

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи
У.Д.К. 621.316.925.1

ТУРТУРИКА НАТАЛЬЯ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ
ПОВРЕЖДЕНИЙ НА САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ
ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
И СОЗДАНИЯ ФИЛЬТРОВ ШЕСТИФАЗНЫХ
СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

221.01 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

КИШИНЁВ, 2023

Диссертация разработана в лаборатории электроэнергетического оборудования и силовой электроники Института Энергетики Технического Университета Молдовы

Научный руководитель:

Киорсак Михаил, д.х.т.н., профессор

Официальные референты:

Ерхан Фёдор, д.х.т.н., профессор

Стратан Ион, д.х.т.н., профессор

Состав Специализированного Ученого Совета:

Олещук Валентин, д.х.т.н., председатель

Комендант Ион, к.т.н., секретарь

Арион Валентин, д.х.т.н., профессор

Бошняга Валерий, к.т.н.,

Хлусов Виорика, к.т.н., лектор университета

Защита диссертации состоится 24 октября 2023, в 14⁰⁰ на заседании Специализированного Ученого Совета D 221.01-23-3 при Институте Энергетики Технического Университета Молдовы по адресу: MD-2028, Республика Молдова, г. Кишинёв, ул. Академическая, 5, ауд. 434.

С текстом диссертации и автореферата можно ознакомиться в научно технической библиотеке Технического Университета Молдовы и на сайте ANACEC (www.cnaa.md).

Автореферат разослан ____ ____ ____ 2023 г.

Ученый секретарь
Специализированного Ученого Совета,
кандидат технических наук
Комендант Ион

Научный руководитель,
Профессор,
д.х.т.н.,
Киорсак Михаил

Автор:
Туртурика Наталья

© Туртурика Наталья, 2023

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность и значимость

Современное развитие энергетики связано с необходимостью дальнейшего объединения энергосистем, повышением пропускной способности линий электропередачи, регулированием потоков передаваемых активных и реактивных мощностей, внедрением новых устройств автоматики и релейной защиты. Одним из основных элементов энергосистем являются линии электропередачи, на которые возлагаются функции не только передачи электрической энергии, но и управления потоками передаваемых мощностей. Особенно это важно для линий электропередачи межсистемных связей.

Повышение пропускной способности линии электропередачи путем повышения напряжения по технико-экономическим соображениям практически исчерпало себя.

Наиболее целесообразным является увеличение пропускной способности ЛЭП путем уменьшения её волнового сопротивления.

Для уменьшения сопротивления (волнового сопротивления ЛЭП) и регулирования пропускной способности в зависимости от режима их работы, были предложены так называемые самокомпенсирующиеся ЛЭП (СВЛ) с уменьшенным волновым сопротивлением за счёт сближения разноименных фаз разных цепей двухцепной ЛЭП между собой и управляемые самокомпенсирующиеся ЛЭП (УСВЛ) - с регулируемым волновым сопротивлением за счёт регулирования угла сдвига между напряжениями сближенных одноименных фаз разных цепей двухцепной ЛЭП.

Внедрение СВЛ и УСВЛ требует решения целого комплекса задач. Одной из важных задач является создание релейной защиты, основу которой составляют расчёты различных электрических величин при различных повреждениях и ненормальных режимах работы, в том числе при сложных видах коротких замыканий и обрывах фаз. Вычисление электрических величин при обрывах и коротких замыканиях на СВЛ и УСВЛ имеет ряд отличий от подобных расчетов для классических линий электропередачи. Это связано со сближением фаз и регулируемым электромагнитным влиянием друг на друга.

Выполненные до сих пор исследования касались вопросов методики расчёта различных простых повреждений - коротких замыканий, на основе метода шести симметричных составляющих.

Разработка и анализ эффективных средств релейной защиты и автоматики СВЛ и УСВЛ требует рассмотрения и анализа не только простых, но и сложных видов повреждений, чему и посвящена данная работа.

Цель и объекты исследования

Целью настоящей работы является разработка теоретических основ, методологии и методики расчета сложных видов повреждений - коротких замыканий и обрывов фаз на СВЛ и УСВЛ, создание фильтров шести симметричных составляющих для релейной защиты.

Объект исследования – самокомпенсирующиеся ЛЭП, управляемые самокомпенсирующимися ЛЭП.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Разработка теоретических основ методологии расчёта сложных видов несимметричных к.з. и обрывов фаз методом шести симметричных составляющих, создание фильтров шести симметричных составляющих как одной из составных частей дальнейшей разработки эффективной релейной защиты СВЛ и УСВЛ.
2. Разработка наглядной и корректной методики расчета тока и напряжения при сложных видах повреждений СВЛ и УСВЛ с учетом их особенностей работы при любых углах сдвига между системами векторов напряжений цепей.
3. Апробация и применение разработанной методики для расчёта тока и напряжения при сложных видах повреждений на конкретных СВЛ и УСВЛ.
4. Создание фильтров шести симметричных составляющих для релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

Гипотеза исследования. Следует ожидать, что разработка методики дополнит теорию расчёта несимметричных к.з. на шестифазных ЛЭП, к которым можно отнести СВЛ и УСВЛ, и позволит создать наглядную, сравнительно простую и применимую для инженерной практики методику расчёта несимметричных к.з. Также предполагается, что разработанные принципиальные схемы и модели фильтров шестифазных симметричных составляющих будут использованы при создании эффективной, надёжной и селективной релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

Методы исследования: анализ научно-методической литературы, анализ проведенных исследований, систематизация ранее полученных результатов по проблеме исследования, сравнение существующих подходов к решению задачи, математические матричные методы исследования и анализа, методы компьютерного моделирования СВЛ и УСВЛ на основе разработанных комплексных схем, математические методы расчёта сложных повреждений с использованием метода шести симметричных составляющих, экспериментальные исследования в программах Multisim и Matlab Simulink.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработана методика и метод расчета электрических величин (тока и напряжения) при различных сложных видах повреждений (к.з.): одновременных к.з. в разных местах ЛЭП, к.з. и обрывом фаз, к.з. и обрывом фаз в разных местах ЛЭП, которые могут иметь место в шестифазных линиях электропередачи, в частности на СВЛ и УСВЛ;
2. Разработаны комплексные схемы замещения для моделирования на компьютере в средах программ Matlab-Simulink различных сложных видов повреждений;
3. Разработаны принципиальные схемы и методика моделирования фильтров шести симметричных составляющих на компьютере в среде Matlab-Simulink для создания эффективной современной микропроцессорной релейной защиты высокой чувствительности, реагирующей при различных повреждениях на СВЛ и УСВЛ не на фазные величины, а на их симметричные составляющие.

Важная научная проблема, решенная в работе: предложена методика расчёта и анализа электрических величин при сложных видах повреждений и методика моделирования фильтров симметричных составляющих, позволяющих разработать эффективную релейную защиту, необходимую для внедрения на СВЛ и УСВЛ.

Теоретическая значимость исследования. На основе метода шести симметричных составляющих разработаны теоретические основы, методология расчёта и моделирования на компьютере сложных видов повреждений: к.з. и обрывов в шестифазных системах передачи электроэнергии, в том числе СВЛ и УСВЛ, представляющие дальнейшее развитие теории применения методов симметричных составляющих для расчёта несимметричных к.з. и сложных видов повреждений в шестифазных системах передач электроэнергии. Создание теоретических предпосылок разработки фильтров шестифазных симметричных составляющих для релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

Практическая значимость результатов работы. Создана универсальная, сравнительно наглядная и применимая для инженерной практики методика расчета сложных видов повреждений: к.з. и обрывов на СВЛ и УСВЛ и фильтров шестифазных симметричных составляющих, необходимых для разработки релейной защиты при внедрении СВЛ и УСВЛ на практике. Предложенная в диссертационной работе методика расчета сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ может быть применена для расчёта несимметричных повреждений для любых шестифазных систем передачи электроэнергии,

в том числе и на обычных двухцепных ЛЭП, рассматривая их как шестифазные линии, что существенно уточняет и упрощает расчёт.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются применением методологии исследования, корректными целями и задачами работы, репрезентативностью экспериментальных данных, корректностью их обработки и сопоставимостью расчётов сложных видов повреждений для обычных двухцепных ЛЭП известным методом трёх симметричных составляющих и методом шести симметричных составляющих.

Апробация результатов работы. Результаты исследования были представлены на семинарах Института энергетики Академии Наук Республики Молдова, а также на следующих конференциях:

- 1) Conferinței Științifice Internaționale a Doctoranzilor: Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători, Chișinău, 2015;
- 2) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2015, Chișinău, 2015;
- 3) International Conference: Energy of Moldova - 2016. Regional aspects of development”, Chișinău, 2016;
- 4) Conferinței Științifice a Doctoranzilor Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători Ediția a V-a Chișinău, 2016;
- 5) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2017, Chișinău, 2017;
- 6) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2019, Chișinău, 2019.
- 7) Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2021, Chișinău, 2021;
- 8) XI международная научная конференция, Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, Казань, 2021.

По теме диссертации опубликовано 11 статей и представлены 8 докладов на 8 международных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Методика расчета сложных видов повреждений на шестифазных ЛЭП, СВЛ и УСВЛ на основе шестифазных симметричных составляющих;
- 2) Методика построения и построение комплексных схем замещения для расчёта сложных видов повреждения на СВЛ и УСВЛ методом шести симметричных составляющих;

3) Методика разработки и разработка компьютерной модели фильтров шестифазных симметричных составляющих.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 143 страницах машинописного текста и состоит из четырёх глав, общих выводов и заключения. Библиографический список использованной литературы включает 172 источника. Работа содержит 8 таблиц и 65 рисунков.

Ключевые слова: самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (СВЛ), управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ), расчёт сложных несимметричных коротких замыканий, метод шести симметричных составляющих, фильтры шести симметричных составляющих, комплексные схемы замещения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначен объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, сформулирована теоретико-методологическая основа диссертационной работы, выбраны методы исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОБЫЧНОЙ И САМОКОМПЕНСИРУЮЩЕЙСЯ ЛЭП» приведен обзор существующих методов расчёта несимметричных коротких замыканий на трёхфазных, включая двухцепные линии электропередачи и разработанного метода шестифазных симметричных составляющих для расчёта и анализа сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ.

Показано, что с учётом особенностей СВЛ и УСВЛ наиболее подходящим методом для расчёта несимметричных, в том числе и сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ: к.з. с обрывом в одном месте, к.з. и обрывы в разных местах и т.д., является предложенный метод шести симметричных составляющих.

Рассматривая СВЛ, УСВЛ как шестифазные линии электропередачи с порядком чередования фаз A, B, C, D, E, F и с учётом их особенностей, несимметричные системы векторов фазных токов (напряжений) можно разложить на шесть систем векторов симметричных составляющих. Матрицы перехода от шестифазных симметричных

составляющих векторов тока (напряжений) к фазным токам (напряжениям) для СВЛ и УСВЛ зависят от порядка чередования фаз. На рис.1 представлены симметричные составляющие несимметричных токов (напряжений) в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 последовательностей, соответствующие порядку чередования фаз: A, C', B, A', C, B' и естественным фиксированным углом сдвига $\theta = 120^\circ$ между напряжениями сближенных фаз для СВЛ и регулируемым углом θ между системами векторов напряжений сближенных фаз для УСВЛ при регулировании угла θ в пределах: $(-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ)$. Матрица перехода от шести симметричных составляющих векторов напряжений (токов) 0,1,2,3,4,5 последовательностей к фазным координатам AC', BA', CB' в матричном виде:

$$\dot{\vec{F}} = \dot{\vec{S}}_6 \times \dot{\vec{F}}_S, \quad (1)$$

$$\text{где: } \dot{\vec{F}} = \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_{C'} \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_{A'} \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_{B'} \end{bmatrix}, \quad \dot{\vec{S}}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \end{bmatrix}, \quad \dot{\vec{F}}_S = \begin{bmatrix} \dot{F}_{A_0} \\ \dot{F}_{A_1} \\ \dot{F}_{A_2} \\ \dot{F}_{A_3} \\ \dot{F}_{A_4} \\ \dot{F}_{A_5} \end{bmatrix} - \text{матрица-столбец}$$

векторов токов (напряжений) в фазных координатах; матрица преобразования (перехода) от шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 векторов токов (напряжений) шестифазной ЛЭП к фазным координатам AC', BA', CB' и матрица-столбец векторов токов (напряжений) в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5.

Обратная матрица перехода от симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей к фазным координатам имеет вид:

$$\dot{\vec{F}}_S = \dot{\vec{S}}_6^{-1} \times \dot{\vec{F}}, \quad (2)$$

$$\text{где: } \dot{\vec{S}}_6^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \text{- обратная матрица преобразования от} \\ \text{матрицы фазных координат к матрице} \\ \text{симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5.} \end{array}$$

Пассивные параметры эквивалентных трёхфазных систем М и N, к которым подключена СВЛ И УСВЛ в координатах трёх симметричных составляющих :

$$[Z_{CM}]_{s_6} = \dot{S}_{nU}^{-1} [Z_{CM}]_{s_3}^{np} \dot{S}_{ni} ; [Z_{CN}]_{s_6} = \dot{S}_{nU}^{-1} [Z_{CN}]_{s_3}^{np} \dot{S}_{ni} \quad (3)$$

где $[Z_{CM}]_{s_3}^{np}, [Z_{CN}]_{s_3}^{np}$ -матрицы эквивалентных сопротивлений трёхфазных питающих систем М и N в фазных координатах и в координатах трёх симметричных составляющих 0,1,2, последовательностей трёхфазной системы.

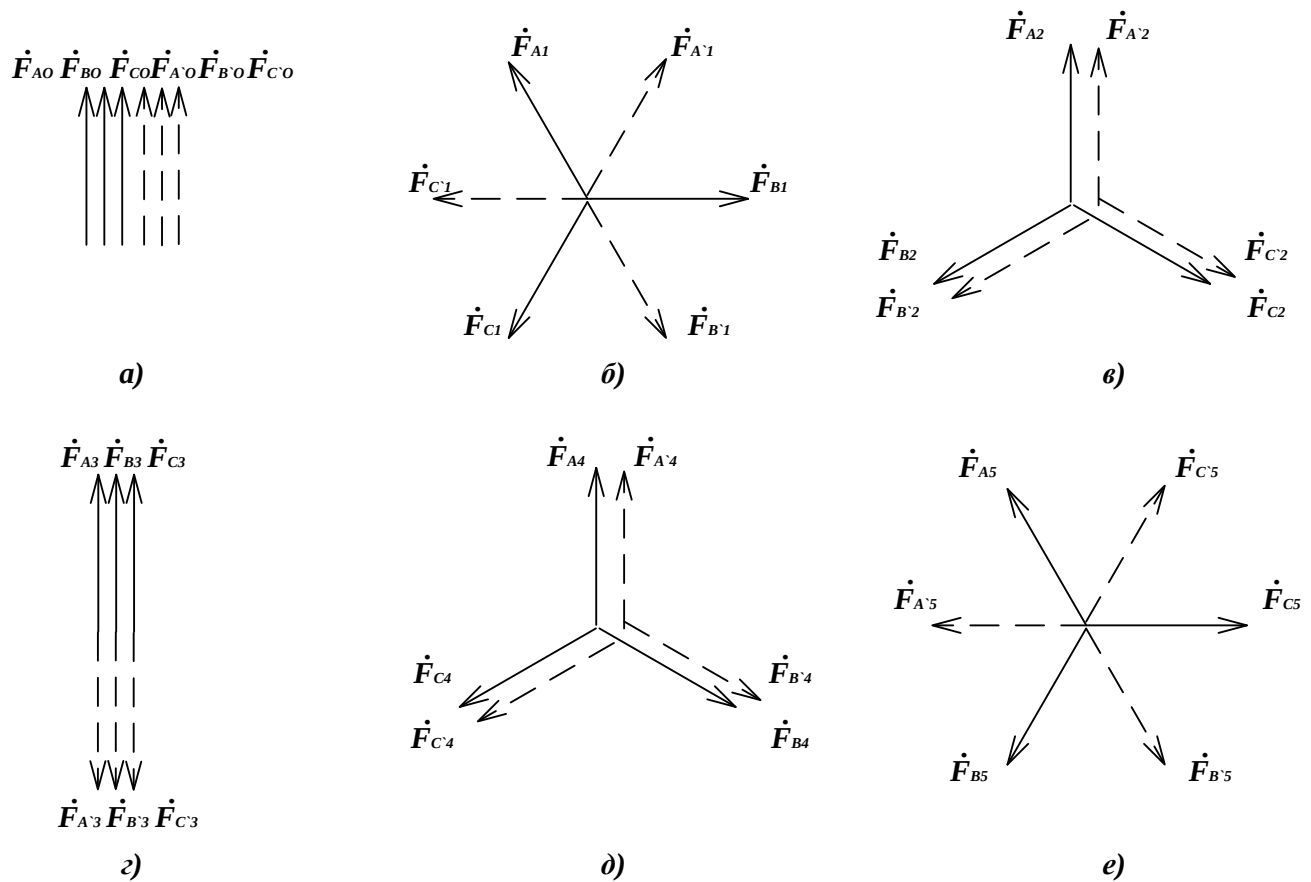


Рис.1. Шестифазные симметричные составляющие 0,1,2,3,4,5 последовательностей токов (напряжений) несимметричной шестифазной системы A, C', B, A', C, B' при регулировании угла θ в пределах: $(-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ)$: а) „0”- последовательность б) „1”- последовательность в) „2”- последовательность г) „3”-последовательность; д) „4”- последовательность е) „5”-последовательность

Использованный метод шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 последовательностей при расчёте сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ существенно упрощает расчёт, поскольку позволяет полностью диагонализировать матрицу пассивных параметров СВЛ и УСВЛ и вести расчёт по схемам замещения соответствующих последовательностей, не связанных между собой взаимоиנדукцией:

$$\dot{Z} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_5 \end{vmatrix} \quad (4)$$

где $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ - сопротивления СВЛ и УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 последовательностей.

Во второй главе, «РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ», основываясь на разработанном методе шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 последовательностей для расчёта простых видов несимметричных коротких замыканий, разработана методика расчёта сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ, таких как обрыв фаз с одновременным несимметричным к.з. в том же месте или в разных местах, рассматриваются расчёты следующих видов сложных повреждений на СВЛ и УСВЛ:

- расчет обрывов одной и нескольких фаз;
- расчет обрыва одной из фаз УСВЛ с одновременным коротким замыканием других фаз на землю;
- расчет обрыва одной из фаз УСВЛ с одновременным коротким замыканием её на землю.

Используя метод наложения, каждый сложный вид повреждения может быть рассмотрен как состоящий из двух простых несимметрий: короткого замыкания и обрыва. Обобщённые формулы для граничных условий и расчёта простых коротких замыканий (поперечных повреждений) рассмотрены ранее. Используя аналогичный подход, в работе получены обобщённые формулы для граничных условий и расчёта сложных видов повреждений: обрывов (продольных повреждений) и к.з. поперечных несимметрий на СВЛ и УСВЛ.

Согласно чередованию фаз СВЛ и УСВЛ, при этом используя для удобства следующие обозначения фаз d, e, h, i, j, k в порядке их чередования и симметричные составляющие токов и напряжений цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6:

$$\dot{I}_{(y)} = 0, \text{ где } y = d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \quad (5)$$

$$\dot{U}(y) = 0, \text{ где } y = 1 \dots 6; y \neq e, y \neq h, y \neq i, y \neq j, y \neq k,$$

получены обобщённые граничные условия в координатах шести симметричных составляющих для любой продольной несимметрии (обрывов фаз):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{I}_{s(p)} &= 0 \\ \text{где : } y &= d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \\ \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{U}_{s(p)} &= 0 \\ \text{где : } y &= 1 \dots 6; y \neq e, y \neq h, y \neq i, y \neq j, y \neq k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

На основе граничных условий выведены обобщенные уравнения для вычисления любой продольной несимметрии на СВЛ и УСВЛ с любым числом оборвавшихся фаз:

$$\begin{aligned} \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(i,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(e,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(j,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(h,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; & \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(k,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

где:

$$p = d, p = e, p = h, p = i, p = j, p = k;$$

$\dot{S}_{(d,y)}, \dot{S}_{(e,y)}, \dot{S}_{(h,y)}, \dot{S}_{(i,y)}, \dot{S}_{(j,y)}, \dot{S}_{(k,y)}$ - соразмерный элемент матрицы

преобразования $\dot{S}_6$;

$\dot{E}_{s(y)}$ - y-ый элемент матрицы-столбца $\dot{E}_s$;

Z_{yy} - y-ый элемент матрицы суммарных сопротивлений $Z_{k\Sigma}$;

$\dot{S}_{(y,p)}^{-1}$ - соразмерный элемент обратной матрицы $\dot{S}_6^{-1}$;

$\dot{U}_{s(p)}$ - напряжения на поврежденных фазах.

Рассчитав напряжение на участке несимметрии $\dot{U}_{s(p)}$ согласно уравнению (7), рассчитываются симметричные составляющие напряжений и токов в месте обрыва, а также значения токов поврежденных и неповрежденных фаз.

Таким образом, расчёт любого повреждения, связанного с обрывами фаз, сводится к решению обобщённых систем уравнений (7).

Расчёт любого повреждения, связанного с простыми видами несимметричных к.з., можно вести с использованием ранее разработанных обобщённых систем уравнений, аналогичных уравнениям (7).

На основании этих систем уравнений разработаны обобщённые комплексные схемы замещения для расчёта продольной и поперечной несимметрий, представленные на рис. 2 а,б., где схемы 0,1,2,3,4,5 последовательностей представлены в виде двухполюсников с зажимами М и N. Схемы объединены друг с другом согласно граничным условиям данного повреждения в координатах шести симметричных составляющих с использованием промежуточных идеальных трансформаторов, с комплексными коэффициентами трансформации. В зависимости от того, какая фаза является особой, коэффициенты трансформации промежуточных идеальных трансформаторов $\dot{k}_{T0}, \dot{k}_{T1}, \dot{k}_{T2}, \dot{k}_{T3}, \dot{k}_{T4}, \dot{k}_{T5}$ выбираются согласно таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты трансформации промежуточных идеальных трансформаторов

Особая фаза	$\dot{k}_{T0}$	$\dot{k}_{T1}$	$\dot{k}_{T2}$	$\dot{k}_{T3}$	$\dot{k}_{T4}$	$\dot{k}_{T5}$
A	1	1	1	1	1	1
C'	1	-a	a ²	-1	a	-a ²
B	1	a ²	a	1	a ²	a
A'	1	-1	1	-1	1	-1
C	1	a	a ²	1	a	a ²
B'	1	-a ²	a	-1	a ²	-a

Комплексную схему замещения при одновременной несимметрии в разных местах на СВЛ и УСВЛ можно составить, объединяя отдельные комплексные схемы замещения, составленные для отдельных простых видов несимметрий :к.з. и обрывов в одном месте и в разных местах, входящих в сложную рассматриваемую несимметрию в соответствии с обобщёнными граничными условиями данной сложной несимметрии. При этом необходимо учесть в схемах замещения электрическую связь между схемами 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей для одного места несимметрии, при условии, что в другом месте несимметрии схемы 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей объединены промежуточными идеальными трансформаторами. Например, комплексная схема при обрыве фазы A и одновременном коротком замыкании фазы C' СВЛ на землю представлена на рис.3 .

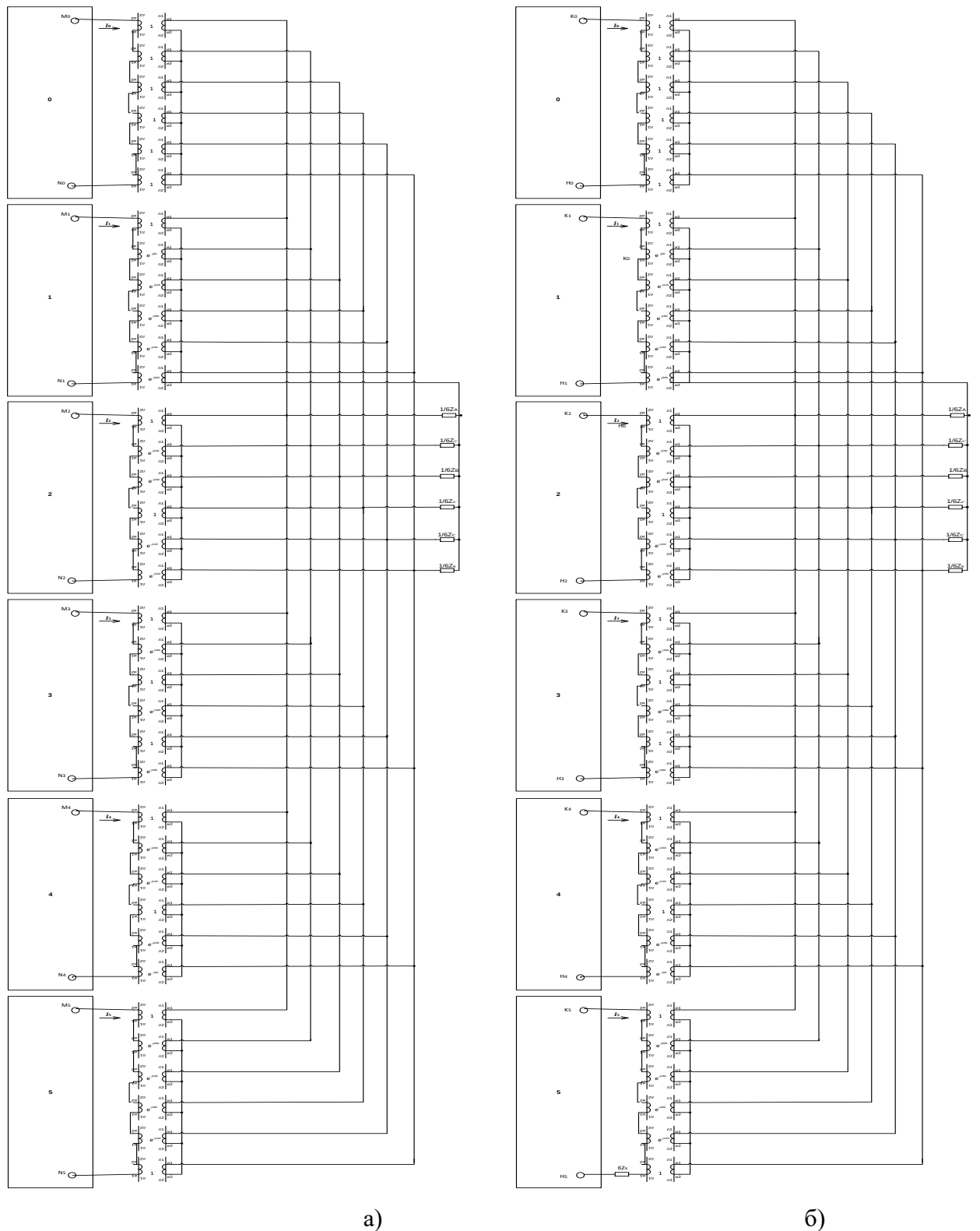


Рис. 2. Обобщённые комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая сложной несимметрии: а) продольной несимметрии на УСВЛ; б) поперечной несимметрии на УСВЛ

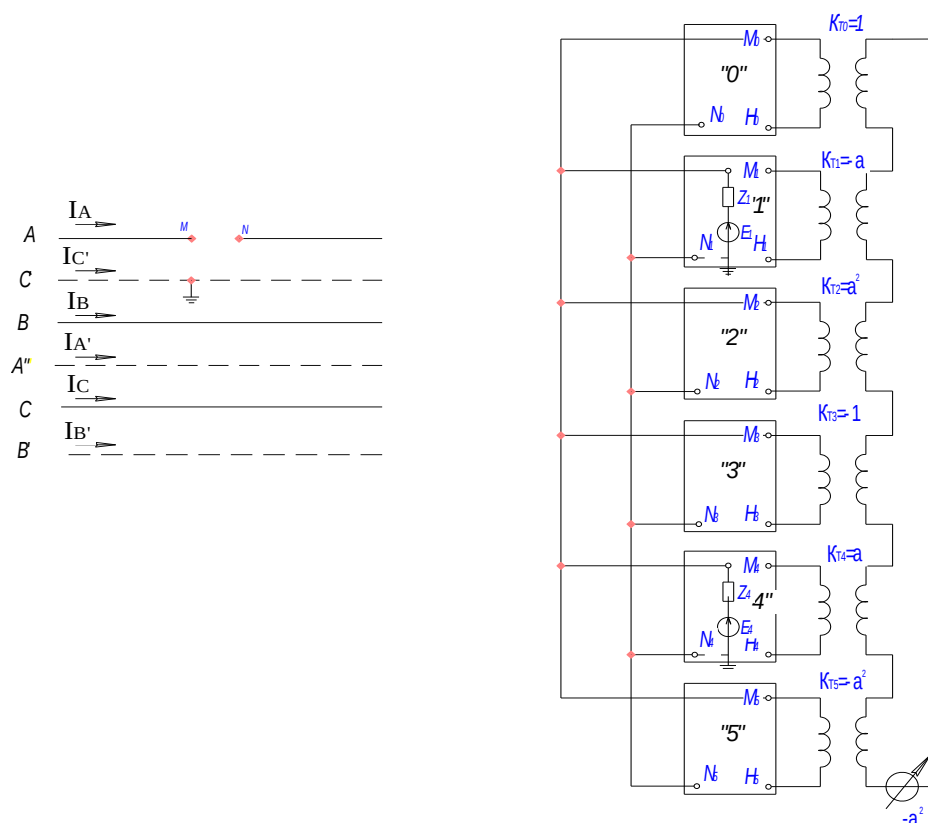


Рис. 3 Комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих при обрыве фазы А и замыкание на землю фазы С'.

Для упрощения анализа различных простых и сложных видов повреждений на УСВЛ и как частный случай на СВЛ, предложено использовать моделирование комплексных схем замещения на компьютере в Multisim или Matlab-Simulink.

В третьей главе «АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ШЕСТИФАЗНЫХ ЛЭП (УСВЛ) НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ» проведена проверка разработанной методики расчёта сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ методом шести симметричных составляющих на примере расчёта обрыва фазы А и одновременного её к.з. на землю на двухцепной ЛЭП 110 кВ методом трёх симметричных составляющих и методом шести симметричных составляющих и расчёт на УСВЛ обрыва фазы А и одновременным её к.з при $\theta=120^\circ$ и $\theta=180^\circ$.

Апробация разработанной методики методом шести симметричных составляющих на примере расчёта обрыва фазы А и одновременным её к.з. на землю на двухцепной ЛЭП 110 кВ методом трёх симметричных составляющих и методом шести симметричных составляющих правомерно, поскольку обычную двухцепную ЛЭП можно рассматривать как

частный случай УСВЛ при $\theta=0^\circ$ и расстояниями между «сближенными» фазами, которые соответствуют стандартным, что позволяет использовать как метод трёх, так и метод шести симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов.

На рис. 4 представлена принципиальная электрическая схема двухцепной ЛЭП-110 кВ с двухсторонним питанием длиной 70 км, выполненной проводом АС-150, на которой произошёл обрыв фазы А в начале линии и короткое замыкание фазы А на землю на расстоянии 30 км от начала линии.

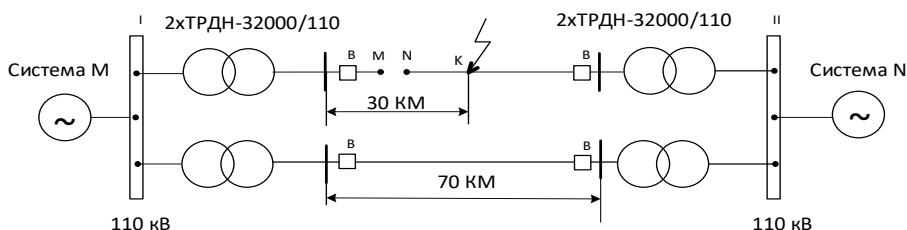


Рис. 4 Принципиальная электрическая схема двухцепной ЛЭП 110 кВ с обрывом и одновременным коротким замыканием фазы А.

На рис. 5,6 даны комплексные схемы замещения ЛЭП в координатах трёх 0,1,2 (рис.5) и шести 01,2,3,4 и 5 (рис.6) составляющих. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

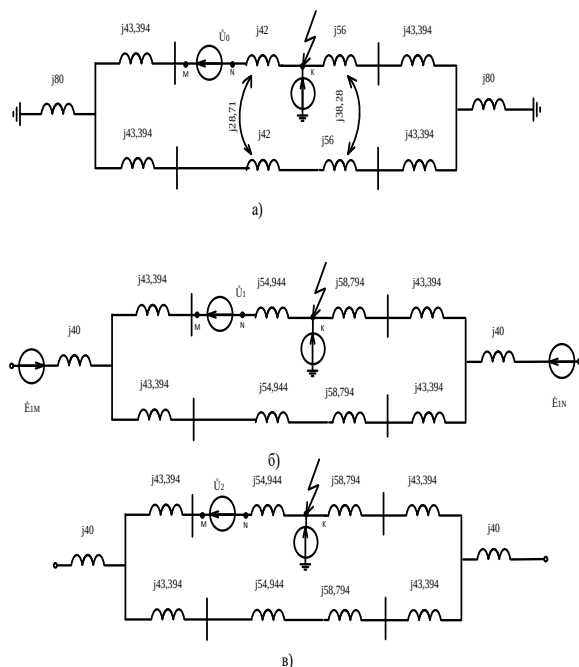


Рис. 5 Схемы замещения двухцепной ВЛ 110 кВ в координатах трёх симметричных составляющих 0, 1, 2: а) нулевой, б) первой, в) второй последовательностей.

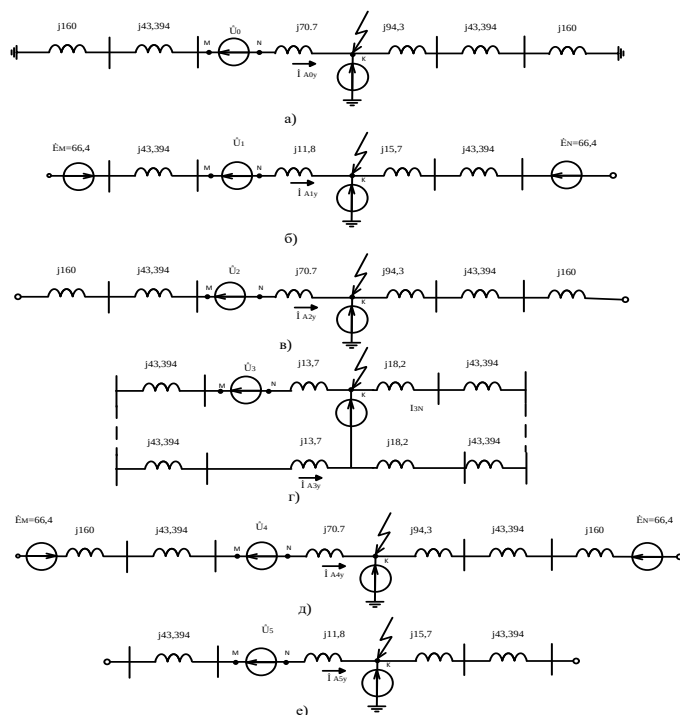


Рис. 6 Схемы замещения двухцепной ВЛ 110 кВ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 : а) нулевой, б) первой, в) второй, г) третьей, д)четвёртой, е)пятой последовательностей.

Сравнение результатов расчёта, представленных в таблице 2, полученных известным методом трёх симметричных составляющих и разработанным методом шести симметричных составляющих показывает, что максимальное отличие результатов составляет около 7% , что свидетельствует о достоверности и правильности разработанного метода шести симметричных составляющих.

Таблица 2 Результаты расчётов фазных токов при обрыве одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю на двухцепной ЛЭП 110кВ методом трёх и шести симметричных составляющих

Токи в фазах со стороны системы М	<i>I цепь</i>			<i>II цепь</i>		
	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$
Метод симметричных составляющих 0,1,2	0	$0,748 e^{-j117}$	$1,27e^{j72}$	$0,096 e^{j180}$	$0,686 e^{j117}$	$1,56 e^{j72}$
Метод симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5	0	$0,8 e^{-j117}$	$1,2e^{j72}$	$0,09 e^{j180}$	$0,648 e^{j117}$	$1,492 e^{j72}$

Полученные результаты также подтверждены моделированием на компьютере с использованием программы Multisim и Matlab- Simulink данных повреждений на рассматриваемой двухцепной ЛЭП в координатах шести симметричных составляющих. Согласно обобщённой комплексной схеме замещения шестифазной ЛЭП (СВЛ и УСВЛ) , представленной на рисунке 2, комплексная схема замещения в Multisim для рассматриваемой двухцепной ЛЭП и рассматриваемых повреждений представлены на рис.7. На данном рисунке показана электрическая связь между соответствующими схемами замещения по месту обрыва фазы А (сечение $M N$), а трансформаторная связь по месту короткого замыкания (точки К-Н). Коэффициенты трансформации определены согласно таблице 1

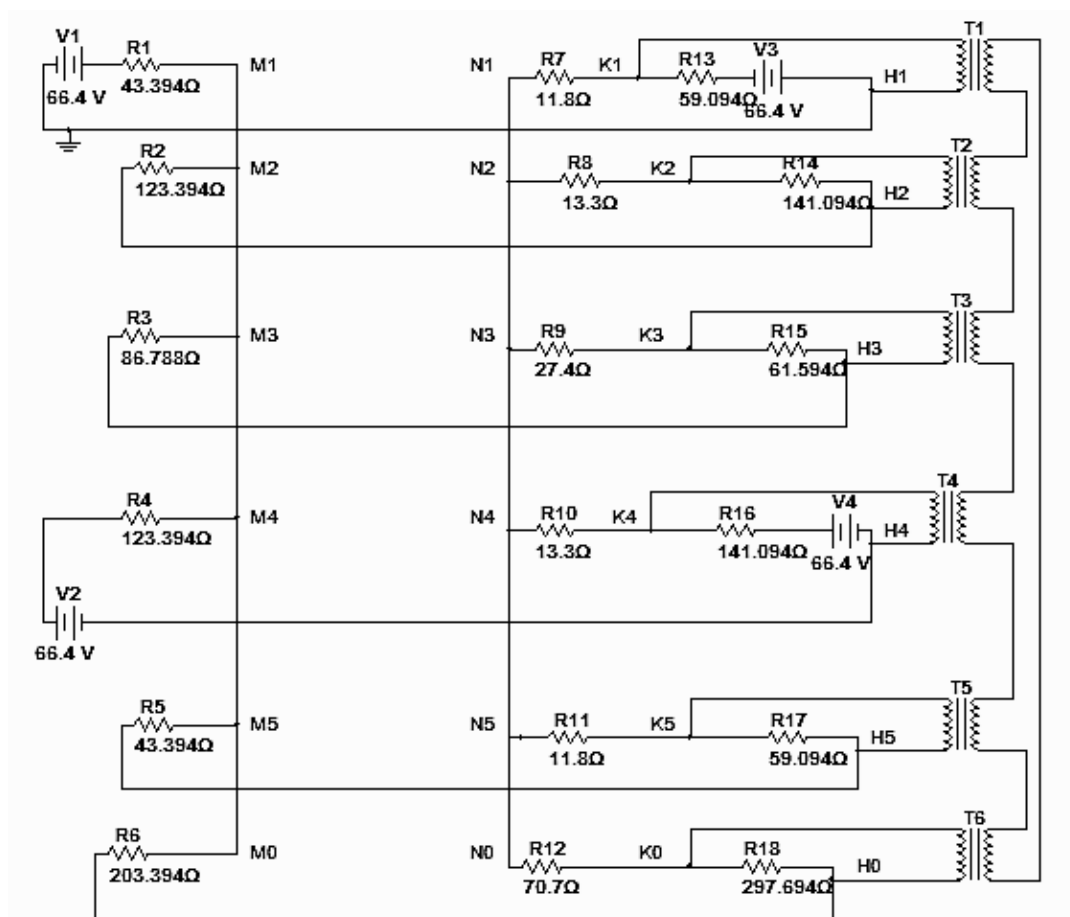


Рис. 7 Комплексная схема замещения при обрыве фазы А с одновременным коротким замыканием на землю на двухцепной ВЛ 110 кВ в программе Multisim

Достоверность и правильность разработанной методики также подтверждены сопоставлением выполненного расчёта обрыва фазы А на двухцепной ЛЭП 220 кВ с двухсторонним питанием методом трёх симметричных составляющих, приведённого в сборнике задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах, под редакцией Ульянова С.А, и расчётом этого повреждения по разработанному методу шести симметричных составляющих.

На рисунке 8 представлена принципиальная электрическая схема УСВЛ - 110 кВ, которая выполнена проводом АС-150, длиной 76 км при углах сдвига между системами векторов напряжений цепей, равными $\theta=120^\circ$ и $\theta=180^\circ$, на которой произошёл обрыв провода фазы А с одновременным замыканием одного конца на землю.

Схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих (0,1,2,3,4,5) для рассматриваемого случая при $\theta=120^\circ$ представлены на рисунке 9.

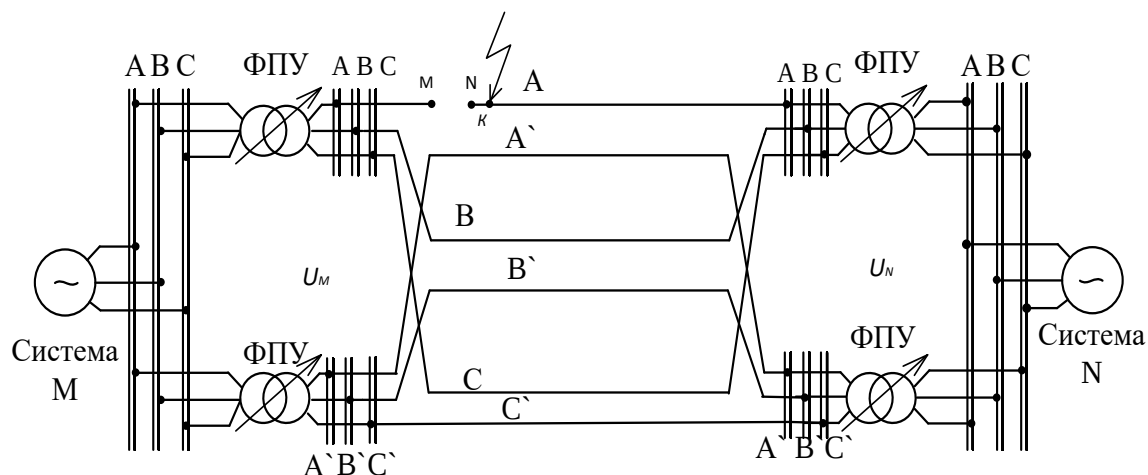


Рис. 8 Принципиальная электрическая схема УСВЛ-110 кВ

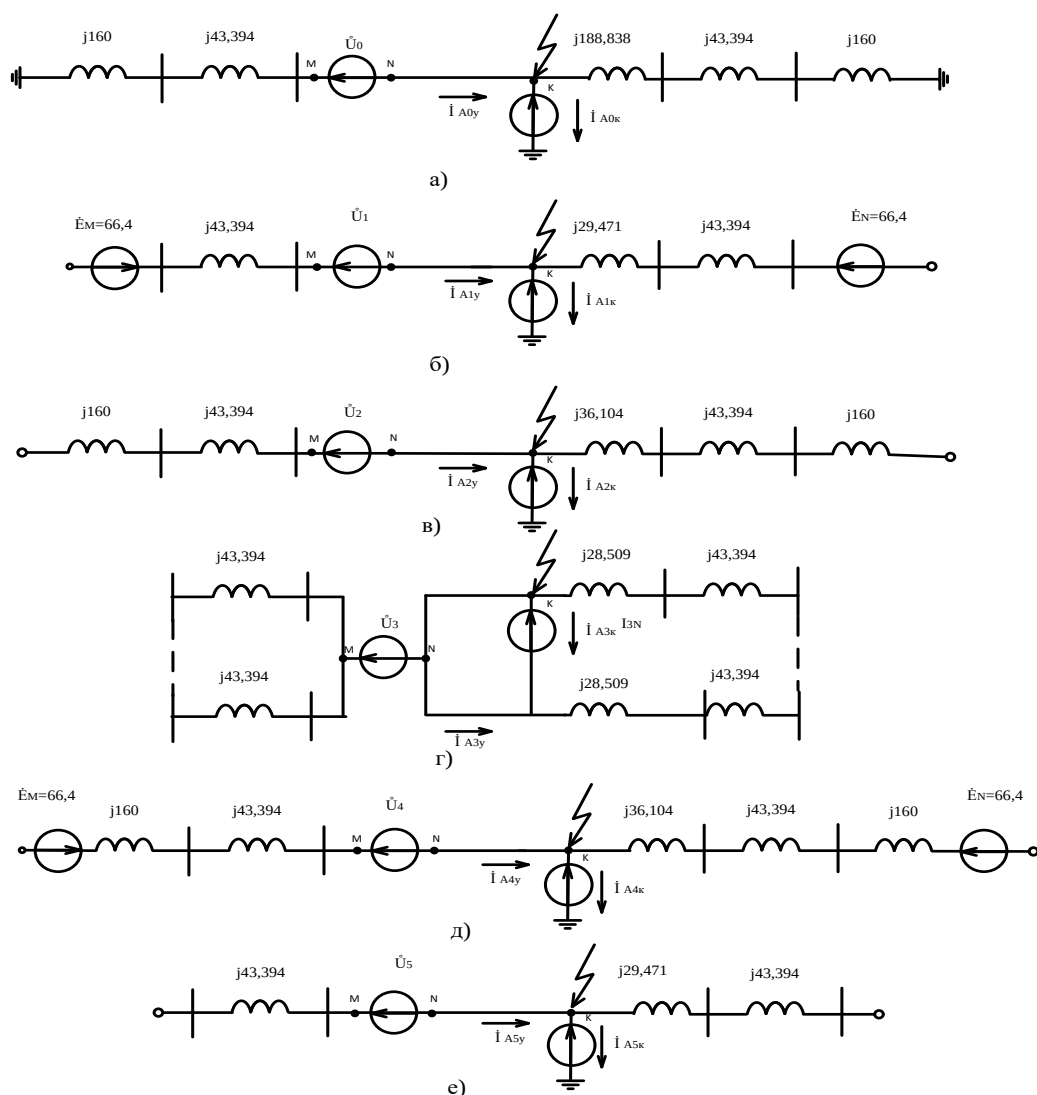


Рис. 9 Схемы замещения УСВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей: а) нулевой последовательности; б) первой последовательности; в) второй последовательности; г) третьей последовательности; д) четвёртой последовательности; е) пятой последовательности

Определение токов и напряжений при данном повреждении путем моделирования их на компьютере осуществлено по схеме, приведенной на рисунке 10.

Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

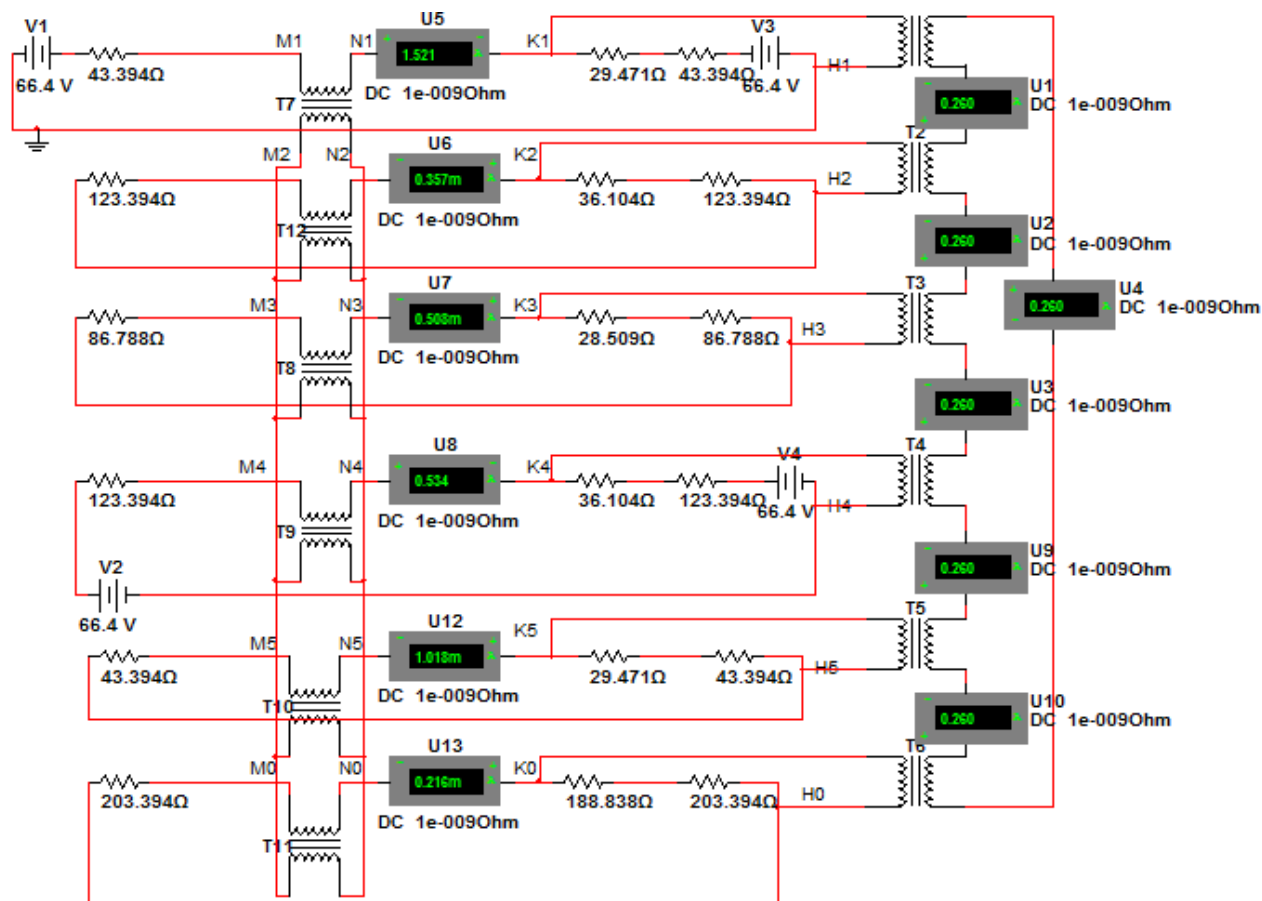


Рис. 10 Комплексная схема замещения УСВЛ с регулируемым углом $\theta=120^\circ$ при обрыве провода фазы А с одновременным замыканием одного конца на землю в Multisim

Таблица 3 Результаты расчётов фазных токов УСВЛ при обрыве провода фазы А с одновременным замыканием одного конца на землю при $\theta=120^\circ$ и $\theta=180^\circ$

	$ I_A $	$ I_A' $	$ I_B $	$ I_B' $	$ I_C $	$ I_C' $
$\theta=120^\circ$	2,057°	0.987°	2.054	0.987	2.054	0.987
$\theta=180^\circ$	2,061°	0.99	2.059	0.991	2.059	0.99

В соответствии с разработанной методикой разработана блок-схема расчёта токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих рисунок 11.

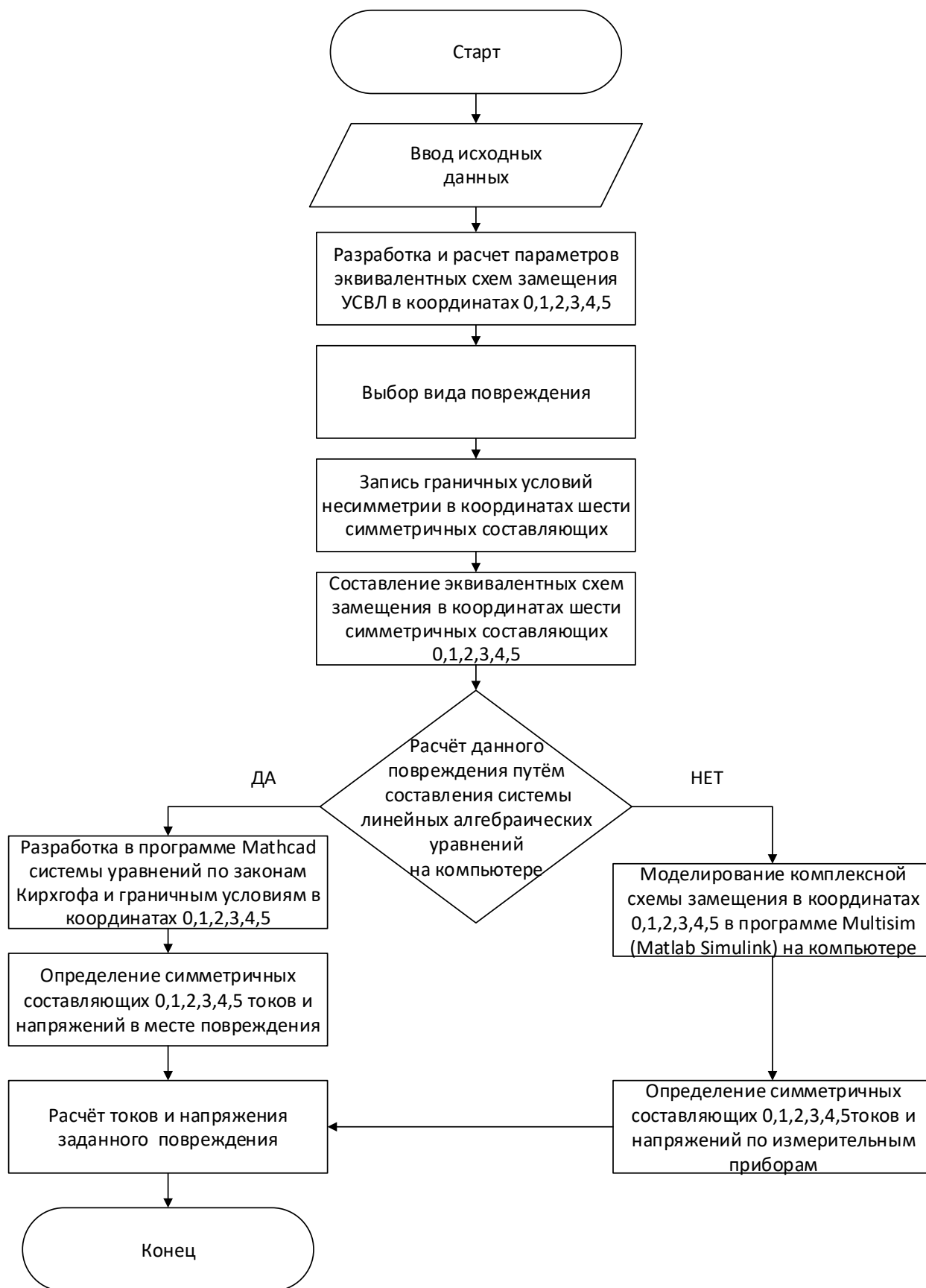


Рис. 11 Блок-схема расчёта токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих

Четвёртая глава «РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРОВ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ» посвящена исследованию фильтров шестифазных симметричных составляющих.

Анализ функционирования устройств релейной защиты на самокомпенсирующихся линиях электропередачи СВЛ и управляемых самокомпенсирующихся линиях электропередачи УСВЛ показал, что существующие устройства релейной защиты с учетом некоторых особенностей работы и выбора уставок срабатывания могут удовлетворительно защитить СВЛ и УСВЛ от всех видов коротких замыканий. Однако с учётом возможности возникновения сложных видов повреждений и с точки зрения максимального сохранения питания потребителей, "живучести" СВЛ и УСВЛ, повышения эффективности и чувствительности релейной защиты и выборочного отключения тех или иных повреждённых фаз наиболее целесообразно иметь релейную защиту, реагирующую на появление тех или иных шестифазных симметричных составляющих. Для разработки устройств РЗ и автоматики СВЛ и УСВЛ, реагирующих на появление различных шестифазных симметричных составляющих при повреждениях (к.з. и обрывах), необходимы фильтры симметричных составляющих шестифазного разложения.

В данной главе рассмотрены теоретические основы создания фильтров токов и напряжений шестифазных симметричных составляющих.

Предполагая, что к входным зажимам фильтра тока подведены фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_B, \dot{I}_{A'}, \dot{I}_C, \dot{I}_{B'}$ шестифазной системы СВЛ и УСВЛ, обозначим симметричные составляющие на выходе фильтра, отнесенные к фазе А через $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$. Принимаем, что элементы, из которых состоит фильтр, являются линейной функцией от $\dot{I}_A, \dot{I}_C, \dot{I}_B, \dot{I}_{A'}, \dot{I}_C, \dot{I}_{B'}$ СВЛ И УСВЛ. Отсюда следует, что ток на выходе фильтра:

$$\dot{I}_p = \dot{n}_A \cdot \dot{I}_A + \dot{n}_C \cdot \dot{I}_C + \dot{n}_B \cdot \dot{I}_B + \dot{n}_{A'} \cdot \dot{I}_{A'} + \dot{n}_C \cdot \dot{I}_C + \dot{n}_{B'} \cdot \dot{I}_{B'} \quad (8)$$

Здесь коэффициенты $\dot{n}_A, \dot{n}_C, \dot{n}_B, \dot{n}_{A'}, \dot{n}_C, \dot{n}_{B'}$ являются комплексными или действительными величинами, характеризующими амплитудные и фазные изменения токов, подводимых к фильтру. Замена полных токов СВЛ и УСВЛ их симметричными составляющими 0,1,2,3,4,5 можно описать формулой:

$$\dot{I}_p = \dot{k}_0 \dot{I}_0 + \dot{k}_1 \dot{I}_1 + \dot{k}_2 \dot{I}_2 + \dot{k}_3 \dot{I}_3 + \dot{k}_4 \dot{I}_4 + \dot{k}_5 \dot{I}_5. \quad (9)$$

Коэффициенты фильтра представлены комплексными или действительными значениями в соответствии с матрицей S_6 (1) перехода от фазных координат к координатам симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 согласно матрице:

$$\begin{bmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Обратным преобразованием матрицы (10) можно получить выражения для коэффициентов $\mathbf{n}$ через коэффициенты $\mathbf{k}$:

Для реализации фильтров симметричных составляющих необходимо суммировать токи или напряжения, находящиеся в конкретных соотношениях с электрическими величинами, подводимыми к фильтру. Сдвиг по фазе токов или напряжений может производиться разными методами путем соответствующего подбора элементов цепей фильтра: активных, индуктивных, емкостных, смешанного типа и индуктивно связанных.

На основании вышеизложенного разработаны принципиальные схемы фильтра токов шести симметричных составляющих для СВЛ, представленные рис.12 а,б,в.

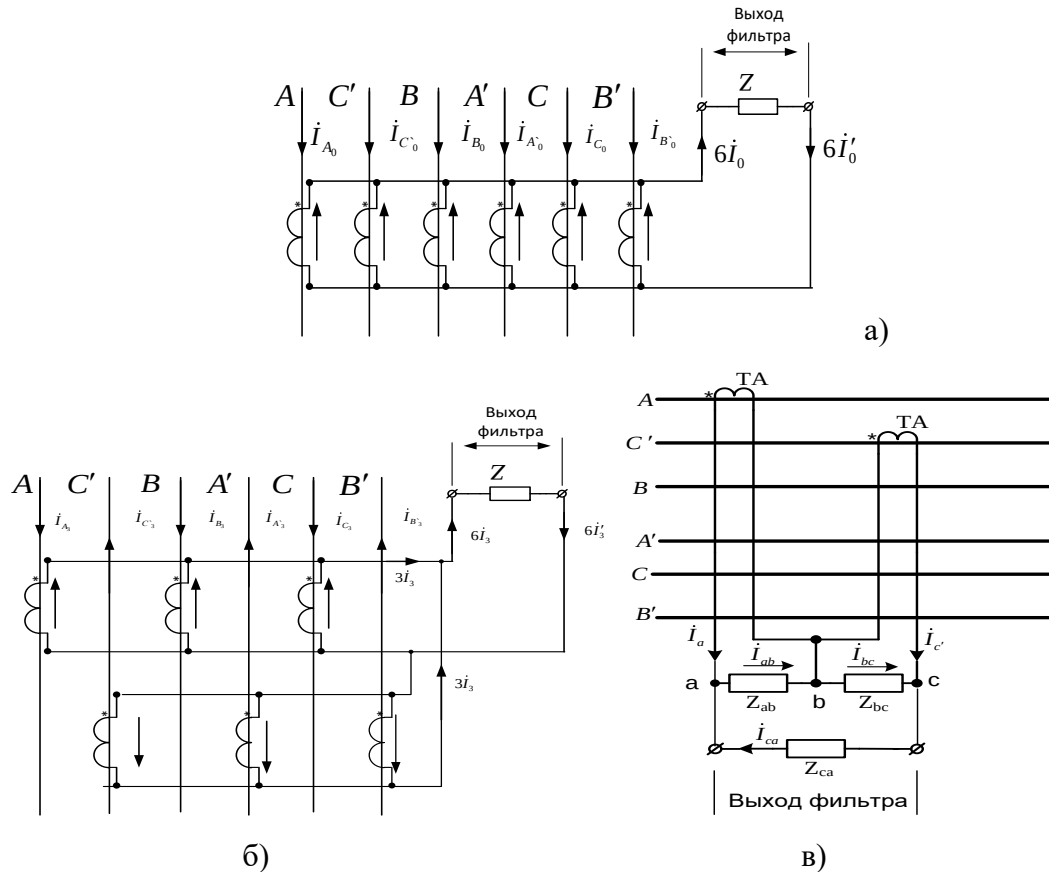


Рис.12 Фильтр симметричных составляющих токов нулевой последовательности (а), фильтр симметричных составляющих токов третьей последовательности (б), фильтр симметричных составляющих токов 1,2,4,5 последовательностей (в) СВЛ.

Фильтр тока нулевой последовательности выполнен по принципу суммирования токов всех шести фаз. Данное суммирование производится при помощи трансформаторов тока путем соединения их вторичных обмоток параллельно, рис. 12.а. У фильтра тока третьей последовательности рис. 12.б трансформаторы тока соединены таким образом, что бы вторичные токи трансформаторов тока третьей последовательности в трёх фазах одной цепи СВЛ и УСВЛ были направлены в одну сторону, а вторичные токи трансформаторов тока второй цепи были направлены в противоположном направлении.

Учитывая, что для современных цифровых и микропроцессорных защит наиболее целесообразно математическое «выделение» данных симметричных составляющих при различных несимметричных к.з., включая сложные виды повреждения, смоделирован комбинированный фильтр шестифазных симметричных составляющих токов и напряжений 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей на компьютере с помощью программных комплексов Matlab-Simulink рис. 13.

Для реализации методики модели фильтра в библиотеке Math Operations использованы следующие блоки с их функциональными возможностями:

- Блок Constant – формирует постоянную величину: оператор системы $a = e^{j120^\circ}$ и $-a = e^{-j60^\circ}$;
- блок Math- выполняет математические функции: возводит в квадрат оператор a и $-a$;
- блок Product - выводит результат умножения двух входных данных, согласно матричному выражению:

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_{A1} \\ \dot{F}_{A2} \\ \dot{F}_{A3} \\ \dot{F}_{A4} \\ \dot{F}_{A5} \end{pmatrix} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{pmatrix} \quad \text{- для УСВЛ} \quad (12)$$

Для СВЛ в матрице (12) необходимо учесть соответствующее чередование фаз.

- Блок Sum - суммирует на входах фазные составляющие согласно (12)
- Блок Gain -умножает входной сигнал на постоянное значение (1/6) согласно (12).

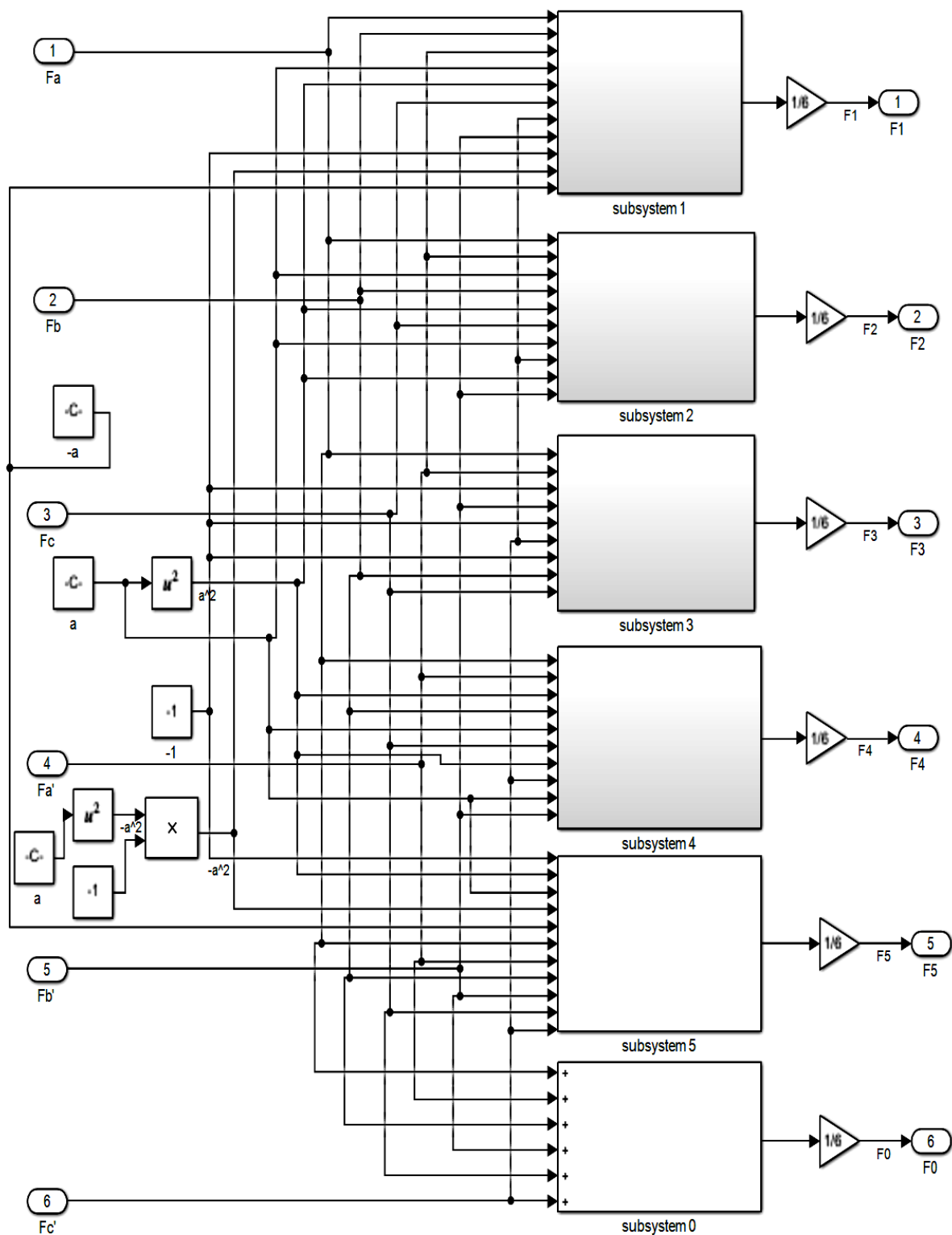


Рис. 13 Имитационная модель фильтра шести симметричных составляющих реализованная на компьютере в пакете Matlab-Simulink

Для тестирования разработанной модели фильтра шести симметричных составляющих рис. 13, в программе Matlab-Simulink составлена комплексная модель шестифазной линии электропередачи на примере обычной двухцепной ЛЭП с двухсторонним питанием (как частный случай СВЛ, УСВЛ) к которой была подключена разработанная модель фильтра шестифазных симметричных составляющих. Были рассмотрены токи и напряжения в нормальном режиме работы и при коротком замыкании фазы А на землю. На рис. 14, 15 приведены осциллограммы фазных и симметричных составляющих токов при коротком замыкании фазы А на землю. Начальный временной интервал осциллограмм (примерно до 0,3 с.) соответствует нормальному режиму, конечный интервал – возникновение аварийного режима.

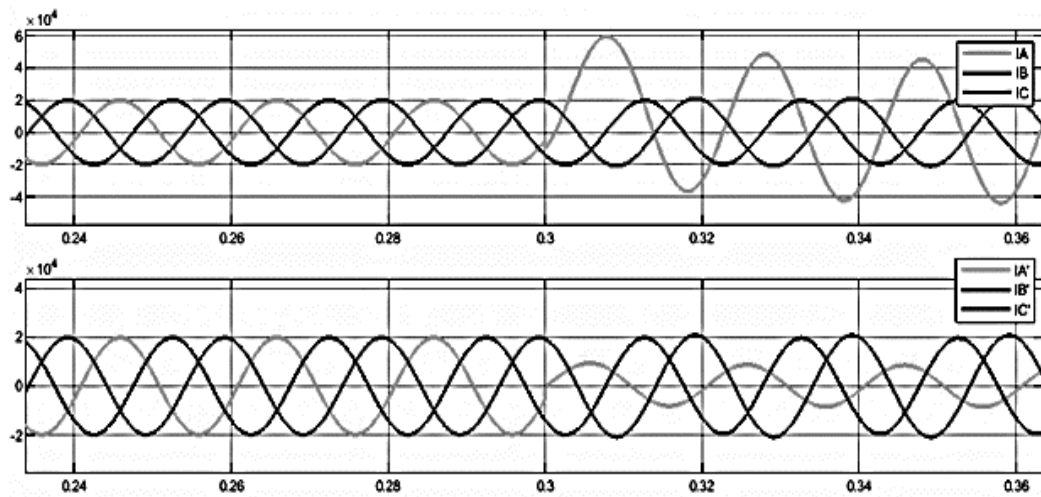


Рис. 14 Осциллограммы фазных токов при коротком замыкании фазы А на землю.

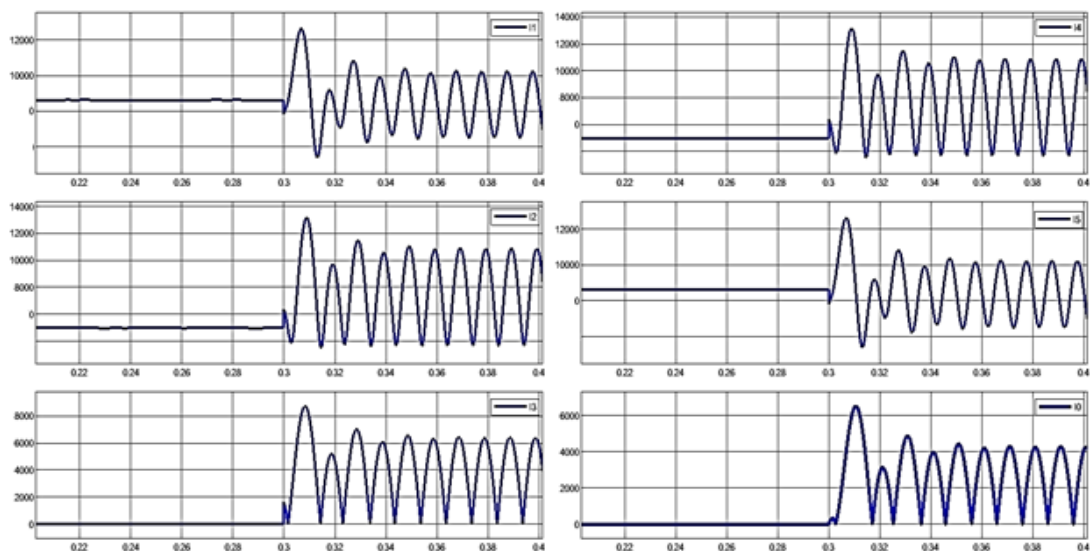


Рис. 15 Осциллограммы симметричных составляющих токов 0,1,2,3,4,5 последовательностей при коротком замыкании фазы А на землю

Как и следовало ожидать, в нормальном режиме токи 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей на выходе фильтра тока равны нулю, рис.15 (момент времени от 0-0,3 сек.). При к.з. фазы А в момент времени 0,3 секунды на выходе фильтра появляются токи 0,1,2,3,4,5 последовательностей, что подтверждает работоспособность разработанной модели фильтра.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В диссертационной работе разработана методика расчета электрических величин при сложных видах повреждений на СВЛ и УСВЛ, приведена теория и разработаны принципиальные схемы и математические модели в Matlab-Simulinc фильтров шести симметричных составляющих для релейной защиты.

Основные теоретические и расчетно – экспериментальные результаты работы заключаются в следующем:

1. Исследование и внедрение СВЛ повышенной пропускной способности и УСВЛ с регулированием передаваемых потоков мощности, требует решения ряда вопросов, в том числе связанных с релейной защитой и автоматикой, что требует расчета всех возможных видов повреждений, в том числе сложных несимметричных повреждений: обрывов фаз и коротких замыканий.

2. Если при расчете трехфазных и шестифазных коротких замыканий, которые могут иметь место на СВЛ и УСВЛ, можно использовать метод фазных координат, выполняя расчет по их однофазной схеме замещения. При этом расчет несимметричных коротких замыканий достаточно сложен, практически невозможен, так как необходимо производить расчет по схемам замещения СВЛ и УСВЛ всех шести фаз, соединенных взаимной индукцией.

3. Использование существующих методов трех несимметричных компонент $x, y, 0$; $r, s, 0$; $\alpha, \beta, 0$ и симметричных 0,1,2 для расчета несимметричных коротких замыканий на самокомпенсирующихся линиях электропередачи (СВЛ) и управляемые самокомпенсирующимися ЛЭП (УСВЛ) является более приемлемым, чем метод фазных координат, но существенно не упрощает расчет, так как полностью не диагонализует матрицу пассивных параметров этих линий и, как следствие, некоторые эквивалентные схемы СВЛ и УСВЛ в соответствующих координатах будут связаны между собой взаимной индукцией.

4. Рассматривая СВЛ и УСВЛ как шестифазные линии электропередач, с учетом их специфических особенностей: повышенное электромагнитное воздействие с

фиксированным углом $\theta = 120^\circ$ между напряжениями сближенных фаз СВЛ и переменным углом θ между сближенными фазными напряжениями УСВЛ, разработан на основе шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 метод расчета простых несимметричных коротких замыканий, которые могут иметь место на СВЛ и УСВЛ. Использование шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 при расчете простых несимметричных коротких замыканий может иметь место на СВЛ, а УСВЛ дает возможность полностью диагонализировать матрицу их пассивных параметров. Это позволяет рассчитывать простые несимметричные короткие замыкания на этих линиях по схемам замещения в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5, не связанных между собой взаимоиндукцией.

5. Исследование и разработка современных и эффективных устройств РЗ для защиты СВЛ и УСВЛ требует расчета кроме простых несимметричных кз и расчет сложных видов несимметрий: обрывов фаз с одновременным несимметричным кз в одном и том же месте или в разных местах.

6. Исследования, представленные в этой работе, показали, что метод 0,1,2,3,4,5-симметричных составляющих также может быть успешно использован для расчета сложных несимметричных повреждений, которые могут иметь места на СВЛ и УСВЛ, таких как обрывов фаз с одновременным несимметричным кз в одном и том же месте или в разных местах.

7. На основе граничных условий в местах повреждений, переходя от граничных условий выраженных в фазовых координатах к граничным условиям выраженным в координатах шести симметричных составляющих, разработан метод и обобщенные формулы расчета различных сложных видов повреждений, которые могут возникнуть на СВЛ и УСВЛ.

8. Для проверки разработанной методики были выполнены расчеты сложных видов повреждений: обрыв и замыкание на землю фазы А на обычной двухцепной ВЛ 110 кВ межсистемной связи протяженностью 70 км, как частный случай СВЛ и УСВЛ по методу трех симметричных составляющих 0,1,2 и разработанному методу шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5, которые показали полное совпадение расчетов со средним отклонением 7%.

9. Достоверность разработанного метода была также подтверждена компьютерным моделированием тех же сложных несимметричных режимов: обрывы фаз с одновременным к.з. на землю в одном месте и в разных местах на той же двухцепной ВЛ-

110 кВ с помощью программ multisim и Matlab-Simulink с использованием шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4, 5 .

10. Проведенные расчеты, их моделирование на компьютере и их достоверность подтверждают приемлемость применения метода шести симметричных составляющих и для расчета сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ.

11. Применение разработанного метода шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 для расчета сложных повреждений, таких как обрывы фаз с одновременным к.з. в одном и том же месте или в разных местах на СВЛ и УСВЛ показало что, как и при простых несимметричных к.з., различным сложным видам повреждений характерно «появление» разных шестифазных симметричных составляющих токов и напряжений. Это позволяет разработать эффективные и чувствительные системы релейной защиты для СВЛ и УСВЛ, основанные на обнаружении и выборе параметров срабатывания на основе соответствующих шестифазных симметричных составляющих.

12. Как и для обычных ЛЭП, для создания современной, эффективной, надежной, чувствительной и селективной релейной защиты СВЛ и УСВЛ, в том числе микропроцессорных защит, необходимо использовать фильтры шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5. Согласно изложенному, различным несимметричным к.з. соответствует «появление» определенных симметричных составляющих, что может служить отличительным признаком «узнаваемости» и повысит чувствительность релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

13. В работе дополнительно развиты теоретические основы и обобщена методика создания фильтров шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 для их использования при создании РЗ и А СВЛ и УСВЛ.

14. Для создания современной микропроцессорной защиты СВЛ и УСВЛ разработана на компьютере математическая модель в среде Matlab-Simulink фильтров шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5.

Результаты исследования подтверждены 11 основными публикациями и доложены на 8 конференциях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. KIORSAK, M., **TURTURICA, N.** Simulation of Filters of Six Symmetrical Components of Currents (Voltages) of Controlled Self-Compensating Power Lines. In: *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. 2021, pp. 371-375, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600391. ISBN 978-1-6654-0079-4.
2. KIORSAK, M., **TURTURICA, N.** Methodology for Assessment the Possibility of Transfer Six-Phase Power Line into the Mode of Operation with Incomplete Number of Phases. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2020, nr. 1(45), pp. 51-58, doi: 10.5281/zenodo.3723643. ISSN 1857-0070.
3. KIORSAK, M., TURCUMAN, L., **TURTURICA, N.** Principiul de elaborare a protecției prin relee a liniilor electrice aeriene cu autocompensare la scurtcircuite nesimetrice dintre fazele apropiate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2015, nr. 3(29), pp. 63-66. ISSN 1857-0070.
4. **TURTURICA, N.** Modeling Filters of Six Symmetrical Components of Controlled Self-compensating Power Transmission Lines. In: *Global Journal of Research in Engineering*. July 2020, S1, pp. 40-46. USA ISSN 2249-4596.
5. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Самокомпенсирующиеся линии электропередач, расчёт электрических величин при повреждениях. В: *Современная школа России. Вопросы модернизации*. Москва: Открытый Мир, 2021, № 8(37), с. 234-237. ISSN 2306-8906.
6. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Эквивалентные схемы замещения при расчёте простых несимметричных коротких замыканий на самокомпенсирующихся линий электропередач методом шести симметричных составляющих. В: *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей XI международной научной конференции*. Казань: ООО «Конверт», 29–30 ноября 2021, с. 97-99. ISBN 978-5-6047189-7-1.
7. **КИОРСАК, М.В., ТУРКУМАН, Л.В., ТУРТУРИКА, Н.Н.** Расчет электрических величин для релейной защиты многофазных линий электропередачи. In: *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chișinău. Chișinău, Republica Moldova: Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, 2016, pp. 226-231. ISBN 978-9975-4123-5-3.
8. KIORSAK, M., TURCUMAN, L., **TURTURICA, N.** Computer simulation of the complex damage types of multiphase higher voltage electrical transmission lines by using the method of six symmetrical components. In: *SIELMEN 2017: Proceedings of the 11-th*

international conference on electromechanical and power systems. Chişinău: 11-13 octombrie, 2017, pp. 225-230. ISBN 978-1-5386-1846-2.

9. **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Обобщённая схема замещения для расчёта обрывов фаз на шестифазных ЛЭП методом симметричных составляющих. In: *Tendinţe contemporane ale dezvoltării ştiinţei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chişinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Ştiinţe a Moldovei, 15 martie 2016, Ediţia 5, Vol.2, pp. 63-65. ISBN 978-9975-75-836-9.

10. **ТУРТУРИКА, Н.** Теоретические основы методики расчета сложных видов повреждений на многоцепных линиях электропередачи. In: *Tendinţe contemporane ale dezvoltării ştiinţei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chişinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Ştiinţe a Moldovei, 10 martie 2015, p. 44.

11. **TURTURICA, N.** Development of six-phase symmetrical components filters for self-compensating power lines. In: *Journal of Engineering Science*. 2022, Vol. XXIX (2), pp. 46-53. ISSN 2587-3474.

АННОТАЦИЯ

Туртурика Наталья, „Разработка методики расчёта сложных видов повреждений на самокомпенсирующихся линиях электропередачи и создания фильтров шестифазных симметричных составляющих”, диссертация на соискание ученой степени доктора инженерных наук, Кишинев, 2023.

Структура диссертации: работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 172 наименований, 143 страниц, 65 рисунков и 8 таблиц. Результаты исследования опубликованы в 11 научных работах.

Ключевые слова: управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ), самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (СВЛ), расчёт сложных несимметричных коротких замыканий, метод шести симметричных составляющих, комплексные схемы замещения, фильтры шести симметричных составляющих.

Цель исследования: разработать теоретические основы, методологию и методику расчета сложных видов повреждений - коротких замыканий и обрывов фаз на СВЛ и УСВЛ, создание фильтры шести симметричных составляющих для их релейной защиты.

Задачи исследования: Разработать теоретическую основу и наглядную и корректную методику расчета электрических величин при сложных видах повреждений СВЛ и УСВЛ, с учетом их особенностей работы. Создать фильтры шести симметричных составляющих для релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

Научная новизна и оригинальность исследования – разработаны методология и методика для расчета электрических величин и моделирования на компьютере сложных видах повреждений СВЛ и УСВЛ, приведена теория и разработаны принципиальные схемы и математические модели в Matlab Simulink для моделирования на компьютере фильтров шестифазных симметричных составляющих для релейной защиты. Разработанная методика носит универсальный характер может быть использована для расчёта сложных видов повреждений в любых шестифазных электрических цепей, включая двухцепных ЛЭП.

Получены результаты, способствующие решению важной научной проблемы: разработана методика расчёта и анализа электрических величин при сложных видах повреждений на СВЛ и УСВЛ и в любых шестифазных электрических цепей, разработаны теоретические принципы создания и моделирования на компьютере фильтров шестифазных симметричных составляющих, позволяющих создать эффективную релейную защиту СВЛ и УСВЛ.

Теоретическая значимость исследования: создание универсальной, наглядной и применимой для инженерной практики методики расчета сложных видов повреждений на СВЛ, УСВЛ носящей универсальный характер и приемлемой для расчета сложных видов повреждений в любых шестифазных электрических цепях, методики создания и моделирования на компьютере фильтров шестифазных симметричных составляющих для релейной защиты СВЛ и УСВЛ.

Практическая значимость результатов работы. Предложенная в диссертационной работе методика расчета сложных видов повреждений и модели фильтров симметричных составляющих могут быть использованы для создания эффективной релейной защиты шестифазных линий, СВЛ и УСВЛ. Предложенная методика и подходы могут быть использованы для расчёта и анализа сложных видов повреждений создания релейной защиты любых шестифазных систем.

Внедрение результатов исследования: Результаты работы могут быть использованы при проведении теоретических и экспериментальных исследований, а так же при разработке устройств релейной защиты СВЛ и УСВЛ при их проектирование и внедрение.

ТУРТУРИКА НАТАЛЬЯ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ
ПОВРЕЖДЕНИЙ НА САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ
ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
И СОЗДАНИЯ ФИЛЬТРОВ ШЕСТИФАЗНЫХ
СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

221.01 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Разрешено к печати: 14.06.23
Бумага офсетная. Tipar RISO.
Печатных листов.: 0,97

Формат бумаги 60x84 1/16
Тираж 25 экз.
№ заказа.

UTM, 2004, Chişinău, bd. Ştefan cel Mare şi Sfânt, nr. 168,
Editura "Tehnica-UTM"
MD-2045, Chişinău, str. Studenţilor, nr. 9/9.

© 2023