HOM.P}$ — линейное номинальное напряжение реактора, кВ;

 $I_{HOM,P}$ – номинальный ток реактора, к \mathbf{A} .

ЭДС генератора (фазная) для рассматриваемого момента времени к.з. при моделировании на ПК определяют по приближённому выражению

$$E_{\Gamma} = (1 + I_{*(0)} \cdot X_{\Gamma} \cdot \sin \varphi_{HOM}) \cdot \frac{U_{OCH.CT}}{\sqrt{3}}, \, \kappa B, \tag{6}$$

где ϕ_{HOM} — угол сдвига между векторами тока и напряжения генератора при номинальном режиме его работы;

 $I_{*^{(0)}} = k_3^{}$ – коэффициент нагрузки генератора в исходном режиме.

Мощность любого вида к.з. для моментов времени t=0 и $t\neq 0$ рассчитываем по формулам, соответственно:

$$S_K^{(n)} = \sqrt{3} \cdot I_{\Pi,O}^{(n)} \cdot U_{CP}; \quad S_{Kt}^{(n)} = \sqrt{3} \cdot I_{\Pi t}^{(n)} \cdot U_{CP}, \tag{7}$$

где n – характеризует вид к.з. (n = (2); (1); (1.1)).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При работе с программой EWB 5.0 суммарная погрешность измерения определяется в основном двумя составляющими: методической и инструментальной. Методическая погрешность обычно равна 5-10% (из-за замены модулей полных сопротивлений их активными или индуктивными составляющими и неучета точных значений коэффициентов трансформации); инструментальная погрешность, обусловленная точностью результатов моделирования, показывае-

мых на шкалах измерительных проборов (четыре значащие цифры на дисплее прибора), не превышает 0.1%.

Следовательно, измеренная величина тока или напряжения может быть представлена в виде: $X(\kappa A)$, Δ от -10%X до +10%X, с вероятностью P=0,95, где X – показания прибора, например, в кA; Δ – суммарная погрешность измерения, кA.

Таким образом, истинное значение измеряемого тока (напряжения) с вероятностью 0,95 находятся в интервале: $0.9X \le X \le I$, IX (так как инструментальной погрешностью практически можно пренебречь).

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) расчетную схему системы электроснабжения с исходными данными и расчет параметров схемы замещения в именованных единицах;
 - 4) схему замещения, набранную на ΠK , с результатами моделирования;
- 5) таблицу результатов измерений токов и напряжений в характерных ветвях и узлах схемы замещения;
- 6) оценку полученных результатов в зависимости от величины мощностей нагрузок и удаленности их относительно места к.з.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Перечислите основные меню программы EWB 5.0 и поясните их основные функции.
 - 2 Как на ПК осуществляется набор сопротивлений и ЭДС источников?
- 3 Как осуществляется связь между отдельными элементами схемы замещения, набранной на ΠK ?
- 4 Порядок измерения напряжений на ΠK между любыми точками набранной схемы замещения.
- 5 Методика определения масштаба напряжений, сопротивлений и токов при моделировании схем замещения на ΠK .
 - 6 Общий порядок производства измерений на ПК.

Лабораторная работа 2

РАСЧЕТ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЗАДАННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

Цель работы: Освоить методику расчета на ΠK тока трехфазного к.з. в заданный момент времени в расчетной схеме любой сложности.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Рабочее задание

Для заданной расчетной схемы (рис. 1) необходимо выполнить:

- а) с учетом указанного практического метода расчета составить схему замещения для расчета тока трехфазного к.з. в точке K в момент времени t;
- б) рассчитать параметры элементов схемы замещения в именованных единицах, приведенные к основной ступени напряжения;
 - в) набрать схему замещения на ΠK ;
 - Γ) измерить токи в ветвях источников, нагрузок, в точке M и в месте к.з.;
- д) измерить напряжения в точках M и K и определить их истинные значения (при наличии трансформаторов в расчетной схеме).

Для успешного выполнения задания студент должен знать содержание теоретического материала в следующем объеме:

- метод расчетных кривых [1, §10-4, §10-5];
- 2) метод спрямленных характеристик [1, §10-6; 2, §8-4];
- 3) метод типовых кривых [2, §8-3; 3, с. 62-72].

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Приступая к выполнению работы на ΠK , следует предварительно изучить методику работы с программой EWB 5.0 на ΠK .

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В практических расчетах тока трехфазного к.з. в произвольный момент времени используют практические (графоаналитические) методы расчета, а именно: метод расчетных кривых, метод спрямленных характеристик и метод типовых кривых.

Рассмотрим особенности применения каждого практического метода расчета на конкретных примерах.

1 Метод расчетных кривых

В методе расчета кривых все нагрузки, удаленные от места к.з., должны быть отброшены. При этом влияние нагрузки, непосредственно подключенной к месту к.з., учитывается отдельно и только для начального момента времени переходного процесса (t=0).

Сопротивления источников вводятся в схему замещения своими сверхпереходными значениями.

В этом методе не учитывается различие значений ЭДС источников. Поэтому при моделировании источников значения их ЭДС вводят величиной, равной среднему фазному напряжению основной ступени.

Таким образом, в соответствии с данными примера (рисунок 1) схема замещения с результатами моделирования, набранная на ΠK , будет иметь вид (рис. 4).

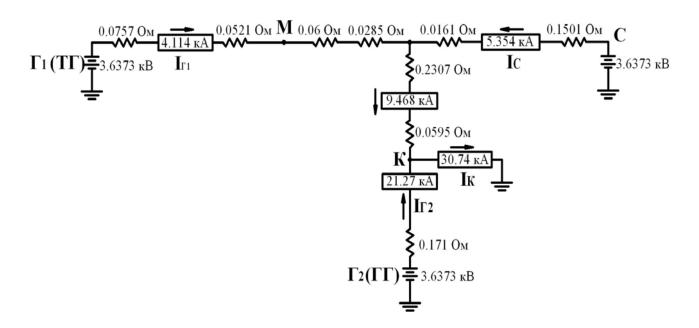


Рисунок 4 — Схема замещения с результатами моделирования при расчете тока трехфазного к.з. методом расчетных кривых (по данным примера на рисунке 1)

Зная значения фазных ЭДС источников и величину тока к.з. в точке K, определяем результирующее сопротивление прямой последовательности всей схемы $X_{1\Sigma}^{(3)}$ относительно точки K:

$$X_{1\Sigma}^{(3)} = \frac{E_{CP}}{I_{TLO}} = \frac{3,6373}{30,74} = 0,1183 \,\text{Om}.$$

При этом коэффициенты долевого участия каждого источника из трёх в общем токе к.з. будут такими:

$$C_{\Gamma 1} = \frac{I_{\Gamma 1}}{I_{\Pi \Omega}} = \frac{4,114}{30,74} = 0,1338$$
; $C_{\Gamma 2} = \frac{21,27}{30,74} = 0,6919$; $C_C = \frac{5,354}{30,74} = 0,1741$.

Определим расчетные относительные сопротивления ветвей генераторов:

a)
$$\Gamma_1: X_{PACY.(\Gamma 1)}^{(3)} = \frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{C_{\Gamma 1}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma 1)}}{U_{CP}^2} = \frac{0,1183}{0,1338} \cdot \frac{75}{6,3^2} = 1,6707 \text{ o.e.};$$

δ)
$$\Gamma_2$$
: $X_{PACY.(\Gamma 2)}^{(3)} = \frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{C_{\Gamma 2}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma 2)}}{U_{CP}^2} = \frac{0,1183}{0,6919} \cdot \frac{67,3}{6,3^2} = 0,28899 ≈ 0,29 \text{ o.e.}$

Видим, что расчетные реактивные сопротивления генераторов меньше трёх, следовательно, нужно обратиться к графикам расчетных кривых [1] для определения относительных величин токов, посылаемых генераторами к месту к.з. в заданный момент времени t.

Пусть требуется определить ток трехфазного к.з. в момент времени t = 2c. Тогда по графику расчетных кривых для турбогенераторов с автоматическим регулированием возбуждения (*APB*) с учетом расчетного реактивного сопротивления $X_{PACY.(\Gamma 1)}^{(3)} = 1,6707$ о.е. находим относительный ток генератора Γ_1 :

$$I_{*\Pi.t.\Gamma1}^{(3)} = 0,65 \text{ o.e.}$$

По графику расчетных кривых для гидрогенераторов с APB с учетом реактивного сопротивления $\underset{*}{X}_{PACY.(\Gamma 2)}^{(3)} + \Delta \underset{*}{X} = 0,29 + 0,07 = 0,36$ о.е. находим ток генератора Γ_2 :

$$I_{*}^{(3)}_{\Pi,t,\Gamma_2} = 2,7 \text{ o.e.}$$

Примечание. Увеличение расчетного реактивного сопротивления генератора Γ_2 на $\Delta X = 0.07$ о.е. учитывает влияние демпферных обмоток на роторе.

Определим номинальные токи генераторов, приведенные к основной ступени напряжения схемы замещения (6 кВ):

$$\overset{\circ}{I}_{HOM(\Gamma 1)} = \frac{S_{HOM}}{\sqrt{3} \cdot U_{CP}} = \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 6,8732 \text{ KA};$$

$$\overset{\circ}{I}_{HOM(\Gamma 2)} = \frac{67,3}{\sqrt{3} \cdot U_{CP}} = 6,1676 \text{ KA}.$$

2 Метод типовых кривых

В методе типовых кривых все нагрузки могут быть отброшены.

Параметры источников (ЭДС и сопротивления) вводятся в схему замещения своими сверхпереходными значениями (для момента времени t=0).

В соответствии с данными примера (рисунок 1) схема замещения, набранная на ΠK , будет иметь вид (рис. 5). Значения ЭДС генераторов в сверхпере-

ходном режиме (фазные величины), вводимые в схему замещения на основной ступени напряжения, будут равны:

$$\begin{split} E_{\varGamma 1}^{/\prime} &= (1 + I_{*(0)} \cdot X_{*d}^{/\prime} \cdot \sin \varphi_{HOM}) \cdot U_{\varPhi \cdot CP} = (1 + 1 \cdot 0.143 \cdot 0.527) \cdot 3.6373 = 3.91 \, \text{kB}; \\ E_{\varGamma 2}^{/\prime} &= (1 + 1 \cdot 0.29 \cdot 0.527) \cdot 3.6373 = 4.1932 \, \text{kB}; \ E_C = 3.6373 \, \text{kB}. \end{split}$$

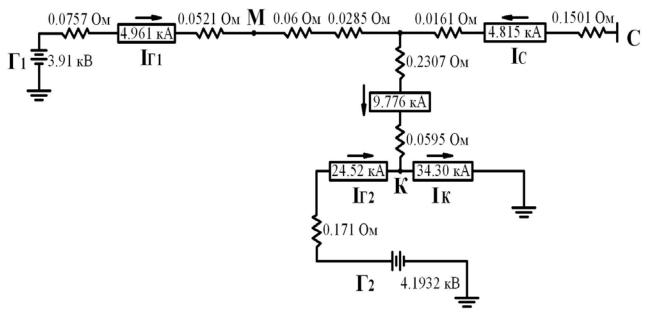


Рисунок 5 — Схема замещения с результатами моделирования при расчете тока трехфазного к.з. в момент времени t=2c методом типовых кривых (по расчётной схеме, рисунок 1)

Согласно результатам моделирования (рисунок 5) видим, что сверхпереходный ток генератора Γ_1 оказался меньше его номинального значения.

Следовательно, суммарный ток, посылаемый генератором Γ_1 и системой C, равный 9,776кA, не изменяется во времени.

Для генератора
$$\Gamma_2$$
 по удаленности: $\frac{I_{\Pi.O.\Gamma2}}{I_{HOM.\Gamma2}} = \frac{24,52}{6,1676} = 3,976 \approx 4$ и графи-

кам типовых кривых [2] определяем степень снижения γ_{τ} тока генератора Γ_2 к моменту времени t=2 c при трехфазном к.з.: $\gamma_{\tau}=0,7$.

Таким образом, ток трехфазного к.з. в момент времени t=2 c будет равен:

$$I_{\Pi t}^{(3)} = I_{\Gamma 1-C} + I_{\Pi,\tau \Gamma 2} = 9,776 + 0,7 \cdot 24,52 = 26,94 \text{ kA}.$$

3 Метод спрямленных характеристик

В методе спрямленных характеристик все нагрузки вводятся в схему замещения параметрами, соответствующими времени к.з. $t = \infty$.

ЭДС и сопротивления источников с APB вводятся в схему замещения с учетом предварительно принятого для них режима работы во время установившегося к.з.: режима нормального напряжения (РНН) или режима предельного возбуждения (РПВ).

По условиям примера (рис. 1) и графикам спрямленных характеристик [2] турбогенераторов с APB определяем относительные ЭДС E_t и реактивное сопротивление X_t для генератора Γ_1 в момент времени к.з. t = 2 c:

$$E_{t(\Gamma_1)} = 1,83 \text{ o.e.}; X_{t(\Gamma_1)} = 0,625 \text{ o.e.}$$

Определяем параметры критического режима Г1 на основной ступени:

$$X_{KPt(\Gamma 1)} = \frac{X_{t(\Gamma 1)}U_H}{E_{t(\Gamma 1)} - U_H} \cdot \frac{U_{CP}^2}{S_{HOO}} = \frac{0,625 \cdot 1}{1,83 - 1} \cdot \frac{6,3^2}{75} = 0,3985 \text{ Om};$$

$$I_{KPt(\Gamma 2)} = \frac{3,6373}{0,4681} = 7,7703 \text{ KA}.$$

Так как генератор Γ_1 электрически значительно удален от места к.з., то предварительно принимаем для него режим *PHH*. Для генератора Γ_2 принимаем режим *P*ПВ из-за наличия трехфазного к.з. непосредственно на его шинах.

С учетом принятых режимов генераторов составляем схему замещения, приведенную на рис. 6.

По результатам моделирования (рис. 6) видим, что ток генератора Γ_1 будет $I_{Kt(\Gamma 1)}=9,026$ кА в режиме трехфазного к.з. в момент времени t=2 c и этот ток меньше его критического тока $I_{KPt}=9,1275$ кА. Следовательно, генератор Γ_1 действительно находится в режиме PHH. Тогда ток трехфазного к.з. в точке К в момент времени t=2 c будет равен:

$$I_{\Pi.t}^{(3)} = 29,00 \,\mathrm{kA}.$$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты измерений обрабатываются согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе 1 данных методических указаний.

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) расчетную схему системы электроснабжения с исходными данными и расчет параметров схемы замещения в именованных единицах;
- 4) схему замещения, набранную на ΠK , с учетом заданного метода расчета тока трехфазного к.з.;
- 5) таблицу результатов измерений токов и напряжений в характерных ветвях и узлах схемы замещения;

6) проверку правильности принятых режимов генераторов (для метода спрямленных характеристик) и в случае необходимости уточнение результатов расчета тока к.з.

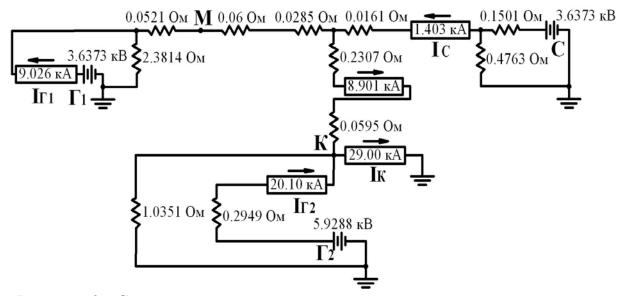


Рисунок 6 — Схема замещения с результатами моделирования при расчете тока трехфазного к.з. в момент времени t=2 c по методу спрямленных характеристик (по данным примера, рисунок 1)

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Основные положения метода расчетных кривых при расчете тока трехфазного к.з. в заданный момент времени t с учетом индивидуального влияния каждого источника.
- 2 Основные положения метода типовых кривых при расчете тока трехфазного к.з. в заданный момент времени t при отсутствии и наличии питающей системы неограниченной мощности.
- 3 Основные положения метода спрямленных характеристик при расчете тока трехфазного к.з. в заданный момент времени t.
- 4 Как осуществляется проверка правильности принятых режимов генераторов при расчете тока к.з. методом спрямленных характеристик по результатам моделирования на ΠK ?
- 5 Как определить приближенное значение сопротивления системы, если известна мощность отключения выключателя, установленного на ее шинах?
 - 6 Поясните, как определить удаленность генератора Γ_1 от места к.з.
- 7 Перечислите возможные режимы работы генератора во время установившегося к.з.
- 8 Запишите условия нахождения генератора, работающего при установившемся к.з., в режиме РНН .

Лабораторная работа 3

РАСЧЕТ ТОКА НЕСИММЕТРИЧНОГО К. 3. В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОКРАТНОЙ ПОПЕ-РЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Цель работы: освоить методику расчета с помощью ПК фазных токов и напряжений при несимметричном к.з. в начальный момент времени (t=0) в расчетной схеме любой сложности.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Рабочее задание

Для заданной расчетной схемы необходимо выполнить:

- а) составить комплексную схему замещения для расчета тока несимметричного к.з. в начальный момент времени в заданной точке K;
- б) рассчитать параметры элементов схем замещения прямой, обратной, а при замыкании на землю, и нулевой последовательностей в именованных единицах; привести эти параметры к основной ступени напряжения;
 - в) набрать комплексную схему замещения на ΠK ;
- Γ) измерить токи прямой, обратной, а при замыкании на землю и нулевой последовательной фазы A в комплексной схеме замещения;
- д) в месте к.з. измерить напряжения прямой, обратной, а при замыкании на землю и нулевой последовательностей фазы A;
- е) в заданной точке M измерить токи и напряжения прямой, обратной, а при замыкании на землю и нулевой последовательностей фазы A;
- ж) рассчитать в месте к.з. токи и напряжения фаз для начального момента времени при несимметричном к.з. в точке K;
- 3) рассчитать в точке M токи и напряжения фаз для начального момента времени при несимметричном к.з. в точке K;
- и) по результатам измерений и расчета построить векторные диаграммы фазных токов и напряжений в точках K и M в начальный момент времени при несимметричном к.з. в точке K;
- к) рассчитать полную мощность несимметричного к.з. для начального момента времени переходного процесса;
- л) дать оценку влияния удаленности точки M относительно места к.з. на параметры режима по току и напряжению в этой точке при несимметричном к.з. в точке K.

Для успешного выполнения задания студент должен знать содержание теоретического материала [1] в следующем объеме:

1) метод симметричных составляющих [$\S11-3$]; 2) параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей [$\S\S12-1\div12-8$]; 3) схемы замещения отдельных последовательностей [$\S\S13-1\div13-5$]; 4) анализ отдельных видов к.з. при однократной поперечной несимметрии [$\S\S14-1\div14-9$].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Расчет фазных токов и напряжений в заданной точке электрической системы при несимметричном к.з. наиболее просто можно выполнить, используя метод симметричных составляющих.

При использовании расчетных столов постоянного и переменного тока или ΠK для этой цепи удобно применять комплексные схемы замещения исследуемой системы для рассматриваемого вида к.з.

В этом случае схемы замещения электрической системы для отдельных последовательностей объединяются в одну комплексную схему замещения в зависимости от вида несимметричного к.з. (см. рисунок 7).

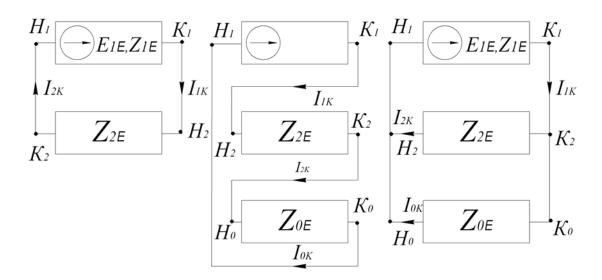
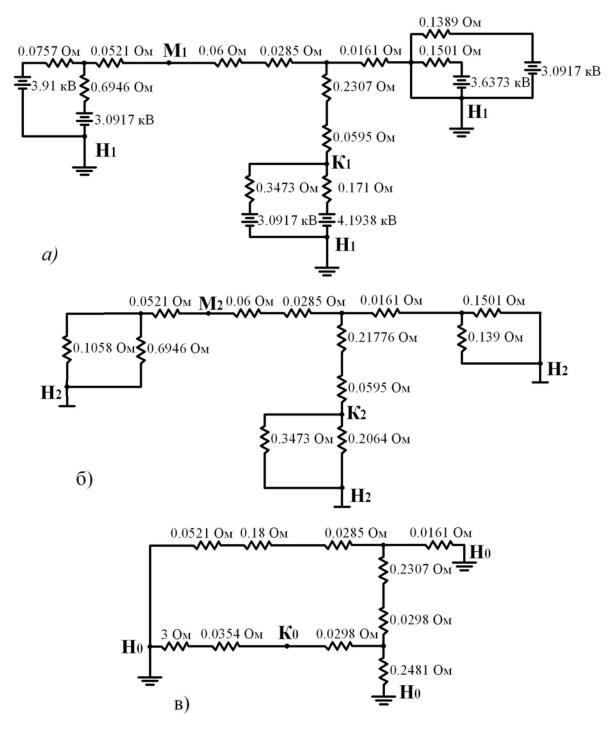


Рисунок 7 — Структура комплексных схем замещения в зависимости от вида к.з. a- для двухфазного к.з.; б- для однофазного к.з.; b- для двухфазного к.з. на землю

В качестве примера на рисунке 8 приведены схемы замещения для начального момента времени к.з. (t=0), набираемые на ΠK : прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей электрической системы при однофазном к.з. на землю в точке K, а на рисунке 9 — комплексная схема замещения (по данным примера на рисунке 1).



а – прямой последовательности; б – обратной последовательности; в – нулевой последовательности

Рисунок 8 — Схемы замещения при однофазном к.з. в точке K в начальный момент времени переходного процесса (по данным примера, рисунок 1)

При составлении схем замещения отдельных последовательностей нужно учитывать следующее:

а) схема замещения прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета симметричного режима. В зависимости

от рассматриваемого момента времени t и принятого практического метода расчета генераторы, двигатели и нагрузки вводятся в схему замещения своими соответствующими сопротивлениями и ЭДС. Все элементы схемы замещения снабжаются индексом «1»;

- б) схема замещения обратной последовательности по конфигурации близка схеме прямой последовательности. Отличие состоит в том, что она не содержит ЭДС источников питания, имеет соответствующие параметры для вращающих машин и в общем случае содержит сопротивления нагрузок. Элементы схемы замещения снабжаются индексом «2». В схеме зачастую не учитывают нагрузки, если их мощности на порядок и более меньше мощностей источников;
- в) конфигурация схемы замещения нулевой последовательности определяется возможными путями растекания токов нулевой последовательности, зависит также от группы соединения обмоток трансформаторов (автотрансформаторов); построение схемы замещения нулевой последовательности следует начинать, двигаясь от точки к.з. Все элементы схемы замещения снабжаются индексом «0». Следует помнить, что элементы (реакторы, резисторы), включенные в нейтраль трансформаторов (генераторов), вводятся в схему замещения утроенной величиной сопротивления.

Определение тока несимметричного к.з. вида п производят по выражению:

$$I_{\Pi,0}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{A1}^{(n)}, \tag{8}$$

где $m^{(n)}$ – постоянный множитель (модуль), зависящий от вида к.з.:

$$m^{(3)} = 1; \ m^{(2)} = \sqrt{3}; \ m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma} / (X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma})^2};$$
 (9)

 $I_{A1}^{(n)}$ — ток прямой последовательности фазы A при к.з. вида n.

Таким образом, начальный ток однофазного к.з. на землю в точке K для условий примера (рис. 1) будет равен:

$$I_{\Pi.0}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{A1}^{n(1)} = 3.9,54 = 28,962 \text{ kA}.$$

Если не учитывать активные сопротивления элементов расчетной схемы, то векторы симметричных составляющих токов и напряжений фазы A (особая фаза) в месте к.з. расположены по одной оси (для токов – по действительной оси, а для напряжений – по мнимой). Тогда зная в месте к.з. модули симметричных составляющих токов и напряжений фазы A, можно определить токи и напряжения других фаз путем построения векторных диаграмм.

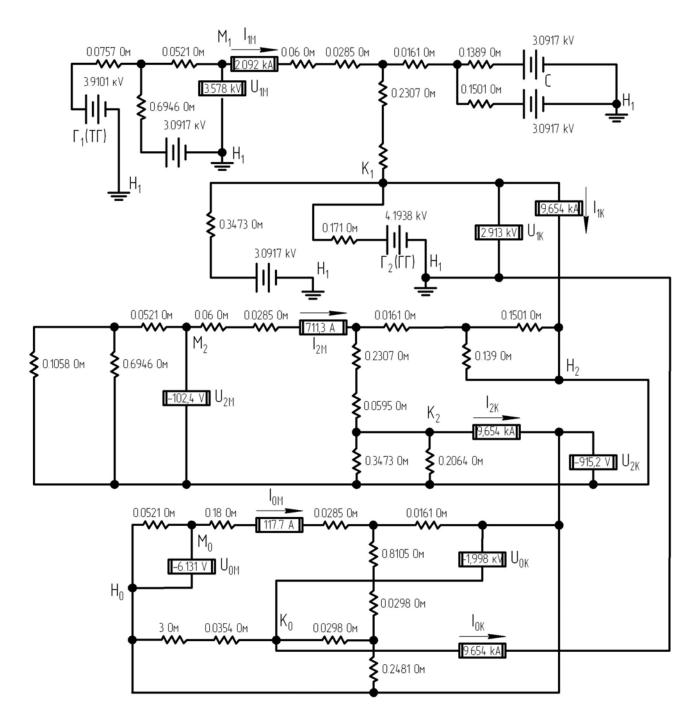


Рисунок 9 — Комплексная схема замещения с результатами моделирования при однофазном к.з. в точке *К* в начальный момент времени переходного процесса (по данным примера на рисунке 1)

На рисунках 10 и 11 приведены примеры такого построения для токов и напряжений в месте к.з. при однофазном коротком замыкании.

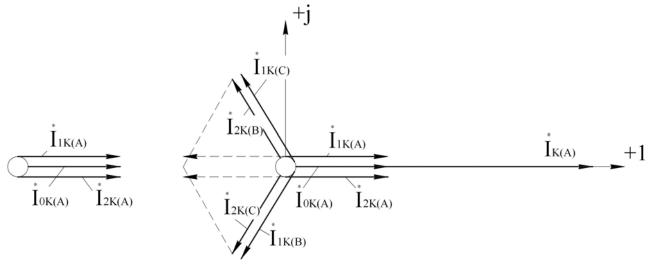


Рисунок 10 – Пример построения векторной диаграммы фазных токов в месте к.з. при однофазном коротком замыкании

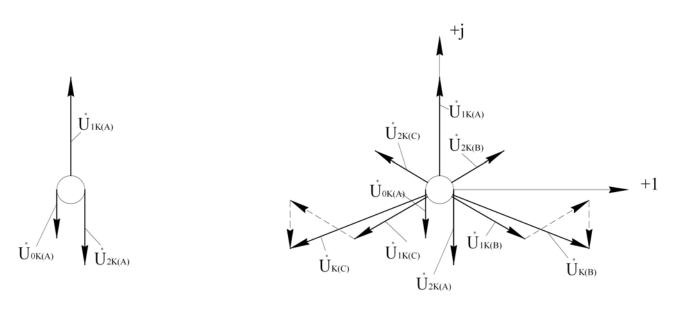


Рисунок 11 – Пример построения векторной диаграммы фазных напряжений в месте к.з. при однофазном коротком замыкании

При аналитическом расчете по методу симметричных составляющих токи и напряжения фаз определяют по известным выражениям:

$$\dot{I}_{A} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \ \dot{I}_{B} = a^{2} \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \ \dot{I}_{C} = a \cdot \dot{I}_{A1} + a^{2} \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \ a = e^{j120^{\circ}};
\dot{U}_{A} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \ \dot{U}_{B} = a^{2} \cdot \dot{U}_{A1} + a \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \ \dot{U}_{C} = a \cdot \dot{U}_{A1} + a^{2} \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}. \tag{10}$$

Симметричные составляющие напряжения фазы A в точке M будем определять расчетным путем, двигаясь от точки к.з., с учетом следующего:

1) в схеме замещения прямой последовательности потенциалы увеличиваются по абсолютной величине по мере приближения к источникам, навстречу току, а в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей потенциалы соответственно снижаются;

2) при переходе через трансформаторы по пути от места к.з. к заданной точке M, учитываются угловые сдвиги составляющих векторов токов и напряжений прямой и обратной последовательностей (трансформация симметричных составляющих). Так, при переходе через трансформатор со стороны треугольника на сторону звезды, обмотки которого соединены по схеме и группе Y/Δ -11, векторы прямой последовательности поворачиваются на -30° (в сторону отставания, т.е. вращения по часовой стрелке), а векторы обратной последовательности — на $+30^{\circ}$ в обратном направлении (в сторону опережения по фазе)[1, гл. 13, §5].

Рассчитаем по данным измерений (см. рисунок 9) напряжения и токи фаз в точках K и M в начальный момент времени однофазного к.з. в точке K по формулам (10):

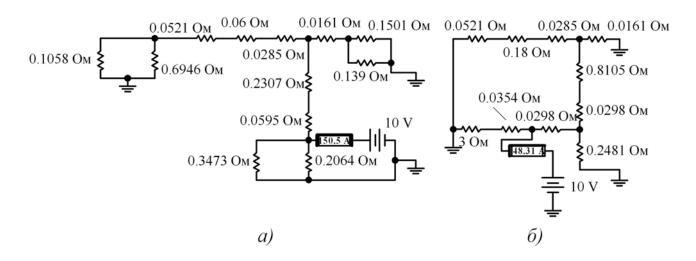
$$\begin{split} \dot{U}_{K(A)}^{(1)} &= \dot{U}_{1K} + \dot{U}_{1K} + \dot{U}_{0K} = j2,913 - j0,9198 - j1,998 = 0 \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{K(B)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{U}_{1k} + a \cdot \dot{U}_{1k} + \dot{U}_{0k} = e^{j240^\circ} \cdot j2,913 + \\ &+ e^{j120^\circ} \cdot (-j0,9152) - j0,9198 - j1,998 = 4,47e^{-j42,11^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{K(C)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{U}_{1k} + a \cdot \dot{U}_{1k} + \dot{U}_{0k} = e^{j120^\circ} \cdot j2,913 + \\ &+ e^{j240^\circ} \cdot (-j0,9152) - j0,9198 - j1,998 = 4,47e^{-j22,11^\circ} \, \text{kB}. \\ \dot{I}_{H,0(A)}^{(1)} &= m^{(1)} \cdot \dot{I}_{A1}^{(1)} = 3 \cdot 9,654 = 28,962 \, \text{kA}; \\ \dot{I}_{H,0(B)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = e^{j240^\circ} \cdot 9,654 + e^{j120^\circ} \cdot 9,654 + 9,654 = 0 \, \text{kA}; \\ \dot{I}_{H,0(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{I}_{A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = e^{j120^\circ} \cdot 9,654 + e^{j240^\circ} \cdot 9,654 + 9,654 = 0 \, \text{kA}; \\ \dot{U}_{M(A)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M} + \dot{U}_{2M} + \dot{U}_{0M} = (j3,578 - j0,1024 - j0,0061) \cdot \frac{115}{6,3} = j63,332 \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{M(B)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{U}_{1M} + a \cdot \dot{U}_{2M} + \dot{U}_{0M} = \\ &= \left\{ e^{j240^\circ} \cdot j3,578 + e^{j120^\circ} \cdot (-j0,1024) - j0,0061 \right\} \cdot \frac{115}{6,3} = 66,317e^{-j28,69^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{M(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{U}_{1M} + a^2 \cdot \dot{U}_{2M} + \dot{U}_{0M} = \\ &= \left\{ e^{j120^\circ} \cdot j3,578 + e^{j240^\circ} \cdot (-j0,1024) - j0,0061 \right\} \cdot \frac{115}{6,3} = 66,317e^{j28,69^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{I}_{M(A)}^{(1)} &= \dot{I}_{1M} + \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = (2,092 + 0,1177) \cdot \frac{6,3}{6,3} = 66,317e^{j28,69^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{I}_{M(B)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{I}_{1M} + a \cdot \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = \\ &= (e^{j240^\circ} \cdot 2,092 + e^{j120^\circ} \cdot 0,7113 + 0,1177) \cdot \frac{6,3}{115} = 0,096e^{j222,97^\circ} \, \text{kA}; \\ \dot{I}_{M(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{I}_{1M} + a^2 \cdot \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = \\ &= (e^{j240^\circ} \cdot 2,092 + e^{j120^\circ} \cdot 0,7113 + 0,1177) \cdot \frac{6,3}{115} = 0,096e^{j222,97^\circ} \, \text{kA}; \\ \dot{I}_{M(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{I}_{1M} + a^2 \cdot \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = \\ &= (e^{j240^\circ} \cdot 2,092 + e^{j120^\circ} \cdot 0,7113 + 0,1177) \cdot \frac{6,3}{115} = 0,096e^{j222,97^\circ} \, \text{kA}; \\ \dot{I}_{M(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{I}_{1M} + a^2 \cdot \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = \\ &= (e^{j240^\circ} \cdot 2,092 + e^{j120^\circ} \cdot 0,09113 + e^{j240^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{I}_{M(C)}^$$

$$= \left\{ e^{j120^{\circ}} \cdot 2,092 + e^{j240^{\circ}} \cdot 0,7113 + 0,1177 \right\} \cdot \frac{6,3}{115} = 0,096e^{j137,03^{\circ}} \kappa A.$$

Известно, что при аналитическом расчете требуется знание величин сопротивлений $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$, значения которых можно найти при работе на ΠK . Для этого в набранной на ΠK схеме замещения нужно включить между точкой к.з. и точкой нулевого потенциала схемы источник постоянной ЭДС и измерить суммарный ток рассматриваемой последовательности. Отношение ЭДС источника к суммарному току определяет значение искомого сопротивления.

Аналогично, можно определить и $X_{1\Sigma}$, если в схеме прямой последовательности принять нулевое значение ЭДС источников.

В качестве примера на рис. 12 показан порядок определения сопротивлений $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ (по условиям рис. 1).



а — обратной последовательности — $X_{2\Sigma}$; б — нулевой последовательности - $X_{0\Sigma}$ Рисунок 12 — Определение результирующих сопротивлений схем замещения по данным примера 1

Таким образом, результирующие сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательностей будут равны:

$$X_{2\Sigma} = 10/105, 5 = 0,0948 \text{ Om}; \ X_{0\Sigma} = 10/48, 31 = 0,207 \text{ Om}.$$

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Приступая к выполнению лабораторной работы, следует повторить содержание работы 1, в которой приведена методика работы на ПК и даны методические указания к выполнению расчетов.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента обрабатываются согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе 1 данных методических указаний.

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) расчетную схему электрической системы;
- 4) комплексную схему замещения для заданного вида к.з.;
- 5) расчет сопротивлений комплексной схемы замещения для рассматриваемого момента времени;
 - 6) схему набора комплексной схемы замещения на ПК;
- 7) результаты измерений симметричных составляющих токов и напряжений на ΠK ;
 - 8) расчет тока и мощности несимметричного к.з.;
- 9) векторные диаграммы фазных токов и напряжений в месте к.з. и в точке M;
 - 10) Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Метод симметричных составляющих.
- 2 Порядок определения фазных векторов токов и напряжений исходной несимметричной трехфазной системы по их симметричным составляющим.
 - 3 Правила составления схем замещения отдельных последовательностей.
- 4 Порядок применения правила эквивалентности прямой последовательности в расчетах токов к.з.
- 5 Порядок составления комплексной схемы замещения в зависимости от вида несимметричного к.з.
 - 6 Порядок расчета тока несимметричного к.з. в начальный момент времени (=0).
- 7 Порядок построения векторных диаграмм фазных токов и напряжений в точках K и M при несимметричном к.з. в точке K по данным измерений.
- 8 Поясните, как находится дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$ для каждого из видов несимметричного к.з.
- 9 В чём заключается правило эквивалентности прямой последовательности?
- 10 Как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при различных видах к.з. по мере удаления от места к.з. и при переходе через трансформатор?

Лабораторная работа 4

РАСЧЕТ ТОКА НЕСИММЕТРИЧНОГО К. 3. В ЗАДАННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ПРИ ОДНОКРАТНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Цель работы: освоить методику расчета токов и напряжений в заданный момент времени t при несимметричном к.з. в расчетной схеме любой сложности.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Рабочее задание

Для заданной расчетной схемы следует выполнить:

- а) с учетом заданного практического метода расчета составить эскиз комплексной схемы замещения для расчета тока несимметричного к.з. в точке K для момента времени t;
- б) определить параметры элементов схемы замещения прямой последовательности в именованных единицах для момента времени t, приведенные к основной ступени напряжения;
- в) определить сопротивления элементов схем замещения обратной и нулевой последовательностей в именованных единицах, привести их к основной ступени напряжения;
 - Γ) набрать комплексную схему замещения на ΠK ;
- д) рассчитать в месте к.з. и в заданной точке M токи и напряжения фаз для момента времени t при несимметричном к.з. в точке K;
- е) построить векторные диаграммы фазных токов и напряжений в месте к.з. и в заданной точке M для момента времени t при несимметричном к.з. в точке K.

Для успешного выполнения задания студент обязан знать теоретический материал в [1–32] в следующем объеме:

- 1) метод расчетных кривых [1, §10-4, §10-5];
- метод спрямленных характеристик [1, §10-6; 2, §8-4];
- 3) метод типовых кривых [2, §8-3; 3, с. 62-72];
- 4) метод симметричных составляющих [1, §11-3];
- 5) параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей [1, $\S10-1\div12-8$;2,гл.10];
 - 6) схемы замещения отдельных последовательностей [1, §§13-1÷13-5; 2, гл.11];
- 7) анализ отдельных видов к.з. при однократной поперечной несимметрии [1, §§14-1÷14-9; 2, гл.12];
- 8) применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии [1, §14-11; 2, §12-7].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рассмотрим порядок применения практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии.

1 Метод расчетных кривых

В этом случае расчетное реактивное сопротивление генераторов определяется по формуле:

$$X_{*PACY(t)}^{(n)} = \frac{X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)}}{C_{\Gamma 1}} \cdot \frac{S_{HOM.\Gamma}}{U_{CP}^2}, \tag{11}$$

где $\Delta X^{(n)}$ - дополнительное сопротивление, определяемое видом несимметричного к.з.: $\Delta X^{(3)} = 0$; $\Delta X^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$; $\Delta X^{(2)} = X_{2\Sigma}$; $\Delta X^{(1,1)} = X_{2\Sigma} /\!/ X_{0\Sigma}$.

Для условий примера (рисунок 1) искомые сопротивления при однофазном к.з. в точке K будут равны:

$$\Delta X^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 0,0948 + 0,207 = 0,3018 \,\text{Om};$$

$$X^{(1)}_{PACY(1)} = \frac{0,1183 + 0,3018}{0,1338} \cdot \frac{75}{6,3^2} = 5,933 \,\text{o.e.} > 3;$$

$$X^{(1)}_{PACY(2)} = \frac{0,1183 + 0,3018}{0,6919} \cdot \frac{67,3}{6,3^2} = 1,0295 \,\text{o.e.}$$

Определим относительную величину тока прямой последовательности генераторов для заданного момента времени к.з. (t=2 c):

для генератора
$$\Gamma_1$$
: $\underset{*}{X}_{1\Pi.t.\Gamma1}^{(1)} = \frac{U_{HOM*}}{X_{PACY(\Gamma1)}^{(1)}} = \frac{1}{5,933} = 0,1685$ o.e.;

для генератора Γ_2 : $X_{1\Pi.t.\Gamma2}^{(1)} = 1,03$ о.е. — находим по расчетным кривым для гид-

рогенераторов [1] (с учетом увеличения $X_{PACY(2)}^{(1)}$ до значений 1,0295+0,07=1,0995o.e.).

Составляем комплексную систему замещения, приведенную на рис. 13.

Таким образом, искомый ток однофазного к.з. в точке K в момент t=2 c будет равен:

$$I_{\Pi,t}^{(1)} = m^{(1)} \cdot (I_{* \ 1\Pi,t,\Gamma 1}^{(1)} \cdot I_{HOM(\Gamma 1)} + I_{* \ 1\Pi,t,\Gamma 2}^{(1)} \cdot I_{HOM(\Gamma 2)} + I_{* \ 1\Pi,t,C}^{(1)}) =$$

$$= 3 \cdot (0,1685 \cdot 6,8732 + 1,03 \cdot 6,1676 + 1,508) = 27,056 \text{ KA}.$$

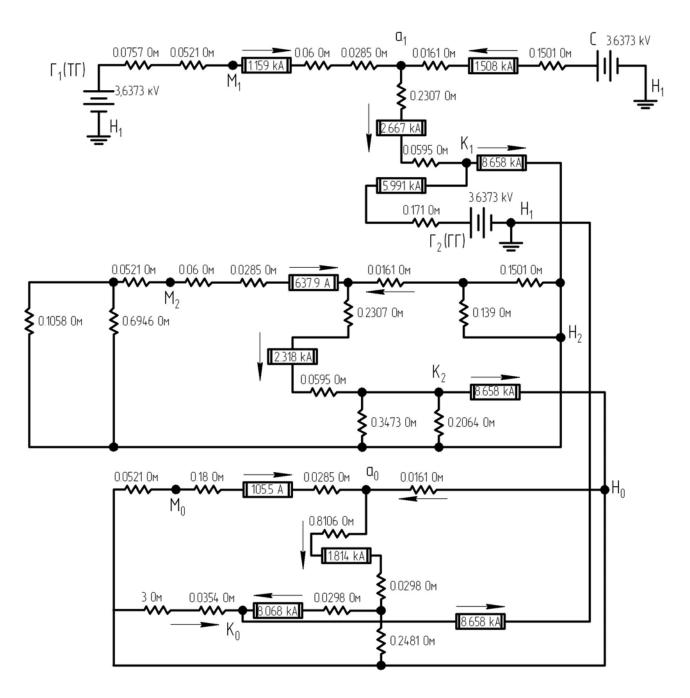


Рисунок 13 — Комплексная схема замещения для определения коэффициентов токораспределения C_i токов $I_{A1}^{(1)}$, $I_{A2}^{(1)}$ и $I_{A0}^{(1)}$ по ветвям схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при однофазном к.з. в точке К (по данным примера (рисунок 1))

Заметим, что непосредственное использование результатов моделирования по рисунке 13 не дает правильного результата из-за наличия зависимости тока генератора Γ_2 от времени. Поэтому определение фазных и напряжений в месте к.з. и в любой точке сети осуществляется расчетным путем.

Покажем пример такого расчета для расчетной схемы, приведенной на рисунке 1, при однофазном к.з. на землю в точке K в момент времени t=2 c.

Для этого используем соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений фазы A при однофазном к.з. в месте аварии [1]:

$$\dot{I}_{A1}^{(1)} = \dot{I}_{A2}^{(1)} = \dot{I}_{A0}^{(1)} = \frac{27,056}{3} = 9,0187 \text{ KA}; \ \dot{U}_{1K}^{(1)} = -(\dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)});$$

$$\dot{U}_{2K}^{(1)} = -j \cdot \dot{I}_{1K}^{(1)} \cdot X_{2\Sigma}; \ \dot{U}_{0K}^{(1)} = -j \cdot \dot{I}_{1K}^{(1)} \cdot X_{0\Sigma}.$$
(12)

При этом напряжение обратной , нулевой и прямой последовательностей фазы A в месте к.з. будут равны:

$$\begin{split} \dot{U}_{2K}^{(1)} &= -j \cdot \dot{I}_{A1}^{(1)} \cdot X_{2\Sigma} = -j \cdot 9,0187 \cdot 0,0948 = -j \cdot 0,855 \, \mathrm{kB}; \\ \dot{U}_{0K}^{(1)} &= -j \cdot \dot{I}_{A1}^{(1)} \cdot X_{0\Sigma} = -j \cdot 9,0187 \cdot 0,207 = -j \cdot 1,8669 \, \mathrm{kB}; \\ \dot{U}_{1K}^{(1)} &= -(\dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{CK}^{(1)} = -j \cdot (0,855 + 1,8669) = -j \cdot 2,7219 \, \mathrm{kB}. \end{split}$$

Рассчитаем токи и напряжения фаз в месте к.з.:

$$\begin{split} \dot{I}_{\Pi,t,A}^{(1)} &= m^{(1)} \cdot \dot{I}_{A1}^{(1)} = 3 \cdot 9,0187 = 27,056 \, \text{kA}; \ \dot{I}_{\Pi,t,B}^{(1)} = 0 \, \text{kA}; \ \dot{I}_{\Pi,t,C}^{(1)} = 0 \, \text{kA}; \\ \dot{U}_{K(A)}^{(1)} &= \dot{U}_{1K}^{(1)} + \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = j \cdot 2,599 - j0,8164 - j1,7826 = 0 \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{K(B)}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{U}_k + a \cdot \dot{U}_{2k} + \dot{U}_{0k} = \\ &= e^{j240^\circ} \cdot j2,7219 + e^{j120^\circ} \cdot (-j0,855) - j1,8669 = 4,17e^{-j42,11^\circ} \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{K(C)}^{(1)} &= a \cdot \dot{U}_k + a^2 \cdot \dot{U}_{2k} + \dot{U}_{0k} = e^{j120^\circ} \cdot j2,7219 + e^{j240^\circ} \cdot (-j0,855) - j1,8669 = 4,17e^{j222,11^\circ} \, \text{kB}. \end{split}$$

Находим фазные токи и напряжения в точке M, используя комплексную схему замещения, приведенную на рис. 13, для определения коэффициентов токораспределения C_i по ветвям схемы токов последовательностей $I_{A1}^{(1)}$, $I_{A2}^{(1)}$ и $I_{A0}^{(1)}$. Токи $I_{1M}^{(1)}$, $I_{2M}^{(1)}$, $I_{0M}^{(1)}$ для момента времени t=2 c на стороне 6 кВ будут равны:

$$\begin{split} \dot{I}_{1M}^{(1)} &= \dot{I}_{1K}^{(1)} \cdot C_{M1-a1} = 9,0187 \cdot 1,159/8,658 = 1,2073 \text{ kA}; \\ \dot{I}_{2M}^{(1)} &= 9,0187 \cdot 0,6379/8,658 = 0,6645 \text{ kA}; \\ \dot{I}_{0M}^{(1)} &= 9,0187 \cdot 0,1055/8,658 = 0,1099 \text{ kA}. \end{split}$$

Определим напряжения $\dot{U}_{\scriptscriptstyle 1M}^{\scriptscriptstyle (1)}$, $\dot{U}_{\scriptscriptstyle 2M}^{\scriptscriptstyle (1)}$, $\dot{U}_{\scriptscriptstyle 0M}^{\scriptscriptstyle (1)}$ на основной ступени напряжения, учитывая падения напряжения по пути от точки M до точки нулевого потенциала в соответствующей схеме замещения.

$$\begin{split} \dot{U}_{1M}^{(1)} &= \dot{U}_{\Phi,CP} - \dot{I}_{1M}^{(1)} \cdot jX_{H1-M1} = j3,6373 - 1,2073 \cdot j(0,0757 + 0,0521) = j3,483 \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{2M}^{(1)} &= \dot{I}_{2M}^{(1)} jX_{H2-M2} = -0,6645 \, j(0,0521 + 0,1058 \cdot 0,6946/(0,1058 + 0,6946)) = -j0,0956 \, \text{kB}; \\ \dot{U}_{0M}^{(1)} &= -\dot{I}_{0M}^{(1)} \cdot jX_{H0-M0} = -j0,1099 \cdot j0,0521) = -j0,0057 \, \text{kB}. \end{split}$$

Рассчитаем значения симметричных составляющих токов и напряжений на стороне 110кВ:

$$\begin{split} \dot{I}_{1M(110)}^{(1)} &= \dot{I}_{1M}^{(1)} \cdot (1/K_T) = 1,2073 \cdot (6,3/115) = 66,139 \, \mathrm{A}; \\ \dot{I}_{2M(110)}^{(1)} &= 0,6645 \cdot (6,3/115) = 36,403 \, \mathrm{A}; \\ \dot{I}_{0M(110)}^{(1)} &= 0,1099 \cdot (6,3/115) = 6,021 \, \mathrm{A}; \\ \dot{U}_{1M(110)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M}^{(1)} \cdot K_T = j3,483 \cdot (115/6,3) = j63,5786 \, \mathrm{kB}. \\ \dot{U}_{2M(110)}^{(1)} &= -j0,0956 \cdot (115/6,3) = -j1,7487 \, \mathrm{kB}; \\ \dot{U}_{0M(110)}^{(1)} &= -j0,0957 \cdot (115/6,3) = -j0,104 \, \mathrm{kB}. \end{split}$$

Далее по значениям симметричных составляющих токов и напряжений в точках K и M рассчитывают фазные величины токов и напряжений по формулам (10) или находят их значения путем построения векторных диаграмм.

2 Метод типовых кривых

При использовании этого метода составляют комплексную схему замещения, содержащую схему прямой последовательности с параметрами сверхпереходного режима (рис. 14).

Видим, что сверхпереходный ток прямой последовательности генератора Γ_2 оказался больше его номинального тока, а генератора Γ_1 – меньше.

По типовым кривым для момента времени t=2 с определяем ток прямой последовательности генератора Γ_2 :

$$\begin{split} I_{1(\Gamma 2)} \,/\, I_{HOM(\Gamma 2)} &= 7,473 \,/\, 6,1676 = 1,21; \ \gamma_t = 1,07 \,; \\ I_{1(\Gamma 2)}^{(1)} &= \gamma_t \cdot I_{1(\Gamma 2)}^{n(1)} = 1,07 \cdot 7,473 = 7,996 \, \text{KA}. \end{split}$$

Таким образом, ток прямой последовательности для заданного момента времени t=2 c и ток однофазного к.з. в точке K будут соответственно равны: $I_{A1\Pi,t}^{(1)}=7,996+2,188=10,184$ кА. $I_{\Pi,t}^{(1)}=3\cdot10,184=30,552$ кА.

Расчет фазных токов и напряжений в точках K и M производится по методике, изложенной выше.

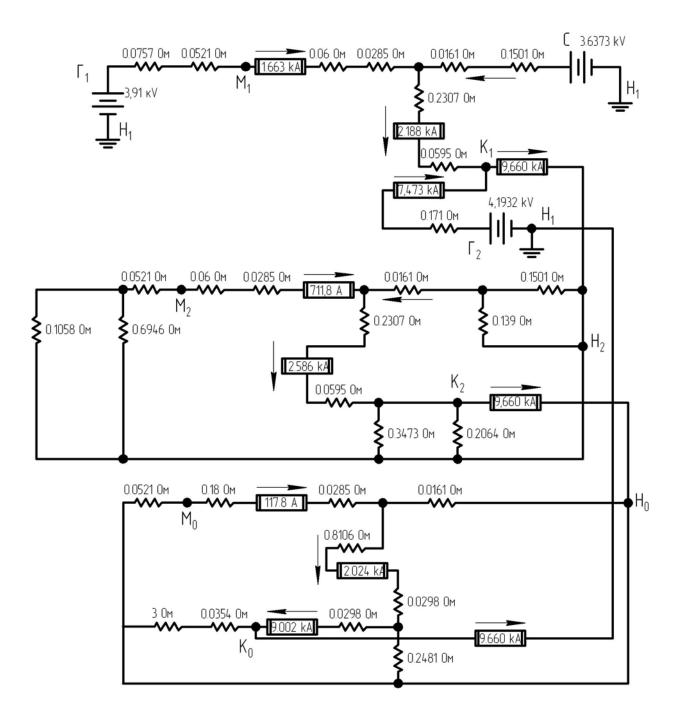


Рисунок 14 — Комплексная схема замещения с результатами моделирования к расчету однофазного к.з. в момент времени $t=2\ c$ в точке K методом типовых кривых (по данным примера на рисунке 1)

3 Метод спрямленных характеристик

Полагая, что при однофазном к.з. в точке K в момент времени t = 2 c генератор Γ_2 работает в режиме $P\Pi B$, а генератор Γ_1 – в режиме PHH, составляем комплексную схему замещения, приведенную на рисунке 15.

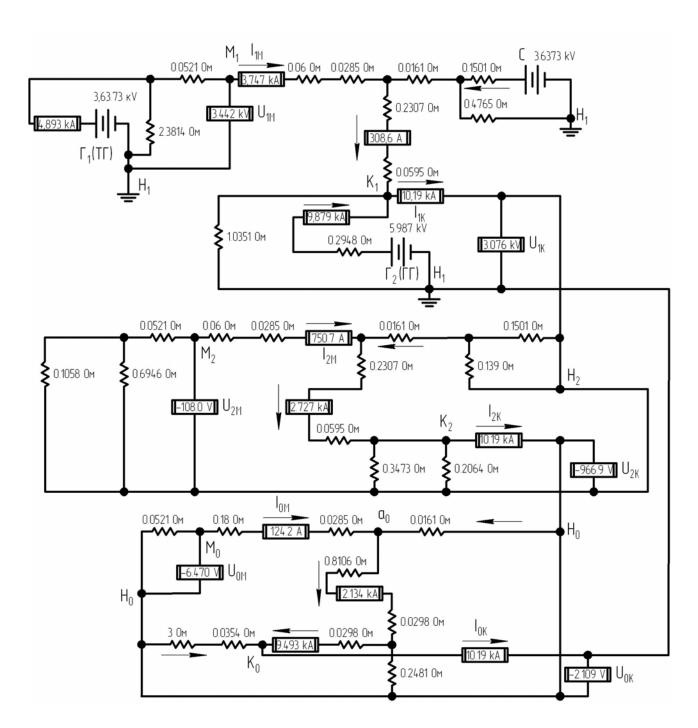


Рисунок 15 — Комплексная схема замещения с результатами моделирования к расчету однофазного к.з. на землю K методом спрямляемых характеристик (по данным примера на рисунке 1)

Из результатов измерений следует, что в момент времени t=2~c при однофазном к.з. в точке K генератор Γ_1 находится в режиме PHH $(I_{1(\Gamma 1)} < I_{KP(\Gamma 1)} = 9,12~\text{кA})$, а генератор Γ_2 — в режиме $P\PiB$ $(I_{1(\Gamma 2)} > I_{KP(\Gamma 1)} = 7,77~\text{кA})$.

Следовательно, искомый ток однофазного к.з. будет равен:

$$I_{\Pi t}^{(1)} = m^{(1)} \cdot I_{A1\Pi t}^{(1)} = 3.10,19 = 30,57 \text{ KA}.$$

Видим, что комплексная схема замещения на рис. 15 к расчету однофазного к.з. в момент времени t=2 c содержит все данные, необходимые для нахождения фазных значений токов и напряжений в точках K и M расчетным путем или путем построения векторных диаграмм.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента обрабатываются согласно указаниям, приведенным в лабораторной работе данных методических указаний.

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) расчетную схему электрической системы;
- 4) расчет сопротивлений комплексной схемы замещения для заданного момента времени несимметричного к.з. с учетом принятого практического метода расчета;
- 5) комплексную схему замещения для расчета несимметричного к.з. с результатами моделирования на ΠK ;
- 6) расчет симметричных составляющих токов и напряжений в точках K и M для заданного момента времени t;
- 7) расчет фазных токов, напряжений в точках K и M и их векторные диаграммы для заданного момента времени t;

Выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Порядок составления комплексной схемы замещения в зависимости от вида несимметричного к.з. и принятого практического метода расчета.
- 2 Порядок определения симметричных составляющих токов и напряжений в заданных точках расчетной схемы.
- 3 Порядок определения фазных токов и напряжений в заданных точках расчетной схемы.
- 4 Порядок построения векторных диаграмм фазных токов и напряжений по данным моделирования и расчетов.
- 5 Поясните, как находится дополнительное сопротивление $\Delta X^{\scriptscriptstyle (n)}$ для каждого из видов несимметричного к.з.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 520с.
- 2 Крючков И.П., Старшинов В.А. и др. Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебник для вузов.— М.: МЭИ, 2009. — 416 с.
- 3 Пособие к курсовому проектированию для электроэнергетических специальностей/ под ред. В.М. Блок. М.: Высшая школа, 1980. 383с.
- 4 Винославский В.Н.и др. Переходные процессы в системах электроснабжения. Киев: Вища школа, 1989. 422с.
- 5 Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM РС. М.: Солон-Р, 1999. –144с.
- 6 Расчеты на персональном компьютере токов симметричных и несимметричных коротких замыканий. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 100400 всех форм обучении/ Составил Серебряков В.Н. Саратов: Изд-во СГТУ. 2010. 32с.

Мошкин Владимир Иванович

РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсам «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» всех форм обучения, для студентов направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Авторская редакция

Подписано к печати	Формат 60х84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 2,5	Учизд. л. 2,5
Заказ	Тираж 15	Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ. 640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25. Курганский государственный университет.