

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 621.316.925.1

TURTURICA NATALIA

ELABORAREA METODEI DE CALCUL A DETERIORĂRILOR
COMPLEXE PE LINIILE ELECTRICE CU
AUTOCOMPENSARE ȘI CREAREA FILTRELOR
COMPONENTELOR SIMETRICE HEXAFAZATE

221.01. SISTEME SI TEHNOLOGII ENERGETICE

Teză de doctor în științe ingineresti

Conducător științific:

Chiorsac Mihail,
doctor habilitat în științe tehnice,
profesor universitar

Autorul:

Turturica Natalia

CHIȘINĂU, 2023

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

У.Д.К. 621.316.925.1

ТУРТУРИКА НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА

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

221.01. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

диссертация на соискание ученой степени

доктора инженерных наук

Научный руководитель:

Киорсак Михаил,
доктор хабилитат технических наук,
профессор

Автор:

Туртурика Наталья

КИШИНЁВ, 2023

© Turturica Natalia, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ADNOTARE	6
АННОТАЦИЯ.....	7
ANNOTATION.....	8
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОБЫЧНОЙ И САМОКОМПЕНСИРУЮЩЕЙСЯ ЛЭП	18
1.1 Существующие методы расчета повреждений, возникающих на обычных ЛЭП	18
1.2 Особенности самокомпенсирующихся линий электропередачи	22
1.3 Метод шести симметричных составляющих расчета простых несимметричных коротких замыканий, на самокомпенсирующихся и управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП.....	30
1.4 Эквивалентные схемы замещения при расчёте простых несимметричных коротких замыканий на СВЛ (УСВЛ) методом шести симметричных составляющих	35
Выводы по первой главе	38
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.....	39
2.1 Расчёт неполнофазных режимов на управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП.....	39
2.1.1 Расчет обрывов одной или нескольких фаз на самокомпенсирующейся ЛЭП.....	40
2.1.2 Расчет обрыва одной из фаз УСВЛ с одновременным коротким замыканием её на землю	45
2.2 Построение и применение комплексных схем замещения.....	50
2.2.1 Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая продольной несимметрии на УСВЛ	51
2.2.2 Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая поперечной несимметрии на УСВЛ	56
2.2.3 Комплексные схемы замещения для некоторых случаев продольной несимметрии на УСВЛ	60
2.2.4 Комплексные схемы замещения для некоторых случаев поперечной несимметрии (к.з.) на УСВЛ	65
2.2.5 Комплексные схемы замещения при конкретных сложных несимметричных режимах на УСВЛ	69

Выводы по второй главе	72
3. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ШЕСТИФАЗНЫХ ЛЭП (УСВЛ) НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.....	73
3.1 Расчет обрыва одной из фаз на обычной двухцепной ЛЭП методом трех симметричных составляющих и методом разложения на шесть симметричных составляющих	73
3.2 Расчёт обрыва одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю на обычной двухцепной ЛЭП методом трёх симметричных составляющих и методом разложения на шесть симметричных составляющих.....	84
3.3 Расчет обрыва фазы А на обычной двухцепной ЛЭП методом разложения на три и шесть симметричных составляющих	89
3.4 Расчет обрыва одной из фаз УСВЛ при угле сдвига векторов напряжений сближенных фаз $\theta=120^\circ$ с одновременным коротким замыканием её на землю	92
3.5 Алгоритм расчета и определения токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих	96
Выводы по третьей главе	99
4. РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРОВ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.....	100
4.1 Теоретические основы разработки фильтров шестифазных симметричных составляющих	100
4.2 Разработка фильтров симметричных составляющих 1, 2, 4, 5 последовательностей	105
4.3 Разработка комбинированного фильтра шестифазных симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей.....	108
4.4 Фильтры симметричных составляющих "0", "3" последовательностей	111
4.5 Моделирование комбинированного фильтра шестифазных симметричных составляющих токов и напряжений 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей на компьютере с помощью программных комплексов Matlab Simulink	113
Выводы по четвёртой главе	121
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	122
БИБЛИОГРАФИЯ	124

ADNOTARE

Turturica Natalia, „Elaborarea metodei de calcul a deteriorărilor complexe pe liniile electrice cu autocompensare și crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate”, teză de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2023.

Structura tezei: introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, o listă bibliografică de 172 de titluri, 143 de pagini, 65 de figuri, 8 tabele. Pe baza materialelor cercetării, au fost publicate 11 publicații.

Cuvinte- cheie: linii electrice cu autocompensare (LEAC), linii electrice cu autocompensare reglabilă (LEACR), deteriorări complexe, scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze, metoda a șase componente simetrice, circuite echivalente complexe, filtre hexafazate.

Scopul lucrării: elaborarea bazei teoretice a metodologiei și a metodei de calcul a deteriorărilor complexe – scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, crearea filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecției prin relee a LEAC și LEACR.

Obiectivele cercetării: elaborarea metode adecvate și corecte de calcul a deteriorărilor complexe: scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc pe LEAC și LEACR, ținând cont de particularitățile de funcționare ale acestora la orice unghi de deplasare a vectorilor tensiunilor aplicate dintre fazele apropiate și a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee.

Noutatea și originalitatea științifică- este elaborată metodologia teoretică și metoda de calcul a mărimilor electrice la diferite deteriorări complexe pe LEAC și LEACR, prezentată teoria și sunt elaborate schemele electrice și modelele matematice de modelare la calculator în Matlab-Simulink a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee. Metoda elaborată are un caracter general și poate fi aplicată și la calculul deteriorărilor complexe: scurtcircuite nesimetrice și ruperi de faze ce pot avea loc în orice circuit hexafazat, inclusiv LEA cu lanț dublu.

Rezultatele obținute care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante: este elaborată metodologia de calcul și analiză a mărimilor electrice, curenților și tensiunilor, la deteriorări complexe ce pot avea loc pe LEAC și LEACR ce are un caracter universal și poate fi aplicată la calculul deteriorărilor complexe ce pot avea loc în diferite circuite electrice hexafazate, este elaborat principiul teoretic, schemele principale fizice și de modelare la calculator a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, ce permit elaborarea unei protecții prin relee eficientă pentru LEAC și LEACR.

Semnificația teoretică: elaborarea unei metodologii universale, practice și aplicabile pentru practica inginerescă pentru calcularea deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR și în orice circuit electric hexafazat, metodei de creare și modelare la calculator a filtrelor componentelor simetrice hexafazate pentru protecția prin relee a LEAC și LEACR.

Valoarea aplicativă: metoda de calcul a deteriorărilor complexe și a filtrelor componentelor simetrice hexafazate, necesare pentru studierea și elaborarea unei protecții prin relee eficiente la implementarea LEAC și LEACR. Metoda și abordările propuse pot fi utilizate pentru a calcula și analiza deteriorările complexe și elaborarea protecției prin relee a oricărei sisteme hexafazate.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele lucrării pot fi utilizate în cercetări teoretice și experimentale la calcularea deteriorărilor complexe pe LEAC și LEACR și în orice circuit electric hexafazat, la elaborarea protecției prin relee la proiectarea și implementarea LEAC și LEACR.

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.

ANNOTATION

Turturika Nataliya, “The development of methods for calculation at complex failures on self-compensating power transmission lines and creating filters of six symmetric components”, PhD thesis in engineering sciences, Chisinau, 2023.

Thesis structure: introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, references including 172 items, 143 pages, 65 figures, 8 tables. Based on the dissertation materials 11 works are published.

Keywords: controlled self-compensating transmission lines (CSCTL), self-compensating transmission lines (SCTL), calculation complex nonsymmetrical short-circuits, method of six symmetrical components, complex schemes of substitution, filters of six symmetrical components.

The aim of the research: to develop the theoretical foundations, methodology and methodology for calculating complex types of damage - short circuits and phase failures on (SCTL and CSCTL) and creation of filters of six symmetrical components for the relay protection.

Research objectives: Development of graphic and correct calculation of electric values methods at SCTL and CSCTL complex failures, taking into account their operation peculiarities; Creation filters of six symmetrical components for SCTL and CSCTL relay protection.

Scientific novelty and singularity of the research: the methods for the electric values calculation was developed at SCTL and CSCTL complex failures, the theory was presented and principal schemes were developed along with the mathematic models in Matlab-Simulink filters of six symmetrical components for the relay protection.

The results obtained that contribute to solving an important scientific problem, solved in the work: development method for calculation and analysis of electric values at complex failures, creation filters of symmetrical components, which make it possible to design the efficient the relay protection SCTL and CSCTL.

Theoretical significance of the work results: creation of universal, graphic and applicable for engineering methods of calculation of SCTL and CSCTL complex failures, computer methods for creation and modeling filters of six-phase symmetrical components for their relay protection.

Practical significance of the results of the work: the calculation methods proposed in this work for complex failures and filter models of symmetrical components can be used for creation of the efficient relay protection of six-phase lines, SCTL, CSCTL. The method and approaches offered can be used for calculation and analysis of complex failures and relay protection of any six-phase systems.

Implementation of the research results: the results of this work can be used for performing theoretic and experimental studies, as well as for the development of the relay protection devices on SCTL and CSCTL and ordinary double-circuit transmission lines.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЛЭП – линия электропередачи

ФПУ – фазоповоротное устройство

УСВЛ – управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи

СВЛ – самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи

к.з. – короткое замыкание

РЗА – релейная защита и автоматика

КУ - компенсирующее устройство

ИРМ - источник реактивной мощности

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Современное развитие мировой энергетики 21 века связано с необходимостью дальнейшего повышения эффективности объединения энергосистем путём увеличения пропускной способности линий электропередачи, с необходимостью внедрения новых устройств автоматики, релейной защиты, регулируемых потоков передаваемых активных и реактивных мощностей и внедрением SMART технологий [57,63,64,100,152,167]. Эта тенденция отражена в законе об утверждении Национальной стратегии развития «Молдова-2030», в повышении качества жизни людей, в том числе за счёт удовлетворения растущих потребностей на основе качественного и надёжного обеспечения электроэнергией в необходимом объёме [72]. В энергетической стратегии Молдовы до 2030 года приведены основные задачи развития электроэнергетики, связанные с *улучшением энергетической эффективности в цепи производства, транспортировки и распределения электроэнергии путём снижения уровня потерь* [72].

В законе об электроэнергии предусмотрена общая обязанность по соблюдению законодательства об охране окружающей среды в сфере генерирования, транспортировки и распределения электрической энергии [141].

Одним из способов повышения функционирования, уменьшения потерь электроэнергии и снижения экологического влияния линий электропередачи на окружающую среду является внедрение компактных ЛЭП, самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (СВЛ) и управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (УСВЛ) повышенной пропускной способности, с уменьшенной полосой отчуждения и электромагнитного влияния на окружающую среду и возможности управления потоками передаваемых мощностей [10,78, 83, 86, 115, 150, 151].

СВЛ и УСВЛ со сближенными фазами позволяют уменьшить индуктивность и увеличить ёмкость ЛЭП, повышая их пропускную способность, в том числе компактных, так называемых самокомпенсирующихся ЛЭП с естественным углом сдвига систем векторов напряжения сближенных фаз 120 (СВЛ) и управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП с регулируемым углом сдвига систем векторов напряжения сближенных фаз (УСВЛ) [75,76,85,87, 156, 159, 162].

Внедрение СВЛ и УСВЛ требует решения целого комплекса задач, включая исследование, проектирование и создание релейной защиты на основе расчёта и анализа различных повреждений: коротких замыканий и обрывов фаз, чему и посвящена данная работа [22,95,117].

СВЛ в отличие от обычных ЛЭП представляют собой линии электропередачи, у которых для создания естественного 120° угла сдвига систем векторов напряжения между сближенными фазами сближены соответствующие разноимённые фазы цепей $AB'BC'SA'$.

УСВЛ представляют собой двухцепные ЛЭП, у которых сближены одноименные фазы $AA'BB'CC'$ разных цепей между собой с созданием между ними, благодаря специальным фазоповоротным устройствам - трансформаторам (ФПУ), регулируемого угла сдвига векторов напряжений, рисунок 1[74].

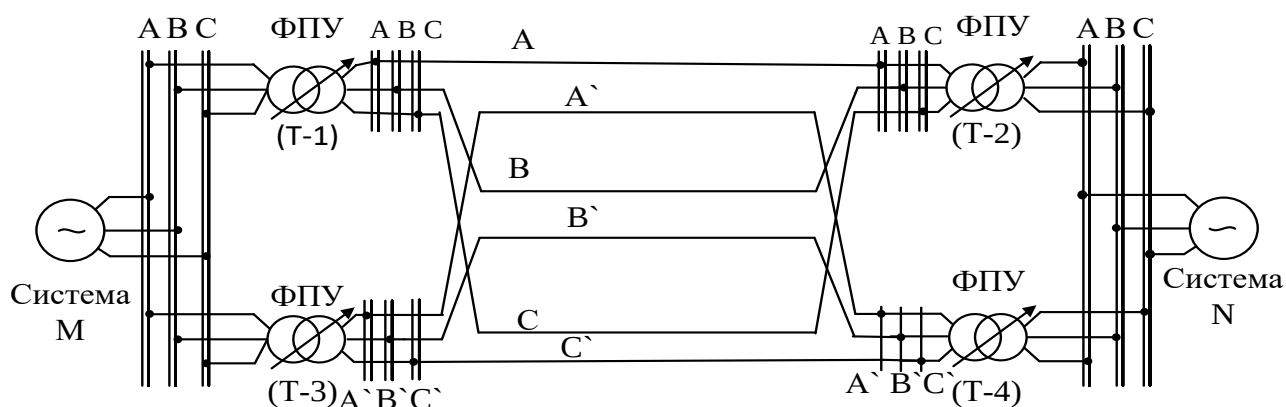


Рис. 1. Трехлинейная принципиальная электрическая схема УСВЛ [74]

СВЛ и УСВЛ - воздушные линии нового поколения, внедрение которых является неотъемлемой частью на пути модернизации и построения «разумных» электроэнергетических систем, которые будут гарантировать: установленную пропускную способность, требуемые режимные характеристики, уменьшение эксплуатационных расходов и капитальных инвестиций, наименьшее негативное воздействие на окружающую среду.

Свойства линий электропередачи зависят от параметров фазных цепей (фаз). Основной величиной, характеризующей данные параметры, является напряженность магнитного поля, которая в свою очередь зависит от: междофазных расстояний, значения и расположения векторов приложенных напряжений и проходящих токов. Регулировка этих параметров позволяет в значительной степени менять характеристики линии. Электромагнитное поле создаётся вокруг каждой отдельной цепи. При сближении цепей возникает обоюдное электромагнитное воздействие. Чем ближе расположены цепи, тем данное воздействие выше, в результате чего возникает обоюдная компенсация полей. Данное явление происходит без внешнего воздействия на электромагнитное поле, поэтому его можно рассматривать как внутреннюю самокомпенсацию.

Основным новшеством СВЛ и УСВЛ является применение физического эффекта интенсивного электромагнитного воздействия трехфазных цепей переменного тока, вследствие их сближения. Данный эффект обеспечивает улучшение эквивалентных параметров линии, повышение технико-экономических показателей и улучшение пропускной способности[163]. Улучшение эквивалентных параметров, увеличение пропускной способности УСВЛ достигается благодаря сближению фазных цепей и изменению фазового сдвига между системами напряжений. Внутренняя самокомпенсация позволяет уменьшить значение напряженности электромагнитного поля у поверхности земли под ЛЭП.

Линии электропередачи нового поколения по сравнению с классическими линиями имеют ряд преимуществ:

- уменьшение на 20 - 30% капитальных инвестиций на единицу транспортируемой мощности;
- минимизация потерь и соблюдение установленных режимных характеристик и ограничений благодаря регулированию режимов работы линии и сети [146];
- быстродействующая и эффективная реакция на всевозможные изменения условий энергосистем для переходных и нормальных режимов работы [9, 47, 90];
- уменьшение почти в два раза сельскохозяйственных угодий, отдаваемых под строительство линий;
- увеличение в 1,5 раза пропускной способности;
- регулирование направления и величины потока мощности в электрических сетях;
- снижение величины напряженности электрического поля, и следовательно уменьшение экологического влияния, что особенно важно для электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжений [151].

Внедрение СВЛ и УСВЛ требует решения целого комплекса задач. Одной из наиболее важных задач исследования является проектирование релейной защиты, основу которого составляют расчёты различных коротких замыканий и обрывов цепей, а также анализ аварийных режимов работы [15, 24, 113, 113]. 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 (цепей), а следовательно в электромагнитном влиянии друг на друга.

Выполненные до сих пор исследования [31-34] 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 повреждения, 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, 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.

Проведенные ранее исследования [23,79] и настоящие [35, 133,151] показали, что расчет различных несимметричных режимов работы, коротких замыканий и сложных повреждений, таких как обрывы и короткие замыкания, наиболее целесообразно выполнять, используя метод шестифазных симметричных составляющих. Кроме того в процессе исследований выявлено, что для определенных видов коротких замыканий (К.З.) и сложных повреждений имеет место «появление» определенных симметричных составляющих, что является их отличительным признаком и может послужить опознавательным признаком для релейной защиты[62, 65, 108]. Несмотря на то, что современные микропроцессорные релейные защиты, как и классические, могут успешно реагировать на фазные величины токов (напряжений) при различных повреждениях, их реагирование на появление симметричных составляющих существенно повышает чувствительность релейной защиты. Для выявления симметричных составляющих присущих тем или иным повреждениям, необходимы соответствующие фильтры[126]. До настоящего времени проведенные исследования [35,36, 139] касались только физического исполнения этих фильтров, что вполне приемлемо для традиционных защит. Для современных цифровых и микропроцессорных защит наиболее целесообразно

математическое «выделение» данных симметричных составляющих при различных несимметричных повреждениях, что рассматривается в данной работе.

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 сопоставимых 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 содержание диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка литературы из 172 наименований, 8 таблиц, 65 рисунков.

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

В первой главе рассмотрены теоретические основы методики расчета сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ, разработаны основные принципы расчета различных

сложных повреждений с использованием метода шести симметричных составляющих, приведен алгоритм вычисления удельных характеристик в координатах шести симметричных составляющих.

Во второй главе согласно приведённой методике выведены соответствующие граничные условия в местах повреждений на шестифазных ЛЭП в координатах шести симметричных составляющих. Показано построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных режимах для дальнейшего компьютерного моделирования.

В третьей главе проведена апробация разработанной методики расчета сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ методом шести симметричных составляющих. Представлены расчеты сложной несимметрии на одной из цепей обычной двухцепной ЛЭП методом разложения на три (0,1,2) и на шесть (0,1,2,3,4,5) составляющих. Рассчитаны токи при обрыве одной из фаз и к.з с одновременным обрывом фаз обычной двухцепной ЛЭП, методом разложения на шесть симметричных составляющих и сопоставление с результатами смоделированной комплексной схемы. Рассчитаны токи при обрыве фазы обычной двухцепной ЛЭП методом разложения на шесть (0,1,2,3,4,5) симметричных составляющих и сопоставление его с результатами расчета методом разложения на три (0,1,2) составляющие.

В четвертой главе рассмотрены теоретические основы создания фильтров тока и напряжения шестифазных симметричных составляющих, реализован алгоритм создания фильтра симметричных составляющих шестифазного разложения в электронном пакете Matlab Simulink.

Общие выводы и рекомендации отражают полученные научные и теоретические результаты работы, а также определяют целесообразность проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований релейной защиты самокомпенсирующихся ЛЭП.

Используемое программное обеспечение: текстовый редактор Microsoft Word 2010, векторный графический редактор Microsoft Visio 2010, программа подготовки и просмотра презентаций Microsoft Power Point 2010, программное обеспечение Multisim 11, среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем Matlab Simulink 2015.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОБЫЧНОЙ И САМОКОМПЕНСИРУЮЩЕЙСЯ ЛЭП

1.1 Существующие методы расчета повреждений, возникающих на обычных ЛЭП

В настоящее время наиболее известными методами расчета параметров несимметричных электрических систем являются:

- классический метод, для описания состояния электрической цепи составляется система уравнений действительных (полных) токов и напряжений фаз (метод фазных координат) [2,5,8];
- методы несимметричных составляющих [64];
- метод симметричных составляющих [120,121, 131].

Использование данных методов заключается в составлении соответствующих схем замещения электрической сети с последующим сведением к уравнениям узловых напряжений [58] согласно выражению:

$$\dot{\mathbf{Y}}_{y\Sigma} \dot{\mathbf{U}}_{\Sigma} = \sqrt{3} \dot{\mathbf{I}}_{\Sigma} \quad (1.1)$$

где $\dot{\mathbf{Y}}_{y\Sigma}$ – полная комплексная матрица узловых проводимостей порядка $(n-1)$;

$\dot{\mathbf{I}}_{\Sigma}$ – вектор токов в узлах $(n-1)$ -го порядка; $\dot{\mathbf{U}}_{\Sigma}$ – вектор-столбец напряжений узлов $(n-1)$ -го порядка.

Дальнейший расчет параметров сети проводят итерационными или аналитическими методами. Итерационные методы наиболее распространены. Одним из таких методов является метод матричной алгебры. Сущность данного метода заключается в систематизации исходных данных и параметров сети, а также в решении матричных уравнений [121], составленных в виде матриц из токов и напряжений электрической сети.

Несимметричные режимы, в том числе и сложные несимметричные режимы, вызванные к.з. и обрывом фаз могут быть рассчитаны методом фазных координат. При использовании данного метода трёхфазная схема замещения электрической сети описывается соответствующей системой уравнений с учётом рассматриваемого повреждения [96,166]. Каждый трехфазный элемент сети задается тремя сопротивлениями с электромагнитными связями или соответствующей схемой замещения. Число узлов расчетной схемы по отношению к однолинейной схеме замещения сети для расчёта нормального режима при этом утраивается, так как расчёт необходимо вести по всем трём

фазам одновременно с учётом взаимоиндукции между ними, в том числе между обмотками трансформаторов и автотрансформаторов, что значительно усложняет расчёт[60].

Даже с использованием современных компьютеров стараются эффективно использовать память компьютера и уменьшить время расчёта [101].

Использование метода фазных координат целесообразно при необходимости учета различий в фазных параметрах линии, для осуществления расчета нормальных режимов комбинированных однофазных и трехфазных сетей электрических сетей с особыми схемами соединений трансформаторов, а также при расчетах взаимных электромагнитных влияний линий. Применение метода фазных координат для расчетов режимов электрических систем рассматривается в работах [30,53,67,103].

Общая методика расчёта несимметричных режимов в фазных координатах может быть использована при расчетах простых несимметричных режимов. Однако и в этом случае расчет является довольно громоздким и сложным, поскольку его необходимо вести по всем трём фазам одновременно с учётом взаимоиндукции между ними.

Второй метод - метод несимметричных составляющих позволяет представить симметричные трёхфазные статические элементы сети с электромагнитными связями между фазами через эквивалентные схемы соответствующих несимметричных составляющих. Выражения матриц напряжения и тока через соответствующие несимметричные составляющие имеют вид:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\phi} = \mathbf{C}_{xyz} \dot{\mathbf{U}}_{xyz} \quad (1.2)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{\phi} = \mathbf{B}_{xyz} \dot{\mathbf{I}}_{xyz} \quad (1.3)$$

где $\mathbf{C}_{xyz}$, $\mathbf{B}_{xyz}$ - матрицы преобразования для группы несимметричных составляющих x, y, z .

$$\mathbf{C}_{xyz} = c_{az} \begin{vmatrix} \pm\sqrt{2k_z / k_x} & 0 & 1 \\ \mp\sqrt{k_z / 2k_x} & \pm\sqrt{3k_z / 2k_y} & 1 \\ \mp\sqrt{k_z / 2k_x} & \mp\sqrt{3k_z / 2k_y} & 1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{xyz} = k_z c_{az} \begin{vmatrix} \pm\sqrt{2k_x / k_z} & 0 & 1 \\ \mp\sqrt{k_x / 2k_z} & \pm\sqrt{3k_y / 2k_z} & 1 \\ \mp\sqrt{k_x / 2k_z} & \mp\sqrt{3k_y / 2k_z} & 1 \end{vmatrix},$$

где c_{az}, k_x, k_y, k_z - коэффициенты, представляющие собой действительные числа, зависящие от вида несимметрии (короткого замыкания).

Метод несимметричных составляющих $x, y, 0; r, s, 0; \alpha, \beta, 0$ и другие методы [55,112] несколько упрощают расчёт, но не приводят матрицу пассивных параметров сети и её элементы к диагональному виду, поэтому необходимо учитывать взаимоиндукцию между токами соответствующих последовательностей.

В связи с этим наибольшее распространение получил метод трёх симметричных составляющих прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей токов и напряжений, позволяющий привести матрицу пассивных параметров сети и её элементов к диагональному виду [28-20,46,63,70,89,89,138 168].

Метод трёх симметричных составляющих, как известно, даёт возможность вести расчёт по однофазным схемам замещения соответствующих последовательностей с учётом соответствующих граничных условий данного несимметричного повреждения, которые не связаны между собой взаимоиндукцией, что существенно упрощает расчет [16,88,142,165]. Кроме того, конкретным несимметричным коротким замыканиям соответствует «появление» тех или иных симметричных составляющих токов (напряжений). Это служит отличительным признаком для распознавания релейной защиты данного повреждения и повышает её чувствительность за счёт реагирования не на фазные величины полных токов и напряжений, а на соответствующие симметричные составляющие [7,21,42,72].

Сущность метода заключается в разложении несимметричной трёхфазной системы векторов токов (напряжений) на три системы векторов симметричных составляющих токов (напряжений) [121,123]:

$$\begin{aligned}\dot{F}_A &= \dot{F}_{A1} + \dot{F}_{A2} + \dot{F}_{A0}; \\ \dot{F}_B &= \dot{F}_{B1} + \dot{F}_{B2} + \dot{F}_{B0}; \\ \dot{F}_C &= \dot{F}_{C1} + \dot{F}_{C2} + \dot{F}_{C0},\end{aligned}\tag{1.4}$$

где $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$ - система токов (напряжений) в фазных координатах;

$\dot{F}_{A1}; \dot{F}_{A2}; \dot{F}_{A0}; \dot{F}_{B1}; \dot{F}_{B2}; \dot{F}_{B0}; \dot{F}_{C1}; \dot{F}_{C2}; \dot{F}_{C0}$ - система симметричных составляющих токов (напряжений)

Используя оператор $a = e^{j120}$ и выражая симметричные составляющие фаз В и С через симметричные составляющие фазы А, можно получить упрощенный вид выражения (1.4):

$$\begin{aligned}\dot{F}_A &= \dot{F}_1 + \dot{F}_2 + \dot{F}_0; \\ \dot{F}_B &= a^2 \dot{F}_1 + a \dot{F}_2 + \dot{F}_0; \\ \dot{F}_C &= a \dot{F}_1 + a^2 \dot{F}_2 + \dot{F}_0.\end{aligned}\tag{1.5}$$

или в матричной форме:

$$\dot{\mathbf{F}} = \dot{\mathbf{S}}_3 \times \dot{\mathbf{F}}_s\tag{1.6}$$

Умножая матричное выражение (1.6) слева и справа на обратную матрицу $\dot{\mathbf{S}}_3^{-1}$ получаем:

$$\dot{\mathbf{F}}_s = \dot{\mathbf{S}}_3^{-1} \times \dot{\mathbf{F}},\tag{1.7}$$

$$\text{где } \dot{\mathbf{S}}_3^{-1} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a^2 & 1 \\ a^2 & a & 1 \end{vmatrix} - \text{обратная матрица перехода от симметричных}$$

составляющих к фазным координатам.

Матричное выражение (1.7) позволяет осуществить переход от матрицы токов (напряжений) в фазных координатах $\mathbf{F}$ к матрице симметричных составляющих токов (напряжений) $\dot{\mathbf{F}}_s$ в координатах трёх симметричных составляющих 0,1,2.

$$\begin{aligned}\dot{F}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C); \\ \dot{F}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a\dot{F}_B + a^2\dot{F}_C); \\ \dot{F}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a^2\dot{F}_B + a\dot{F}_C).\end{aligned}\tag{1.8}$$

Представление фазных токов и напряжений через симметричные составляющие с использованием матрицы $\mathbf{S}_3$ приводит к диагонализации матрицы сопротивлений трёхфазной системы в фазных координатах к диагональному виду:

$$\mathbf{Z}_s = \begin{vmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{vmatrix},\tag{1.9}$$

где элементы Z_0, Z_1, Z_2 . - представляют собой сопротивления соответствующих симметричных составляющих.

Благодаря этому представляется возможным вести расчёт любой несимметрии по однофазным схемам замещения симметричных составляющих, не связанных между собой взаимоиндукцией [1,3,4,124, 16,99].

1.2 Особенности самокомпенсирующихся линий электропередачи

Как было указано ранее, основной отличительной особенностью самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (СВЛ) и управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (УСВЛ) от обычной двухцепной ЛЭП является сближение разноимённых фаз разных цепей между собой (СВЛ) или одноимённых фаз цепей с созданием специальным фазоповоротным трансформатором угла сдвига фаз между векторами напряжений сближенных фаз (УСВЛ) [91,38,81, ,80-84, 149].

Расстояние между сближенными фазами СВЛ и УСВЛ намного меньше по сравнению с расстоянием между фазами у обычных ВЛ. Это позволяет за счёт повышенного электромагнитного влияния между сближенными фазами, уменьшить эквивалентную индуктивность фаз СВЛ или управлять эквивалентной индуктивностью фаз УСВЛ. При этом в полной мере соблюдаются условия выполнения требований по ограничениям минимально допустимых изоляционных промежутков «фаза - фаза» по максимальным рабочим напряжениям, а также грозовым и коммутационным перенапряжениям. Выбор сечения проводов и конструкций расщепленных фаз при этом осуществляется с учетом требований по ограничению максимальной величины напряженности электрического поля на поверхности проводов по условиям ограничения потерь на коронирование, акустические шумы и радиопомехи.

Для СВЛ и УСВЛ разработаны специальные типы опор. Уменьшение расстояния между фазами ВЛ позволяет существенно изменить параметры электромагнитного поля, удельное индуктивное сопротивление, емкостную поперечную проводимость, волновое сопротивление, зарядную мощность и величину натуральной мощности, которая является главным показателем пропускной способности линии [25].

Благодаря новым конструкциям СВЛ и УСВЛ различных классов напряжения удается добиться увеличения натуральной мощности в расчете на цепь на 25-40 % по сравнению с аналогичными двухцепными ВЛ традиционного исполнения [44,77,106,159].

При выборе габаритов ВЛ, в первую очередь, учитываются требования по допустимой величине напряженности электрического поля под линией вблизи поверхности земли.

Проанализировав отечественные и зарубежные работы, проведенные в области компактных ВЛ, СВЛ и УСВЛ, необходимо подчеркнуть, что минимально допустимые расстояния между фазами на линиях указанных типов могут составлять 25-30 % от

величины принимаемого в настоящее время расстояния между фазами на ВЛ обычной конструкции.

Достичь механической устойчивости сближенных фаз ВЛ удастся за счет внедрения V - образной конструкции поддерживающих гирлянд изоляторов на опорах или изолирующих траверс и прочих мероприятий, в том числе внедрением междуфазных изоляционных элементов, а также подбором конструкции расщепленных фаз с переменным радиусом расщепления. Более значительного эффекта удастся достичь благодаря СВЛ и УСВЛ [12,127].

При расчете параметров режимов работы УСВЛ знак взаимных составляющих индуктивного сопротивления и емкостной проводимости сближенных фаз зависит от величины угла сдвига систем векторов напряжений цепей друг относительно друга. В результате взаимные составляющие индуктивного сопротивления и емкостной проводимости сближенных фаз могут либо прибавляться, либо вычитаться из величин собственной индуктивности фазы. От этого будут зависеть эквивалентные параметры, определяющие величину зарядной мощности линии и величину натуральной мощности. При угле $\Theta = 180^\circ$ между векторами сближенных фаз УСВЛ достигается наибольшая величина натуральной мощности УСВЛ, вследствие того, что индуктивное сопротивление между сближенными фазами имеет минимальное значение, а емкостная проводимость и соответственно зарядная мощность - максимальное. При $\Theta = 180^\circ$ взаимная индуктивная составляющая индуктивного сопротивления сближенных фаз имеет отрицательный знак и вычитается из собственного значения индуктивного сопротивления фаз, в результате чего величина эквивалентного индуктивного сопротивления фаз становится минимальной.

При рассмотрении поперечной проводимости следует, что взаимное влияние сближенных фаз создает дополнительную величину емкостной проводимости, имеющую положительный знак по отношению к собственной поперечной емкостной проводимости фаз. Следовательно, величина эквивалентной емкостной проводимости при $\Theta = 180^\circ$ имеет максимальное значение, линия при этом обладает максимальной зарядной и натуральной мощностью, являющейся показателем пропускной способности. При переводе УСВЛ в режим при $\Theta = 0^\circ$ взаимное электромагнитное влияние цепей линии меняет знак, из-за этого эквивалентное индуктивное сопротивление сближенных фаз становится максимальным, а емкостная проводимость - минимальной, соответственно зарядная и натуральная мощности линии принимают минимальные значения.

На рисунке 1.1 показана конструкция опоры УСВЛ 220 кВ.

В общем виде принципиальная электрическая схема УСВЛ показана на рисунке 1.2.

Вариант схемного исполнения СВЛ приведен на рисунке 1.3.

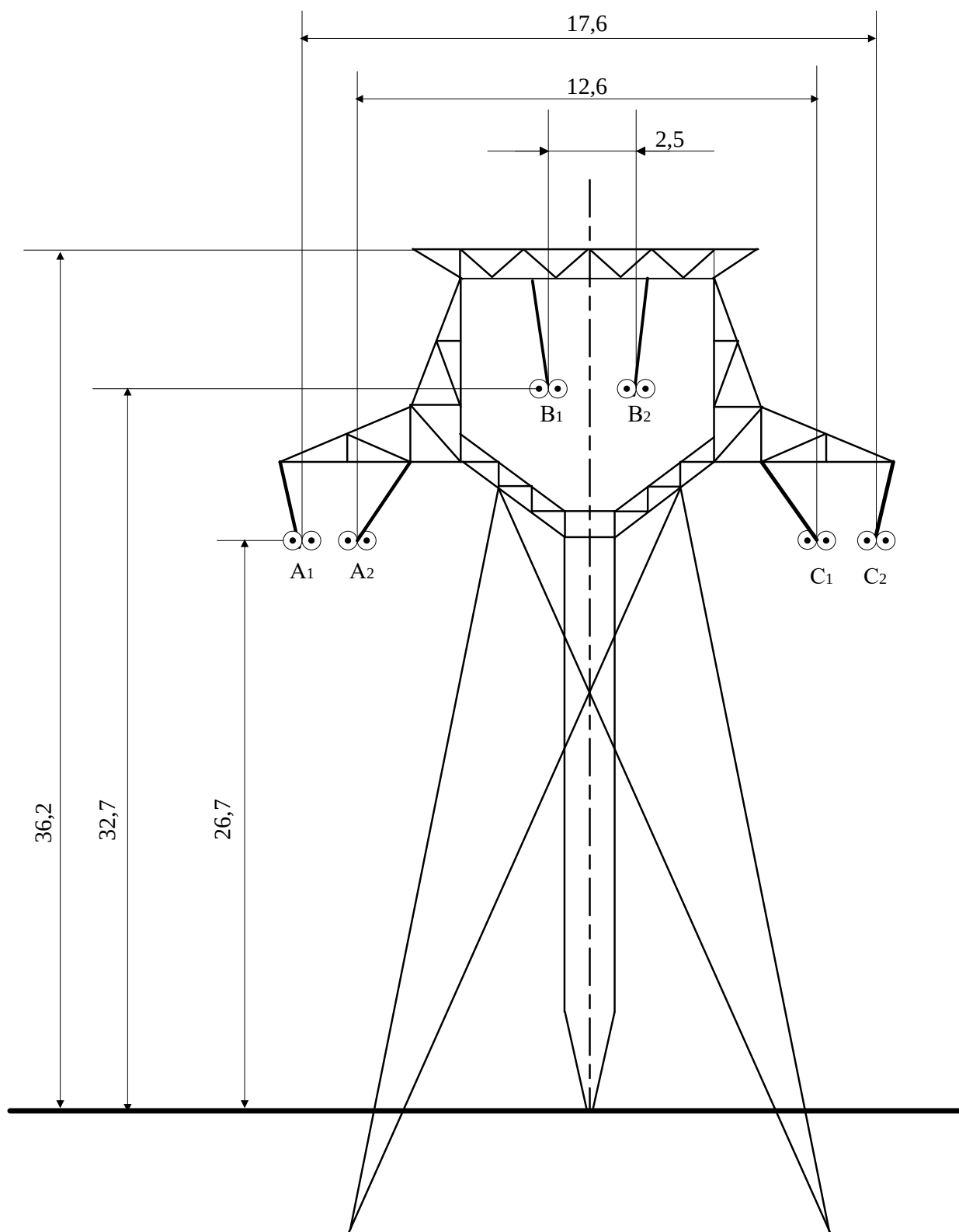


Рис. 1.1. Двухцепная УСВЛ - 220 кВ на опорах типа «Чайка» [79]

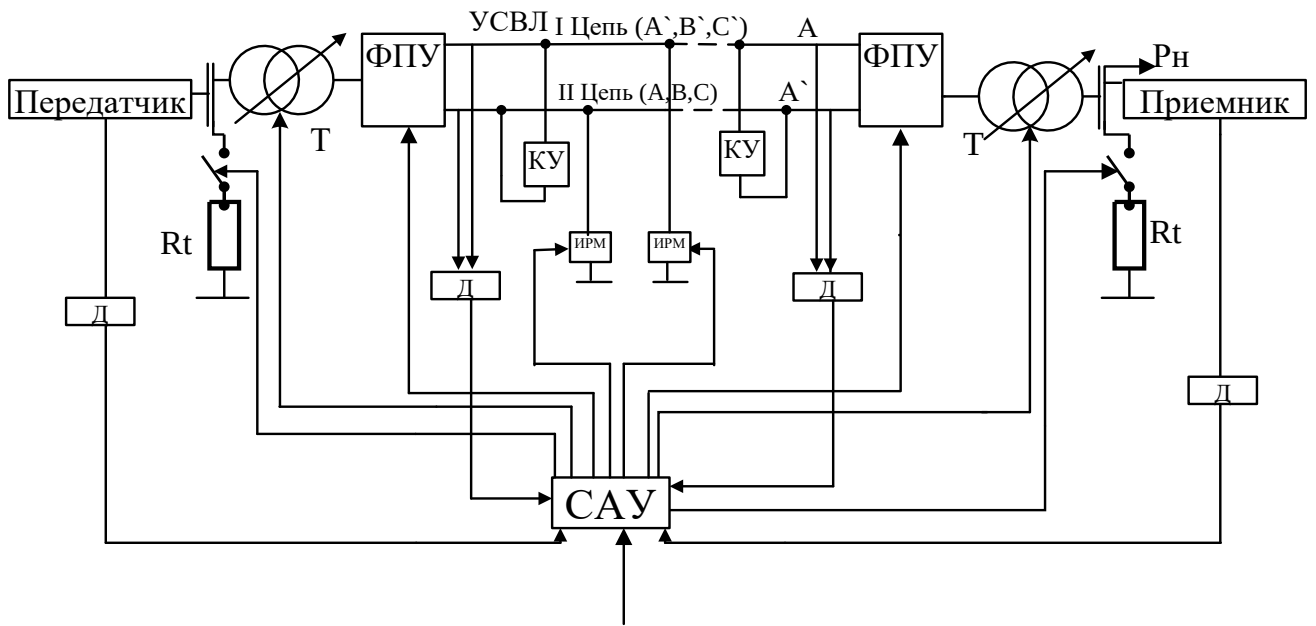


Рис. 1.2. Принципиальная электрическая схема УСВЛ: ФПУ - фазоповоротное устройство; R_t - тормозное сопротивление; Д - датчик; КУ - компенсирующее устройство; ИРМ - управляемый источник реактивной мощности; R_n - нагрузка; САУ - задающая система управления [78]

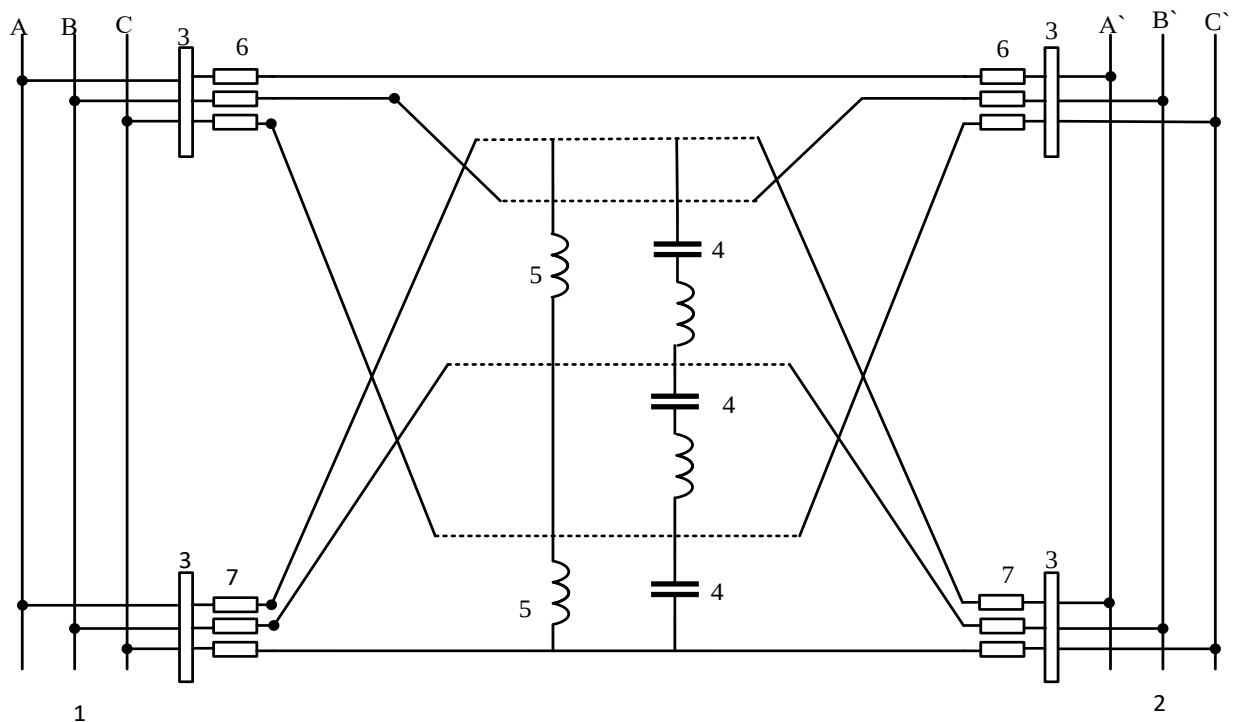


Рис. 1.3. Принципиальная электрическая схема двухцепной СВЛ с возможностью регулирования в широких пределах углового сдвига между системами векторов напряжений цепей, и содержащая компенсирующие устройства между фазами: 1 - фазы A, B, C 1-ой цепи; 2 - фазы A', B', C' 2-ой цепи; 3 - фазоповоротное устройство; 4 - дополнительные емкости; 5 - дополнительные шунтирующие реакторы; 6, 7 - выключатели 1-ой и 2-ой цепей, соответственно [79]

Регулирование эквивалентных параметров и характеристик УСВЛ и параметров режимов электропередачи во всем диапазоне передаваемой мощности осуществляется при помощи фазового управления и дополнительных компенсирующих устройств. Двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи по сравнению с обычными двухцепными ВЛ тех же классов напряжения характеризуются повышенной на 30 - 50 % величиной натуральной мощности, сниженными на 15 - 20 % удельными капитальными вложениями в расчете на единицу передаваемой мощности, требуют меньшей полосы отчуждаемых под строительство земельных угодий и оказывают сниженное экономическое влияние [71,84-86,118].

Управляемую двухцепную линию электропередачи повышенной пропускной способности, работающую в системе, можно привести в общем случае к эквивалентной электрической схеме замещения, показанной на рисунке 1.4, где Z_C , Z_{CM} и Z_{CN} - эквивалентные сопротивления трехлучевой схемы замещения энергосистемы, $Z_{УСВЛ}$ - эквивалентное сопротивление УСВЛ [78,158].

Для УСВЛ класса напряжения 330 кВ и выше, с учётом что Z_C намного меньше Z_{CM} и Z_{CN} , то при расчете коротких замыканий, анализе электрических величин и поведения релейной защиты на УСВЛ, с достаточной для этих целей точностью можно принять $Z_C = 0$, т. е. рассматривать УСВЛ как линию с двухсторонним питанием от эквивалентных систем M и N в соответствии с рисунком 1.5, где Z_{CM} и Z_{CN} - эквивалентные сопротивления систем M и N .

На рисунке 1.6 дана однолинейная и трехлинейная принципиальные электрические схемы УСВЛ, состоящей из двух трехфазных цепей A, B, C и A', B', C' , сближенных между собой на минимально допустимое по коммутационным перенапряжениям расстояние. ФПУ – фазоповоротное устройство или группа из четырех трансформаторов, установленных по концам линии и обеспечивающая необходимый фазовый сдвиг θ между системами векторов фазных напряжений цепей. Приведенные схемы УСВЛ выбраны для дальнейших исследований.

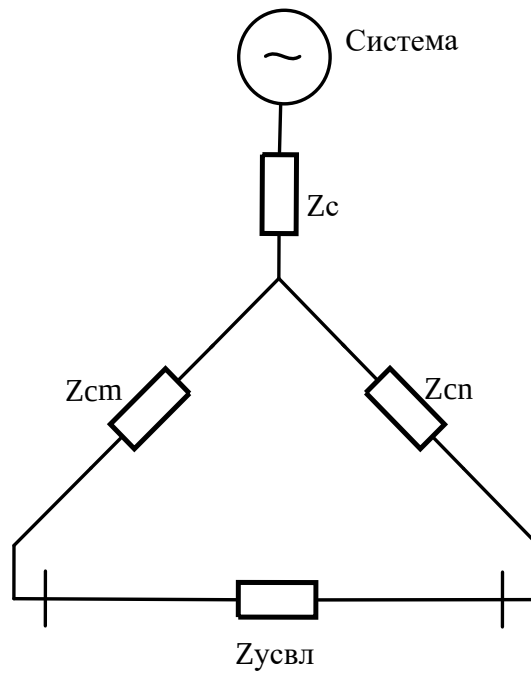


Рис. 1.4. Эквивалентная электрическая схема замещения УСВЛ, работающая в системе Z_c, Z_{cm}, Z_{cn} эквивалентные сопротивления трехлучевой схемы замещения энергосистемы; $Z_{увл}$ - эквивалентное сопротивление УСВЛ [79]

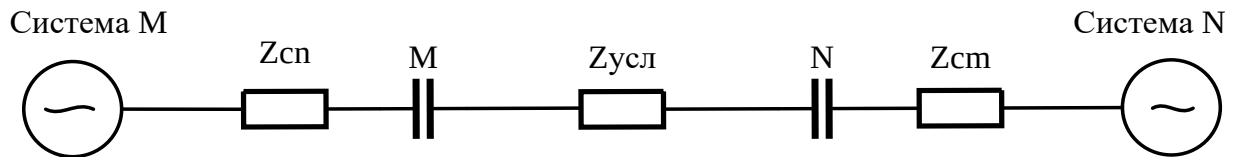
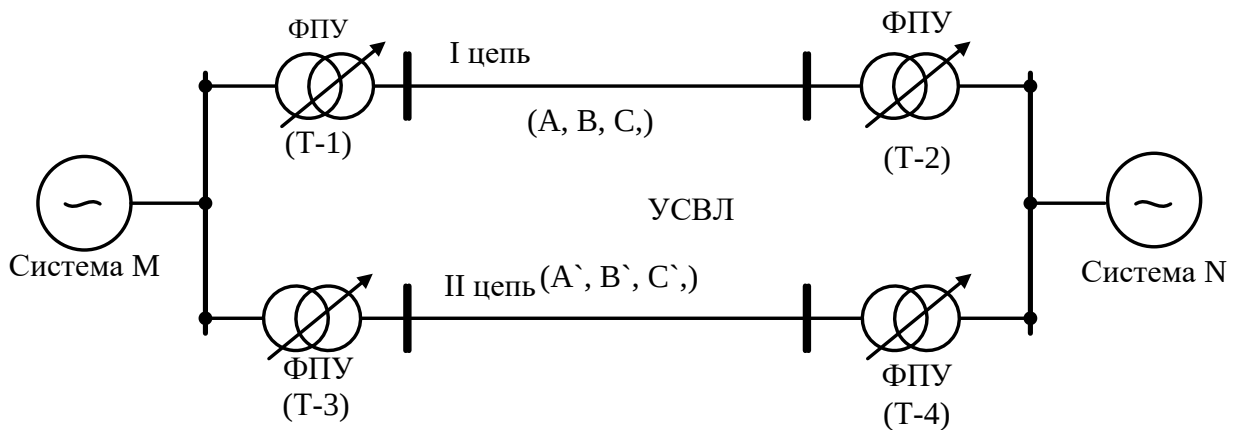


Рис. 1.5. Эквивалентная электрическая схема замещения УСВЛ работающая в системе при $Z_c = 0$ [79]



а)

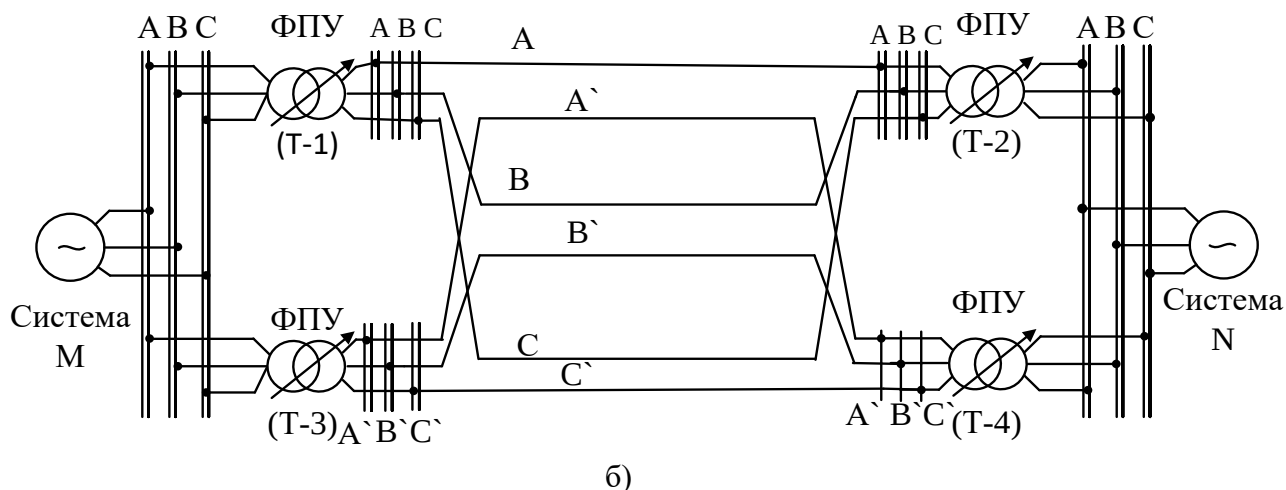


Рис. 1.6. Однолинейная (а) и трехлинейная (б) принципиальные электрические схемы УСВЛ: A, B, C - фазы первой цепи линии; A', B', C' - фазы второй цепи линии; ФПУ - фазоповоротные устройства; θ^0 - угол между системами векторов фазных напряжений цепей [79]

От положения фаз друг относительно друга и от угла θ сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей зависит величина взаимного электромагнитного влияния цепей УСВЛ.

Для обеспечения равенства характеристик УСВЛ, транспозиция фаз должна быть осуществлена с сохранением сближенных фаз между собой [171]. Рассмотрим один из возможных циклов транспозиции обычных двухцепных ЛЭП при фиксированных углах сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ и расположении фаз «цепь слева - цепь справа». Цикл: на первых трех участках выполняется круговая перестановка проводов каждой из цепей, далее осуществляется скрещивание цепей, и затем вновь следует круговая перестановка проводов каждой цепи (рисунок 1.7). Для УСВЛ представленный цикл транспозиции обеспечивает равенство эквивалентных параметров фаз с сохранением результирующего взаимного влияния цепей при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ и смешанном расположении фаз по вершинам треугольника.

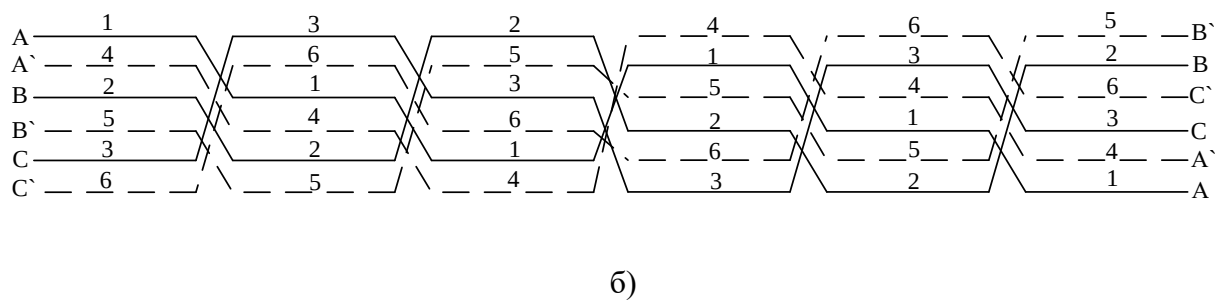
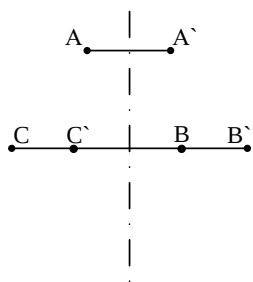
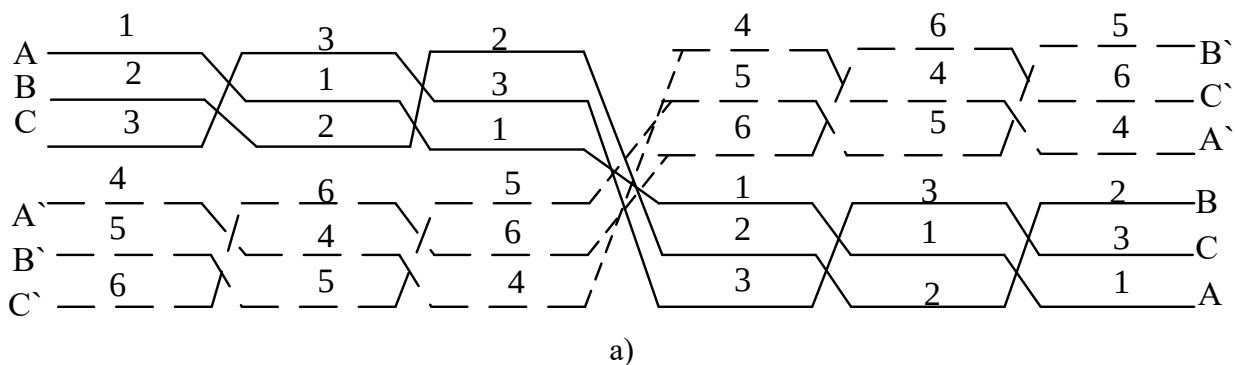
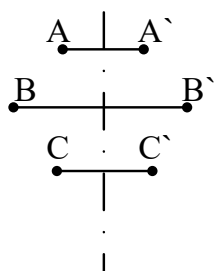


Рис. 1.7. Варианты полного цикла транспозиции обычных ВЛ и УСВЛ, обеспечивающие полную симметрию параметров, фаз с сохранением взаимного электромагнитного влияния цепей друг на друга при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ и расположением фаз: а) обычная ВЛ «цепь слева - цепь справа» и б) УСВЛ при смешанном расположении фаз по вершинам треугольника [78]

Реализация на УСВЛ, работающей с углом $\theta = 0^\circ$ или $\theta = 180^\circ$, $\pm 60^\circ$ и $\pm 120^\circ$, соответствующих циклов транспозиции, даёт возможность сохранить взаимное влияния цепей друг на друга и гарантирует равенство индуктивностей их фаз. Это же относится и к их емкостным проводимостям. Учитывая вышеизложенное, очевидно, что для

обеспечения равенства параметров фаз одной УСВЛ, работающей с дискретным регулированием угла θ степенями: $0, \pm 60^\circ, \pm 120^\circ, \pm 180^\circ$ соответствующими транспозициями, необходима установка дополнительных транспозиционных аппаратов: разъединителей, отделителей, выключателей и т.д. [11]. Гарантия равенства индуктивностей фаз УСВЛ с сохранением взаимного электромагнитного влияния цепей друг на друга при различных углах θ сдвига систем векторов напряжений цепей, за исключением рассмотренных, неосуществима. Для сохранения взаимного влияния цепей УСВЛ друг на друга следует сохранить на протяжении полного цикла транспозиции равное расстояние между ее сближенными фазами.

1.3 Метод шести симметричных составляющих расчета простых несимметричных коротких замыканий, на самокомпенсирующихся и управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП

Как было показано выше (параграф 1.2) сближение разноимённых фаз разных цепей СВЛ на минимальные допустимые расстояния увеличивает по сравнению с двухцепными ЛЭП взаимоиנדукцию между ними [13,61,132]. При несимметричных режимах, связанных с простыми несимметричными короткими замыканиями (короткие замыкания, происходящие в одном месте линии), охватывающими как сближенные, так и не сближенные фазы СВЛ и УСВЛ, взаимоиנדукция фаз друг на друга, даже при полном цикле транспозиции разная. Поэтому расчёт необходимо вести по всем шести фазам СВЛ и УСВЛ, связанным между собой различной взаимоиנדукцией, что ещё больше усложняет расчёт, чем при расчёте несимметричных к.з. на обычной двухцепной ВЛ.

Проведенные до сих пор исследования показали [39,40], что, рассматривая СВЛ и УСВЛ как шестифазные линии электропередачи с порядком чередования фаз A, B, C, D, E, F с учётом их особенностей, несимметричные системы векторов токов (напряжений) фаз можно разложить на шесть систем векторов симметричных составляющих. Матрица перехода от шести симметричных составляющих векторов напряжений (токов) к фазным координатам представлена ниже:

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_D \\ \dot{F}_E \\ \dot{F}_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{F}_{A_0} \\ \dot{F}_{A_1} \\ \dot{F}_{A_2} \\ \dot{F}_{A_3} \\ \dot{F}_{A_4} \\ \dot{F}_{A_5} \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

В матричном виде:

$$\dot{\vec{F}} = \dot{\vec{S}}_6 \times \dot{\vec{F}}_s, \quad (1.11)$$

где $\dot{\vec{S}}_6$ - квадратная матрица преобразования (перехода) от шестифазных симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 векторов токов (напряжений) шестифазной ЛЭП к фазным координатам A,B,C,D,E,F, имеющая вид:

$$\dot{\vec{S}}_6 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \end{pmatrix},$$

где $\dot{\vec{F}} = \begin{pmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_D \\ \dot{F}_E \\ \dot{F}_F \end{pmatrix}$ - матрица-столбец векторов токов (напряжений) в фазных координатах;

$\dot{\vec{F}}_s = \begin{pmatrix} \dot{F}_{A_0} \\ \dot{F}_{A_1} \\ \dot{F}_{A_2} \\ \dot{F}_{A_3} \\ \dot{F}_{A_4} \\ \dot{F}_{A_5} \end{pmatrix}$ - матрица-столбец векторов токов (напряжений) в координатах шести

симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5.

Обратная матрица переход от симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 к фазным координатам:

$$\dot{\vec{F}}_s = \dot{\vec{S}}_6^{-1} \times \dot{\vec{F}}, \quad (1.12)$$

где:

$$\dot{\mathbf{S}}_6^{-1} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{vmatrix}, - \text{обратная матрица преобразования от матрицы}$$

фазных координат к матрице симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5.

Учитывая, что УСВЛ состоит из двухцепной ЛЭП с фазами A, B, C, A', B', C' , при этом одноимённые фазы разных цепей A и A' , B и B' , C и C' сближены между собой с созданием регулируемого угла θ систем векторов фазных напряжений сближенных фаз специальным фазоповоротным трансформатором. Фазовое положение симметричных составляющих каждой фазы зависит от порядка чередования фаз. При изменении угла θ сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей изменяется чередование фаз. В этом случае выражение (1.10) примет вид:

$$\begin{vmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_{C'} \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_{A'} \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_{B'} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{F}_{A_0} \\ \dot{F}_{A_1} \\ \dot{F}_{A_2} \\ \dot{F}_{A_3} \\ \dot{F}_{A_4} \\ \dot{F}_{A_5} \end{vmatrix}$$

На рисунке 1.8 представлены симметричные составляющие токов (напряжений) УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5, соответствующие порядку чередования фаз: A, C', B, A', C, B' при регулировании угла θ в пределах $-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ$.

На рисунке 1.8 желтым показаны симметричные составляющие, относящиеся к фазе A и A' (пунктиром), зеленым - симметричные составляющие, относящиеся к фазе B и B' (пунктиром); красным - симметричные составляющие, относящиеся к фазе C и C' (пунктиром).

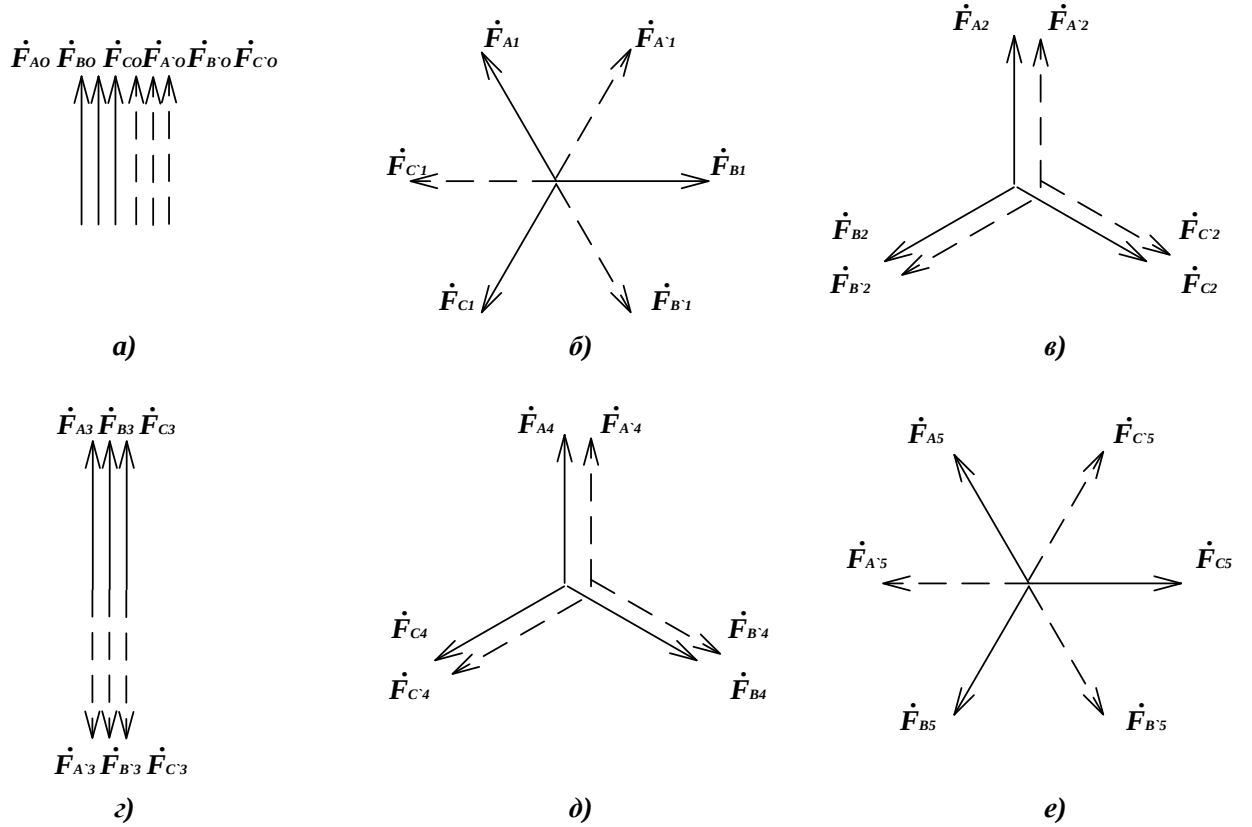


Рис.1.8. Шестифазные симметричные составляющие 0,1,2,3,4,5 токов (напряжений) несимметричной шестифазной системы A, C', B, A', C, B' при регулировании угла θ в пределах $:-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ$)

- а) система векторов нулевой последовательности;
- б) система векторов первой последовательности;
- в) система векторов второй последовательности;
- г) система векторов третьей последовательности;
- д) система векторов четвертой последовательности;
- е) система векторов пятой последовательности [40]

Матрица пассивных параметров СВЛ и УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 с учётом полного цикла транспозиции и при сохранении расстояния между сближенными фазами может быть представлена в виде:

$$\dot{\mathbf{Z}}_{S6} = \dot{\mathbf{S}}_6^{-1} \dot{\mathbf{Z}}_6 \dot{\mathbf{S}}_6 \quad (1.13)$$

где

$$\mathbf{Z}_S = \begin{bmatrix} Z & Z_M & Z_M & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z & Z_M & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z & Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_M & Z & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M & Z_M & Z_M & Z \end{bmatrix} - \text{удельная матрица сопротивлений СВЛ}$$

(УСВЛ);

$$Z = R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_s} + L_{BH} \right) \text{ удельное собственное полное сопротивление фаз}$$

СВЛ (УСВЛ);

$$Z_{\dot{M}} = j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}}; \text{ удельное сопротивление взаимоиндукции между}$$

сближенными фазами СВЛ (УСВЛ);

$$Z_M = j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{cob}}; \text{ удельное сопротивление взаимоиндукции между}$$

разноименными фазами СВЛ (УСВЛ).

Здесь: R - активное удельное сопротивление фаз ЛЭП, D_3 - эквивалентная глубина возврата тока через землю, r_e - эквивалентный радиус проводов фаз, L_{BH} - внутренняя индуктивность фаз.

Матрица удельных пассивных параметров СВЛ и УСВЛ Z_s в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5 согласно (1.13) имеет диагональный вид:

$$\dot{Z}_s = \begin{vmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_5 \end{vmatrix} \quad (1.14)$$

где

$$Z_0 = Z + Z_{\dot{M}} + 2Z_M + 2Z_{M'};$$

$$Z_1 = Z - Z_{\dot{M}} - Z_M + Z_{M'};$$

$$Z_2 = Z + Z_{\dot{M}} - Z_M - Z_{M'};$$

$$Z_3 = Z - Z_{\dot{M}} + 2Z_M - 2Z_{M'};$$

$$Z_4 = Z + Z_{\dot{M}} - Z_M - Z_{M'};$$

$$Z_5 = Z - Z_{\dot{M}} - Z_M + Z_{M'}.$$

Диагональный вид матрицы Z_s позволяет рассматривать вместо одной схемы замещения СВЛ и УСВЛ в фазных координатах, где все шесть фаз связаны между собой взаимоиндукцией - шесть схем замещения СВЛ и УСВЛ токов соответствующих симметричных составляющих в координатах шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4,5, не связанных между собой взаимоиндукцией.

1.4 Эквивалентные схемы замещения при расчёте простых несимметричных коротких замыканий на СВЛ (УСВЛ) методом шести симметричных составляющих

При составлении эквивалентных схем замещения СВЛ и УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих эквивалентные ЭДС питающих трёхфазных систем M и N определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= 0; \\ \dot{E}_1 &= 0,5(1 - e^{j\pm\theta^o})\dot{E}_A; \\ \dot{E}_2 &= 0; \\ \dot{E}_3 &= 0; \\ \dot{E}_4 &= 0,5(1 + e^{j\pm\theta^o})\dot{E}_A; \\ \dot{E}_5 &= 0.\end{aligned}\tag{1.15}$$

где E_A -ЭДС фазы А эквивалентной систем M и N .

Приведение сопротивлений эквивалентных трёхфазных питающих систем M и N к координатам шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 осуществляется согласно формулам:

$$[Z_{CM}]_{S_6} = \dot{S}_{n\dot{U}}^{-1} [Z_{CM}]_{S_3}^{np} \dot{S}_{ni}; [Z_{CN}]_{S_6} = \dot{S}_{n\dot{U}}^{-1} [Z_{CN}]_{S_3}^{np} \dot{S}_{ni}\tag{1.16}$$

где $[Z_{CM}]_{S_3}^{np}, [Z_{CN}]_{S_3}^{np}$ -матрицы эквивалентных сопротивлений трёхфазных питающих систем M и N в фазных координатах и в координатах трёх симметричных составляющих 0,1,2 трёхфазной системы.

Указанные схемы замещения с учётом приложения в месте короткого замыкания напряжения соответствующих симметричных составляющих $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{U}_5$ представлены на рисунке 1.9 [39,172].

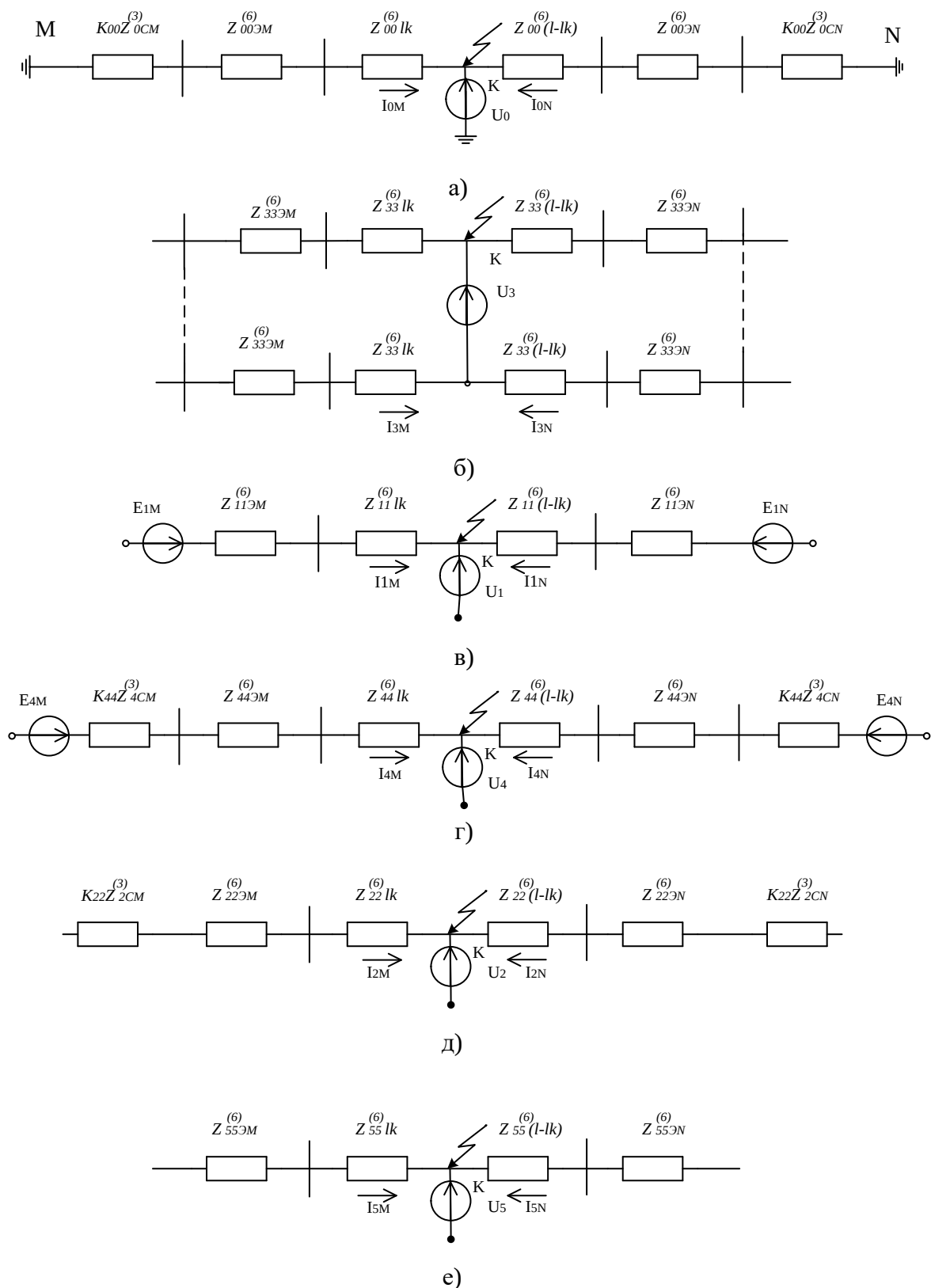


Рис. 1.9. Схемы замещения УСВЛ в координатах симметричных составляющих 0,1,2,3,4, и 5 последовательностей при несимметричном коротком замыкании на ней в точке “к.з” Схемы замещения : а) и б) – нулевой и третьей последовательностей; в) и г) – первой и четвертой последовательностей; д) и е) – второй и пятой последовательностей [40]

Такие же схемы замещения могут быть составлены и для СВЛ с учетом нерегулируемого 120° угла сдвига между системами векторов напряжения сближенных фаз $A B'$, $B C'$ и $C A'$.

Для каждой из схем (рисунок 1.9), согласно второму уравнению Кирхгофа, для СВЛ и УСВЛ можно записать в матричном виде следующие выражения:

$$\dot{\mathbf{I}}_s = \frac{\dot{\mathbf{E}}_s - \dot{\mathbf{U}}_s}{\mathbf{Z}_{s\Sigma}} \quad (1.17)$$

где:

$$\dot{\mathbf{U}}_s = \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \\ \dot{U}_5 \end{bmatrix}; \dot{\mathbf{E}}_s = \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{E}_4 \\ 0 \end{bmatrix}; \dot{\mathbf{Z}}_{s\Sigma} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{0\Sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{1\Sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{2\Sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_{3\Sigma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_{4\Sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_{5\Sigma} \end{bmatrix}; \dot{\mathbf{I}}_s = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{bmatrix}; \quad (1.18)$$

где: $Z_{0\Sigma}$, $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{3\Sigma}$, $Z_{4\Sigma}$ и $Z_{5\Sigma}$ –диагональная матрица сумм сопротивлений соответствующей последовательности относительно места повреждения, определяемая по соответствующим схемам замещения на рисунке 1.9;

$\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$ - ток 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей относительно места повреждения.

Обобщённые формулы для расчёта простых несимметричных коротких замыканий методом шести симметричных составляющих с учётом граничных условий данных кз приведены ниже:

для коротких замыканий без земли:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 (\dot{S}_{(i,k)} - \dot{S}_{(j,k)}) (\dot{E}_{s(k)} - \sum_{p=1}^6 Z_{(k,p)} \sum_q (\dot{S}_{(p,q)}^{-1} - \dot{S}_{(p,i)}^{-1}) \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\ \sum_{k=1}^6 (\dot{S}_{(i,k)} - \dot{S}_{(m,k)}) (\dot{E}_{s(k)} - \sum_{p=1}^6 Z_{(k,p)} \sum_q (\dot{S}_{(p,q)}^{-1} - \dot{S}_{(p,i)}^{-1}) \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\ \sum_{k=1}^6 (\dot{S}_{(i,k)} - \dot{S}_{(n,k)}) (\dot{E}_{s(k)} - \sum_{p=1}^6 Z_{(k,p)} \sum_q (\dot{S}_{(p,q)}^{-1} - \dot{S}_{(p,i)}^{-1}) \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\ \sum_{k=1}^6 (\dot{S}_{(i,k)} - \dot{S}_{(d,k)}) (\dot{E}_{s(k)} - \sum_{p=1}^6 Z_{(k,p)} \sum_q (\dot{S}_{(p,q)}^{-1} - \dot{S}_{(p,i)}^{-1}) \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\ \sum_{k=1}^6 (\dot{S}_{(i,k)} - \dot{S}_{(f,k)}) (\dot{E}_{s(k)} - \sum_{p=1}^6 Z_{(k,p)} \sum_q (\dot{S}_{(p,q)}^{-1} - \dot{S}_{(p,i)}^{-1}) \dot{I}_{(q)}) &= 0, \end{aligned} \quad (1.19)$$

где $q=j$, $q=m$, $q=n$, $q=d$, $q=f$.

для коротких замыканий с землёй:

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(i,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(j,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(m,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(n,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(d,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0; \\
\sum_{k=1}^6 \dot{S}_{(f,k)} (\dot{E}_{s(k)} - \sum_p Z_{(k,p)} \sum_q \dot{S}_{(p,q)}^{-1} \dot{I}_{(q)}) &= 0,
\end{aligned} \tag{1.20}$$

где $q=i, q=j, q=m, q=n, q=d, q=f$.

Зная соответствующие симметричные составляющие, по формуле (1.11) можно определить токи короткого замыкания и напряжения фаз в фазных координатах [26,68].

Выводы по первой главе

1. Использование метода фазных координат при определении несимметричных коротких замыканий в трёхфазных сетях, в том числе и на обычных ЛЭП, существенно усложняет расчёт, так как его необходимо вести по всем трём фазам одновременно, которые в свою очередь связаны между собой различной взаимоиндукцией.

2. Использование существующих методов трёх несимметричных и симметричных составляющих наиболее целесообразно, чем метод фазных координат. Использование известного метода трёх симметричных составляющих 0,1, и 2 последовательностей позволяет вести расчёт несимметричных к.з. по схемам замещения соответствующих симметричных составляющих, не связанных между собой взаимоиндукцией, что существенно упрощает расчёт.

3. В силу особенностей СВЛ и УСВЛ – повышенное электромагнитное влияние сближенных фаз друг на друга делает расчёт несимметричных коротких замыканий сложным даже при использовании метода трёх симметричных составляющих, так как схемы замещения соответствующих последовательностей будут связаны взаимоиндукцией.

4. Использование метода шести симметричных составляющих 0,1,2,3,4 и 5 последовательностей при расчёте несимметричных к.з на СВЛ и УСВЛ существенно упрощает расчёт, поскольку позволяет вести его по схемам замещения соответствующих последовательностей, не связанных между собой взаимоиндукцией.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

При анализе режимов работы СВЛ и УСВЛ в различных аварийных ситуациях, при выборе и расчёте уставок релейной защиты и автоматики кроме простых видов несимметричных коротких замыканий [114,93,94], необходимо рассчитывать и сложные виды повреждений : обрывы фаз, обрывы и короткое замыкание, короткие замыкания в разных точках линии и т.д [169].

Поскольку методология выполнения расчёта простых и сложных видов повреждений для СВЛ и УСВЛ аналогична, поэтому далее рассмотрено использование метода шести симметричных составляющих для расчёта несимметричных и сложных видов повреждений на УСВЛ. Расчёт сложных видов повреждения на СВЛ, как и на двухцепных ЛЭП, может быть рассмотрен как частный случай их расчёта на УСВЛ при $\theta=0^\circ$ (для обычных двухцепных ЛЭП) и $\theta=120^\circ$ для СВЛ.

2.1 Расчёт неполнофазных режимов на управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП

На УСВЛ, оборудованной пофазным управлением, по различным причинам могут возникать длительные неполнофазные режимы. Например, при устойчивом однофазном коротком замыкании на каком-либо участке поврежденная фаза окажется отключенной с двух сторон, при этом линия продолжит свою работу на пяти фазах [135]. Потеря одной из фаз уменьшит передаваемую мощность по линии, и линия будет работать в несимметричном режиме.

При раздельном управлении фазами линии появляется возможность значительного расширения перечня работ, связанных с осмотрами и ремонтами линий и коммутационной защитной аппаратуры без прекращения электроснабжения [170]. При производстве таких работ на одной фазе остальные фазы остаются под напряжением, при этом возможна работа линии даже при нескольких несимметричных режимах, возникших в результате непредвиденного аварийного отключения какой-либо фазы [29,52,116]. Вероятность таких совпадений увеличивается с возрастанием длины линии и количества цепей. Поэтому при решении вопросов об оборудовании линии пофазным управлением следует в каждом конкретном случае доказать целесообразность его использования, а также возможность длительной работы линии в несимметричном режиме.

2.1.1 Расчет обрывов одной или нескольких фаз на самокомпенсирующейся ЛЭП

Обрывы любых фаз на УСВЛ можно рассматривать как включение в рассечку повреждённых фаз в месте обрыва некоторого эквивалентного сопротивления, приводящего к неодинаковым сопротивлениям фаз - продольной несимметрии. Падение напряжения на этом сопротивлении может быть заменено некоторым источником с напряжением, равным падению напряжения в месте обрыва и направленным встречно. Например, несимметрия, связанная с обрывом фазы *A* УСВЛ (рисунок 2.1), приведена к схеме без обрыва посредством включения в место обрыва между точек *M* и *N* источника, создающего на участке несимметрии несимметричную систему напряжений U_{MN} рисунок 2.1,б. Суммарный ток повреждённой фазы для цепи рисунок 2.1а и рисунок 2.1,б равен нулю.

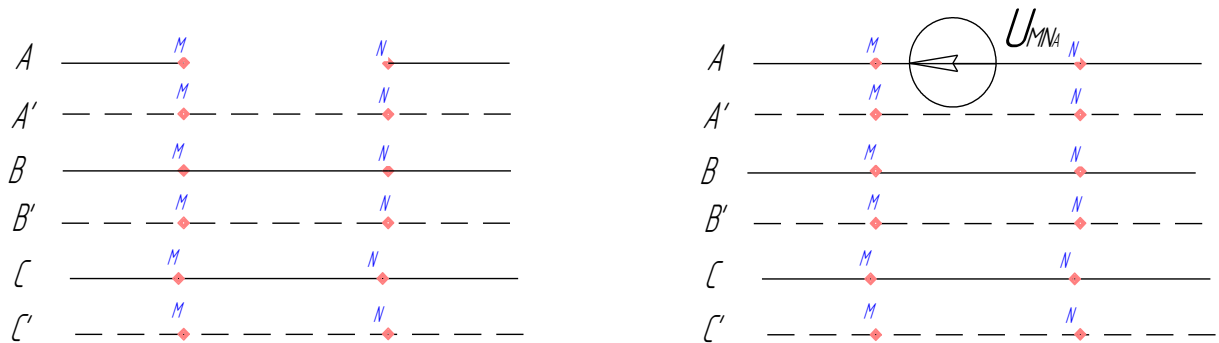


Рис. 2.1. Шестифазная линия: а) разрыв фазы *A*; б) включение напряжение в место разрыва

[Источник: разработан автором]

Выражения, связывающие между собой токи и напряжения в месте несимметрии, представляются граничными условиями данной несимметрии.

Граничные условия в фазных координатах для различной продольной несимметрии на СВЛ и УСВЛ могут быть описаны как:

- ток фазы, на которой произошел обрыв равен нулю;
- напряжения неповрежденных фаз равны нулю;
- напряжение и ток, введенные в рассечку фаз, связаны между собой законом Ома ($\dot{U} = \dot{I}Z$), где Z -эквивалентное сопротивление, введенное в рассечку фаз в месте обрыва.

Согласно чередованию фаз *A, C', B, A', C, B'*, соответствующему изменению угла θ : $(-120^\circ \leq \theta \leq -240^\circ)$ УСВЛ, в дальнейшем для удобства используются следующие

обозначения фаз в порядке их чередования: d, e, h, i, j, k , а симметричные составляющие токов и напряжений - цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6.

С учетом вышеизложенного обобщенные граничные условия несимметрии в фазных координатах имеют вид:

$$\dot{I}_{(y)} = 0, \text{ где } y = d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \quad (2.1)$$

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

Граничные условия (2.1) с учётом уравнений (1.11) и (1.12) в координатах шести симметричных составляющих приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{I}_{s(p)} &= 0 \\ \text{где: } y &= d, y = e, y = h, y = i, y = j, y = k \\ \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)} \dot{U}_{s(p)} &= 0 \\ \text{где: } y &= 1 \dots 6; y \neq e, y \neq h, y \neq i, y \neq j, y \neq k. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Согласно матричному выражению (1.17), на основе граничных условий (2.2), выведены обобщенные уравнения для вычисления любой продольной несимметрии на СВЛ с любым числом оборвавшихся фаз:

$$\begin{aligned} \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(e,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(h,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(i,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(j,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0; \\ \sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(k,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \sum_p \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{s(p)}}{Z_{yy}} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

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.

После расчета напряжения на участке несимметрии $\dot{U}_{s(p)}$, согласно выражению (1.12), рассчитываются симметричные составляющие напряжений и токов в месте обрыва, а также значения токов поврежденных и неповрежденных фаз согласно выражению (1.11).

В качестве примера рассмотрено выведение обобщенных выражений (2.3) для расчета обрыва одной и двух фаз УСВЛ. Общие граничные условия для представленных вариантов несимметрии в фазных координатах согласно выражениям (2.3) будут иметь вид:

- Обрыв одной фазы:

$$\dot{I}_d = 0;$$

$$\dot{U}_{(y)} = 0; \text{ где } y \neq d; \quad (2.4)$$

- Обрыв двух фаз:

$$\dot{I}_d = \dot{I}_e = 0;$$

$$\sum_{y=e}^{y=d} \dot{U}_{(y)} = 0; \quad (2.5)$$

$$\dot{U}_{(y)} = 0, \text{ где } y = 1 \dots 6; y \neq d, y \neq e$$

Граничные условия в координатах шести симметричных составляющих по (2.2):

- для обрыва одной фазы:

$$\sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d, y)} \dot{I}_{s(y)} = 0; \quad (2.6)$$

$$\sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y, p)} \dot{U}_{s(p)} = 0; \text{ где } y \neq d.$$

- для обрыва двух фаз:

$$\sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d, y)} - \dot{S}_{(e, y)} \dot{I}_{s(y)} = 0; \quad (2.7)$$

$$\sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y, p)} \dot{U}_{s(p)} = 0, \text{ где } y = 1 \dots 6, y \neq d, y \neq e.$$

Согласно матричной формуле (1.17):

$$\dot{I}_{s(y)} = \frac{\dot{E}_{s(y)} - \dot{U}_{s(y)}}{\dot{Z}_{yy}} \quad (2.8)$$

Преобразуя выражения (2.6) и (2.7) и используя выражение (2.8), можно записать, что:

- для обрыва одной фазы:

$$\sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(d,y)} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \dot{U}_{s(y)}}{\dot{Z}_{yy}} = 0 \quad (2.9)$$

- для обрыва двух фаз:

$$\sum_{y=1}^6 (\dot{S}_{(d,y)} - \dot{S}_{(e,p)}) \frac{\dot{E}_{s(y)} - \dot{U}_{s(y)}}{\dot{Z}_{yy}} = 0 \quad (2.10)$$

Напряжение $\dot{U}_{s(y)}$ с учётом выражения (1.12):

- для обрыва одной фазы:

$$\dot{U}_{s(y)} = \dot{S}_{(y,d)}^{-1} \dot{U}_{(d)} \quad (2.11)$$

- для обрыва двух фаз:

$$\dot{U}_{s(y)} = \sum_{p=1}^6 \dot{S}_{(y,p)}^{-1} \dot{U}_{(p)} \quad (2.12)$$

Принимая во внимание выражения (2.11) и (2.12), выражение (2.9) и (2.10) примут вид:

- при обрыве одной фазы:

$$\sum_{y=1}^6 \dot{S}_{(d,y)}^{-1} \frac{\dot{E}_{s(y)} - \dot{S}_{(y,d)}^{-1} \dot{U}_{(d)}}{\dot{Z}_{yy}} = 0 \quad (2.13)$$

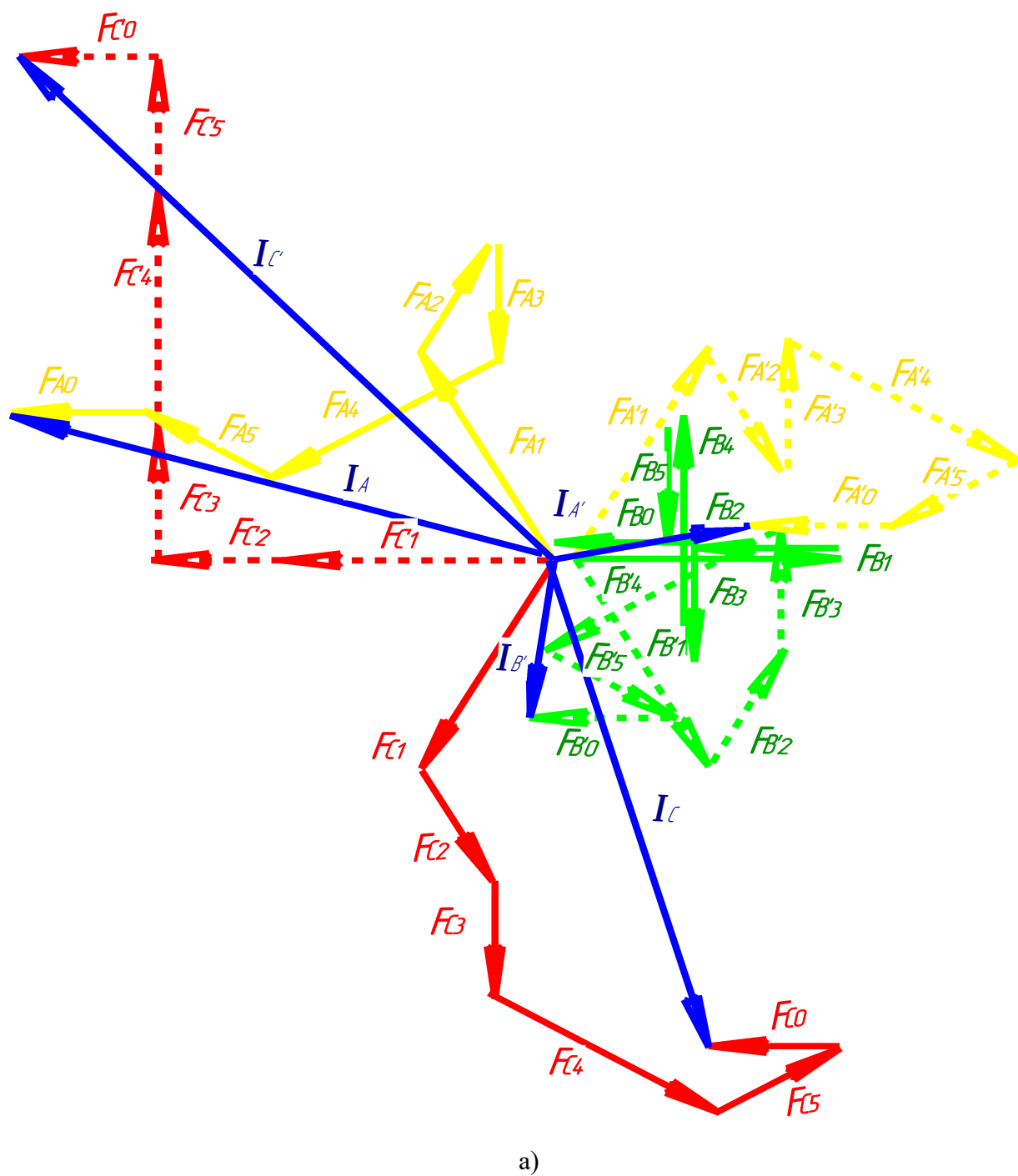
- при обрыве двух фаз:

$$\sum_{y=1}^6 (\dot{S}_{(d,y)}^{-1} - \dot{S}_{(e,p)}) \frac{\dot{E}_{s(y)} - (\dot{S}_{(y,e)}^{-1} - \dot{S}_{(y,d)}^{-1}) \dot{U}_{s(y)}}{\dot{Z}_{yy}} = 0 \quad (2.14)$$

Выражение (2.13) соответствует первому уравнению из выражения (2.3), в котором $p=d$.

На основании выражений (2.13) и (2.14) могут быть получены определенные уравнения для вычисления различных вариантов поперечной несимметрии на УСВЛ, связанной с обрывами фаз.

На рисунке 2.2 для примера представлены векторные диаграммы токов и напряжений в месте обрыва фазы В, где симметричные составляющие токов и напряжений соответствующих фаз показаны в цвете согласно их цветовому обозначению Ж-З-К (А,В,С).



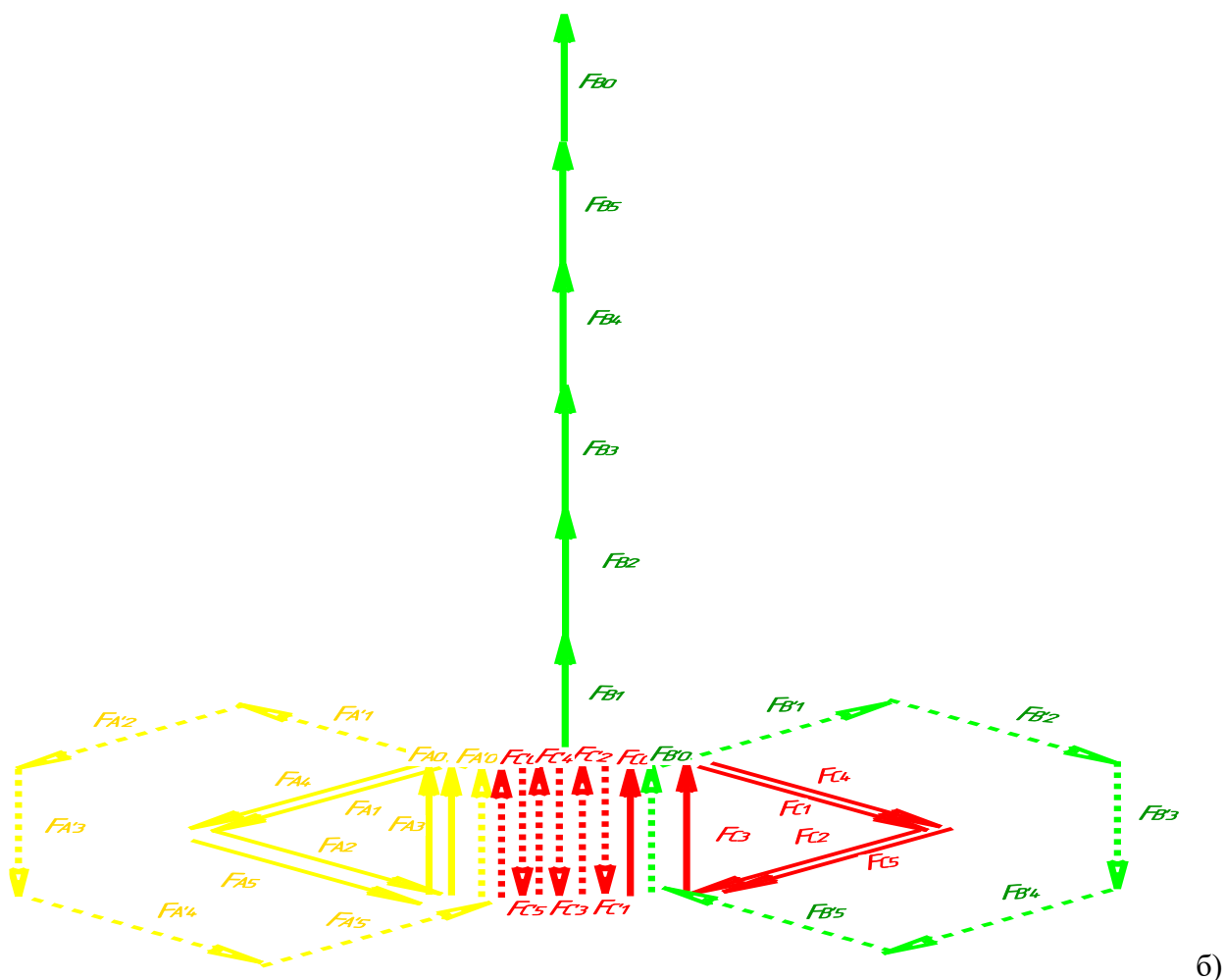


Рис. 2.2. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в месте обрыва фазы В УСВЛ [Источник: разработан автором]

Приведенные векторные диаграммы построены с учетом соответствующих граничных условий данного обрыва. За ось отсчета принят вектор тока (напряжения) прямой последовательности фазы А.

2.1.2 Расчет обрыва одной из фаз УСВЛ с одновременным коротким замыканием её на землю

В электрических сетях наряду с короткими замыканиями, охватывающими не только сближенные фазы, но и фазы разных цепей, так же возникают короткие замыкания одной фазы с одновременным её разрывом [122,128,129,143,144]. Учитывая, что такие короткие замыкания наиболее вероятны, их расчёт имеет не только теоретическое, но и практическое значение.

При возникновении обрыва одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю на УСВЛ (рисунок 2.3) граничные условия данного повреждения, например для фазы А, будут иметь вид:

в фазных координатах:

Для обрыва фазы A :

$$\dot{I}_{yA} = 0; \quad \dot{U}_{yC'} = \dot{U}_{yB} = \dot{U}_{yA'} = \dot{U}_{yC} = \dot{U}_{yB'} = 0;$$

и одновременным коротким замыканием фазы A на землю:

$$\dot{I}_{kC'} = \dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kC} = \dot{I}_{kB'} = 0; \quad \dot{U}_{kA} = 0.$$

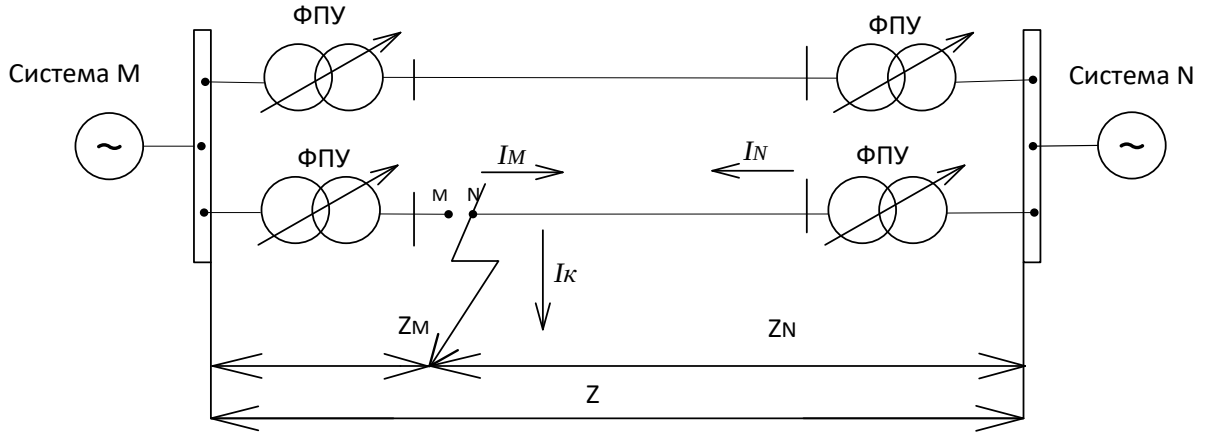


Рис. 2.3. Однолинейная принципиальная электрическая схема обрыва одной из фаз УСВЛ с одновременным коротким замыканием её на землю [Источник: разработан автором]

В координатах шести симметричных составляющих согласно матрице (1.10) граничные условия будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AK} &= \dot{U}_{0K} + \dot{U}_{1K} + \dot{U}_{2K} + \dot{U}_{3K} + \dot{U}_{4K} + \dot{U}_{5K}; \\ \dot{I}_{C'K} &= \dot{I}_{0K} + \dot{I}_{1K} e^{-j60^\circ} + \dot{I}_{2K} e^{-j120^\circ} - \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{4K} e^{-j240^\circ} + \dot{I}_{5K} e^{-j300^\circ}; \\ \dot{I}_{BK} &= \dot{I}_{0K} + \dot{I}_{1K} e^{-j120^\circ} + \dot{I}_{2K} e^{-j240^\circ} + \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{4K} e^{-j120^\circ} + \dot{I}_{5K} e^{-j240^\circ}; \\ \dot{I}_{A'K} &= \dot{I}_{0K} - \dot{I}_{1K} + \dot{I}_{2K} - \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{4K} - \dot{I}_{5K}; \\ \dot{I}_{CK} &= \dot{I}_{0K} + \dot{I}_{1K} e^{-j240^\circ} + \dot{I}_{2K} e^{-j120^\circ} + \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{4K} e^{-j240^\circ} + \dot{I}_{5K} e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_{B'K} &= \dot{I}_{0K} + \dot{I}_{1K} e^{-j300^\circ} + \dot{I}_{2K} e^{-j240^\circ} - \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{4K} e^{-j120^\circ} + \dot{I}_{5K} e^{-j60^\circ}; \\ \dot{I}_{AY} &= \dot{I}_{0Y} + \dot{I}_{1Y} + \dot{I}_{2Y} + \dot{I}_{3Y} + \dot{I}_{4Y} + \dot{I}_{5Y}; \\ \dot{U}_{C'Y} &= \dot{U}_{0Y} + \dot{U}_{1Y} e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{2Y} e^{-j120^\circ} - \dot{U}_{3Y} + \dot{U}_{4Y} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{5Y} e^{-j300^\circ}; \\ \dot{U}_{BY} &= \dot{U}_{0Y} + \dot{U}_{1Y} e^{-j120^\circ} + \dot{U}_{2Y} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{3Y} + \dot{U}_{4Y} e^{-j120^\circ} + \dot{U}_{5Y} e^{-j240^\circ}; \\ \dot{U}_{A'Y} &= \dot{U}_{0Y} - \dot{U}_{1Y} + \dot{U}_{2Y} - \dot{U}_{3Y} + \dot{U}_{4Y} - \dot{U}_{5Y}; \\ \dot{U}_{CY} &= \dot{U}_{0Y} + \dot{U}_{1Y} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{2Y} e^{-j120^\circ} + \dot{U}_{3Y} + \dot{U}_{4Y} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{5Y} e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_{B'Y} &= \dot{U}_{0Y} + \dot{U}_{1Y} e^{-j300^\circ} + \dot{U}_{2Y} e^{-j240^\circ} - \dot{U}_{3Y} + \dot{U}_{4Y} e^{-j120^\circ} + \dot{U}_{5Y} e^{-j60^\circ}. \end{aligned} \tag{2.15}$$

На рисунке 2.4 показаны эквивалентные обобщённые схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих, составленные с учётом соответствующих граничных условий в координатах шести симметричных составляющих и методу наложения [37,55,56,102] на режим обрыва фазы (рисунок 2.3, точки M - N) режима короткого замыкания на землю фазы A (рисунок 2.3, точка N). На схемах замещения (рисунок 2.4): Z_{0-5M} , Z_{0-5N} – сопротивления питающих систем M и N в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей; Z_{0-5T} – сопротивление трансформаторов в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей; Z_{0-5L} – сопротивление линии в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей.

Для данного повреждения можно составить 24 уравнения: 12 уравнений, описывающих граничные условия данного повреждения в координатах шести симметричных составляющих, и 12 уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа согласно схемам замещения, представленным на рисунке 2.4.

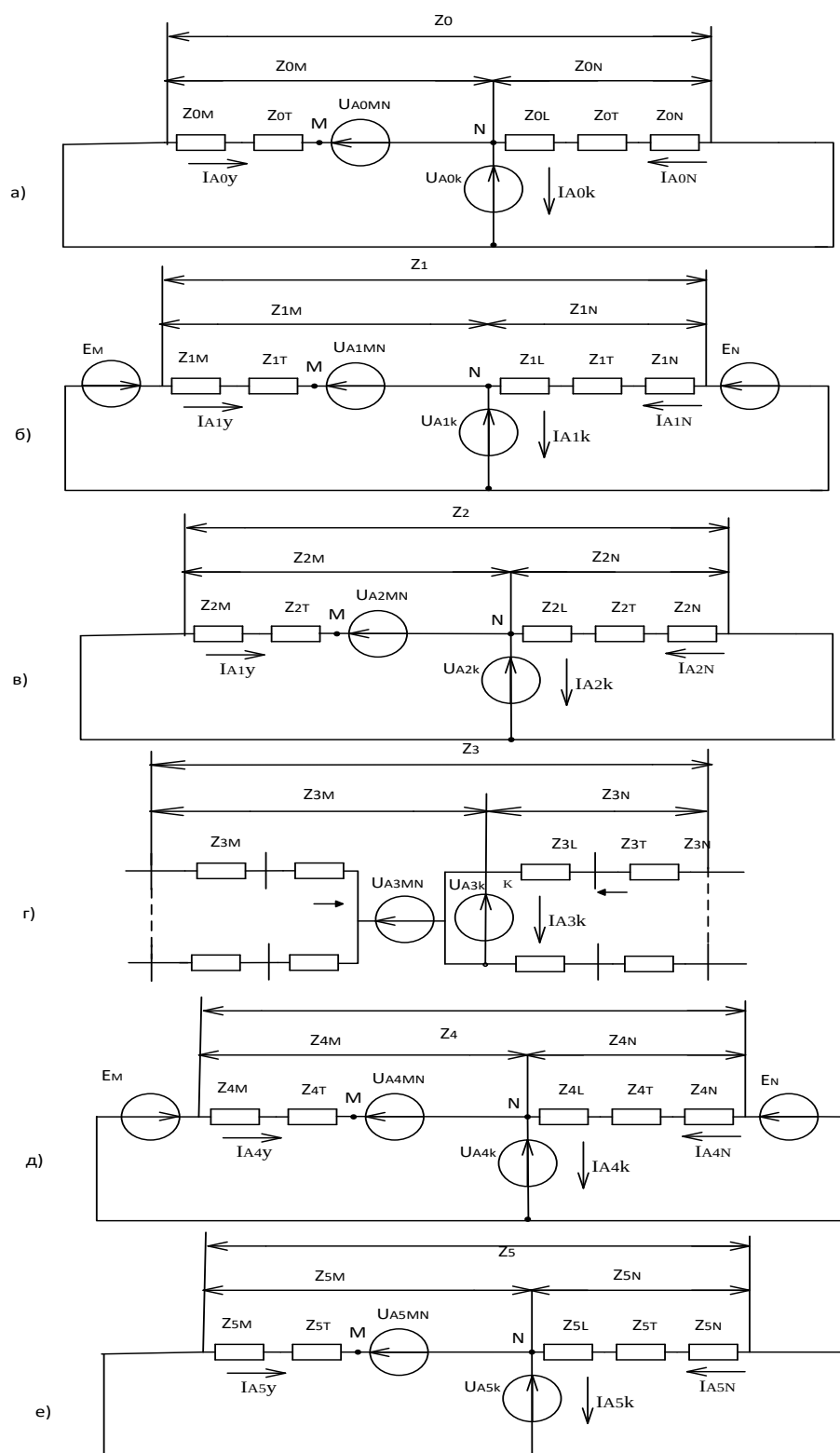


Рис. 2.4. Обобщенные схемы замещения УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности при обрыве одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю. Схемы замещения : а) нулевой последовательности, б) первой последовательности, в) второй последовательности, г) третьей последовательности, д) четвертой последовательности, е) пятой последовательности [Источник: разработан автором]

$$\begin{aligned}
& -Z_{0KK}\dot{I}_{0K} + Z_{0KY}\dot{I}_{0Y} - \dot{U}_{0K} = 0; \\
& Z_{0YK}\dot{I}_{0K} - Z_{0YY}\dot{I}_{0Y} - \dot{U}_{0Y} = 0; \\
& -\dot{E}_N = -Z_{1KK}\dot{I}_{1K} + Z_{1KY}\dot{I}_{1Y} - \dot{U}_{1K}; \\
& -(\dot{E}_M - \dot{E}_N) = Z_{1YK}\dot{I}_{1K} - Z_{1YY}\dot{I}_{1Y} - \dot{U}_{1Y}; \\
& 0 = -Z_{2KK}\dot{I}_{2K} + Z_{2KY}\dot{I}_{2Y} - \dot{U}_{2K}; \\
& 0 = Z_{2YK}\dot{I}_{2K} - Z_{2YY}\dot{I}_{2Y} - \dot{U}_{2Y}; \\
& 0 = -Z_{3KK}\dot{I}_{3K} + Z_{3KY}\dot{I}_{3Y} - \dot{U}_{3K}; \\
& 0 = -Z_{3YK}\dot{I}_{3K} + Z_{3YY}\dot{I}_{3Y} - \dot{U}_{3Y}; \\
& 0 = -Z_{4KK}\dot{I}_{4K} + Z_{4KY}\dot{I}_{4Y} - \dot{U}_{4K}; \\
& 0 = Z_{4YK}\dot{I}_{4K} - Z_{4YY}\dot{I}_{4Y} - \dot{U}_{4Y}; \\
& -\dot{E}_N = -Z_{5KK}\dot{I}_{5K} + Z_{5KY}\dot{I}_{5Y} - \dot{U}_{5K}; \\
& -(\dot{E}_M - \dot{E}_N) = Z_{5YK}\dot{I}_{5K} - Z_{5YY}\dot{I}_{5Y} - \dot{U}_{5Y}.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

где для упрощения обозначения принято:

$Z_{xKK}=Z_{xN}$, $Z_{xYU}=Z_x=Z_{xN}+Z_{xM}$; $Z_{xKY}=Z_{xYK}=Z_{xN}$; x - индекс последовательностей ($x=0,1,2,3,4,5$).

Для их решения в *MathCad* составляется матрица коэффициентов и матрица свободных членов. В результате решения системы получаем симметричные составляющие токов и напряжений, соответствующие данному повреждению. Полученные токи и напряжения отдельных последовательностей в месте разрыва и короткого замыкания позволяют найти токи и напряжения в фазных координатах при обрыве фазы *A* с её одновременным коротким замыканием на землю согласно матрице (1.11).

Аналогично можно получить расчётные выражения для других случаев обрыва других фаз с одновременным их коротким замыканием на землю, включая случаи, когда обрыв в одном месте, а короткое замыкание данной фазы в другом месте. В таких случаях в схемах замещения, изображенных на рисунке 2.4, между точками обрыва и короткого замыкания необходимо учитывать сопротивление линии в координатах шести симметричных составляющих. Для примера на рисунке 2.5 показана схема замещения для первой (четвертой) последовательности в случае обрыва фазы *A* в одном месте (точка М-*N*) и её коротком замыкании в другом месте (точка К).

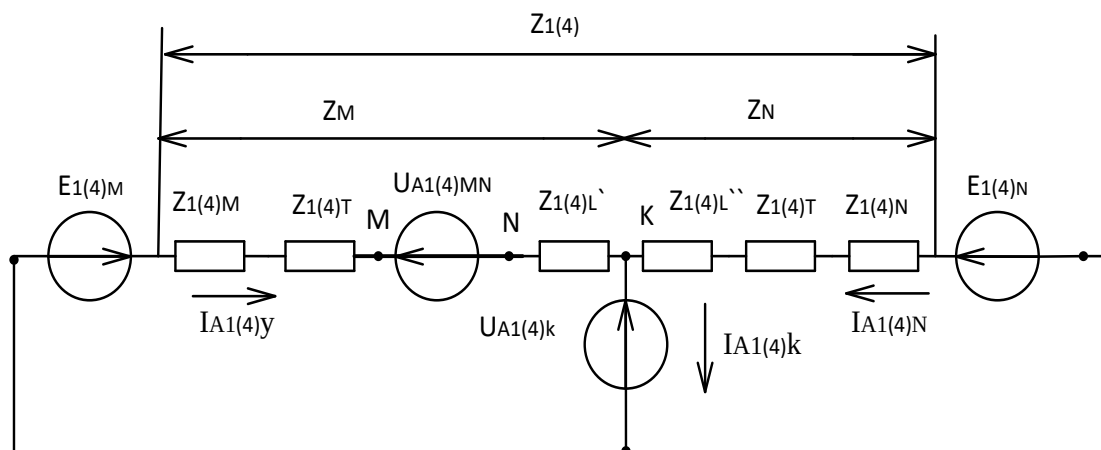


Рис. 2.5. Обобщенные схемы замещения УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих первой (четвертой) последовательности при обрыве фазы А (М-Н) и её коротком замыкании в другом месте (точка К) [Источник: разработан автором]

2.2 Построение и применение комплексных схем замещения

Для упрощения расчёта различных несимметричных простых и сложных видов повреждений методом шести симметричных составляющих и для их моделирования на компьютере [6,28,92] удобно пользоваться комплексными схемами замещения [69].

Сложную несимметрию на УСВЛ можно разбить на ряд простых, для которых несложно построить схемы замещения, и на основании последних составить комплексную схему для сложного случая.

Схема замещения элементов системы в координатах шести симметричных составляющих для данного повреждения представлена в виде двухполюсников, соединенных между собой в соответствии с граничными условиями данного повреждения в координатах шести симметричных составляющих. В качестве входных зажимов для схемы каждой последовательности принимается место обрыва для того участка, где особая фаза совпадает с расчетной, а в качестве выходных — место обрыва, где особая фаза отличается от расчетной. Под особыми фазами подразумеваются повреждённые фазы. Связь для участка обрыва, где особая фаза совпадает с расчетной, должна быть электрической, а для того участка, где особая и расчетная фазы не совпадают — электромагнитной, выполненной через идеальные трансформаторы. Для мест несимметрии, в которых фазы не совпадают, связь схемы отдельных последовательностей необходимо осуществить через идеальные трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации, которые соответствуют преобразованиям особой фазы в расчетную фазу.

Параметры эквивалентного двухполюсника для каждой схемы замещения в координатах 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей рассчитываются путем преобразования схемы каждой последовательности с нахождением её эквивалентных суммарных сопротивлений относительно места повреждения. Четырёхполюсники каждой из последовательностей соединены между собой в соответствии с граничными условиями данного вида повреждения. Соединения могут быть электрическими или через идеальные трансформаторы.

2.2.1 Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая продольной несимметрии на УСВЛ

Возможные продольные несимметрии на УСВЛ (обрывы фаз) можно рассматривать как введения в месте несимметрии в расщелку фаз неравных по величине сопротивлений (рисунок 2.6).

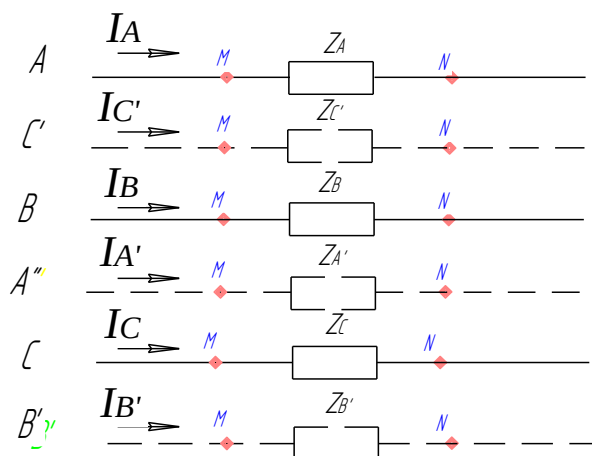


Рис. 2.6. Продольная несимметрия на УСВЛ в одной точке (общий случай) [Источник: разработан автором]

При этом в зависимости от количества оборвавшихся фаз, введенные дополнительные сопротивления могут быть равными нулю (для не оборвавшихся фаз) или иметь бесконечное значение (для оборвавшихся фаз). При моделировании данных несимметрий на компьютере в фазных координатах введенные сопротивления для рабочих фаз имеют меньшие значения, чем сопротивления оборванных фаз, и не оказывают существенного влияния на результаты моделирования.

Продольная несимметрия на УСВЛ характеризуется в данном случае уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= Z_A \dot{I}_A; \quad \dot{U}_{C'} = Z_{C'} \dot{I}_{C'}; \quad \dot{U}_B = Z_B \dot{I}_B; \\ \dot{U}_{A'} &= Z_{A'} \dot{I}_{A'}; \quad \dot{U}_C = Z_C \dot{I}_C; \quad \dot{U}_{B'} = Z_{B'} \dot{I}_{B'}.\end{aligned}\tag{2.17}$$

При замене фазных напряжений и токов (2.17) через их шестифазные симметричные составляющие, согласно (1.11) и (1.12), получаем шесть уравнений, которые связывают симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметрии.

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) + Z_{C'} (\dot{I}_0 - a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 - a^2\dot{I}_5) + \right. \\ &+ Z_B (\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 + a\dot{I}_5) + Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ &+ Z_C (\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 + a^2\dot{I}_5) + Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 - a\dot{I}_5) \left. \right]; \\ \dot{U}_1 &= \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) - a^2 Z_{C'} (\dot{I}_0 - a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 - a^2\dot{I}_5) + \right. \\ &+ a Z_B (\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 + a\dot{I}_5) - Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ &+ a^2 Z_C (\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 + a^2\dot{I}_5) - a Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 - a\dot{I}_5) \left. \right]; \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) + a Z_{C'} (\dot{I}_0 - a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 - a^2\dot{I}_5) + \right. \\ &+ a^2 Z_B (\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 + a\dot{I}_5) + Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ &+ a Z_C (\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 + a^2\dot{I}_5) + a^2 Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 - a\dot{I}_5) \left. \right]; \\ \dot{U}_3 &= \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) - Z_{C'} (\dot{I}_0 - a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 - a^2\dot{I}_5) + \right. \\ &+ Z_B (\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 + a\dot{I}_5) - Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ &+ Z_C (\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a\dot{I}_4 + a^2\dot{I}_5) - Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2\dot{I}_4 - a\dot{I}_5) \left. \right];\end{aligned}\tag{2.18}$$

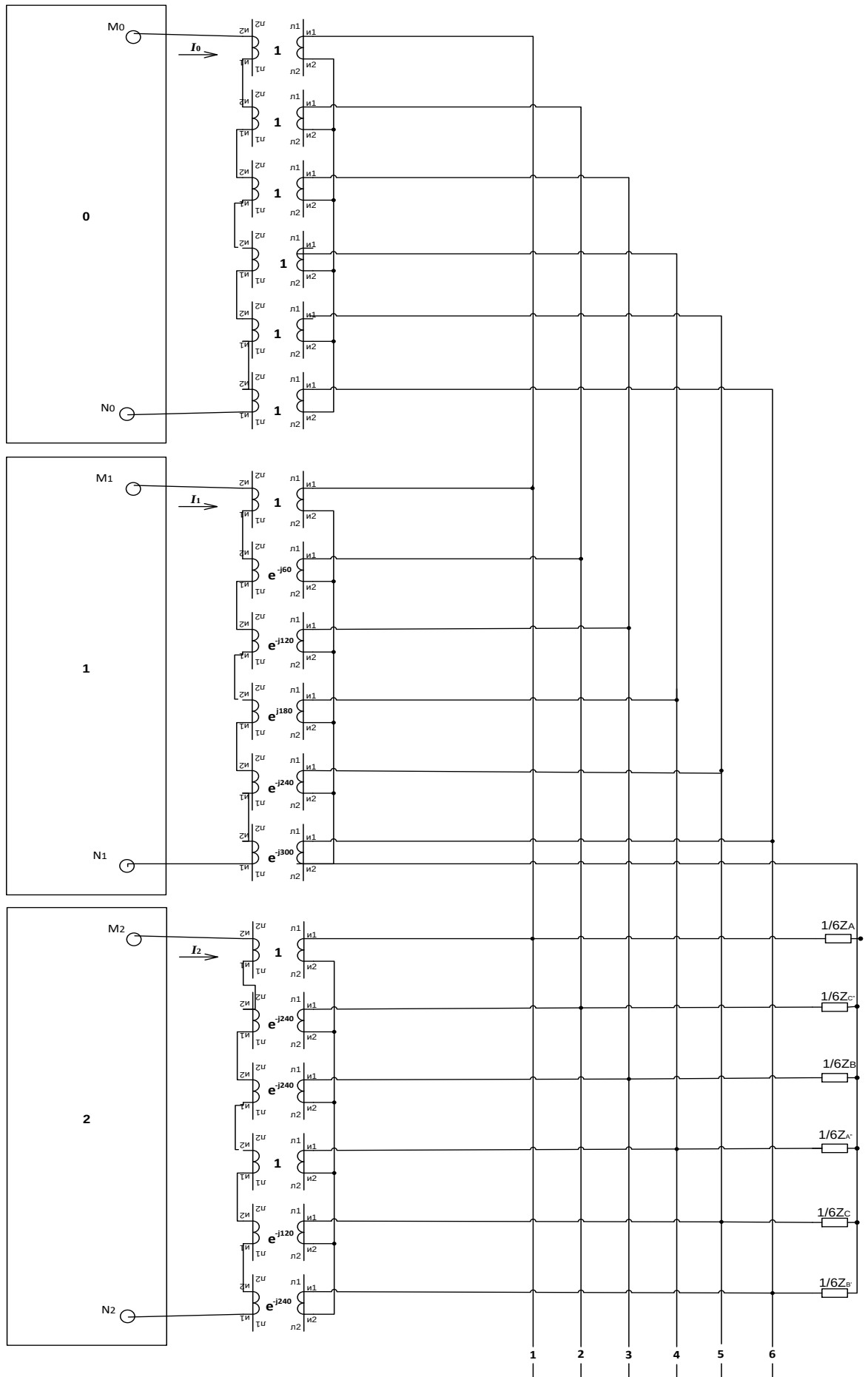
$$\begin{aligned}\dot{U}_4 = & \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) + a^2 Z_{C'} (\dot{I}_0 - a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a \dot{I}_4 - a^2 \dot{I}_5) + \right. \\ & + a Z_B (\dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2 \dot{I}_4 + a \dot{I}_5) + Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ & \left. + a^2 Z_C (\dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a \dot{I}_4 + a^2 \dot{I}_5) + a Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2 \dot{I}_4 - a \dot{I}_5) \right]; \\ \dot{U}_5 = & \frac{1}{6} \left[Z_A (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5) - a Z_{C'} (\dot{I}_0 - a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a \dot{I}_4 - a^2 \dot{I}_5) + \right. \\ & + a^2 Z_B (\dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a^2 \dot{I}_4 + a \dot{I}_5) - Z_{A'} (\dot{I}_0 - \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5) + \\ & \left. + a Z_C (\dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + a \dot{I}_4 + a^2 \dot{I}_5) - a^2 Z_{B'} (\dot{I}_0 - a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + a^2 \dot{I}_4 - a \dot{I}_5) \right].\end{aligned}$$

Данные уравнения определяют связь схем 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей, обусловленную типом несимметрии, и выступают в роли граничных условий.

Для вычисления двенадцати неизвестных ($\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{U}_5, \dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$ в точке несимметрии) уравнения (2.18) необходимо дополнить уравнениями, связывающими данные симметричные составляющие токов и напряжений в соответствии с граничными условиями рассматриваемого повреждения в координатах шести симметричных составляющих.

На рисунке 2.7 представлена обобщённая комплексная схема замещения, соответствующая уравнениям (2.18). В данной комплексной схеме замещения 0,1,2,3,4,5 последовательности представлены в виде двухполюсников с зажимами М и N [104,105].

Схемы 0,1,2,3,4,5 последовательностей объединены друг с другом посредством промежуточных идеальных трансформаторов, обладающих своими коэффициентами трансформации согласно уравнениям (1.11) и (1.12). Схемы 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей соединены между собой через промежуточные идеальные трансформаторы с коэффициентами трансформации, определяемыми согласно (1.11) и (1.12), и равными: $1 : 1$, $1 : -a$, $1 : a^2$, $1 : -1$, $1 : a$, $1 : -a^2$. Под коэффициентом трансформации понимается отношение напряжения (тока) на входных и выходных зажимах трансформатора. При этом входными зажимами трансформатора считаются те, которыми он присоединяется к участку несимметрии. Таким образом, идеальные трансформаторы с коэффициентами трансформации $1 : -a$, $1 : a^2$, $1 : -1$ и т.д. имеют те же свойства. Токи (напряжения) на выходе трансформаторов опережают токи (напряжения) на входе на соответствующие углы: -60° , 240° , 180° и т.д. с учётом того, что идеальные трансформаторы не имеют потока рассеяния и тока намагничивания.



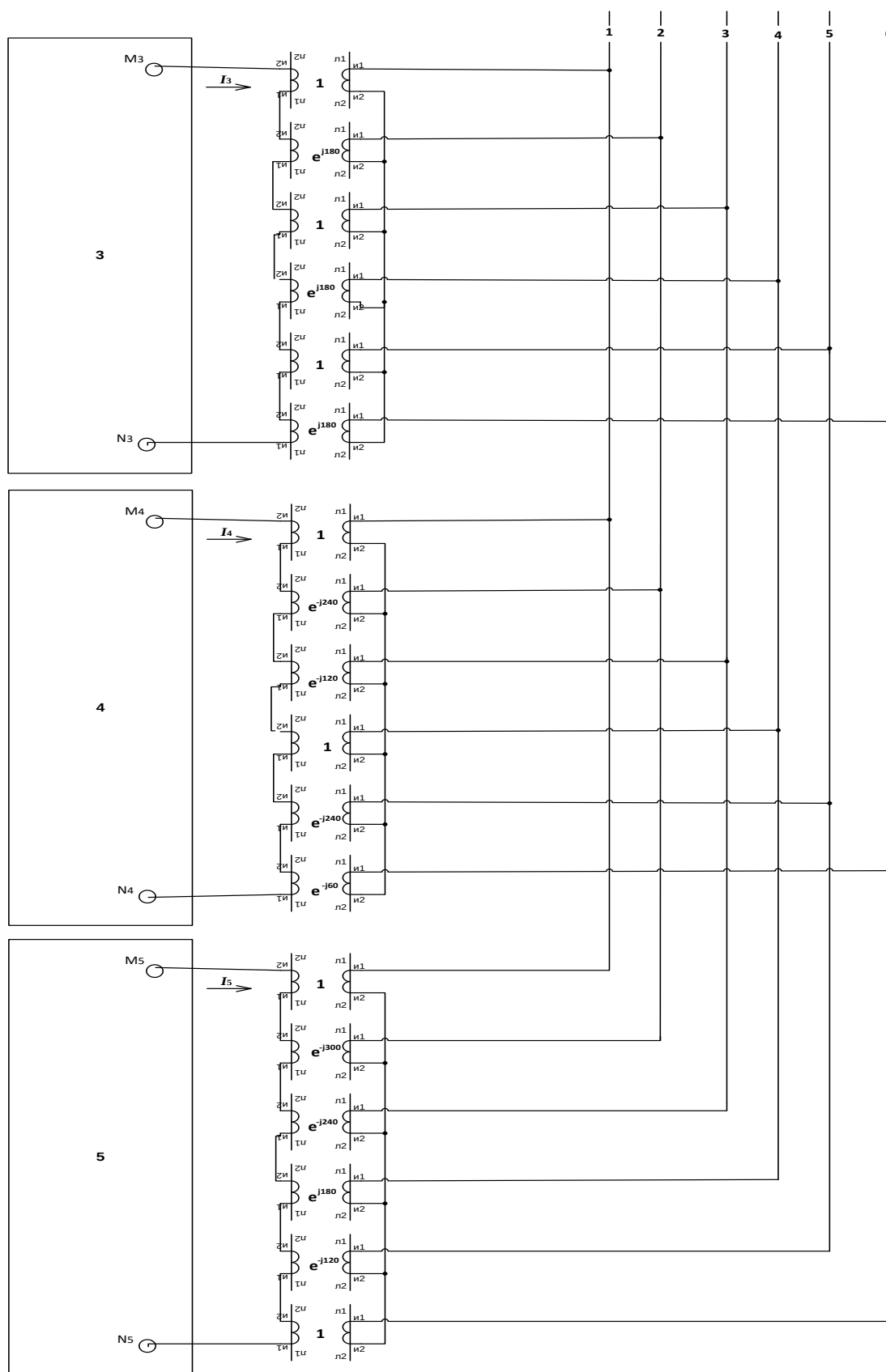


Рис. 2.7. Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая продольной несимметрии на УСВЛ
[Источник: разработан автором]

В зависимости от того, какая фаза считается особой, коэффициенты трансформации промежуточных трансформаторов $\dot{k}_{T0}, \dot{k}_{T1}, \dot{k}_{T2}, \dot{k}_{T3}, \dot{k}_{T4}, \dot{k}_{T5}$ определяют в соответствии с таблицы 2.1.

Таблица 2.1 Коэффициенты трансформации промежуточных идеальных трансформаторов [Источник: разработан автором]

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	1: 1	1: 1	1: 1
C'	1: 1	1: -a	1: a ²	1: -1	1: a	1: -a ²
B	1: 1	1: a ²	1: a	1: 1	1: a ²	1: a
A'	1: 1	1: -1	1: 1	1: -1	1: 1	1: -1
C	1: 1	1: a	1: a ²	1: 1	1: a	1: a ²
B'	1: 1	1: -a ²	1: a	1: -1	1: a ²	1: -a

2.2.2 Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая поперечной несимметрии на УСВЛ

Поперечная несимметрия в одной точке на УСВЛ возникает в случае, когда к фазам присоединяются неравные сопротивления (рисунок 2.8).

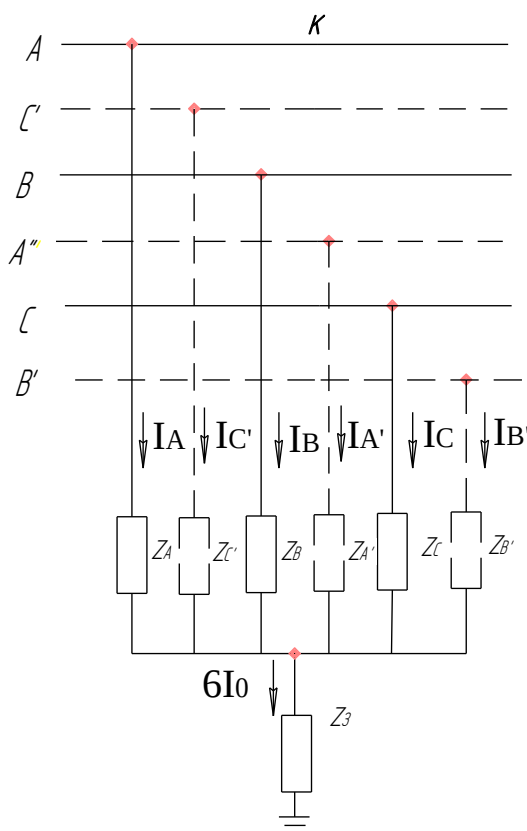


Рис.2.8. Поперечная несимметрия на УСВЛ в одной точке (общий случай) [Источник: разработан автором]

Сопротивления в месте несимметрии обозначены через Z . В зависимости от поперечной несимметрии введённые дополнительные сопротивления могут быть равными нулю или иметь бесконечное значение.

Поперечная несимметрия на УСВЛ характеризуется в данном случае уравнениями в фазных координатах:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= Z_A \dot{I}_A + 6Z_3 \dot{I}_0; \quad \dot{U}_{C'} = Z_{C'} \dot{I}_{C'} + 6Z_3 \dot{I}_0; \quad \dot{U}_B = Z_B \dot{I}_B + 6Z_3 \dot{I}_0; \\ \dot{U}_{A'} &= Z_{A'} \dot{I}_{A'} + 6Z_3 \dot{I}_0; \quad \dot{U}_C = Z_C \dot{I}_C + 6Z_3 \dot{I}_0; \quad \dot{U}_{B'} = Z_{B'} \dot{I}_{B'} + 6Z_3 \dot{I}_0. \end{aligned} \quad (2.19)$$

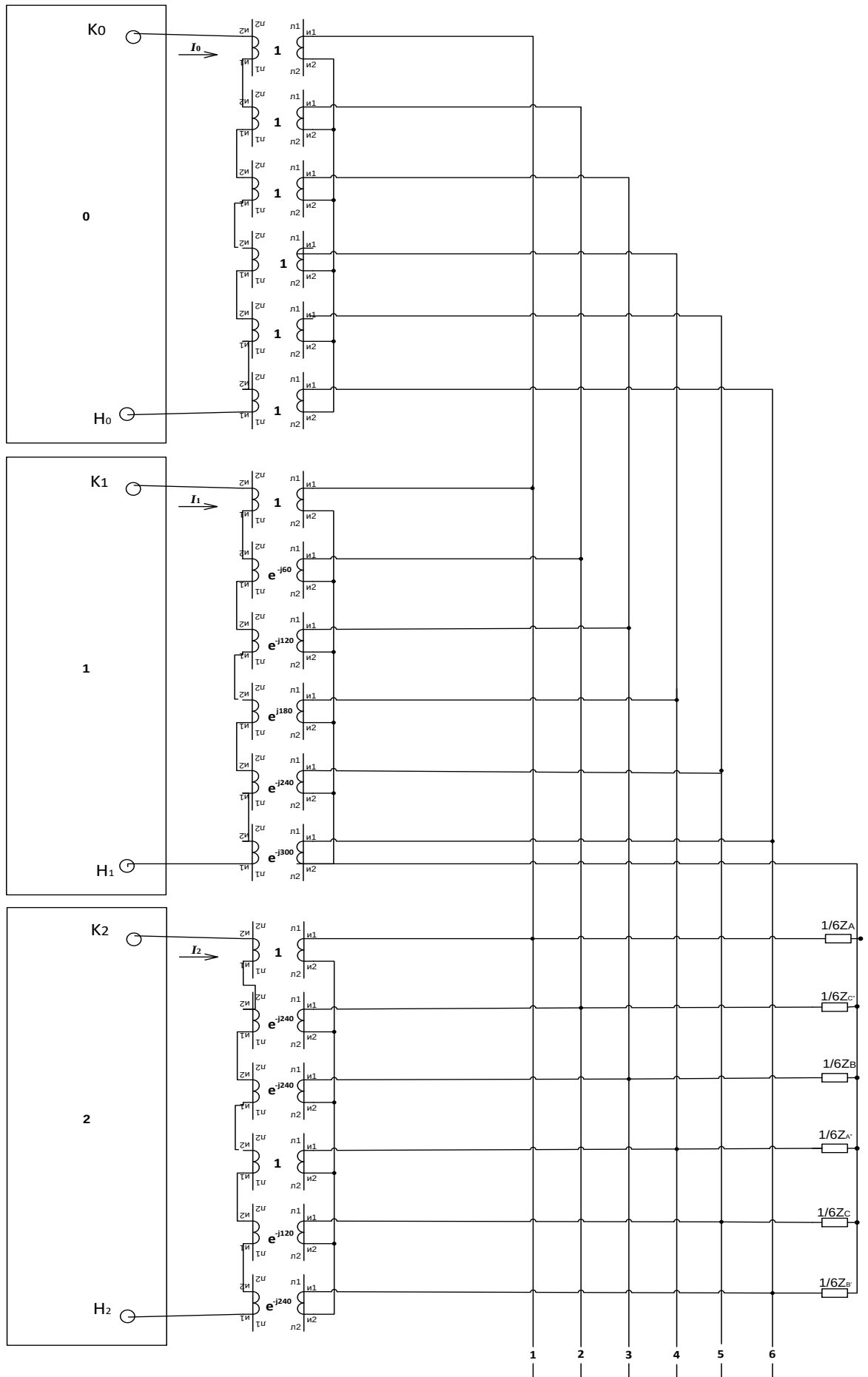
При замене фазных напряжений и токов (2.19) через их шестифазные симметричные составляющие согласно (1.11) и (1.12) получаем шесть уравнений (граничные условия), которые связывают симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметрии.

Соединение схем 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей, соответствующее граничным условиям, образует обобщённую комплексную схему замещения (рисунок 2.9).

В схеме (рисунок 2.8) 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности изображены в виде двухполюсников с зажимами Н и К.

Сравнение выражений (2.17) и (2.19) подтверждает, что поперечная несимметрия является аналогом продольной несимметрии, следовательно, комплексная схема замещения при поперечной несимметрии (рисунок 2.9) аналогична схеме, изображенной на рисунке 2.7.

На основании схемы, изображенной на рисунке 2.9, могут быть получены комплексные схемы замещения для частных случаев, когда некоторые из сопротивлений в схеме (рисунок 2.9) обращаются в нуль или бесконечность.



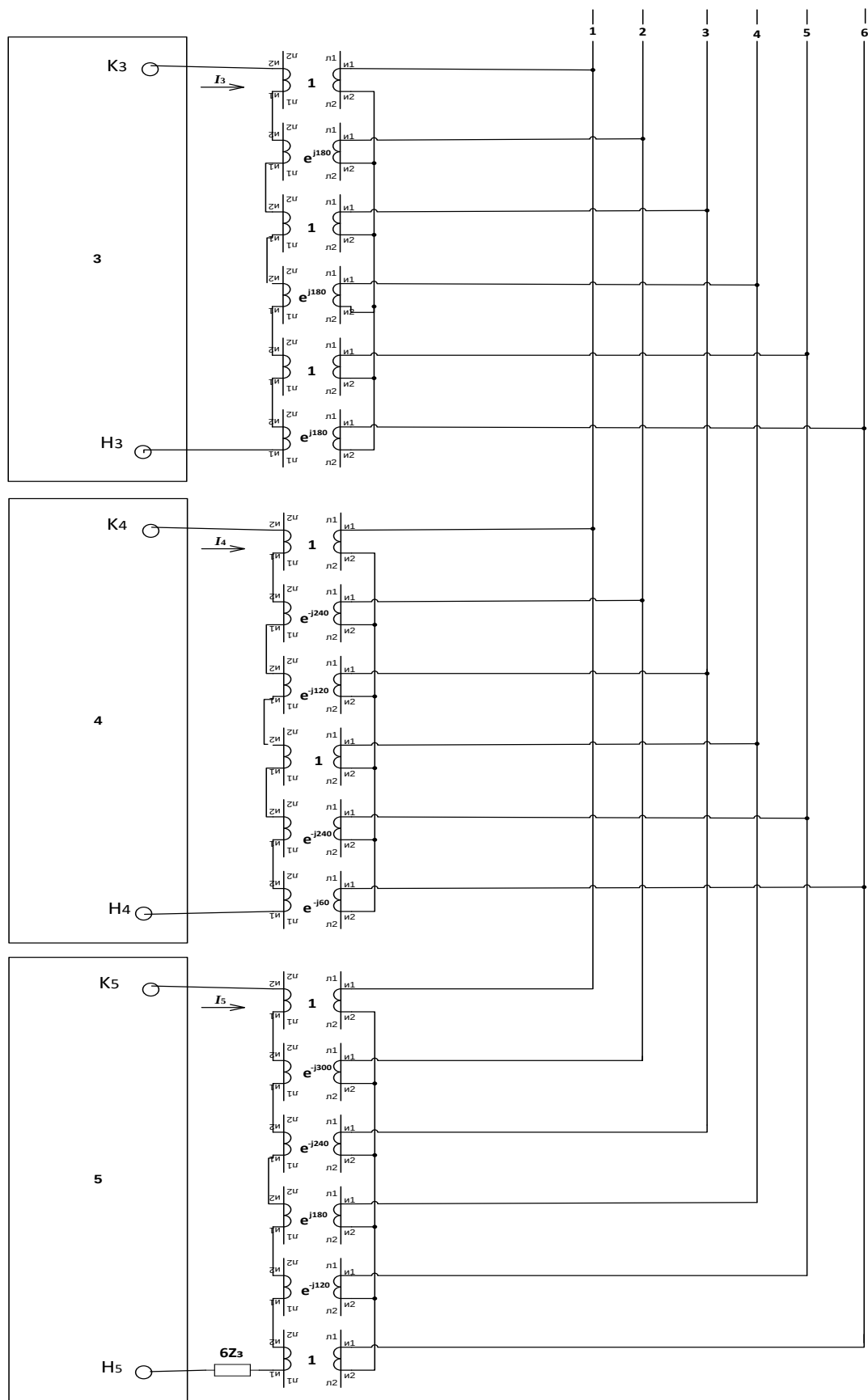


Рис. 2.9. Обобщённая комплексная схема замещения в координатах шести симметричных составляющих для общего случая поперечной несимметрии на УСВЛ
[Источник: разработан автором]

2.2.3 Комплексные схемы замещения для некоторых случаев продольной несимметрии на УСВЛ

На основании обобщённой комплексной схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих (рисунок 2.7) могут быть построены комплексные схемы замещения для разных случаев продольной несимметрии (обрывов), когда некоторые сопротивления, входящие в схему (рисунок 2.6), обращаются в нуль или бесконечность.

Рассмотренный выше метод и представленная комплексная схема в координатах шести симметричных составляющих являются универсальными для всех видов поперечной несимметрии. На их основе можно составить комплексные схемы замещения для конкретных видов несимметрии (обрывов фаз).

Граничные условия в фазных координатах для случаев, когда фаза A на УСВЛ является особой при продольной несимметрии, согласно формулам (2.4-2.6) будут иметь вид:

обрыв фазы A на УСВЛ (рисунок 2.10а):

$$\dot{I}_{yA} = 0; \dot{U}_{yC'} = \dot{U}_{yB} = \dot{U}_{yA'} = \dot{U}_{yC} = \dot{U}_{yB'} = 0; \quad (2.20)$$

обрыв фаз C', B, A', C, B' (рисунок 2.7б):

$$\dot{I}_{yC'} = \dot{I}_{yB} = \dot{I}_{yA'} = \dot{I}_{yC} = \dot{I}_{yB'} = 0; \dot{U}_{yA} = 0; \quad (2.21)$$

Рассмотрим случаи, когда в одну или несколько фаз включается сопротивление Z (рисунок 2.10). Такие условия могут возникнуть, например, при одновременном расхождении контактов полюсов выключателя, при котором дуга отключаемого тока возникает не на всех полюсах.

В данном случае граничные условия в фазных координатах при включении сопротивления Z в фазу A на УСВЛ (рисунок 2.10 а) имеют вид:

$$\dot{I}_{yA} = \frac{\dot{U}_{yA}}{Z} \Big|_{Z \rightarrow \infty} = 0; \dot{U}_{yC'} = \dot{U}_{yB} = \dot{U}_{yA'} = \dot{U}_{yC} = \dot{U}_{yB'} = 0; \quad (2.22)$$

при включении сопротивления Z в фазу C', B, A', C, B' на УСВЛ (рисунок 2.10 б):

$$\dot{I}_{yC'} = \dot{I}_{yB} = \dot{I}_{yA'} = \dot{I}_{yC} = \dot{I}_{yB'} = \frac{\dot{U}_y}{Z} \Big|_{Z \rightarrow \infty} = 0; \dot{U}_{yA} = 0. \quad (2.23)$$

В соответствии с формулами перехода от фазных координат УСВЛ к координатам шести симметричных составляющих (1.11, 1.12) граничные условия (2.20)-(2.23) примут вид:

для обрыва фазы A на УСВЛ:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{A4} + \dot{I}_{A5}; \\ \dot{U}_{A0} &= \dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A3} = \dot{U}_{A4} = \dot{U}_{A5} = \frac{1}{6} \dot{U}_{yA};\end{aligned}\quad (2.24)$$

для обрывов фаз C', B, A', C, B' на УСВЛ:

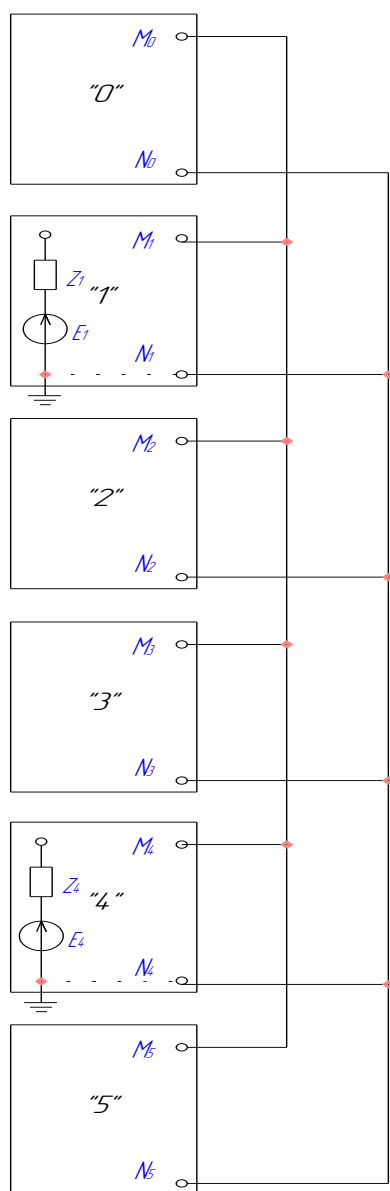
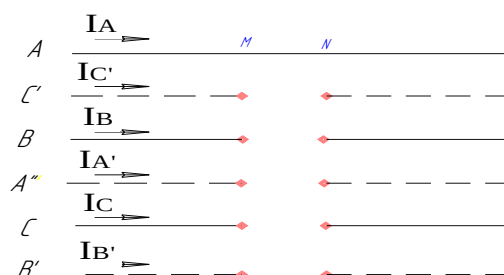
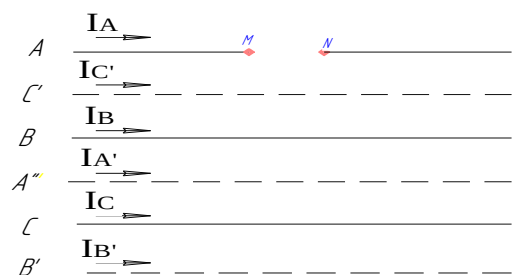
$$\begin{aligned}\dot{I}_{A0} &= \dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A3} = \dot{I}_{A4} = \dot{I}_{A5} = \frac{1}{6} \dot{I}_{yA}; \\ \dot{U}_A &= \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A3} + \dot{U}_{A4} + \dot{U}_{A5};\end{aligned}\quad (2.25)$$

для включения сопротивления Z в фазу A на УСВЛ:

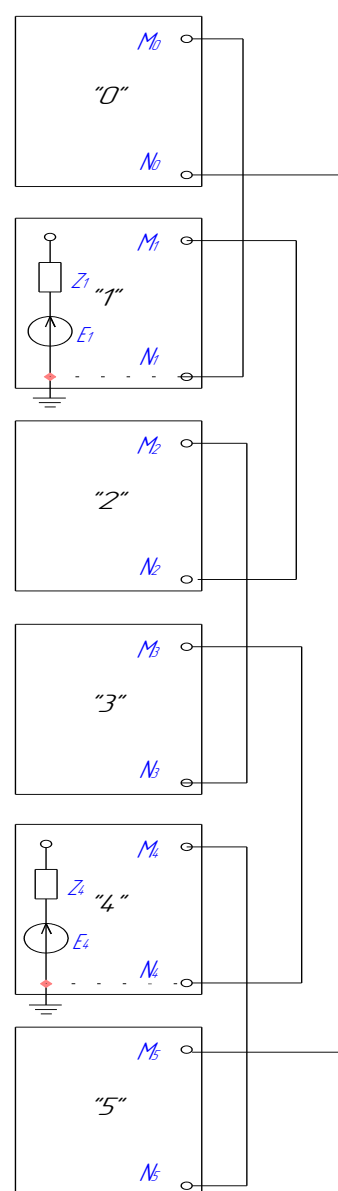
$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{A4} + \dot{I}_{A5} = \frac{\dot{U}_{yA}}{Z/6}; \\ \dot{U}_{A0} &= \dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A3} = \dot{U}_{A4} = \dot{U}_{A5} = \frac{1}{6} \dot{U}_{yA};\end{aligned}\quad (2.26)$$

Согласно данным уравнениям синтезированы комплексные схемы замещения (рисунок 2.10, 2.11) для продольной несимметрии на УСВЛ.

В случаях, когда другие фазы УСВЛ являются особыми, схемы 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей соединены при помощи промежуточных идеальных трансформаторов. Коэффициенты трансформации выбираются согласно таблице 2.1 в зависимости от того, какая фаза является особой. На рисунок 2.12 изображена комплексная схема замещения УСВЛ с трансформаторами связи для случая обрыва фазы C' . Промежуточные трансформаторы с коэффициентами $1; e^{j300^\circ}; e^{j240^\circ}; e^{-j180^\circ}; e^{j120^\circ}; e^{j60^\circ}$ в разомкнутой фазе обеспечивают равенство напряжений, при котором сумма токов всех последовательностей равна нулю.



а)



б)

Рис. 2.10. Комплексные схемы замещения для простейших случаев продольной несимметрии: а) одна фаза разомкнута; б) пять фаз разомкнуты; в) сопротивление в одной фазе; г) сопротивление в пяти фазах [Источник: разработан автором]

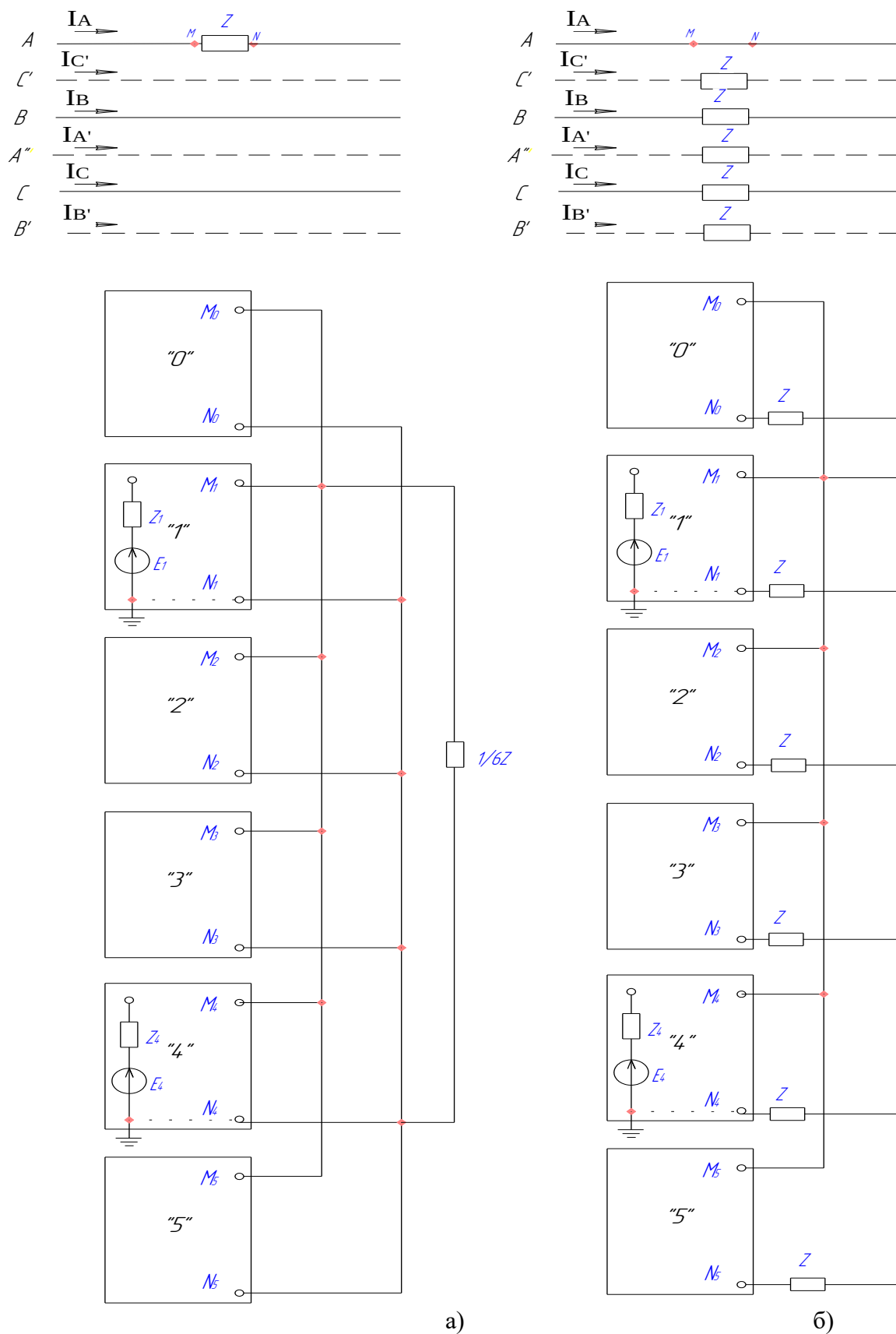


Рис. 2.11. Комплексные схемы замещения для простейших случаев продольной несимметрии: а) сопротивление в одной фазе; б) сопротивление в пяти фазах [Источник: разработан автором]

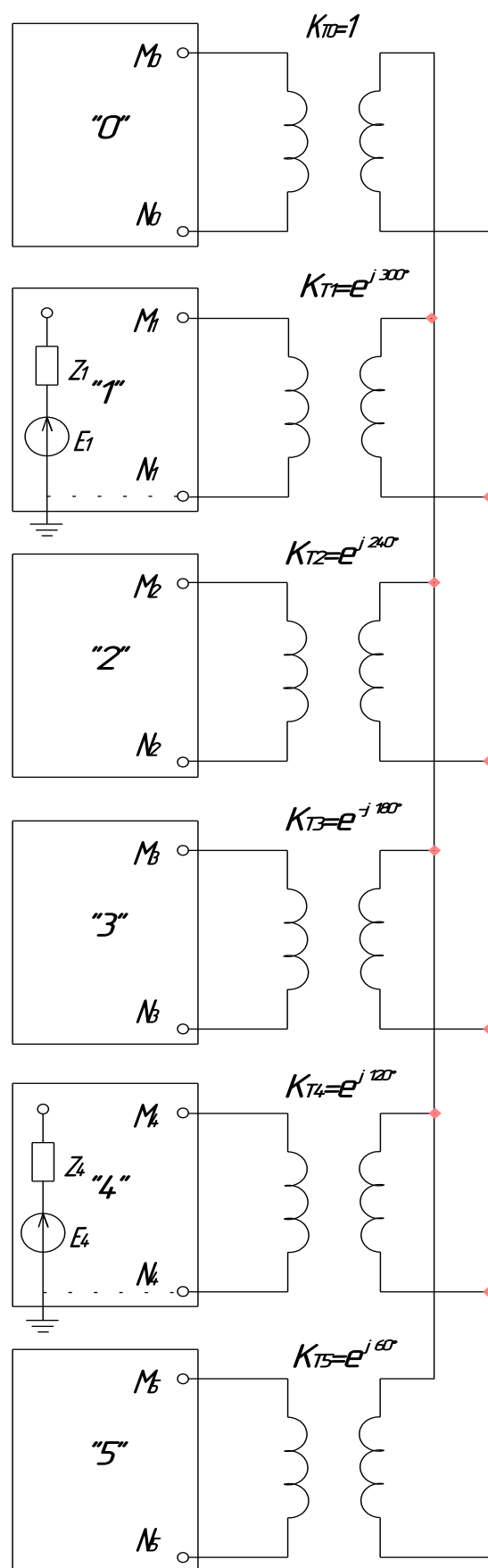
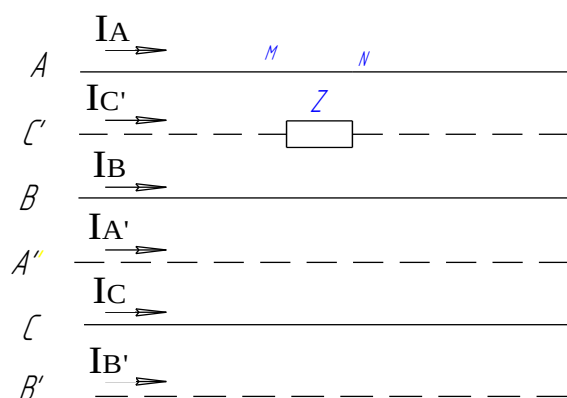


Рис. 2.12. Комплексная схема замещения с трансформаторами связи и сопротивлением в фазе B . [Источник: разработан автором]

Для промежуточных трансформаторов устанавливают поворотные множители в местах, где нужен поворот фаз тока и напряжения таким образом, чтобы токи и напряжения в связывающем элементе соответствовали токам и напряжениям фазы, для которой можно построить схему замещения.

2.2.4 Комплексные схемы замещения для некоторых случаев поперечной несимметрии (к.з.) на УСВЛ

В работе [39] рассмотрены обобщённые формулы расчёта различных коротких замыканий на УСВЛ. Ниже рассматриваются комплексные схемы замещения при некоторых поперечных несимметриях (к.з.).

Комплексные схемы замещения при коротком замыкании на землю фазы A или A' на УСВЛ

Граничные условия при коротком замыкании на землю фазы A или A' на УСВЛ в фазных координатах имеют вид:

для короткого замыкания фазы A на УСВЛ

$$\dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kB'} = \dot{I}_{kC} = \dot{I}_{kC'} = 0; \dot{U}_{kA} = 0;$$

для короткого замыкания фазы A' на УСВЛ

$$\dot{I}_{kA} = \dot{I}_{kB}' = \dot{I}_{kC} = \dot{I}_{kC'} = 0; \dot{U}_{kA'} = 0.$$

Согласно (1.11) и (1.12) данные граничные условия в координатах шести симметричных составляющих имеют вид:

для короткого замыкания фазы A на УСВЛ

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A3} = \dot{I}_{A4} = \dot{I}_{A5} = \frac{1}{6} \dot{I}_{kA};$$

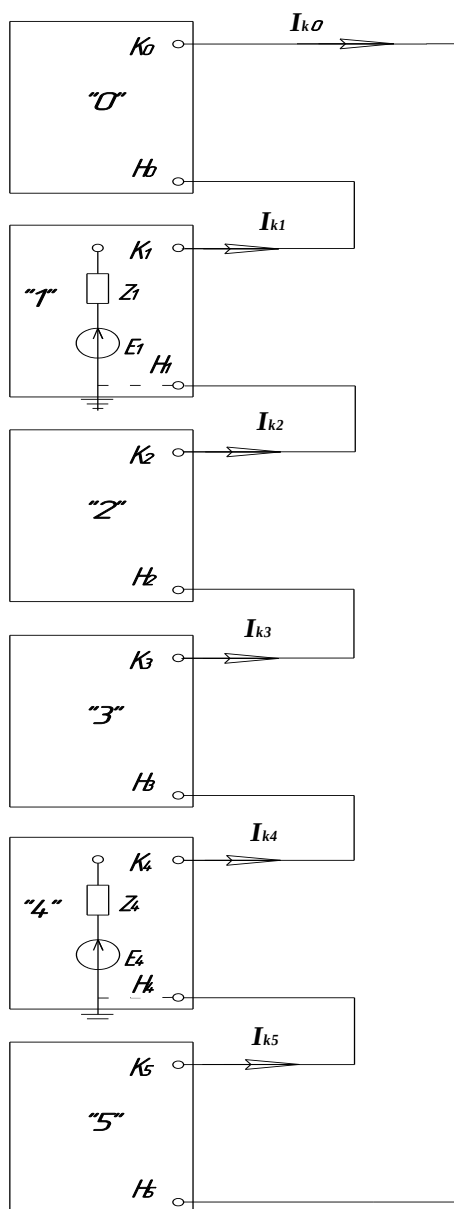
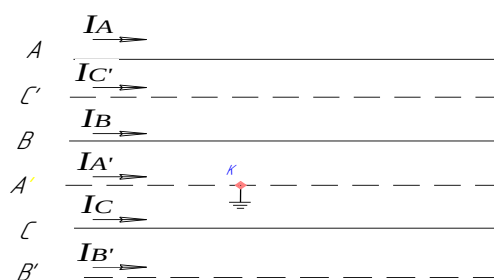
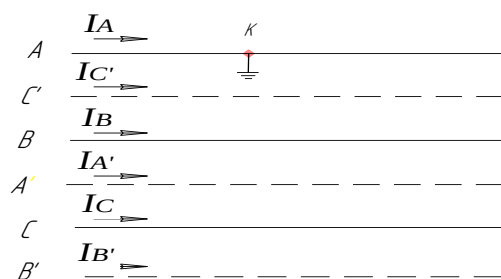
$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A3} + \dot{U}_{A4} + \dot{U}_{A5};$$

для короткого замыкания фазы A' на УСВЛ

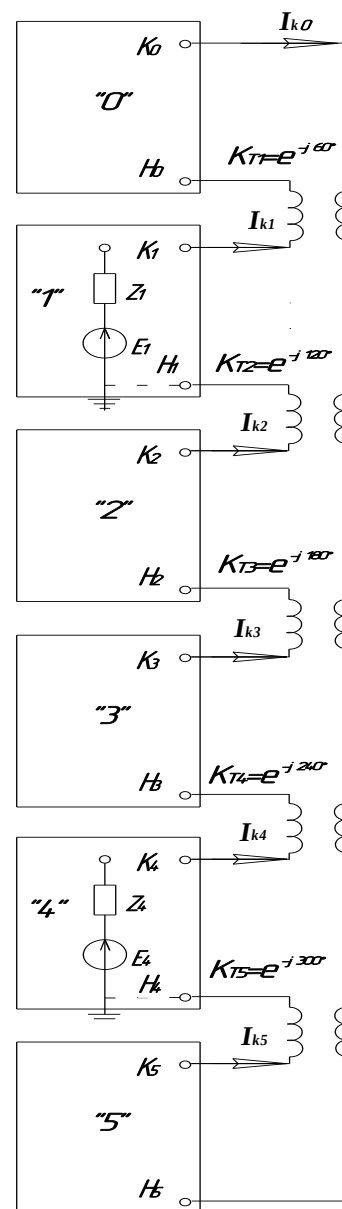
$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A3} = \dot{I}_{A4} = \dot{I}_{A5} = \frac{1}{6} \dot{I}_{kA} e^{j60^\circ};$$

$$\dot{U}_{kA} = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{A2} e^{-j120^\circ} - \dot{U}_{A3} + \dot{U}_{A4} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{A5} e^{-j300^\circ}$$

Исходя из полученных граничных условий, эквивалентные комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих для моделирования на ПК представлены на рисунке 2.13.



а)



б)

Рис.2.13. Эквивалентные комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих: а) – для к.з. фазы A на землю, б) – для к.з. фазы A' на землю
[Источник: разработан автором]

Короткое замыкание между фазами B и C или B и C'

Граничные условия при коротком замыкании между фазами B и C или B и C' в фазных координатах определяются следующим образом:

для короткого замыкания между фазами B и C на УСВЛ

$$\begin{aligned}\dot{I}_{kB} &= -\dot{I}_{kC}; \\ \dot{I}_{kA} &= \dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kB'} = \dot{I}_{kC'} = 0; \\ \dot{U}_{kB} &= \dot{U}_{kC};\end{aligned}$$

для к.з. между фазами B и C' на УСВЛ

$$\begin{aligned}\dot{I}_{kB} &= -\dot{I}_{kC'}; \\ \dot{I}_{kA} &= \dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kB'} = 0; \\ \dot{U}_{kB} &= \dot{U}_{kC'}\end{aligned}$$

В соответствии с (1.11) и (1.12), данные граничные условия в координатах шести симметричных составляющих определяются как:

при коротком замыкании между фазами B и C на УСВЛ

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A_0} &= \dot{I}_{A_3} = 0; \\ \dot{I}_{A_1} &= \dot{I}_{A_4} = -\dot{I}_{A_5} = \frac{\sqrt{3}}{6} \dot{I}_{kB}; \\ \dot{U}_{A_1} + \dot{U}_{A_2} e^{j180^\circ} + \dot{U}_{A_4} + \dot{U}_{A_5} e^{j180^\circ} &= 0;\end{aligned}$$

при к.з. между фазами B, C' на УСВЛ

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A_0} &= \dot{I}_{A_2} = \dot{I}_{A_3} = \dot{I}_{A_4} = 0; \\ \dot{I}_{A_1} &= \dot{I}_{A_5} e^{j60^\circ} = \frac{1}{3} \dot{I}_{kB}; \\ \dot{U}_{A_1} + \dot{U}_{A_2} e^{j180^\circ} + \dot{U}_{A_4} + \dot{U}_{A_5} e^{j180^\circ} &= 0.\end{aligned}$$

Эквивалентные комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих представлены на рисунке 2.14.

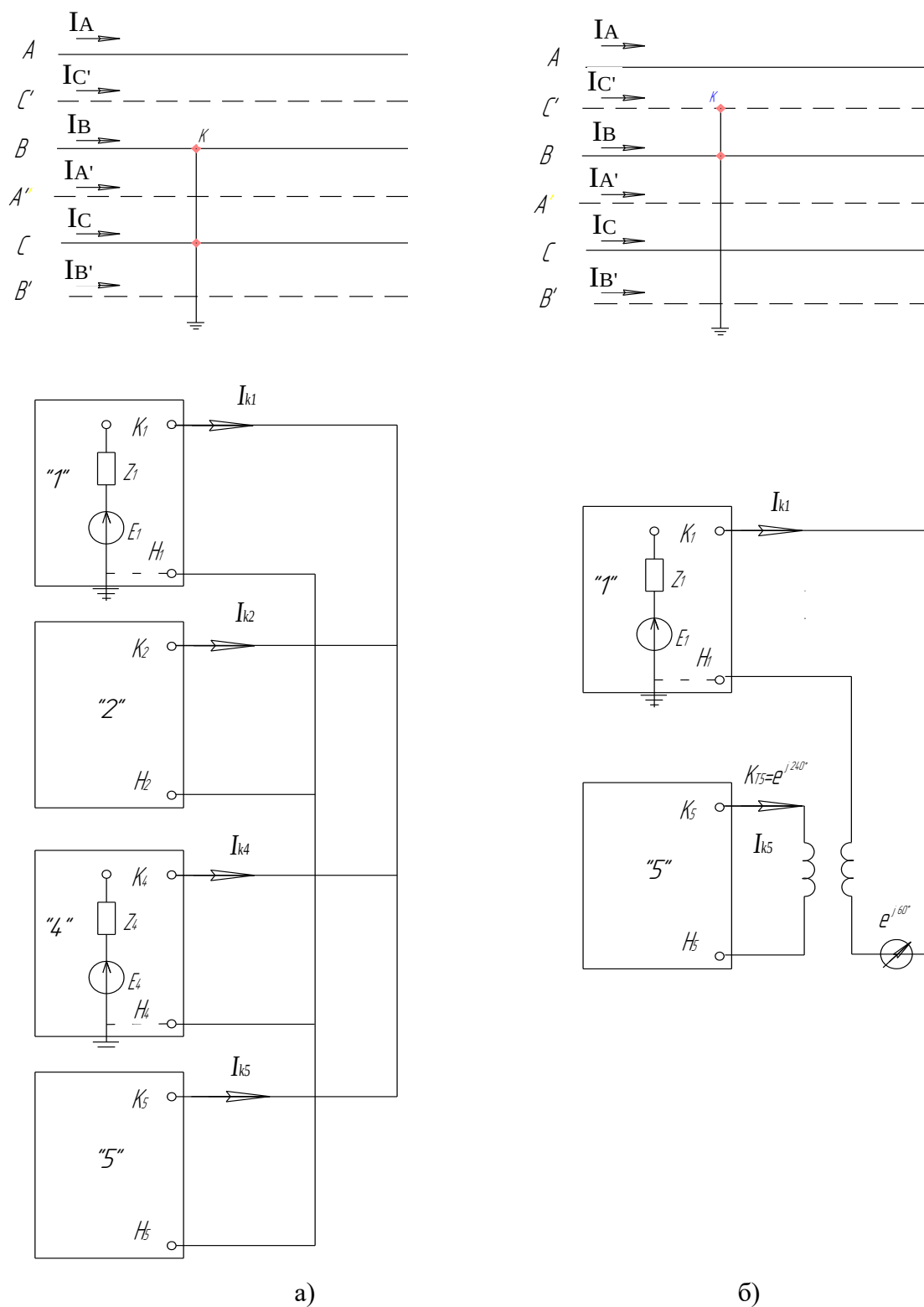


Рис. 2.14. Эквивалентные комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих: а) – для к.з. между фазами B и C ; б) – для к.з. между фазами B и C [Источник: разработан автором]

Аналогичным образом и для других повреждений могут быть получены граничные условия и построены схемы замещения. Следует отметить, что граничные условия в

фазных координатах и симметричных составляющих, а также схемы замещения для коротких замыканий, аналогичны схемам замещения при обрыве соответствующих фаз. Например, граничные условия и схемы замещения для двухфазных коротких замыканий между любыми двумя фазами (B и C') аналогичны обрыву остальных четырех фаз (A , A' , C , B').

Так же, как и для случаев продольной несимметрии, для поперечной несимметрии можно смоделировать эквивалентные комплексные схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих на компьютере, с помощью программы Multisim или Matlab Simulink [14,17,25,43,59,140]. Это позволяет определить по схеме параметры (токи и напряжения при данном повреждении фаз) без проведения соответствующих расчетов. Данное моделирование значительно упрощает расчет схемы [125].

2.2.5 Комплексные схемы замещения при конкретных сложных несимметричных режимах на УСВЛ

Совокупность нескольких простых несимметрий (продольных, поперечных) на УСВЛ считается сложной несимметрией.

Комплексную схему замещения при одновременной несимметрии в разных местах на УСВЛ можно составить, объединяя отдельные комплексные схемы замещения, которые разработаны для отдельных простых видов несимметрий, входящих в сложную 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. Коэффициенты трансформации $k_{T0}, k_{T1}, k_{T2}, k_{T3}, k_{T4}, k_{T5}$ находят согласно таблице 2.1 в зависимости от того, какая фаза является особой.

Разрыв фазы A на УСВЛ с замыканием одного из оборвавшихся концов этой фазы на землю (рисунок 2.15,а).

В этом случае граничные условия в фазных координатах для данного повреждения имеют вид:

при обрыве фазы A в точке MN на УСВЛ

$$\dot{I}_{yA} = 0; \quad \dot{U}_{yC'} = \dot{U}_{yB} = \dot{U}_{yA'} = \dot{U}_{yC} = \dot{U}_{yB'} = 0. \quad (2.27)$$

при однофазном коротком замыкании фазы A на УСВЛ

$$\dot{I}_{kC'} = \dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kC} = \dot{I}_{kB'} = 0; \quad \dot{U}_{kA} = 0; \quad (2.28)$$

В координатах шести симметричных составляющих согласно (1.11) и (1.12) граничные условия (2.27) и (2.28) примут вид:

в точке обрыва фазы *A* на УСВЛ

$$\dot{I}_{yA0} + \dot{I}_{yA1} + \dot{I}_{yA2} + \dot{I}_{yA3} + \dot{I}_{yA4} + \dot{I}_{yA5} = 0; \quad (2.29)$$

$$\dot{U}_{yA0} = \dot{U}_{yA1} = \dot{U}_{yA2} = \dot{U}_{yA3} = \dot{U}_{yA4} = \dot{U}_{yA5} = \frac{1}{6} \dot{U}_{yA}; \quad (2.30)$$

в точке однофазного короткого замыкания на УСВЛ

$$\dot{I}_{kA0} = \dot{I}_{kA1} = \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA3} = \dot{I}_{kA4} = \dot{I}_{kA5} = \frac{1}{6} \dot{I}_{kA}; \quad (2.31)$$

$$\dot{U}_{kA} = \dot{U}_{kA0} + \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA3} + \dot{U}_{kA4} + \dot{U}_{kA5}. \quad (2.32)$$

Согласно граничным условиям, на рисунке 2.15.б представлена комплексная схема замещения.

Схемы последовательностей состоят из двух частей – из схемы в точке обрыва и схемы в точке короткого замыкания. Таким образом, в схеме (рисунок 2.12) имеется электрическая связь по месту обрыва и трансформаторная связь по месту короткого замыкания. Первый объединяющий элемент гарантирует критерий равенства падений напряжений в точке обрыва, а также равенство суммы токов 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей нулю. Второй элемент гарантирует критерий равенства нулю суммы напряжений шести последовательностей в точке к.з. и равенство между собой токов 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей.

Разрыв фазы *A* и короткое замыкание фазы *C'* УСВЛ на землю (рисунок 2.16,а)

Граничные условия при обрыве фазы *A* и коротком замыкании фазы *C'* на УСВЛ схожи с выражениями для случая обрыва фазы *A* с замыканием оборвавшегося конца на землю:

при обрыве фазы *A* (точки *MN*) на УСВЛ:

$$\dot{I}_{yA} = 0; \quad \dot{U}_{yC'} = \dot{U}_{yB} = \dot{U}_{yA'} = \dot{U}_{yC} = \dot{U}_{yB'} = 0;$$

при однофазном коротком замыкании фазы *C'* на УСВЛ

$$\dot{I}_{kA} = \dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kA'} = \dot{I}_{kC} = \dot{I}_{kB'} = 0; \quad \dot{U}_{kC'} = 0.$$

В координатах шести симметричных составляющих:

в точке обрыва фазы *A* на УСВЛ

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{A4} + \dot{I}_{A5};$$

$$\dot{U}_{yA0} = \dot{U}_{yA1} = \dot{U}_{yA2} = \dot{U}_{yA3} = \dot{U}_{yA4} = \dot{U}_{yA5} = \frac{1}{6} \dot{U}_{yA};$$

в точке однофазного короткого замыкания на УСВЛ

$$\dot{I}_{kA0} = \dot{I}_{kA1} = \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA3} = \dot{I}_{kA4} = \dot{I}_{kA5} = \frac{1}{6} \dot{I}_{kA} e^{j60^\circ};$$

$$\dot{U}_{kC'} = \dot{U}_{kA0} + \dot{U}_{kA1} e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{kA2} e^{-j120^\circ} - \dot{U}_{kA3} + \dot{U}_{kA4} e^{-j240^\circ} + \dot{U}_{kA5} e^{-j300^\circ}$$

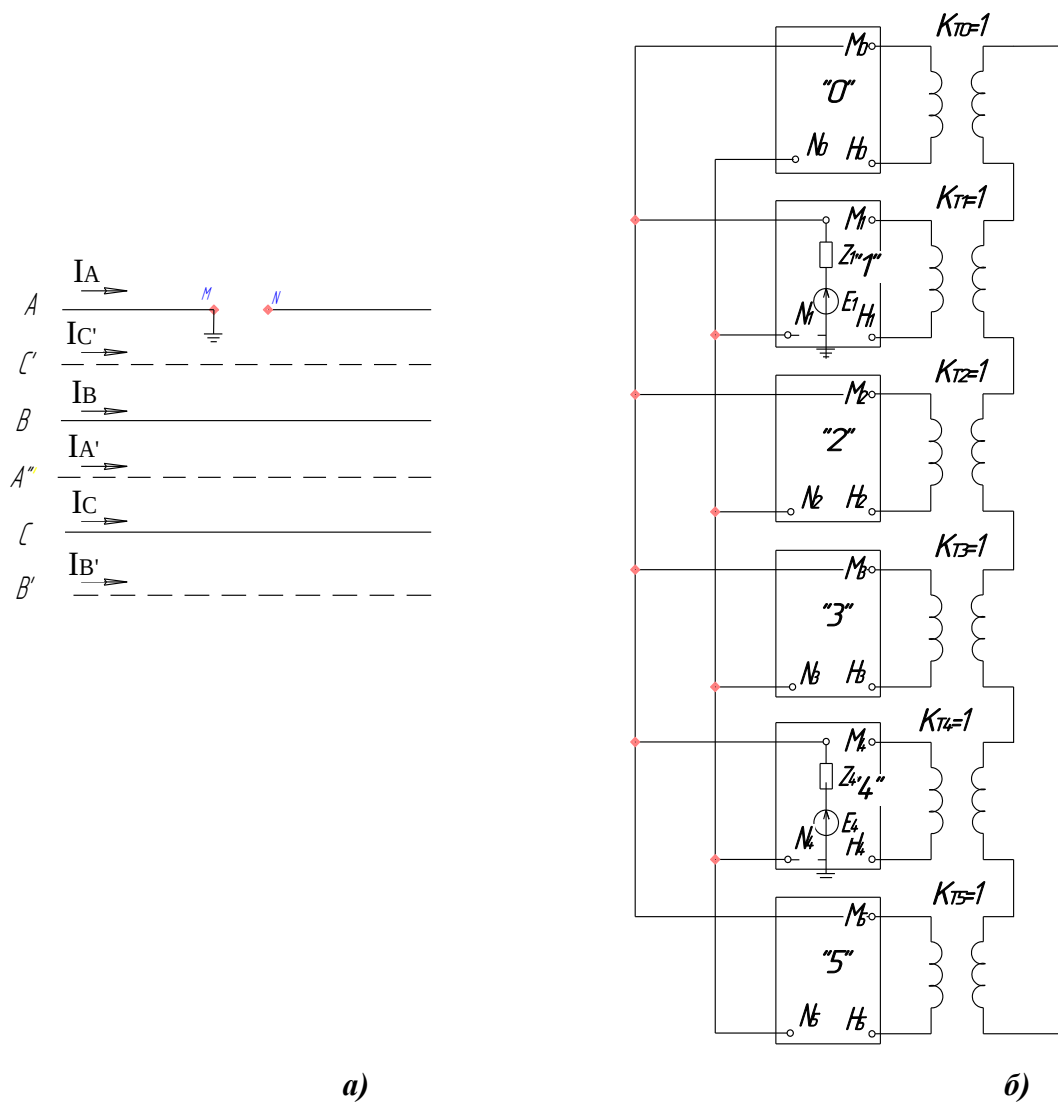


Рис. 2.15. Комплексная схема замещения при обрыве и замыкании на землю фазы А на УСВЛ [Источник: разработан автором]

В комплексной схеме замещения (рисунок 2.16,б) использованы идеальные трансформаторы для соединения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания. Идеальные трансформаторы обеспечивают требуемые граничные условия при замыкании на землю фазы С'.

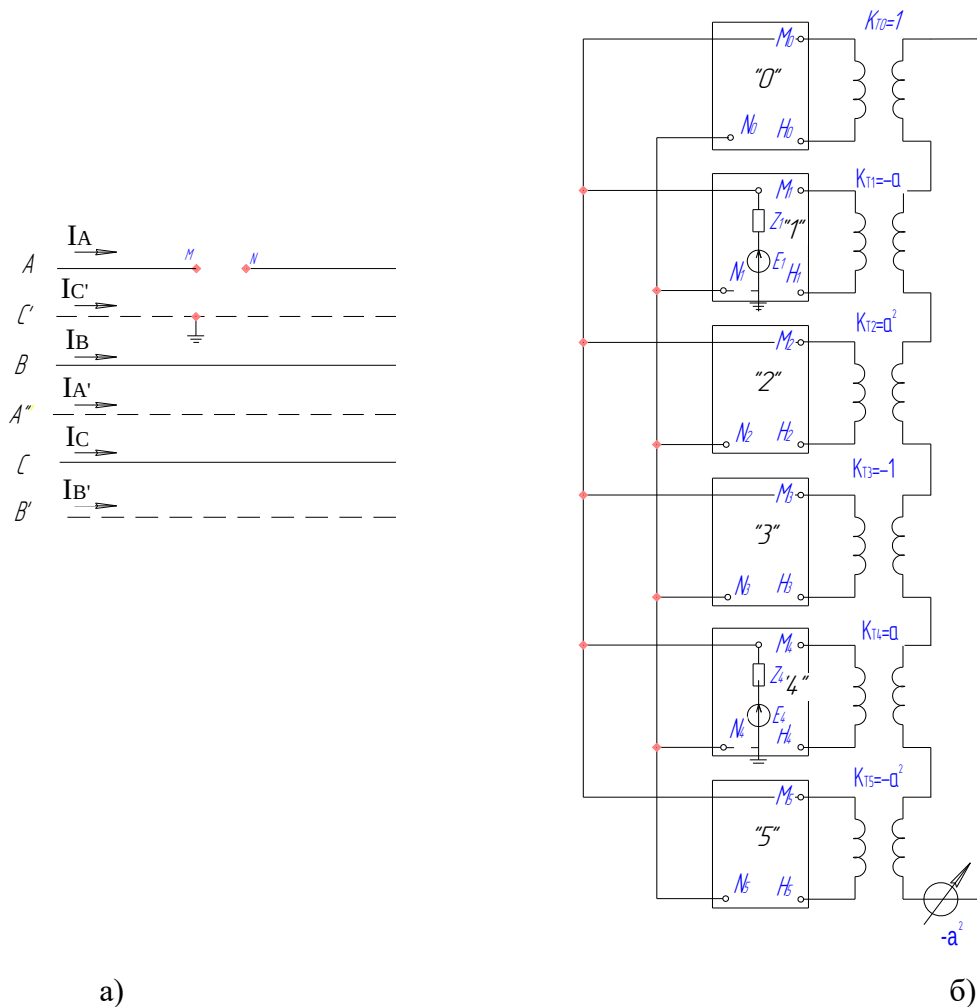


Рис. 2.16. Комплексная схема замещения при обрыве фазы А и замыкании на землю фазы С' УСВЛ [Источник: разработан автором]

Выводы по второй главе

1. Как и для простых видов повреждений, на СВЛ и УСВЛ при расчёте и анализе сложных видов повреждений может быть использован метод разложения несимметричных векторов тока и напряжения на шесть симметричных составляющих.
2. На основании граничных условий при сложных видах повреждений получены конкретные обобщённые формулы для расчёта различных сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ.
3. Для сложных видов продольной и поперечной несимметрии на СВЛ и УСВЛ (обрывы и короткие замыкания) разработаны конкретные и обобщённые схемы замещения СВЛ и УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5.
4. Для 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.

3. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ШЕСТИФАЗНЫХ ЛЭП (УСВЛ) НА ОСНОВЕ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

С учетом вышеизложенного метод шести симметричных составляющих может быть использован для расчёта любых продольных и поперечных несимметрий (обрывов и к.з.) в любых шестифазных системах переменного синусоидального тока, в том числе и на обычных двухцепных ЛЭП. В связи с этим для апробации разработанного метода шести симметричных составляющих можно рассчитать конкретные повреждения на двухцепной ЛЭП известным методом трёх симметричных составляющих. При этом двухцепную ЛЭП можно считать состоящей из двух трёхфазных цепей и, благодаря методу шести симметричных составляющих, рассматривать её как шестифазную ЛЭП.

3.1 Расчет обрыва одной из фаз на обычной двухцепной ЛЭП методом трех симметричных составляющих и методом разложения на шесть симметричных составляющих

С целью апробации изложенной методики расчёта сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ проанализируем определенные несимметрии на обычной двухцепной линии электропередачи. Рассмотрим линию электропередачи повышенной пропускной способности с одинаковыми классами напряжения цепей и углом сдвига между напряжениями сближенных фаз $\theta=0^\circ$ как обычную двухцепную ЛЭП, со стандартным расположением фаз и, следовательно, большим межцепным расстоянием.

Рассмотрим двухцепную ЛЭП-110 кВ с односторонним питанием и длиной 70 км, на которой место обрыва фазы *A* находится на расстоянии 30 км от начала линии (рисунок 3.1).

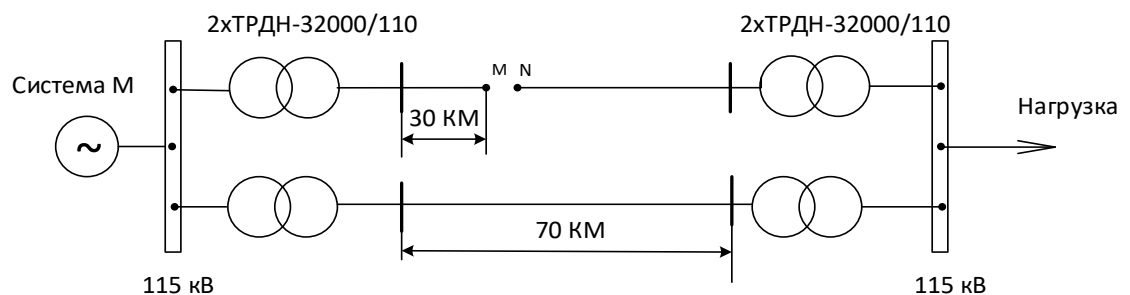


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема двухцепной ЛЭП-110 кВ длиной 70 км с обрывом фазы *A* на расстоянии 30 км от начала линии [Источник: разработан автором]

Несимметричные системы токов и напряжений в месте обрыва характеризуются следующими граничными условиями:

$$\dot{I}_{Ay} = 0,$$

$$\dot{U}_{A'y} = \dot{U}_{By} = \dot{U}_{B'y} = \dot{U}_{Cy} = \dot{U}_{C'y} = 0$$

Схемы замещения элементов двухцепной линии (рисунок 3.1) в координатах трёх симметричных составляющих приведены на рисунке 3.2, а в координатах шести симметричных составляющих приведены на рисунке 3.3. На данных схемах замещения указаны рассчитанные значения и результирующие сопротивления всех последовательностей относительно места обрыва.

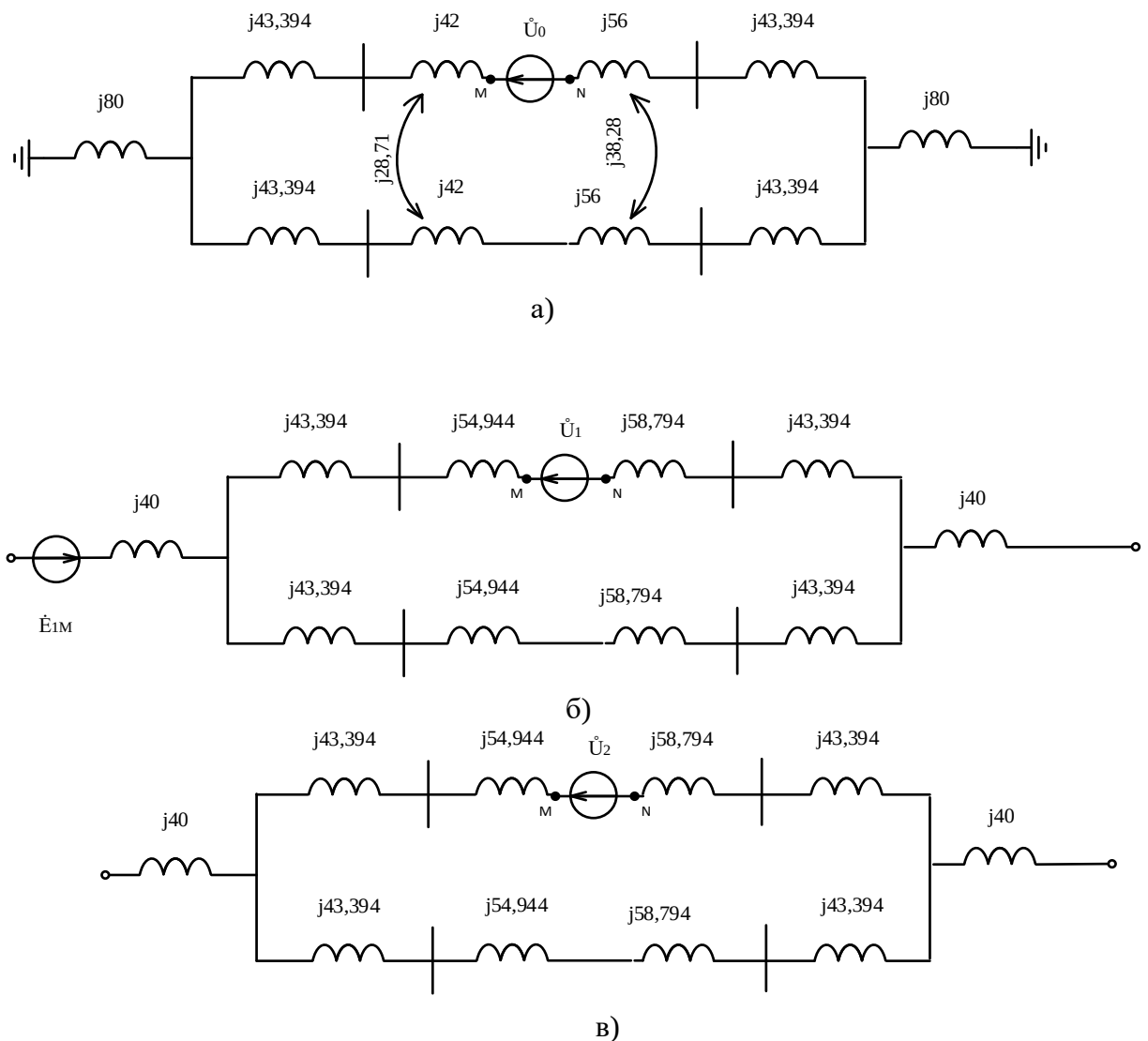


Рис. 3.2. Схемы замещения двухцепной ВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2 последовательности: а) схема замещения нулевой последовательности; б) схема замещения первой последовательности; в) схема замещения второй последовательности [Источник: разработан автором]

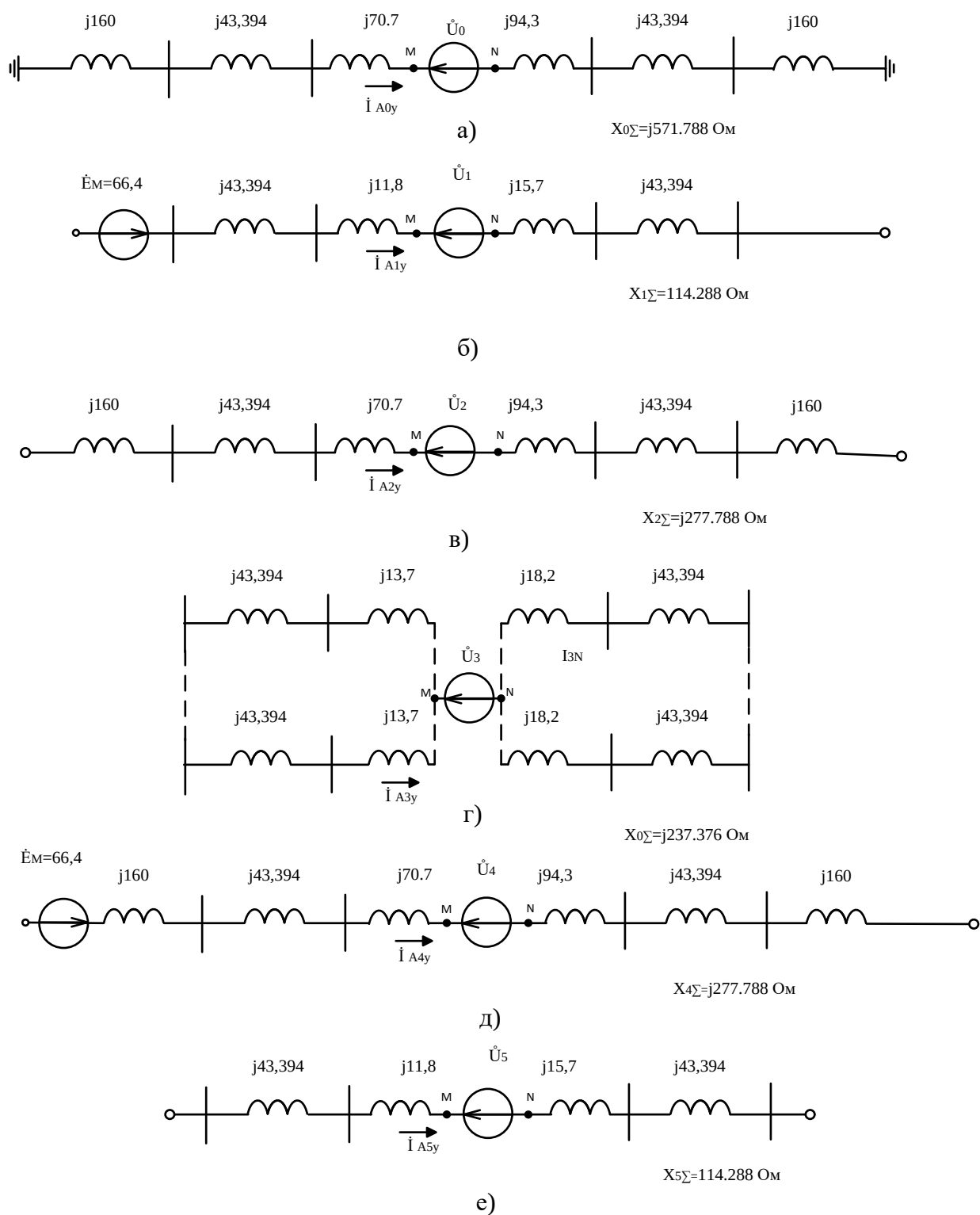


Рис. 3.3. Схемы замещения двухцепной ВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности
 а) схема замещения нулевой последовательности; б) схема замещения первой последовательности; в) схема замещения второй последовательности; г) схема замещения третьей последовательности; д) схема замещения четвёртой последовательности; е) схема замещения пятой последовательности [Источник: разработан автором]

Система уравнений, описывающая данный вид повреждения, согласно главе 2 пункт 2.1.1, состоит из двенадцати уравнений, из которых шесть уравнений составлены согласно второму закону Кирхгофа, и еще шесть уравнений составлены по граничным условиям в месте обрыва в координатах шести симметричных составляющих:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1 = \dot{E} \\ Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = 0 \\ Z_3 \dot{I}_3 + \dot{U}_3 = 0 \\ Z_4 \dot{I}_4 + \dot{U}_4 = \dot{E} \\ Z_5 \dot{I}_5 + \dot{U}_5 = 0 \\ Z_0 \dot{I}_0 + \dot{U}_0 = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_0 = 0 \\ -a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 - \dot{U}_3 + a\dot{U}_4 - a^2\dot{U}_5 + \dot{U}_0 = 0 \\ a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_3 + a^2\dot{U}_4 + a\dot{U}_5 + \dot{U}_0 = 0 \\ -\dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \dot{U}_3 + \dot{U}_4 - \dot{U}_5 + \dot{U}_0 = 0 \\ a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + \dot{U}_3 + a\dot{U}_4 + a^2\dot{U}_5 + \dot{U}_0 = 0 \\ -a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 - \dot{U}_3 + a^2\dot{U}_4 - a\dot{U}_5 + \dot{U}_0 = 0 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Для решения данной системы уравнений в программе MathCad составим два определителя, состоящие из коэффициентов и свободных членов выражения 3.1:

$$X = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a^2 & -1 & a & -a^2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^2 & a & 1 & a^2 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & a^2 & 1 & a & a^2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a^2 & a & -1 & a^2 & -a & 1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} \dot{E} \\ 0 \\ 0 \\ \dot{E} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Выражение 3.1 в матричном виде:

$$\dot{\mathbf{I}} \times \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{X}^{-1} \times \mathbf{Y} \quad (3.3)$$

В результате решения матричного выражения (3.3) в MathCad, симметричные составляющие токов и напряжений в месте обрыва имеют вид:

$$\dot{I}_1 = -j0,347 = 0,347e^{-j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_2 = j0,096 = 0,096e^{j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_3 = j0,113 = 0,113e^{j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_4 = -j0,143 = 0,143e^{-j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_5 = j0,234 = 0,234e^{j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_0 = j0,047 = 0,047e^{j90^\circ} \text{ кА}.$$

Симметричные составляющие напряжений вместе обрыва:

$$\dot{U}_1 = 26,745e^{j0^\circ} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_2 = 26,745e^{j6,178 \cdot 10^{-15}^\circ} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_3 = 26,745e^{-j9,725 \cdot 10^{-15}^\circ} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_4 = 26,745e^{j0^\circ} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_5 = 26,745e^{j1,254 \cdot 10^{-14}^\circ} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_0 = 26,745e^{-j9,725 \cdot 10^{-15}^\circ} \text{ кВ}.$$

Следовательно, согласно матрице перехода от шести симметричных составляющих токов и напряжений к фазным координатам (1.12):

токи в месте обрыва:

$$\dot{I}_A = 0 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A'} = 0,312e^{-j161,491^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_B = 0,749e^{j161,388^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{B'} = 5,947 \cdot 10^{-4} e^{j90^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_C = 0,749e^{j18,612^\circ} \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{C'} = 0,312e^{-j18,509^\circ} \text{ кА}.$$

напряжения в месте обрыва:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= 160,468 e^{j1,937 \times 10^{-15}} \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{A'} &= 1,123 \cdot 10^{-14} e^{-j140,747^\circ} \text{ кВ}; \\ \dot{U}_B &= 6,29 \cdot 10^{-15} e^{j166,833^\circ} \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{B'} &= 1,421 \cdot 10^{-14} e^{-j1,272 \times 10^{-14}} \text{ кВ}; \\ \dot{U}_C &= 5,081 \cdot 10^{-15} e^{j101,135^\circ} \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{C'} &= 1,078 \cdot 10^{-14} e^{j81,514^\circ} \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Векторные диаграммы симметричных составляющих токов 0, 1, 2, 3, 4, и 5 последовательностей представлены на рисунке 3.4:

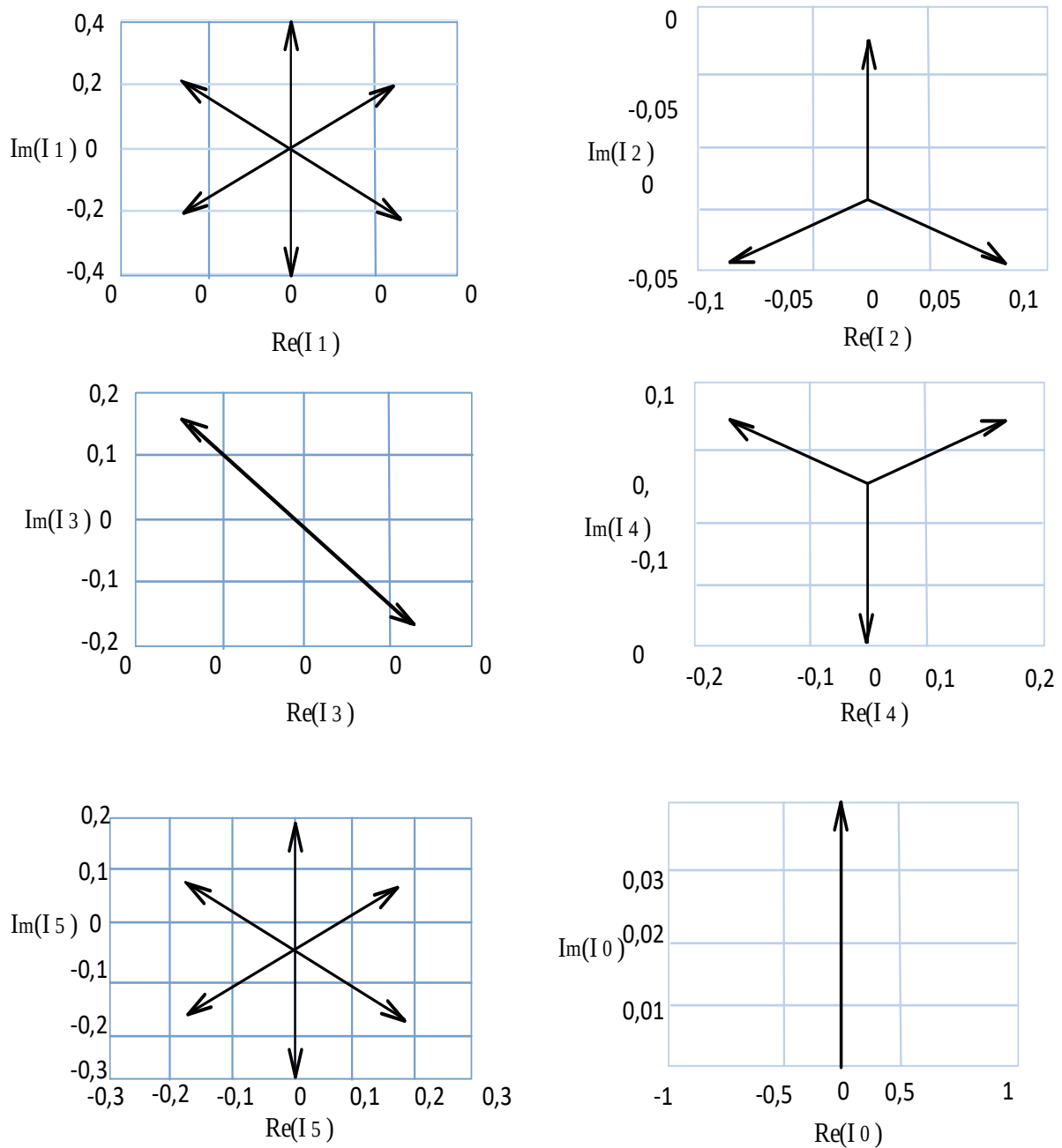


Рис. 3.4. ВД 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности токов [Источник: разработан автором]

Векторные диаграммы симметричных составляющих напряжений 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей представлены на рисунке 3.5.

Векторные диаграммы напряжений в месте обрыва методом трёх и шести симметричных составляющих приведены на рисунках 3.6 - 3.8.

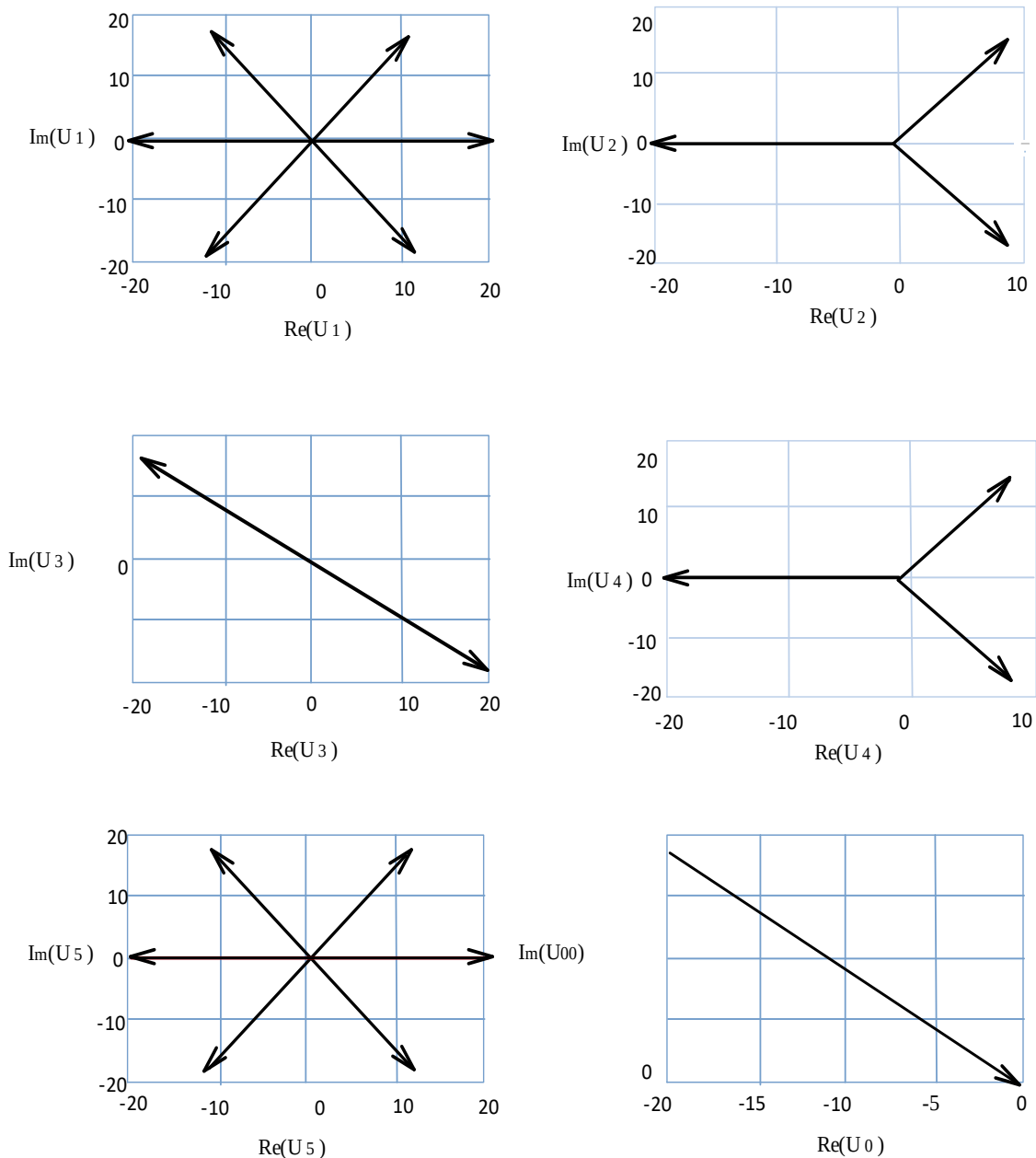
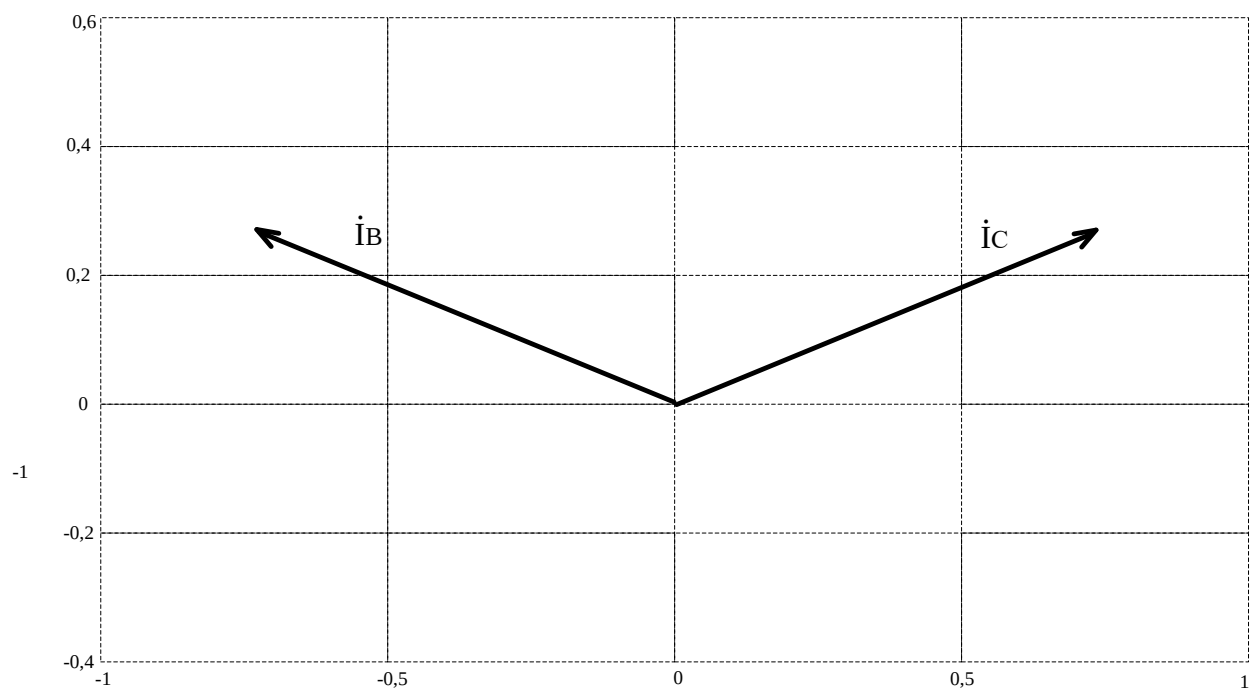
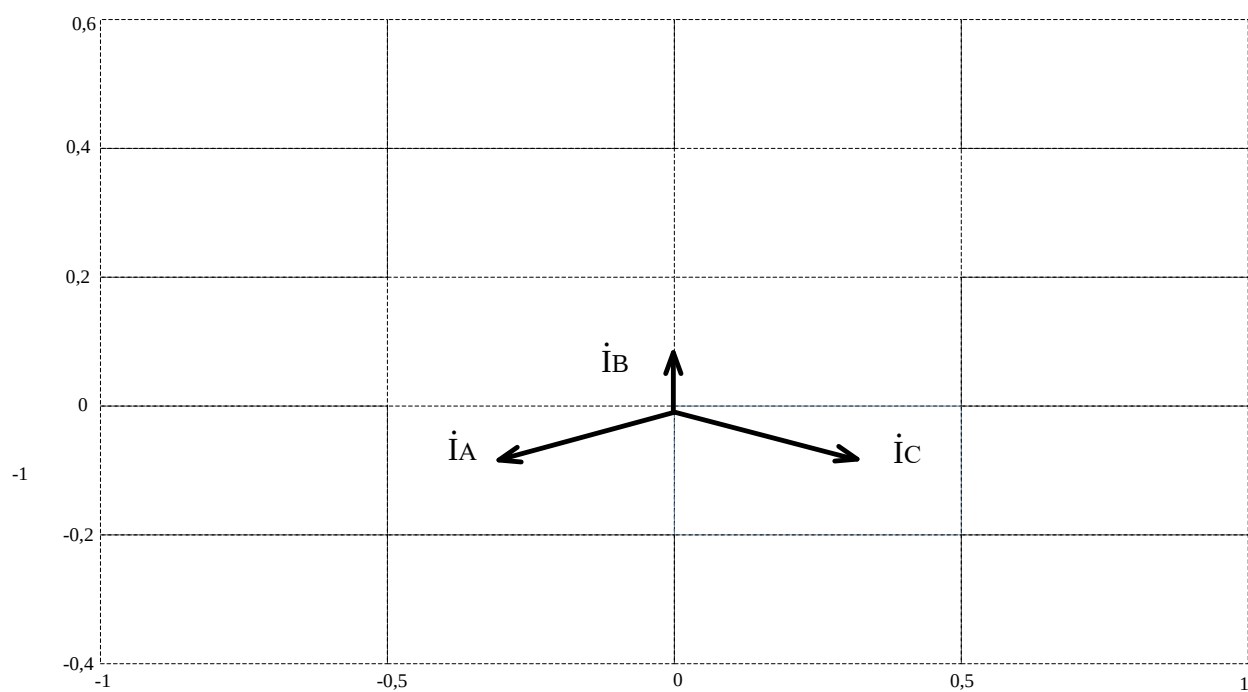


Рис. 3.5. ВД 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей напряжений [Источник: разработан автором]

Векторные диаграммы токов в месте обрыва, полученные методом трёх и шести симметричных составляющих, приведены на рисунках 3.5, 3.6:



а)



б)

Рис.3.6. ВД токов согласно методу трёх симметричных составляющих:
а) первой цепи; б) второй цепи [Источник: разработан автором]

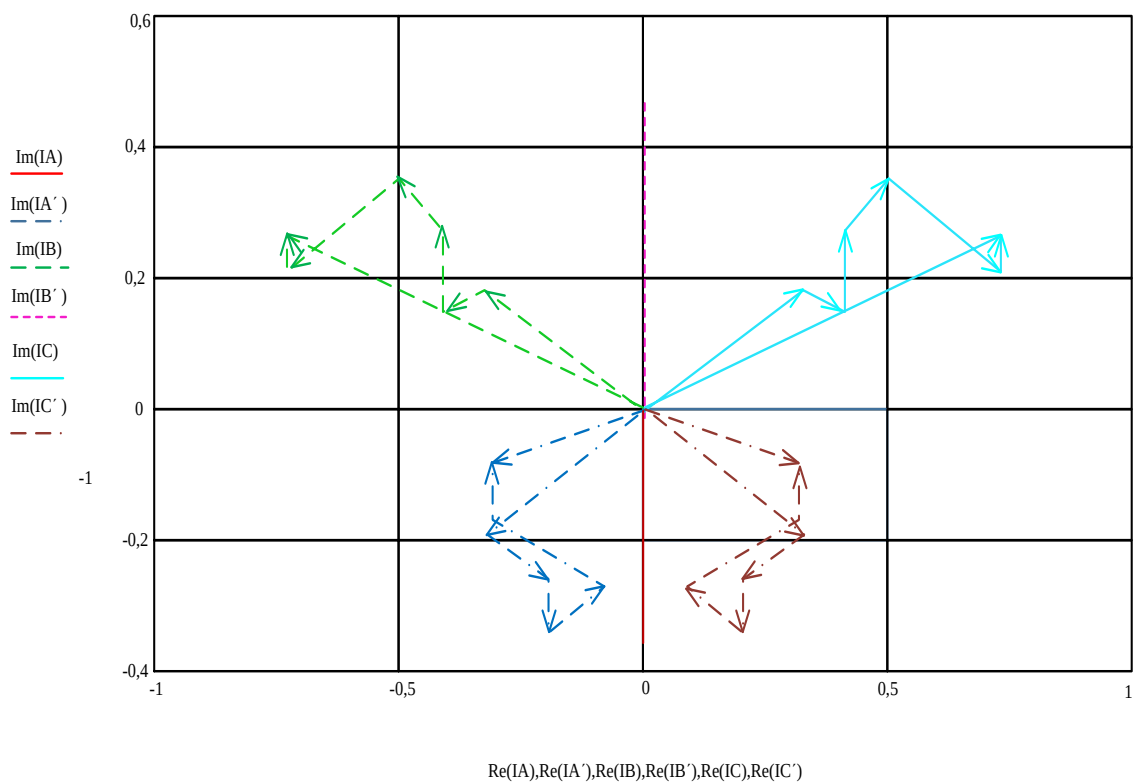


Рис. 3.7. ВД токов согласно методу шести симметричных составляющих [Источник: разработан автором]

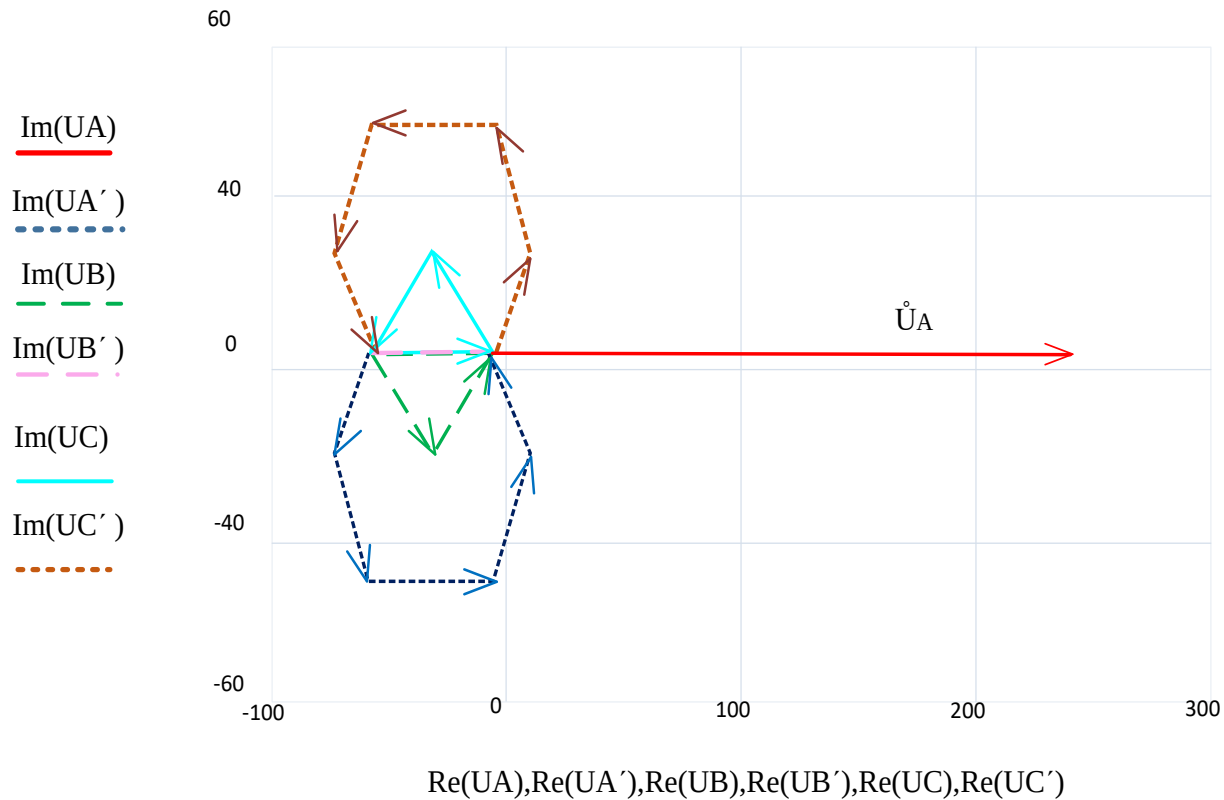


Рис. 3.8. ВД напряжения в месте обрыва согласно методу шести симметричных составляющих [Источник: разработан автором]

Согласно векторным диаграммам, ток и напряжение в месте обрыва могут быть определены как сумма соответствующих симметричных составляющих. Напряжение в месте обрыва $\dot{U}_A$ складывается из составляющих $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{U}_5, \dot{U}_0$, при этом напряжения в других фазах равны нулю. Для токов, $i_{Ay} = 0$, а токи неповреждённых фаз равны сумме симметричных составляющих. На векторных диаграммах модули и углы векторов совпадают.

Дополнительно рассмотрено моделирование комплексной схемы в программе Multisim (рисунок 3.9) и Matlab Simulink (рисунок 3.10) [134]. Для сравнения результаты расчетов и измерений сведены в таблицу 3.1.

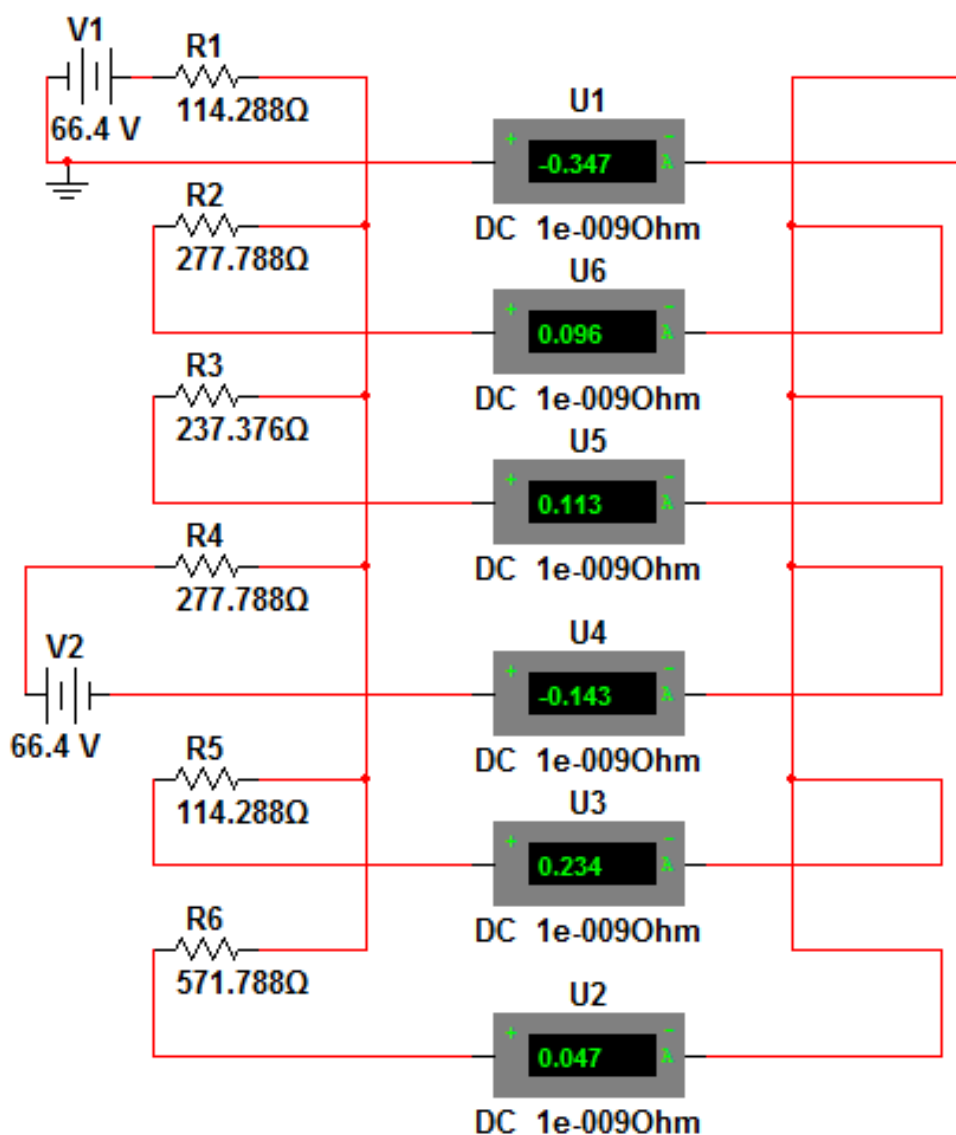


Рис. 3.9. Комплексная схема замещения обрыва фазы А в программе Multisim

[Источник: разработан автором]

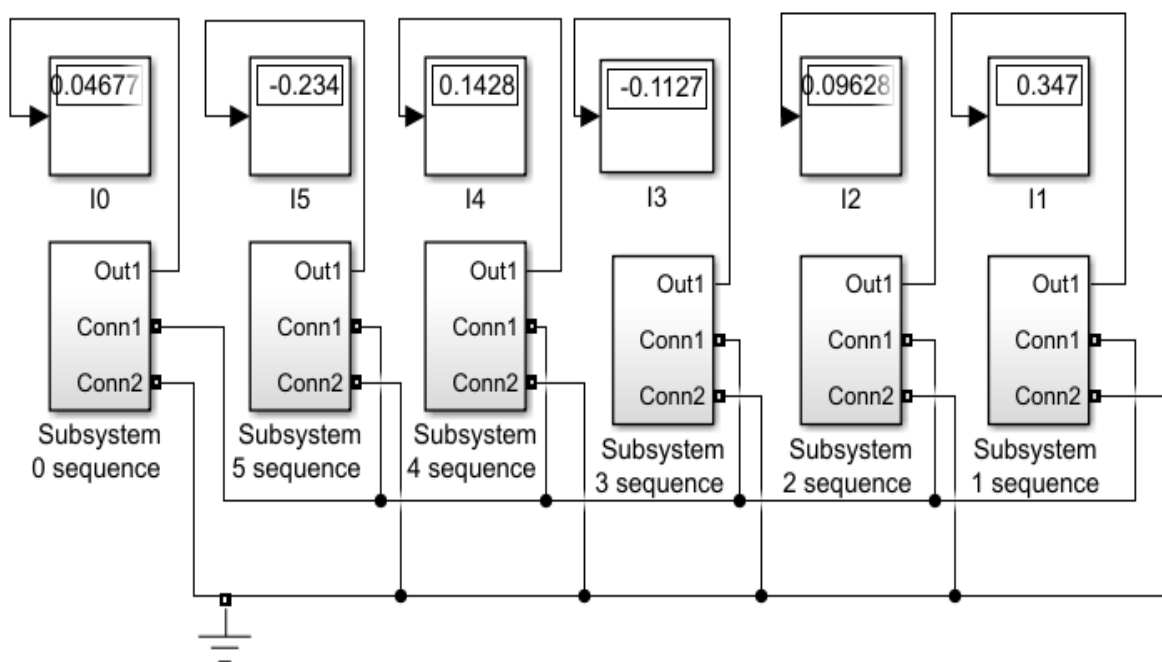


Рис.3.10. Эквивалентная комплексная схема замещения обрыва фазы А в координатах шести симметричных составляющих в программе Matlab Simulink [Источник: разработан автором]

Таблица 3.1 Результаты расчётов и измерений токов 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей при обрыве фазы А

	$ i_1 $	$ i_2 $	$ i_3 $	$ i_4 $	$ i_5 $	$ i_0 $
<i>Расчёт в программе MathCad</i>	0,347	0,096	0,113	0,143	0,234	0,047
<i>Измерения в программе Multisim</i>	0,347	0,096	0,113	0,143	0,234	0,047
<i>Измерения в программе Matlab Simulink</i>	0,347	0,09628	0,1127	0,1428	0,234	0,04677

Согласно таблице 3.1, полученные симметричные составляющие совпадают, следовательно, результаты расчетов идентичны результатам измерений комплексных схем.

Таблица 3.2 Результаты расчётов фазных токов при обрыве фазы *A*

Токи в фазах	<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 0,1,2 составляющих	0	$0,768e^{j161.388^\circ}$	$0,768e^{j18.612^\circ}$	$6,11 \cdot 10^{-4} e^{j90^\circ}$	$0,325e^{-j161.491^\circ}$	$0,325e^{-j18.509^\circ}$
Метод 0,1,2,3,4,5 составляющих	0	$0,749e^{j161.388^\circ}$	$0,749e^{j18.612^\circ}$	$5,947 \cdot 10^{-4} e^{j90^\circ}$	$0,312e^{-j161.491^\circ}$	$0,312e^{-j18.509^\circ}$

Согласно таблице 3.2, расхождения результатов расчёта токов при обрыве фазы *A* методом трёх и шести симметричных составляющих в среднем составляют 4 %. Расчёт продольной несимметрии на обычных двухцепных линиях электропередачи методом шести симметричных составляющих является более точным, так как учитывает воздействие всех взаимоиндукций между фазами в выражениях для сопротивлений соответствующих симметричных составляющих.

3.2 Расчёт обрыва одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю на обычной двухцепной ЛЭП методом трёх симметричных составляющих и методом разложения на шесть симметричных составляющих

Рассмотрим сложный вид повреждения на двухцепной ЛЭП - однофазное к.з. с одновременным обрывом этой же фазы. Данный сложный вид повреждения вероятен при однофазном к.з. и каскадном отключении фазы выключателями *B*; при неодновременном включении устройствами однофазного автоматического повторного включения фазы *A* выключателями *B* на устойчивое к.з.; при обрыве провода и замыкании на землю одного из его оборванных концов. На рисунке 3.11 изображена принципиальная электрическая схема двухцепной ЛЭП-110 кВ с двухсторонним питанием, длиной 70 км, на которой произошёл обрыв фазы *A* в начале линии, и короткое замыкание фазы *A* на землю на расстоянии 30 км от начала линии. При расчёте активные сопротивления элементов схемы не учитываются. Для данного случая схемы замещения представлены в координатах трёх симметричных составляющих 0, 1, 2 последовательностей (рисунок 3.12) и в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей (рисунок 3.13).

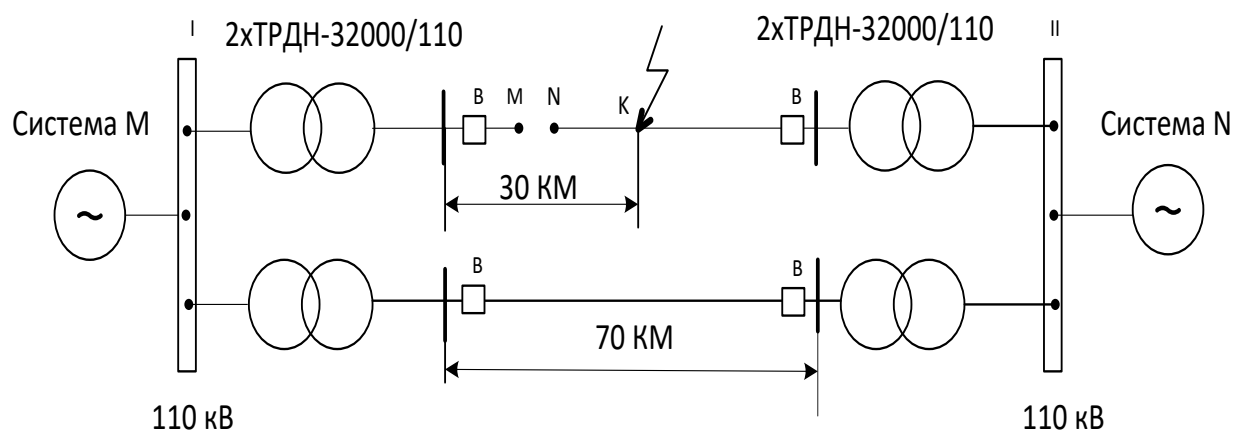


Рис. 3.11. Электрическая схема двухцепной ВЛ [Источник: разработан автором]

Для определения токов применяем метод прямого моделирования. Составляем комплексные схемы, которые состоят из схем замещения 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей. Комплексная схема замещения для повреждённой фазы, разработанная в программе Multisim, изображена на рисунке 3.14. Согласно рисунку 3.14, электрическая связь - по месту обрыва (точки *М*, *Н*), а трансформаторная связь - по месту короткого замыкания (*К-Н*). Коэффициенты трансформации определяются из таблицы 2.1. В соответствии с граничными условиями, в месте обрыва – электрическое соединение между схемами отдельных последовательностей, а в точке короткого замыкания соединение производится с помощью идеальных трансформаторов. Промежуточная цепь введена с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентами 1/1 согласно таблице 2.1. Данное введение гарантирует равенство токов 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей в точке однофазного короткого замыкания, при этом сумма симметричных составляющих напряжения в точке короткого замыкания равна нулю.

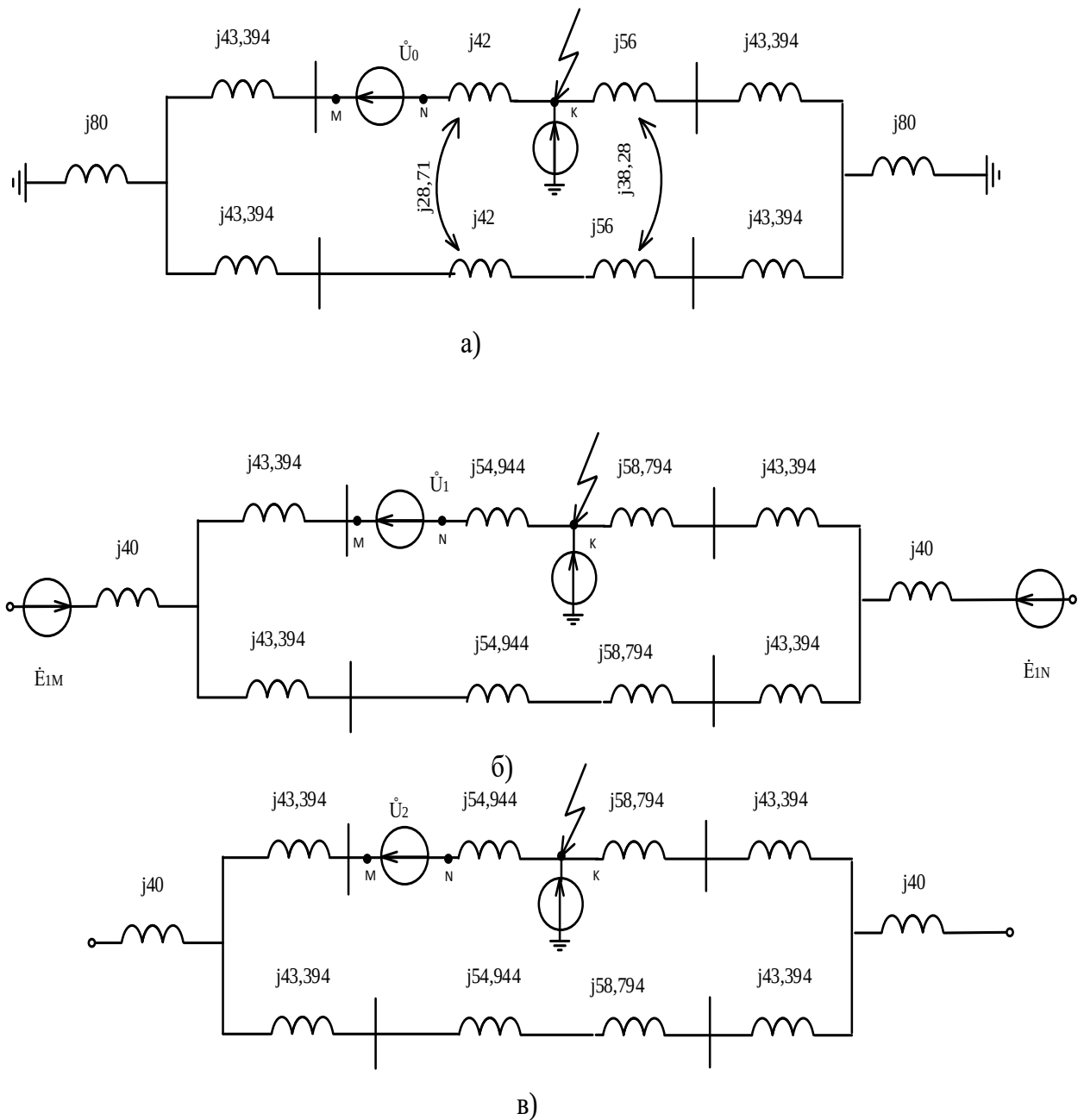


Рис. 3.12. Схемы замещения двухцепной ВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2 последовательностей
а) Схема замещения нулевой последовательности;
б) Схема замещения первой последовательности;
в) Схема замещения второй последовательности [Источник: разработан автором]

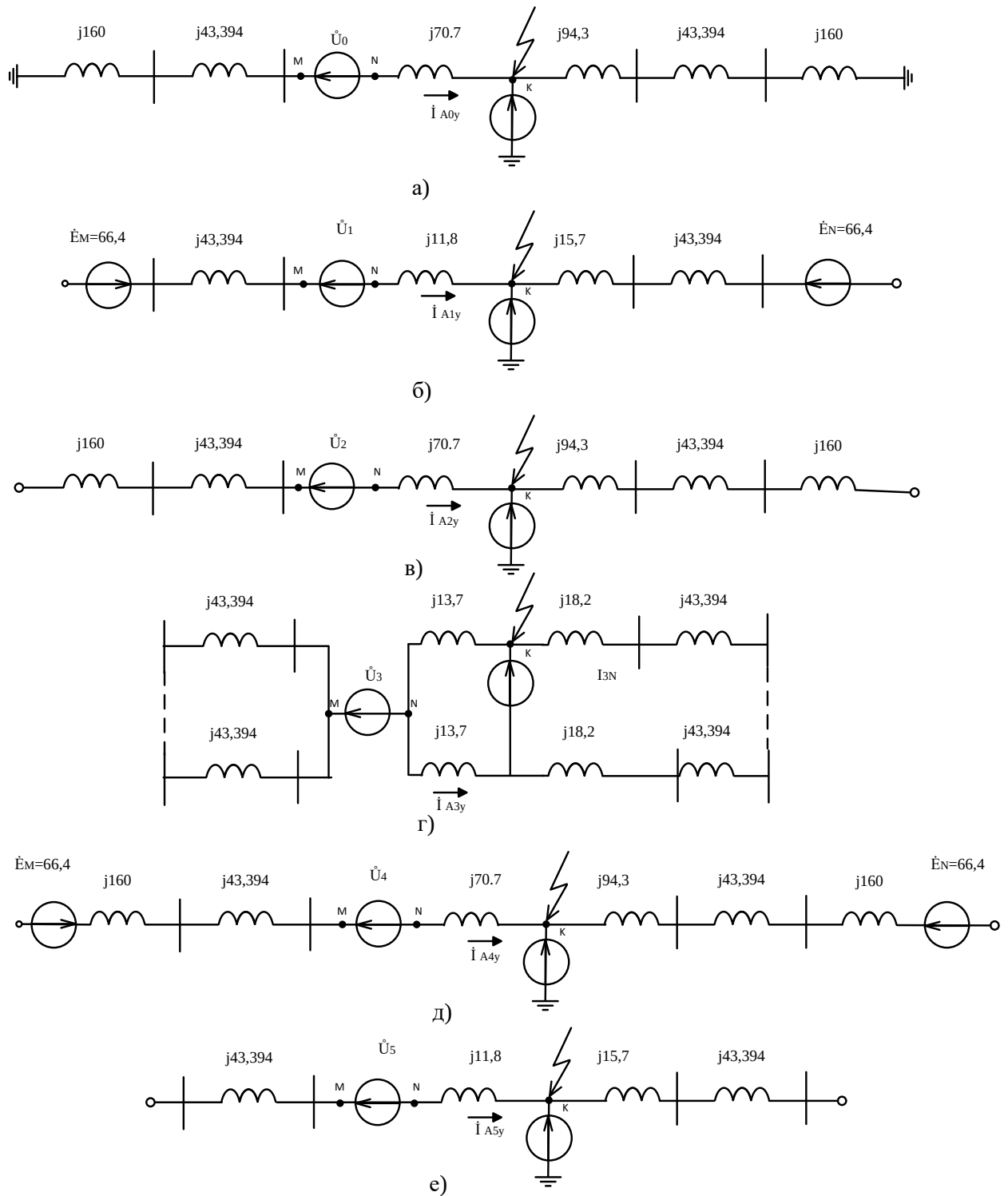


Рис. 3.13. Схемы замещения двухцепной ВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей

- а) Схема замещения нулевой последовательности;**
- б) Схема замещения первой последовательности;**
- в) Схема замещения второй последовательности;**
- г) Схема замещения третьей последовательности;**
- д) Схема замещения четвёртой последовательности;**
- е) Схема замещения пятой последовательности [Источник: разработан автором]**

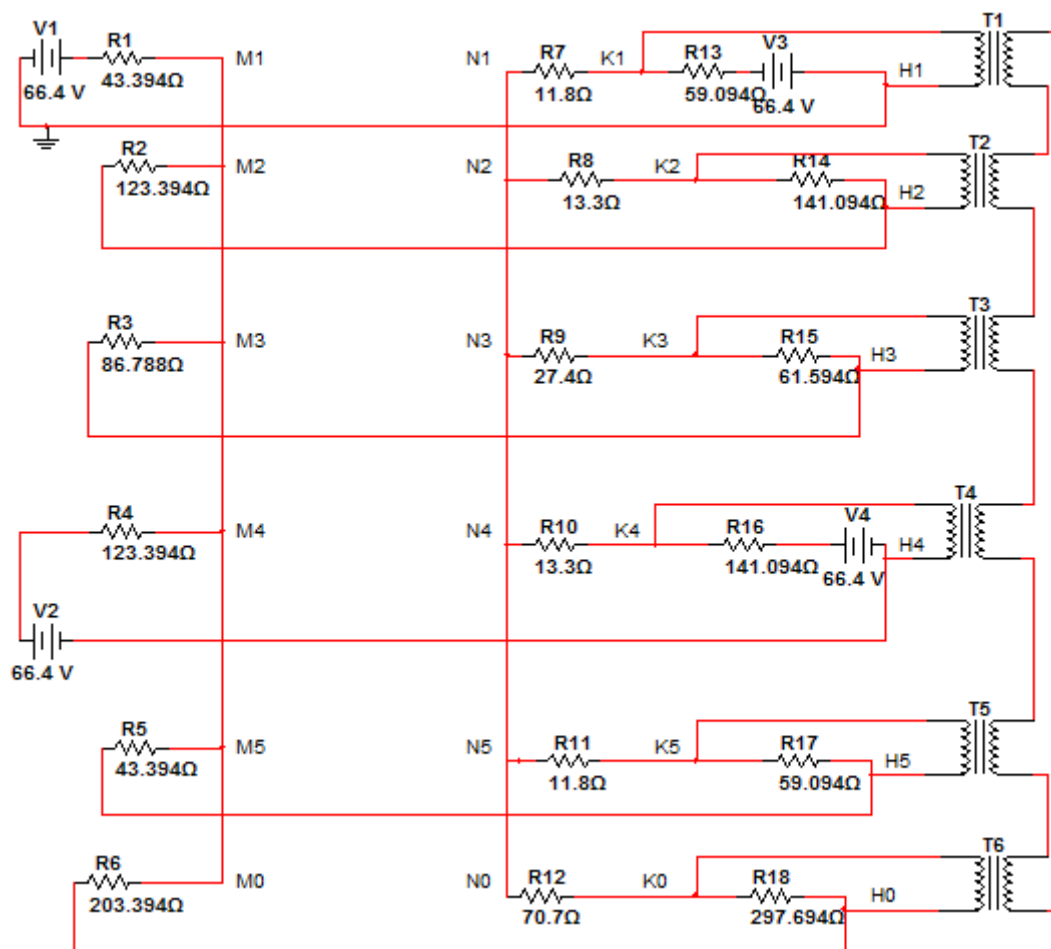


Рис. 3.14. Комплексная схема замещения обрыва фазы с одновременным замыканием на землю в Multisim [Источник: разработан автором]

В месте однофазного короткого замыкания токи всех шести последовательностей равны между собой. Симметричные составляющие тока фазы со стороны системы N определяем по показаниям приборов комплексной схемы замещения:

$$\dot{I}_{A1L} = -0,719 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A2L} = 0,195 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A3L} = 0,234 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A4L} = -0,290 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A5L} = 0,434 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A0L} = 0,037 \text{ кА}.$$

Полные токи отдельных последовательностей в местах короткого замыкания и обрыва определяются суммированием токов короткого замыкания в полнофазном и в дополнительном режимах. Полные токи фаз A', B', C' в линии со стороны системы M определены по известным токам отдельных последовательностей. Результаты расчётов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Результаты расчётов фазных токов при обрыве одной из фаз с одновременным коротким замыканием её на землю

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 0,1,2 составляющих	0	$0,748 e^{-j117}$	$1,27e^{j72}$	$0,096 e^{j180}$	$0,686 e^{j117}$	$1,56 e^{j72}$
Метод 0,1,2,3,4,5 составляющих	0	$0,8 e^{-j117}$	$1,2e^{j72}$	$0,09 e^{j180}$	$0,648 e^{j117}$	$1,492 e^{j72}$

Сопоставление результатов расчёта, полученных известным методом трёх симметричных составляющих и разработанным методом шести симметричных составляющих, подтверждает, что максимальное различие результатов составляет около 7%. Данный факт свидетельствует о достоверности и правильности разработанного метода шести симметричных составляющих.

3.3 Расчет обрыва фазы А на обычной двухцепной ЛЭП методом разложения на три и шесть симметричных составляющих

Рассмотрим пример, приведённый в литературе [97] (пример 7-1, стр.389).

Необходимо определить токи обеих цепей линии электропередачи длиной $l=145$ км, для случая, когда произошло отключение одной фазы выключателем В-1. Электрическая схема данной линии изображена на рисунке 3.15.

Комплексная схема замещения в координатах трёх симметричных составляющих для случая обрыва одной фазы представлена на рисунке 3.16.

Схема замещения ВЛ в координатах 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей и суммарные сопротивления соответствующих последовательностей относительно места обрыва представлены на рисунке 3.17. Напряжение на шинах 500 кВ узла системы, к которому подключена линия электропередачи, поддерживается практически неизменным. Из этого следует, что сопротивление всех последовательностей равно нулю:

$$X_{1c} = X_{2c} = X_{3c} = X_{4c} = X_{5c} = X_{0c} = 0.$$

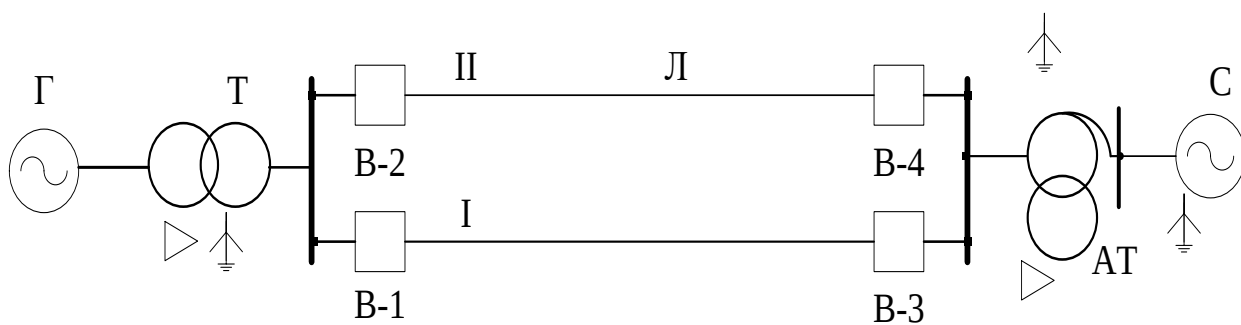


Рис. 3.15. Электрическая схема работы двухцепной ВЛ к примеру 7-1[97]

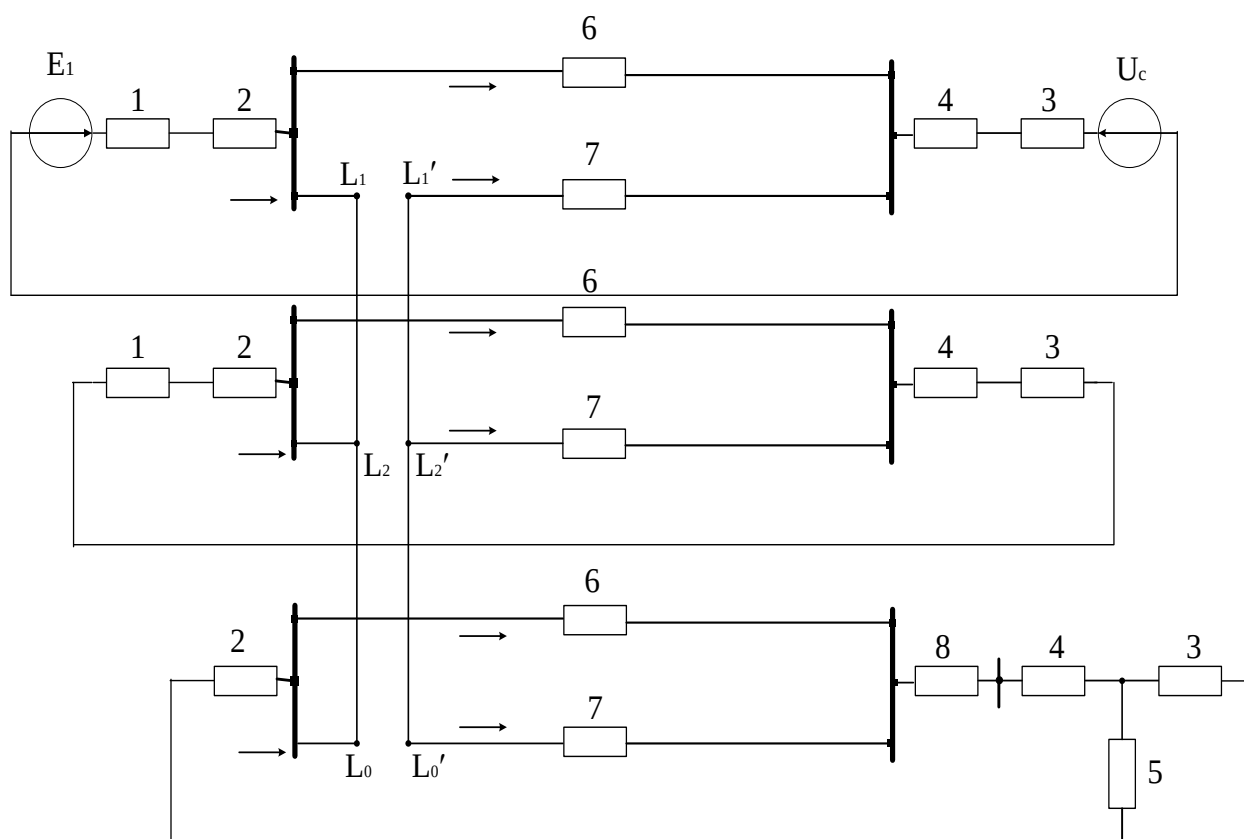


Рис. 3.16. Комплексная схема замещения в координатах 0, 1 и 2 симметричных составляющих для случая обрыва одной фазы[97]

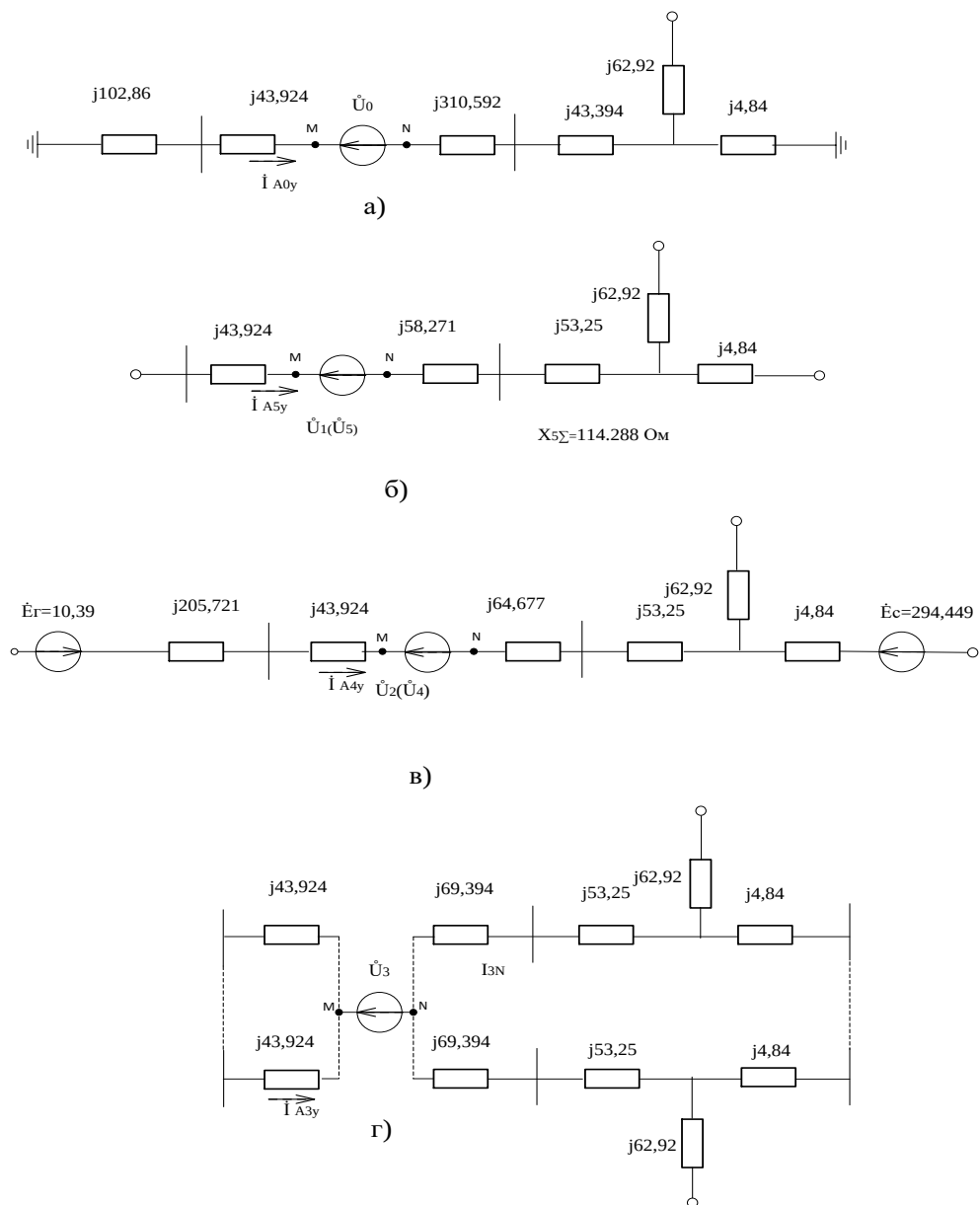


Рис. 3.17. Схемы замещения двухцепной ВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 [Источник: разработан автором]

Результаты расчёта токов обрыва взяты из [97], при этом относительные единицы приведены к именованным и результаты расчёта обрыва методом разложения на шесть симметричных составляющих (0,1,2,3,4,5) сведены в таблицу 3.2.

Согласно таблице 3.4, различие результатов расчёта, полученных методами трех и шести симметричных составляющих, не более 7%. Объясняется это тем, что расчёт продольной несимметрии на обычных двухцепных линиях электропередачи методом шести симметричных составляющих более точный, так как учитывает воздействие всех взаимоиנדукций между фазами в выражениях для сопротивлений соответствующих симметричных составляющих.

Таблица 3.4 Результаты расчёта к примеру 7-1[97]

Токи в фазах, о.е.	<i>I цепь</i>			<i>II цепь</i>		
	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$	$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$
<i>Расчёт методом 0,1,2 составляющих</i>	0	$0,212e^{-j113^\circ}$	$0,212e^{j113^\circ}$	0,31	$0,278e^{-j136}$	$0,278e^{j136}$
<i>Расчёт методом 0,1,2,3,4,5 составляющих</i>	0	$0,225e^{-j113}$	$0,225e^{j113}$	0,33	$0,286e^{-j136}$	$0,286e^{j136}$

При расчёте обрыва на обычной двухцепной ЛЭП методом трёх симметричных составляющих, как правило, междуцепная взаимоиנדукция учитывается лишь по схеме замещения нулевой последовательности. Необходимо отметить, что взаимоиנדукция по схеме замещения прямой и обратной последовательности не учитывается, так как она незначительна из-за больших междуцепных расстояний. Погрешность расчёта при этом находится в допустимых пределах.

3.4 Расчет обрыва одной из фаз УСВЛ при угле сдвига векторов напряжений сближенных фаз $\theta=120^\circ$ с одновременным коротким замыканием её на землю

Рассмотрим сложный вид повреждения на УСВЛ - однофазное к.з. фазы *A* с одновременным её обрывом, при этом установленный угол сдвига векторов напряжений сближенных фаз $\theta=120^\circ$. На рисунке 3.18 представлена принципиальная электрическая схема УСВЛ - 110 кВ, выполненная проводом АС-150, длиной 76 км, на которой произошёл обрыв провода фазы *A* с одновременным замыканием одного конца на землю. Расположение фаз цепей данной линии изображено на рисунке 3.19. При расчёте активные сопротивления элементов схемы не учитываются.

Схемы замещения для рассматриваемого случая представлены в координатах шести симметричных составляющих (0, 1, 2, 3, 4, 5) на рисунке 3.20.

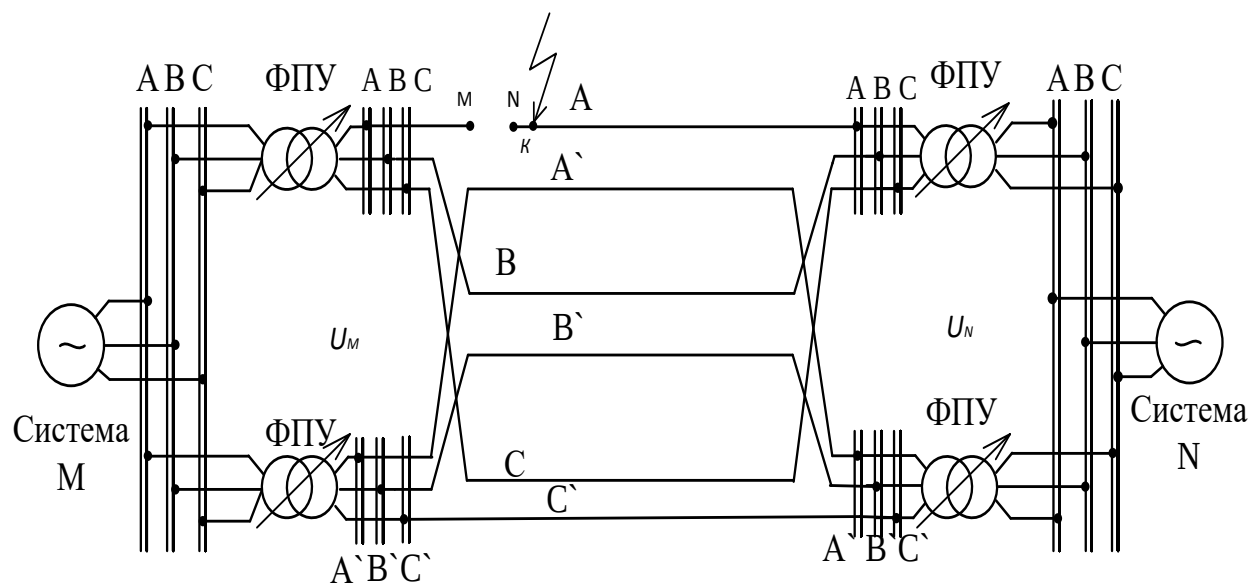


Рис. 3.18. Принципиальная электрическая схема УСВЛ-110 кВ [Источник: разработан автором]

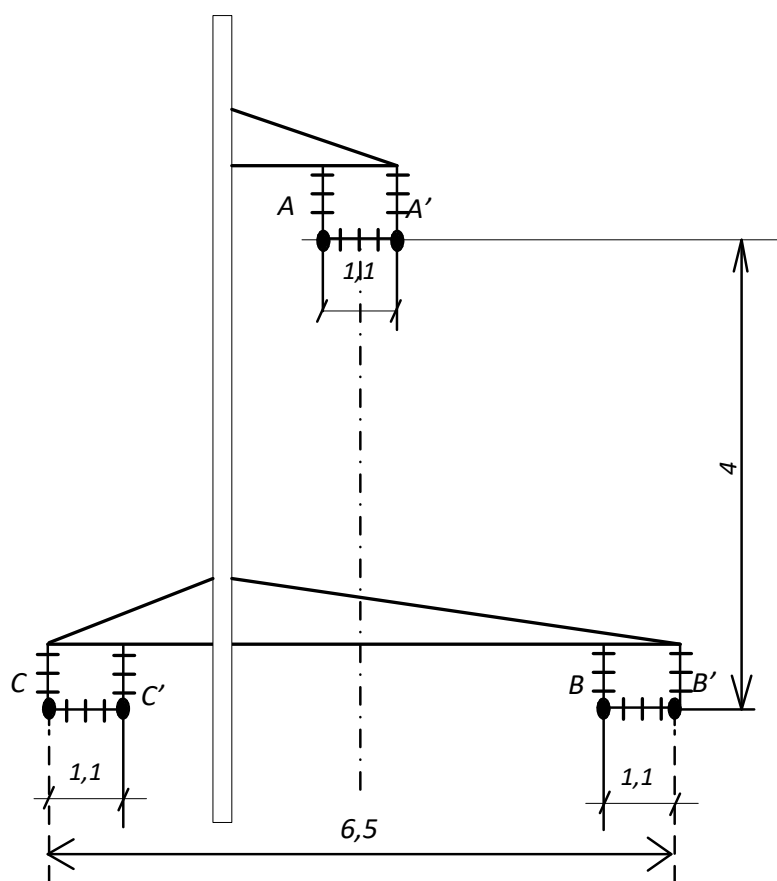


Рис. 3.19. Расположение фаз УСВЛ 110 кВ на одностоечной опоре. Расстояния даны в метрах. [Источник: разработан автором]

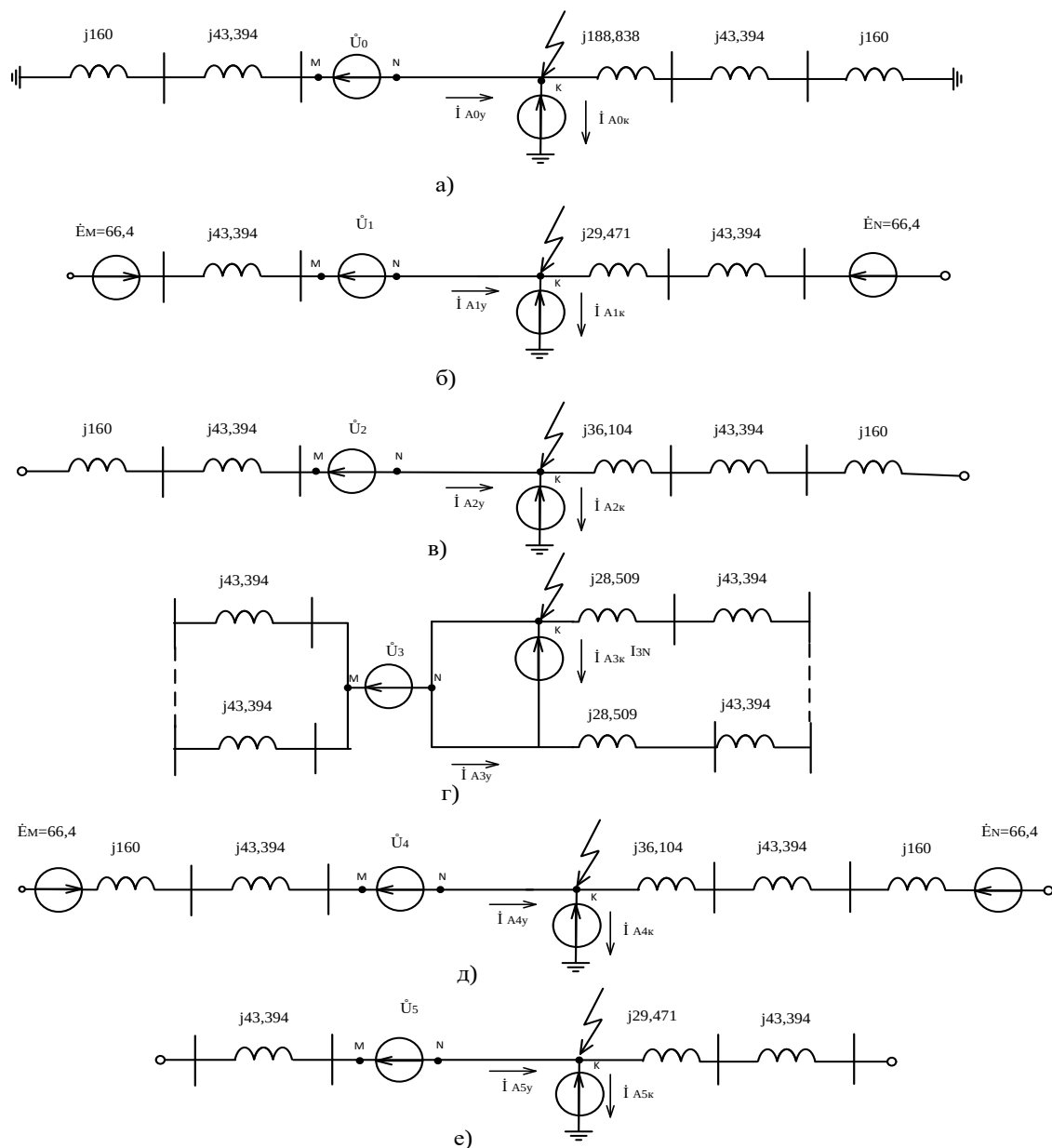


Рис. 3.20. Схемы замещения УСВЛ в координатах симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательности

а) нулевой последовательности; б) первой последовательности; в) второй последовательности; г) третьей последовательности; д) четвёртой последовательности; е) пятой последовательности [Источник: разработан автором]

На рисунке 3.21 представлена комплексная схема моделирования на компьютере данного вида повреждения в координатах шести симметричных составляющих в программе Multisim. На рисунке 3.21 с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентами трансформации 1/1 введены две промежуточные цепи. Первая промежуточная цепь обеспечивает равенство симметричных составляющих падений напряжения в месте обрыва и равенство нулю суммы симметричных составляющих токов

в оборванной фазе. Вторая промежуточная цепь обеспечивает равенство симметричных составляющих токов 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей в месте однофазного короткого замыкания и равенство нулю суммы симметричных составляющих напряжения в месте этого короткого замыкания. На рисунке 3.21 сопротивления соответствующих элементов данной УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих рассчитаны по приведённым ранее выражениям [40]. Сопротивления ФПУ в трёхфазных координатах АВС взяты, как и для аналогичного трёхфазного трансформатора с приведением их к координатам шести симметричных составляющих согласно[40].

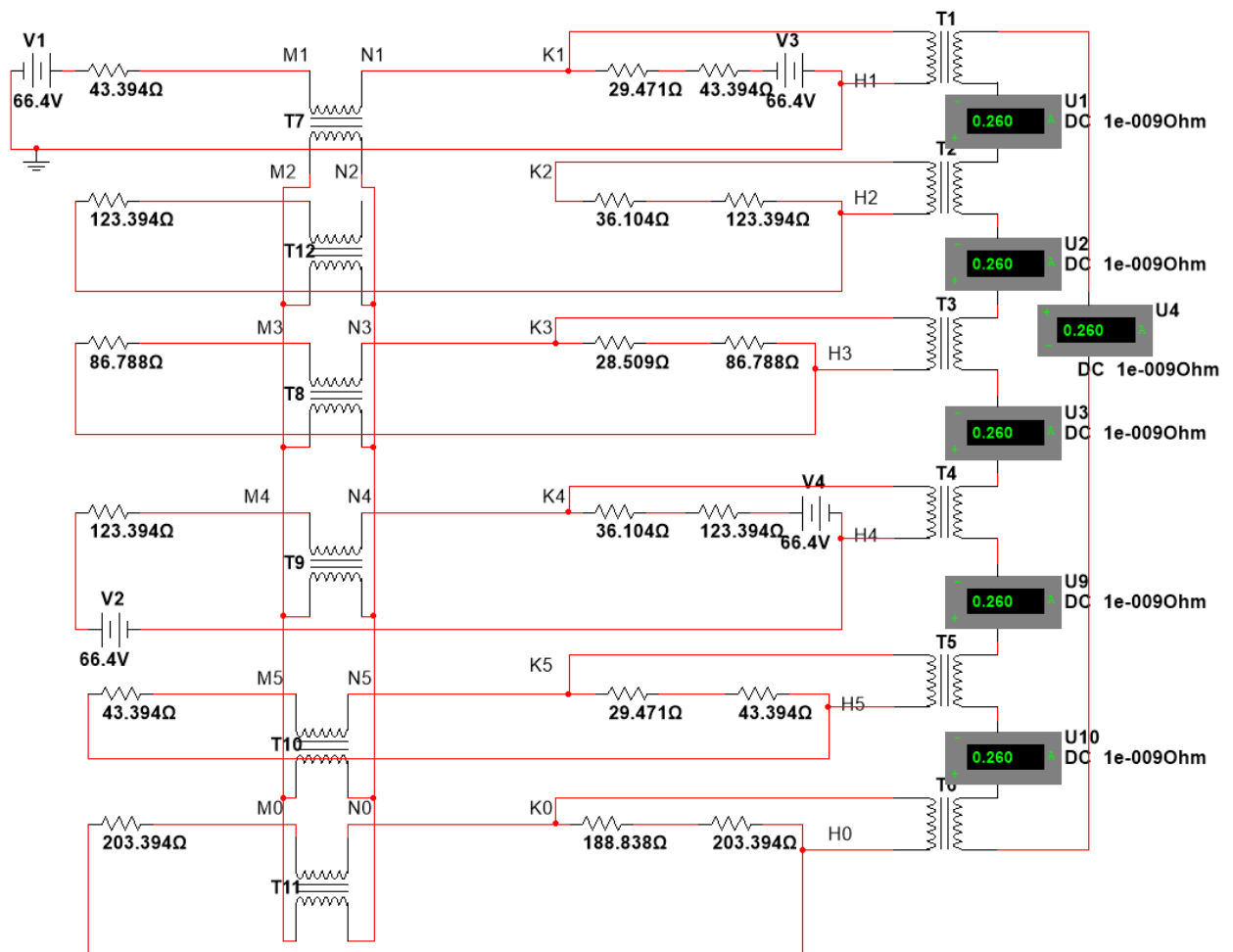


Рис. 3.21. Комплексная схема замещения УСВЛ с регулируемым углом $\theta=120^\circ$ при обрыве провода фазы А с одновременным замыканием одного конца на землю в Multisim [Источник: разработан автором]

Симметричные составляющие тока фазы со стороны системы N определены по показаниям приборов на комплексной схеме замещения. Полные токи фаз в линии со стороны системы N определены по известным токам отдельных последовательностей согласно (1.10) и сведены в таблицу 3.5. Аналогично рассчитаны токи УСВЛ при обрыве провода фазы А с одновременным замыканием одного конца на землю при $\theta=180^\circ$.

Векторные диаграммы токов при обрыве провода фазы A с одновременным замыканием одного конца на землю при $\theta=120^\circ$, $\theta=180^\circ$ приведены на рисунке 3.22 а.

Таблица 3.5. Результаты расчётов фазных токов УСВЛ при обрыве провода фазы A с одновременным замыканием одного конца на землю при $\theta=120^\circ$ и $\theta=180^\circ$

		$ \dot{I}_A $	$ \dot{I}_A' $	$ \dot{I}_B $	$ \dot{I}_B' $	$ \dot{I}_C $	$ \dot{I}_C' $
$\theta=120^\circ$	Со стороны системы N	2,5	0,818	0,709	0,694	0,709	0,694
	На промежуточных идеальных трансформаторах	2,057	0,987	2,054	0,987	2,054	0,987
$\theta=180^\circ$	Со стороны системы N	2,56	1,166	0,709	0,369	0,709	0,369
	На промежуточных идеальных трансформаторах	2,061	0,99	2,059	0,991	2,059	0,99

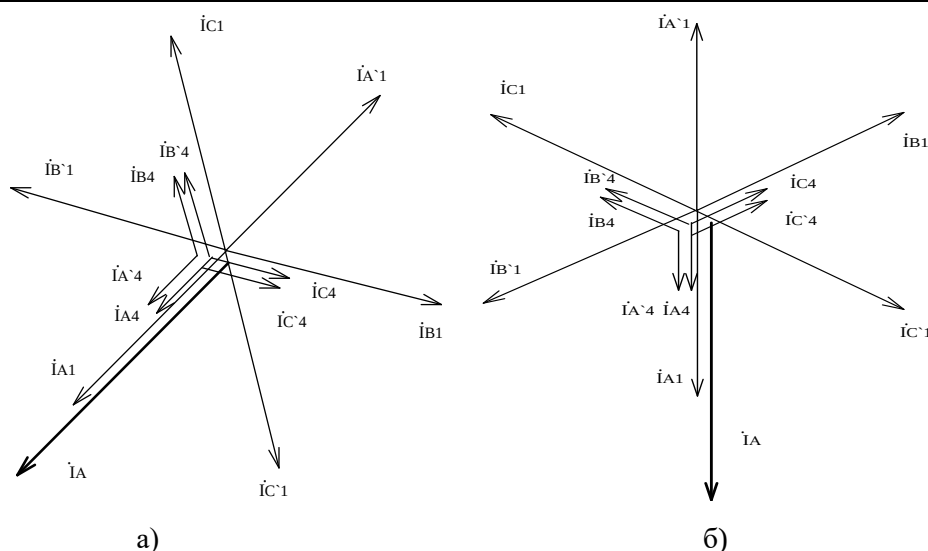


Рис. 3.22. Векторная диаграмма токов УСВЛ при обрыве провода фазы A с одновременным замыканием одного конца на землю: а) при $\theta=120^\circ$; б) при $\theta=180^\circ$ [Источник: разработан автором]

Согласно рисунку 3.22, токи на УСВЛ при обрыве провода фазы A с одновременным замыканием одного конца на землю зависят от угла θ сдвига между системами векторов фазных токов цепи, вследствие изменения эквивалентного сопротивления фаз линии, и имеют максимальные значения при $\theta=180$.

3.5 Алгоритм расчета и определения токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих

В соответствии с разработанной методикой составлена блок-схема расчёта токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих (рисунок 3.23).

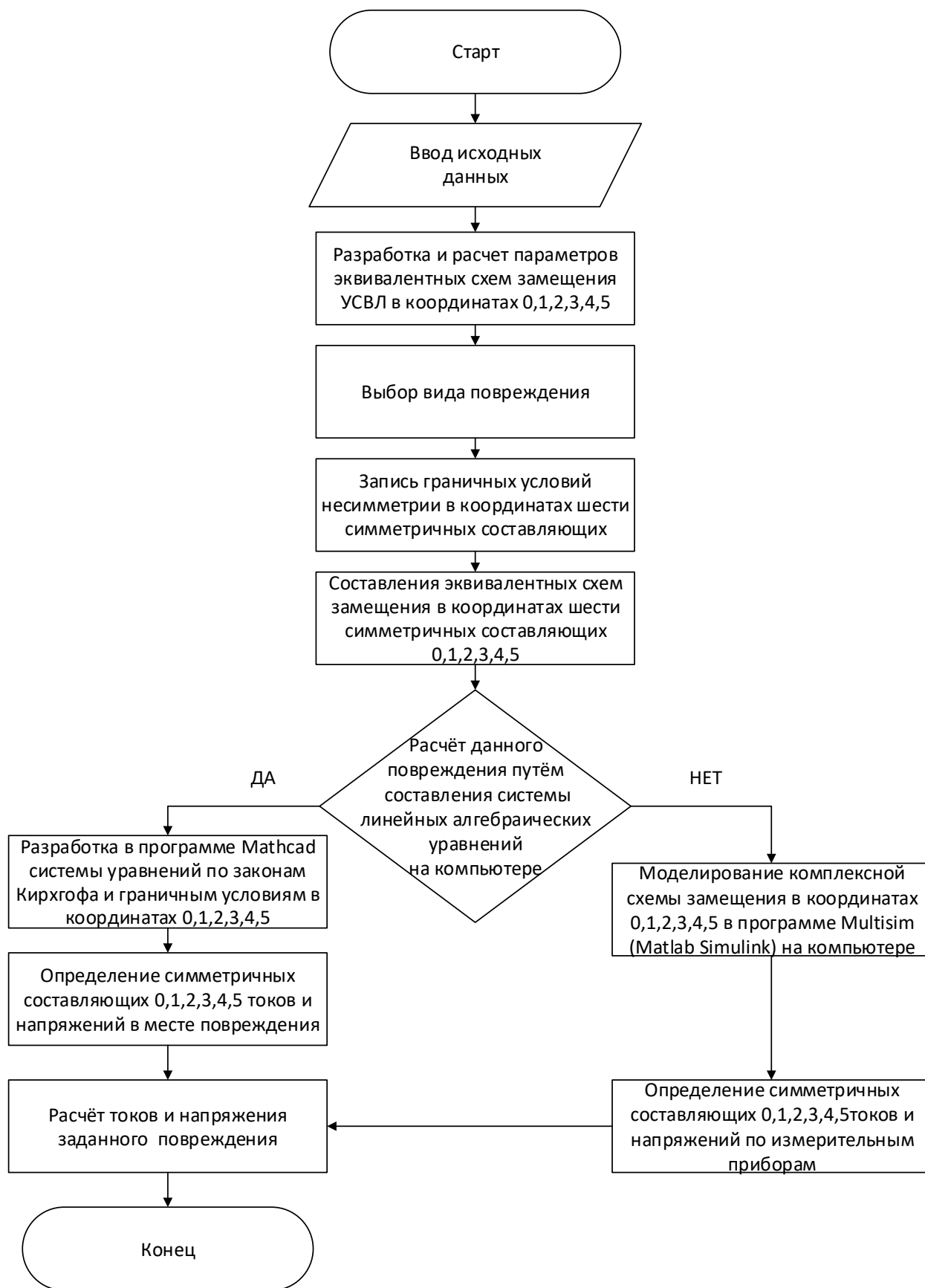


Рис. 3.23. Блок-схема расчёта токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих [Источник: разработан автором]

Согласно рисунку 3.23 и §2.3, алгоритм расчета токов и напряжений при различных видах повреждений на УСВЛ методом шести симметричных составляющих включает в себя следующие операции:

1. Вычисление по исходным данным удельных сопротивлений УСВЛ в координатах 0,1,2,3,4,5, §1.3

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) + j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} + 2(j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}}) + 2(j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}); \\
 Z_1 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}} + j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}; \\
 Z_2 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) + j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}; \\
 Z_3 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} + 2(j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}}) - 2(j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}); \\
 Z_4 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) + j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}; \\
 Z_5 &= R + j628 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D_3}{r_3} + L_{BH} \right) - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{сбл}} - j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{собр}} + j628 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_3}{d_{разн}}.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

2. Запись граничных условий в месте несимметрии в фазных координатах (2.1) и в координатах шести симметричных составляющих (2.2).

3. Составление эквивалентных схем замещения УСВЛ и СВЛ в координатах шести симметричных составляющих для продольной несимметрии (рис.1.9) и для поперечной несимметрии (рис.2.4).

4. Преобразование однофазных эквивалентных схем замещения УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих к простейшему виду. Составление для них уравнения по второму закону Кирхгофа.

5. Объединение уравнений, составленных по граничным условиям (пункт 2) и составленных по эквивалентным схемам замещения УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих (пункт 4) в одну общую систему уравнений. Решение этой системы уравнений в программе MathCad, нахождение соответствующих симметричных составляющих и фазных токов и напряжений при данном напряжении.

Для нахождения токов и напряжений при соответствующем повреждении методом моделирования на ПК необходимо осуществить моделирование эквивалентной комплексной схемы замещения в координатах шести симметричных составляющих (рис.2.7, 2.9) с помощью программ Multisim или Matlab Simulink. Далее необходимо определить, путем непосредственных измерений симметричные составляющие токов и

напряжений при данном повреждении, после чего вычислить соответствующие фазные токи и напряжения по выражению (1.11).

Выводы по третьей главе

1. Рассмотрен расчет сложных видов повреждений (обрыв фазы A , обрыв фазы A с одновременным коротким замыканием её на землю) на обычной двухцепной ЛЭП методом разложения на три симметричные составляющие 0, 1, 2 последовательностей и методом разложения на шесть симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей. Погрешность результатов расчета составила не более 7 %. Данный факт подтверждает достоверность и приемлемость использования метода шести симметричных составляющих для расчёта несимметричных и сложных видов повреждений на двухцепных (шестифазных) ЛЭП, в том числе на СВЛ и УСВЛ.

2. Моделирование вышеперечисленных сложных видов повреждений на двухцепной ЛЭП с использованием комплексных схем замещения в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей на компьютере с применением стандартных пакетов прикладных программ Multisim и Matlab Simulink показало хорошее совпадение результатов с точностью 99%.

3. Методология, использованная для расчета сложных видов повреждений, таких как обрыв и к.з. с одновременным обрывом на УСВЛ, показала высокое совпадение результатов.

4. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная методика сложных видов несимметричных, в том числе сложных видов повреждений на шестифазных ЛЭП (двухцепных СВЛ и УСВЛ), правильна и достоверна.

4. РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРОВ ШЕСТИФАЗНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

4.1 Теоретические основы разработки фильтров шестифазных симметричных составляющих

Анализ функционирования устройств релейной защиты на управляемых двухцепных линиях электропередачи повышенной пропускной способности показал, что известные устройства релейной защиты с учетом некоторых особенностей работы и выбора уставок срабатывания могут защитить УСВЛ от всех видов коротких замыканий и обрывов[145]. Однако с точки зрения максимального сохранения электроснабжения потребителей, "живучести" УСВЛ, повышения эффективности и чувствительности релейной защиты и выборочного отключения той или иной поврежденной фазы или нескольких фаз цепей в зависимости от вида к.з. или обрыва, наиболее целесообразно иметь релейную защиту, реагирующую на появление тех или иных шестифазных симметричных составляющих. Рассматривая СВЛ и УСВЛ как шестифазную линию, создание релейной защиты, реагирующей на шестифазные симметричные составляющие, упрощает распознавание вида обрыва и к.з., упрощает отстройку защиты и повышает ее чувствительность, так как тем или иным видам повреждения соответствует появление определенных шестифазных симметричных составляющих [111,137,147,153,155].

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 [25,48,51,109,130].

В данной главе рассмотрены теоретические основы создания фильтров тока и напряжений шестифазных симметричных составляющих с однофазным выходом, представленные в общем виде на рисунке 4.1.

Допустим, 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, симметричные составляющие которых отнесенные к фазе А, обозначим через $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$.

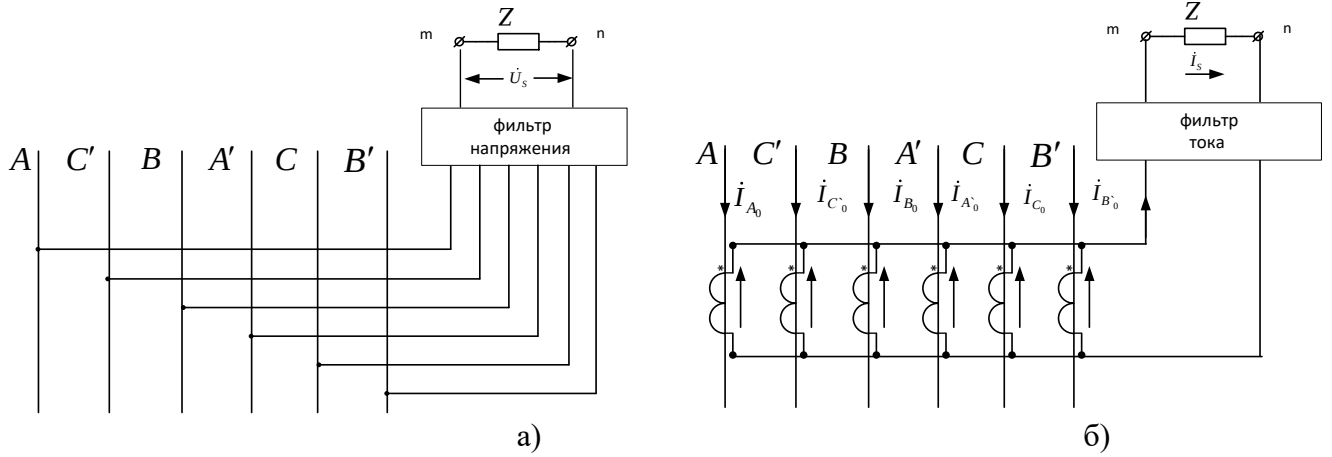


Рис. 4.1. Фильтры симметричных составляющих с однофазным выходом: а) напряжений; б) токов [42]

Элементы, из которых состоит фильтр, являются линейной функцией от $\dot{I}_A, \dot{I}_{C'}, \dot{I}_B, \dot{I}_{A'}, \dot{I}_C, \dot{I}_{B'}$. Отсюда следует, что ток на выходе фильтра вычисляется следующим образом:

$$\dot{I}_p = \dot{n}_A \cdot \dot{I}_A + \dot{n}_{C'} \cdot \dot{I}_{C'} + \dot{n}_B \cdot \dot{I}_B + \dot{n}_{A'} \cdot \dot{I}_{A'} + \dot{n}_C \cdot \dot{I}_C + \dot{n}_{B'} \cdot \dot{I}_{B'} \quad (4.1)$$

где 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 их симметричными составляющими можно описать формулой:

$$\dot{I}_p = \dot{k}_0 \dot{I}_0 + \dot{k}_1 \dot{I}_1 + \dot{k}_2 \dot{I}_2 + \dot{k}_3 \dot{I}_3 + \dot{k}_4 \dot{I}_4 + \dot{k}_5 \dot{I}_5, \quad (4.2)$$

где коэффициенты фильтра представлены комплексными или действительными значениями в соответствии с матрицей S_6 (1.11) перехода от фазных координат к симметричным составляющим:

$$\begin{aligned} \dot{k}_0 &= n_A + n_{C'} + n_B + n_{A'} + n_C + n_{B'}; \\ \dot{k}_1 &= n_A + n_{C'} e^{j300^\circ} + n_B e^{j240^\circ} + n_{A'} e^{j180^\circ} + n_C e^{j120^\circ} + n_{B'} e^{j60^\circ}; \\ \dot{k}_2 &= n_A + n_{C'} e^{j240^\circ} + n_B e^{j120^\circ} + n_{A'} + n_C e^{j240^\circ} + n_{B'} e^{j120^\circ}; \\ \dot{k}_3 &= n_A + n_{C'} e^{j180^\circ} + n_B + n_{A'} e^{j180^\circ} + n_C + n_{B'} e^{j180^\circ}; \\ \dot{k}_4 &= n_A + n_{C'} e^{j120^\circ} + n_B e^{j240^\circ} + n_{A'} + n_C e^{j120^\circ} + n_{B'} e^{j240^\circ}; \\ \dot{k}_5 &= n_A + n_{C'} e^{j60^\circ} + n_B e^{j120^\circ} + n_{A'} e^{j180^\circ} + n_C e^{j240^\circ} + n_{B'} e^{j300^\circ}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Формула (4.3) в матричном виде будет:

$$\begin{pmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Обратным преобразованием матрицы (4.4) можно получить выражения для коэффициентов $\dot{n}$ через коэффициенты $\dot{k}$:

$$\begin{pmatrix} \dot{n}_A \\ \dot{n}_{C'} \\ \dot{n}_B \\ \dot{n}_{A'} \\ \dot{n}_C \\ \dot{n}_{B'} \end{pmatrix} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60} & e^{j120} & e^{j180} & e^{j240} & e^{j300} \\ 1 & e^{j120} & e^{j240} & 1 & e^{j120} & e^{j240} \\ 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} & 1 & e^{j180} \\ 1 & e^{j240} & e^{j120} & 1 & e^{j240} & e^{j120} \\ 1 & e^{j300} & e^{j240} & e^{j180} & e^{j120} & e^{j60} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{k}_0 \\ \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \\ \dot{k}_5 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

На основании выражений (4.4) и (4.5) сформирована таблица аргументов комплексных коэффициентов $\dot{n}_A, \dot{n}_{C'}, \dot{n}_B, \dot{n}_{A'}, \dot{n}_C, \dot{n}_{B'}, \dot{n}_{AB}, \dot{n}_{BC}, \dot{n}_{A'B'}, \dot{n}_{B'C'}$ в зависимости от аргумента комплексного коэффициента фильтра k .

Таблица 4.1. Аргументы комплексных коэффициентов

k	$\dot{n}_A$	$\dot{n}_{C'}$	$\dot{n}_B$	$\dot{n}_{A'}$	$\dot{n}_C$	$\dot{n}_{B'}$	$\dot{n}_{AB}$	$\dot{n}_{BC}$	$\dot{n}_{A'B'}$	$\dot{n}_{B'C'}$
0°	0°	120°	-120°	0°	120°	-120°	0°	-60°	0°	-60°
30°	30°	150°	-90°	30°	150°	-90°	30°	-30°	30°	-30°
60°	60°	180°	-60°	60°	180°	-60°	60°	0°	60°	0°
90°	90°	-150°	-30°	90°	-150°	-30°	90°	30°	90°	30°
120°	120°	-120°	0°	120°	-120°	0°	120°	60°	120°	60°

Для реализации фильтров симметричных составляющих, согласно таблице 4.1, 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.

Аналогичный подход может быть использован и для создания фильтров напряжения. При этом для фильтров напряжения удобнее использовать выделения симметричных составляющих не из фазных величин, а из линейных напряжений. Ниже

рассмотрены основные выражения, составляющие основу для создания фильтра второй последовательности $\dot{U}_2$, к выходным зажимам которого подведены линейные напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{A'B'}, \dot{U}_{B'C'}$ при фиксированном угле регулирования θ .

Формула получения напряжения второй последовательности, согласно (1.12), имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + a\dot{U}_{C'} + a^2\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C + a^2\dot{U}_{B'}) = \frac{1}{6}(\dot{U}_A + a\dot{U}_{C'} + (-1-a)\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C + (-1-a)\dot{U}_{B'}) = \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + a\dot{U}_{C'} - \dot{U}_B - a\dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + a\dot{U}_C - \dot{U}_{B'} - a\dot{U}_{B'}) = \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} - a\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{A'B'} - a\dot{U}_{B'C'}) = \\ &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{-j60^\circ})\end{aligned}\quad (4.6)$$

Таким образом, задача построения фильтра напряжения второй последовательности сводится к использованию четырёх напряжений (вместо шести фазных), которые должны быть повёрнуты на соответствующие углы, а затем геометрически сложены. Это значительно упрощает реализацию фильтров симметричных составляющих.

Аналогичными преобразованиями из линейных напряжений можно получить фильтры 1, 2, 4 и 5 составляющих:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j60^\circ} - \dot{U}_{A'B'} - \dot{U}_{B'C'}e^{-j60^\circ}); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{j60^\circ}); \\ \dot{U}_4 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{A'B'} + \dot{U}_{B'C'}e^{-j60^\circ}); \\ \dot{U}_5 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC}e^{j60^\circ} - \dot{U}_{A'B'} - \dot{U}_{B'C'}e^{j60^\circ}).\end{aligned}\quad (4.7)$$

Нулевую и третью составляющие удобно выделить из фазных напряжений по формулам:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{6}(\dot{U}_A + \dot{U}_{C'} + \dot{U}_B + \dot{U}_{A'} + \dot{U}_C + \dot{U}_{B'}) \quad \dot{U}_3 = \frac{1}{6}(\dot{U}_A - \dot{U}_{C'} + \dot{U}_B - \dot{U}_{A'} + \dot{U}_C - \dot{U}_{B'}) \quad (4.8)$$

Фильтры (выражения 4.7, 4.8) получены при фиксированном угле регулирования θ . При изменяемом угле θ выражения (4.7) и (4.8) примут вид:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_0 &= \frac{1}{6}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C + \dot{U}_{A'} + \dot{U}_{B'} + \dot{U}_{C'}); \\
\dot{U}_1 &= \frac{1}{6}[\dot{U}_{AB}e^{j30^\circ} + \dot{U}_{BC}e^{-j30^\circ} + (\dot{U}_{A'B'}e^{j30^\circ} + \dot{U}_{B'C'}e^{-j30^\circ})e^{j(180^\circ - \theta^\circ)}]; \\
\dot{U}_2 &= \frac{1}{6}[\dot{U}_{AB}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{BC}e^{j30^\circ} + (\dot{U}_{A'B'}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{B'C'}e^{j30^\circ})e^{j(180^\circ - \theta^\circ)}]; \\
\dot{U}_3 &= \frac{1}{6}[\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - (\dot{U}_{A'} + \dot{U}_{B'} + \dot{U}_{C'})]; \\
\dot{U}_4 &= \frac{1}{6}[\dot{U}_{AB}e^{j30^\circ} + \dot{U}_{BC}e^{-j30^\circ} + (\dot{U}_{A'B'}e^{j30^\circ} + \dot{U}_{B'C'}e^{-j30^\circ})e^{j(180^\circ - \theta^\circ)}]; \\
\dot{U}_5 &= \frac{1}{6}[\dot{U}_{AB}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{BC}e^{j30^\circ} + (\dot{U}_{A'B'}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{B'C'}e^{j30^\circ})e^{j(180^\circ - \theta^\circ)}].
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Из выражения (4.9) видно, что ориентация векторов напряжений нулевой и третьей последовательностей не зависит от угла θ сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей, и поэтому угол θ не входит в уравнения для этих последовательностей. Фильтр определённой последовательности можно получить, приравняв нулю коэффициенты $\dot{k}$ других последовательностей. В том случае, когда несколько коэффициентов k не равны нулю, фильтр получается комбинированным фильтром данных последовательностей.

Выражения для коэффициентов комбинированных фильтров тока (напряжения) можно получить, используя величины $\dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3, \dot{k}_4$ и $\dot{k}_5$ согласно выражению (4.5). Схема комбинированного фильтра зависит от того, каким путем достигаются фазовые и амплитудные изменения, определяемые коэффициентами n . При этом коэффициенты могут быть как действительные, так и мнимые. На практике находят применение комбинированные фильтры токов, имеющие на выходе напряжения, определяемые заданной комбинацией симметричных составляющих токов. Пусть коэффициенты $\dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3, \dot{k}_4$ и $\dot{k}_5$ являются действительными и имеют размерность сопротивления, то есть $\dot{k}_0 = k_0, \dot{k}_1 = k_1, \dot{k}_2 = k_2, \dot{k}_3 = k_3, \dot{k}_4 = k_4$ и $\dot{k}_5 = k_5$. На основании выражения (4.5), коэффициенты n_A и $n_{A'}$ являются также действительными, а коэффициенты $n_B, n_{B'}$ и $n_C, n_{C'}$ - комплексно сопряженными.

Принимая:

$$\begin{aligned}
e^{j60^\circ} &= 0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}; e^{j120^\circ} = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\
e^{j180^\circ} &= -1; e^{j240^\circ} = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\
e^{j300^\circ} &= 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}.
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Получим:

$$\begin{aligned}
\dot{n}_A &= \frac{1}{6} [k_0 + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5]; \\
\dot{\eta}_{C'} &= \frac{1}{6} \left[k_0 - k_3 + \frac{k_1 + k_5}{2} - \frac{k_2 + k_4}{2} - j(k_1 - k_5) \frac{\sqrt{3}}{2} + j(k_2 - k_4) \frac{\sqrt{3}}{2} \right]; \\
\dot{n}_B &= \frac{1}{6} \left[k_0 + \frac{k_1 + k_5}{2} - \frac{k_2 + k_4}{2} - j(k_1 - k_5) \frac{\sqrt{3}}{2} + j(k_2 - k_4) \frac{\sqrt{3}}{2} - k_3 \right]; \\
\dot{n}_{A'} &= \frac{1}{6} [k_0 - k_1 + k_2 - k_3 + k_4 - k_5]; \\
\dot{n}_C &= \frac{1}{6} \left[k_0 + k_3 - \frac{k_1 + k_5}{2} - \frac{k_2 + k_4}{2} - j(k_1 - k_5) \frac{\sqrt{3}}{2} - j(k_2 - k_4) \frac{\sqrt{3}}{2} \right]; \\
\dot{n}_{B'} &= \frac{1}{6} \left[k_0 + k_3 - \frac{k_1 + k_5}{2} - \frac{k_2 + k_4}{2} + j(k_1 - k_5) \frac{\sqrt{3}}{2} - j(k_2 - k_4) \frac{\sqrt{3}}{2} \right].
\end{aligned} \tag{4.11}$$

На основании выражения (4.11) можно создать комбинированные фильтры с действительными коэффициентами $\dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3, \dot{k}_4$ и $\dot{k}_5$. При этом $\frac{k_1 - k_5}{4\sqrt{3}}; \frac{k_2 - k_4}{4\sqrt{3}}$ - величины сопротивления взаимоиндукции, а $\frac{k_1 + k_5}{12}; \frac{k_2 + k_4}{12}$ представляют собой активные сопротивления.

4.2 Разработка фильтров симметричных составляющих 1, 2, 4, 5 последовательностей

Разработка фильтров токов симметричных составляющих 1, 2, 4, 5 последовательностей рассмотрена на примере несимметричных к.з между фазами A и C' УСВЛ.

Согласно исследованиям, при несимметричных к.з. между сближенными фазами A и C' СВЛ и УСВЛ «возникают» только симметричные составляющие токов (напряжений) 1, 2, 4, 5 последовательностей [136]. Симметричные составляющие 0, 3

последовательности отсутствуют. На рисунке 4.2 представлена принципиальная схема фильтра выделения при к.з. между сближенными фазами A и C' токов 1, 2, 4 и 5 последовательностей.

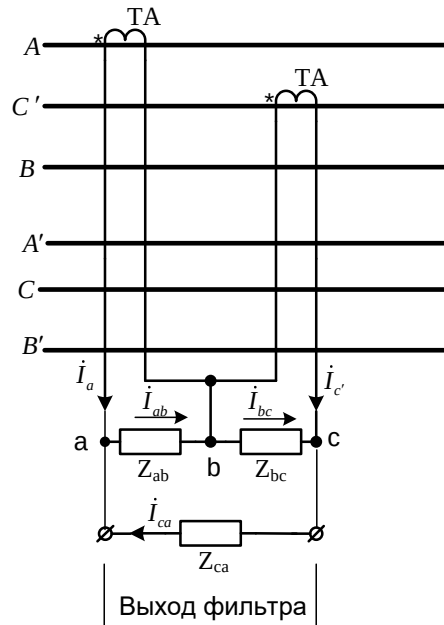


Рис.4.2. Фильтр токов (напряжений) симметричных составляющих 1, 2, 4 и 5 последовательностей [42]

Уравнения I и II законов Кирхгофа, записанные для вторичных цепей фильтра, имеют вид:

$$\begin{aligned} z_{ab}\dot{I}_{ab} + z_{bc}\dot{I}_{bc} + z_{ca}\dot{I}_{ca} &= 0; \\ \dot{I}_{ab} &= \dot{I}_a + \dot{I}_{ca}; \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_b. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Согласно выражению 4.12 ток на выходе фильтра $\dot{I}_{ca}$:

$$\dot{I}_{ca} = \frac{Z_{ab}\dot{I}_a - Z_{bc}\dot{I}_{c'}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad (4.13)$$

Токи на входе фильтра $I_a, I_{c'}$, выраженные через симметричные составляющие 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей:

$$\dot{I}_a = \frac{(\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_4 + \dot{I}_5)}{n_{ТА}}; \quad (4.14)$$

$$\dot{I}_{C'} = \frac{(\dot{I}_1 e^{-j360^\circ} + \dot{I}_2 e^{-j240^\circ} + \dot{I}_4 e^{j120^\circ} + \dot{I}_5 e^{j60^\circ})}{n_{ТТС'}} \quad (4.15)$$

где: $n_{ТА} = n_{Те'}$ - коэффициенты трансформации трансформаторов тока фаз A и C' .

Подставляя полученные выражения для токов $\dot{I}_a$ и $\dot{I}_c$, через их симметричные составляющие в выражение (4.13), получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ca} = & \frac{(Z_{ab} - Z_{bc}e^{j300^\circ})}{n_{TT}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca})} \dot{I}_1 + \frac{(Z_{ab} - Z_{bc})e^{j240^\circ}}{n_{TT}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca})} \dot{I}_2 + \\ & + \frac{(Z_{ab} - Z_{bc}e^{j120^\circ})}{n_{TT}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca})} \dot{I}_4 + \frac{(Z_{ab} - Z_{bc}e^{j60^\circ})}{n_{TT}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca})} \dot{I}_5 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Из выражения (4.16) можно получить на выходе фильтра ток $\dot{I}_{ca}$, пропорциональный соответствующим симметричным составляющим:

$$\dot{I}_{ca} = \dot{I}_{\text{вых}} = \dot{k}_1 \dot{I}_1 + \dot{k}_2 \dot{I}_2 + \dot{k}_3 \dot{I}_3 + \dot{k}_4 \dot{I}_4, \quad (4.17)$$

Коэффициенты $\mathbf{k}$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{k}_1 = & \frac{Z_{ab} - Z_{bc}e^{j300^\circ}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}; \dot{k}_2 = \frac{Z_{ab} - Z_{bc}e^{j240^\circ}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}; \\ \dot{k}_4 = & \frac{Z_{ab} - Z_{bc}e^{j120^\circ}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}; \dot{k}_5 = \frac{Z_{ab} - Z_{bc}e^{j60^\circ}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Таким образом, получен комбинированный фильтр симметричных составляющих 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей.

Если необходимо получить на выходе ток $\dot{I}_{ca}$, пропорциональный только определенным последовательностям: $\dot{I}_{ca} = \dot{k}_1 \cdot \dot{I}_1$ или $\dot{I}_{ca} = \dot{k}_2 \cdot \dot{I}_2$, $\dot{I}_{ca} = \dot{k}_4 \cdot \dot{I}_4$ и $\dot{I}_{ca} = \dot{k}_5 \cdot \dot{I}_5$, то соответствующие коэффициенты при $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_4$ или $\dot{I}_5$ должны быть равны нулю. Например, для $\dot{I}_{ca} = \dot{k}_1 \cdot \dot{I}_1$ необходимо, чтобы $\dot{k}_2 = \dot{k}_4 = \dot{k}_5 = 0$, что соблюдается при $Z_{ab} = Z_{bc}e^{j240^\circ}$, $Z_{ab} = Z_{bc}e^{j120^\circ}$ и $Z_{ab} = Z_{bc}e^{j60^\circ}$.

Аналогично могут быть получены фильтры симметричных составляющих 1, 2, 4, 5 последовательностей, выделяющие соответствующие симметричные составляющие при других к.з. между сближенными фазами BA' и CB' .

Для создания комбинированного фильтра, выделяющего симметричные составляющие токов 1, 2, 4, 5 последовательностей при к.з. между любыми сближенными фазами $A-C'$, $B-A'$, $C-B'$, необходимо подключить к сближенным фазам соответствующие отдельные фильтры, реагирующие на к.з. между данными сближенными фазами. Структурно функциональная схема такого фильтра представлена на рисунке 4.3.

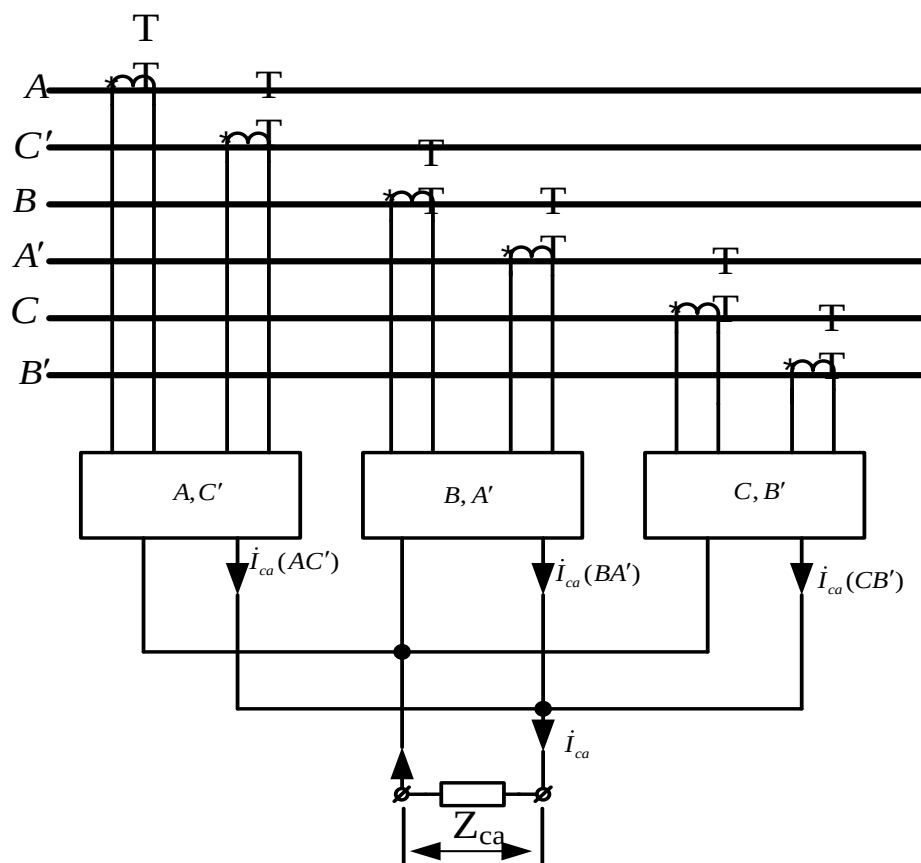


Рис. 4.3. Структурно функциональная схема фильтра 1, 2, 4, 5 последовательностей [42]

4.3 Разработка комбинированного фильтра шестифазных симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей

Комбинированный фильтр шестифазных симметричных составляющих можно рассмотреть как состоящий из шести подобных однофазных фильтров, к входным зажимам которых подводятся шесть токов (напряжений), а на выходе получают соответствующие системы шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей токов (напряжений). Пример данного фильтра приведен на рисунке 4.4.

Правое плечо одного фильтра одновременно является левым плечом другого фильтра, при этом соблюдается идентичность всех плеч (рисунок 4.5).

Аналогично потенциальным диаграммам трёхфазного фильтра (рисунок 4.6 [49]) получены потенциальные диаграммы шестифазного фильтра (рисунок 4.7). При подведении к фильтру 5-ой последовательности напряжений (токов), напряжение (ток) первой последовательности на выходе фильтра равно нулю, соответственно, потенциалы точек x, y, z и x', y', z' совпадают.

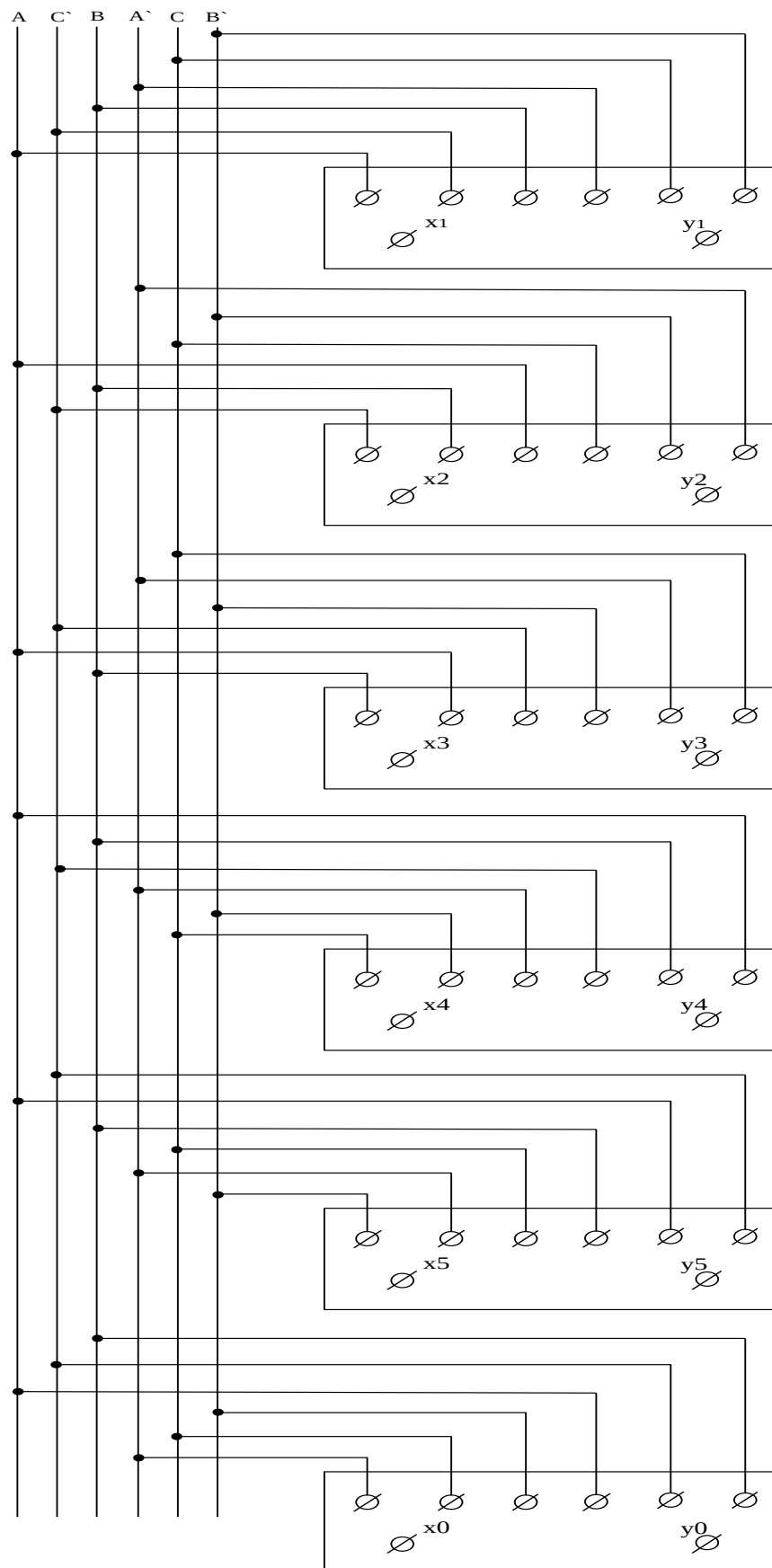


Рис. 4.4. Принципиальная схема шестифазного фильтра напряжения, составленного из шести однофазных фильтров [Источник: разработан автором]

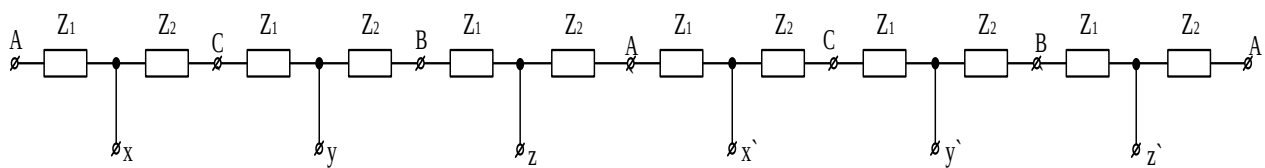
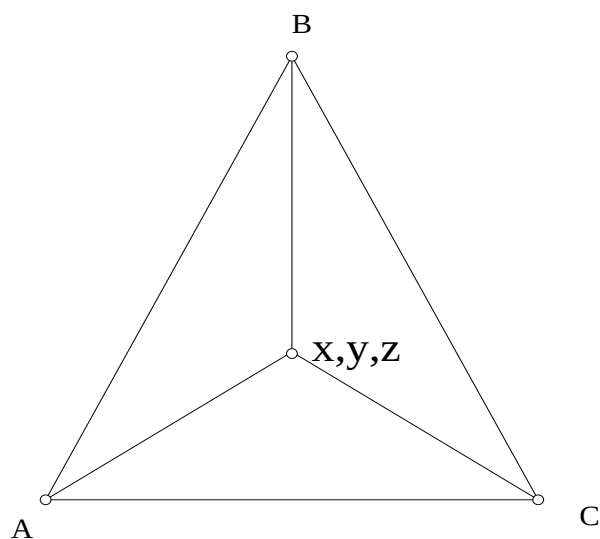
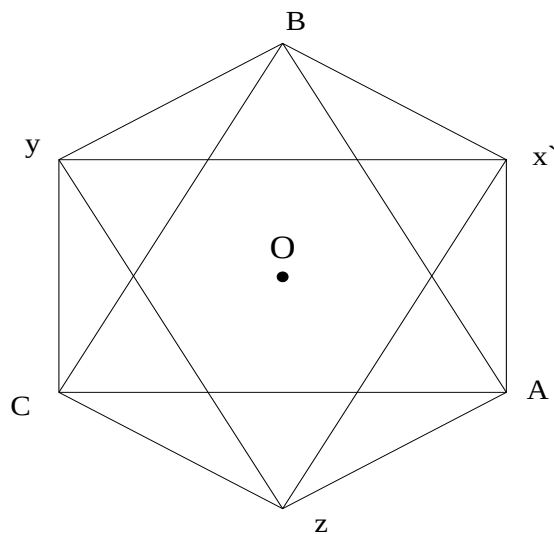


Рис. 4.5. Схема шестифазного фильтра напряжения с шестью плечами [Источник: разработан автором]

На потенциальной диаграмме (рисунок 4.7а) точки x, y, z, x', y', z' расположены в центре потенциального многоугольника A, C', B, A', C, B' . При подведении к этому же фильтру напряжения 5-й последовательности, точки B' и C' , B и C шестиугольника меняются местами, а сторона AA' занимает положение стороны AC' и вместе с ней перемещается потенциал треугольника $AA'x$. Если поступить аналогично с остальными сторонами шестиугольника, то потенциальная диаграмма примет вид (рисунок 4.7б).



а)



б)

Рис. 4.6. Потенциальные диаграммы трёхфазного фильтра напряжений:
 а) для приложенного напряжения прямой последовательности;
 б) для приложенного напряжения обратной последовательности [49]

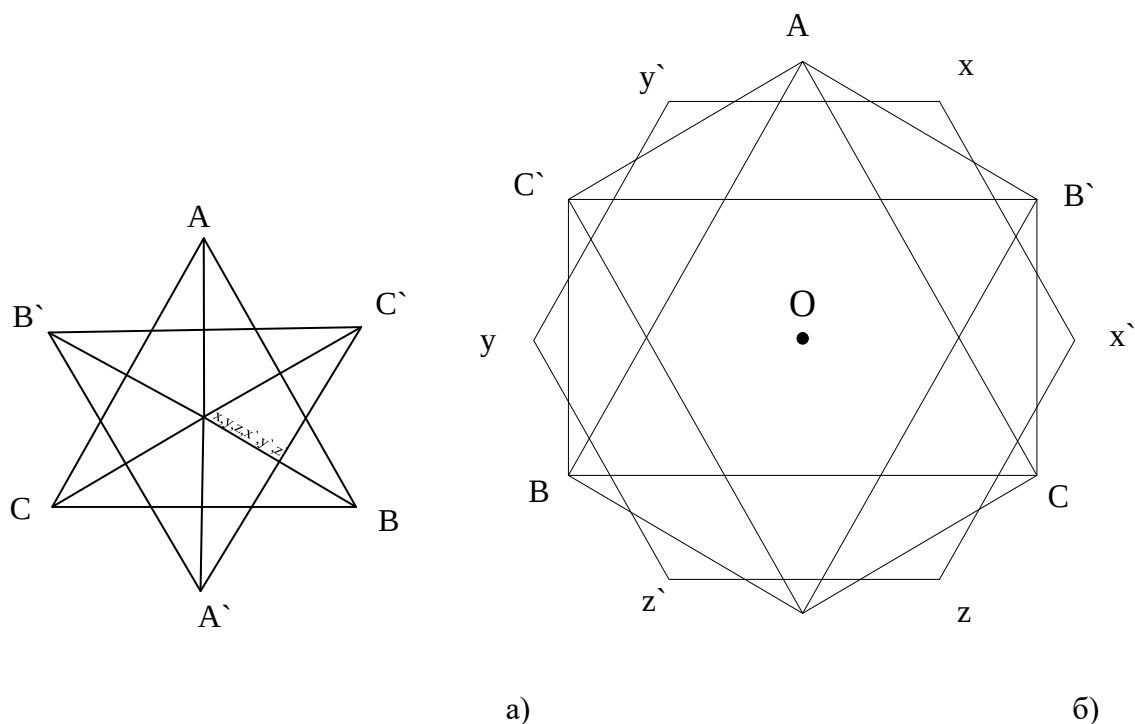


Рис. 4.7. Потенциальные диаграммы шестифазного фильтра напряжений:
а) для приложенного напряжения прямой последовательности;
б) для приложенного напряжения пятой последовательности [Источник: разработан автором]

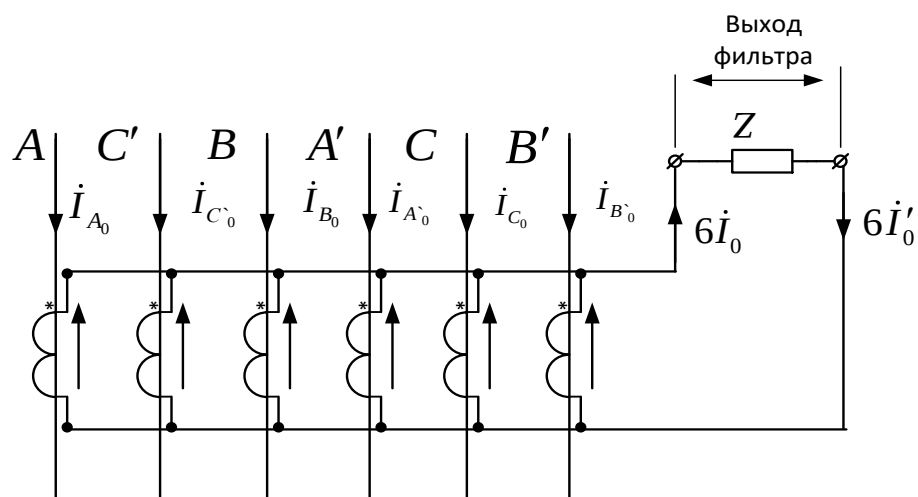
Шестифазные фильтры, созданные по изложенному принципу, могут служить источником симметричных напряжений (токов) при любых несимметричных к.з. на СВЛ и УСВЛ, при условии, что сопротивления нагрузки симметричны и существенно превышают внутреннее сопротивление самого фильтра.

4.4 Фильтры симметричных составляющих "0", "3" последовательностей

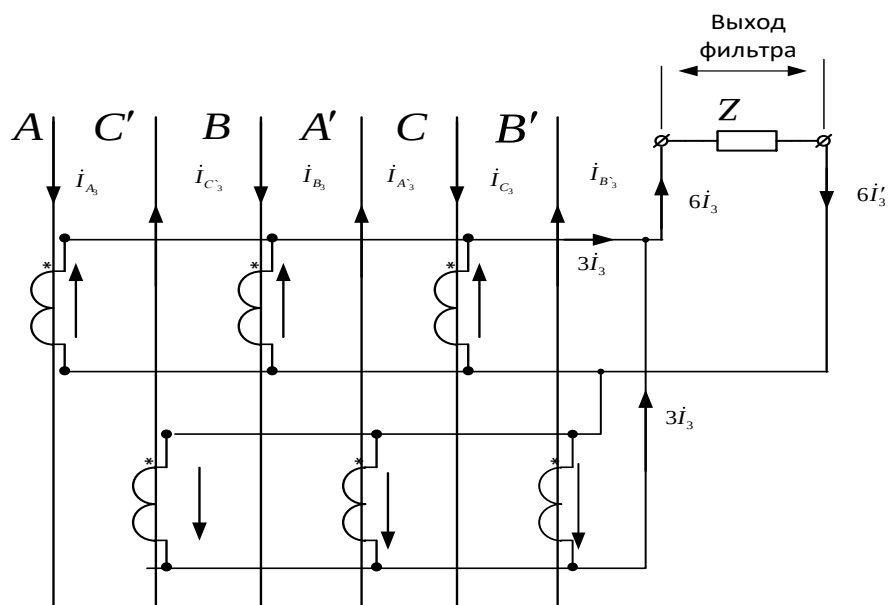
Симметричные составляющие 0 и 3 последовательностей напряжений (токов) могут быть получены с использованием более простых схем, чем для получения симметричных составляющих 1, 2, 4, 5 последовательностей.

Ориентация векторов напряжений (токов) нулевой и третьей последовательностей не зависит от угла θ сдвига между системами векторов фазных напряжений цепей. Поэтому угол θ не входит в уравнения для этих последовательностей.

На рисунке 4.8 представлены принципиальные схемы фильтров токов симметричных составляющих нулевой последовательности (а) и фильтр симметричных составляющих токов третьей последовательности (б).



а)



б)

Рис. 4.8. Фильтр симметричных составляющих токов нулевой последовательности (а) и фильтр симметричных составляющих токов третьей последовательности (б) [42]

Фильтр тока нулевой последовательности выполнен по принципу суммирования токов всех шести фаз. Данное суммирование возможно при помощи трансформаторов тока, путем соединения их вторичных обмоток параллельно (рисунок 4.8а). У фильтра тока третьей последовательности (рисунок 4.8б) трансформаторы тока соединены таким образом, чтобы вторичные токи трансформаторов тока третьей последовательности в трёх фазах одной цепи СВЛ и УСВЛ направлены в одну сторону, а вторичные токи трансформаторов тока второй цепи направлены в противоположном направлении.

При нормальном режиме во вторичных цепях трансформатора тока, через фильтр токов нулевой последовательности проходит симметричная система векторов

$\dot{I}_a, \dot{I}_c, \dot{I}_b, \dot{I}_a, \dot{I}_c, \dot{I}_b$, сумма которых равна нулю. Следовательно, ток нулевой последовательности на выходе фильтра $\dot{I}_0=0$. При несимметричных к.з., связанных с замыканием на землю, по первичным цепям УСВЛ «потечет» система шести векторов нулевой последовательности (рисунок 1.8а), поэтому на выходе фильтра появляется ток нулевой последовательности.

При нормальном режиме во вторичных цепях трансформатора тока, через фильтр токов третьей последовательности проходит симметричная система векторов $\dot{I}_a, \dot{I}_c, \dot{I}_b, \dot{I}_a, \dot{I}_c, \dot{I}_b$, сумма которых равна также нулю. Следовательно, ток третьей последовательности на выходе фильтра $\dot{I}_3=0$. При несимметричных к.з., связанных с замыканием на землю или между фазами разных цепей, в том числе между сближенными фазами, по первичным цепям УСВЛ «потечет» система шести векторов третьей последовательности, направленных в фазах ABC в одну сторону, а в фазах A'B'C' в противоположную сторону (рисунок 1.8г), поэтому на выходе фильтра появляется ток третьей последовательности.

4.5 Моделирование комбинированного фильтра шестифазных симметричных составляющих токов и напряжений 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей на компьютере с помощью программных комплексов Matlab Simulink

До настоящего времени проведенные исследования касались только физического исполнения фильтров, что вполне приемлемо для традиционных защит [39,119]. Для современных цифровых и микропроцессорных защит наиболее целесообразно математическое «выделение» данных симметричных составляющих при различных несимметричных к.з., включая сложные виды повреждения[107].

Выбор наиболее оптимального алгоритма программного исполнения фильтра шести симметричных составляющих сделан на основе использования компьютерного программного обеспечения Matlab Simulink. Для реализации данных фильтров на компьютере с использованием пакета программ Matlab Simulink [66,104,105] осуществлено решение уравнений (1.11), (1.12), описывающих получение фазных токов (напряжений) через симметричные составляющие и, наоборот, путём использования библиотеки SimPowerSystem пакета Matlab Simulink, являющейся библиотекой MathOperations. На рисунке 4.9 представлена имитационная модель фильтра шести симметричных составляющих, реализованная в пакете Matlab Simulink [134].

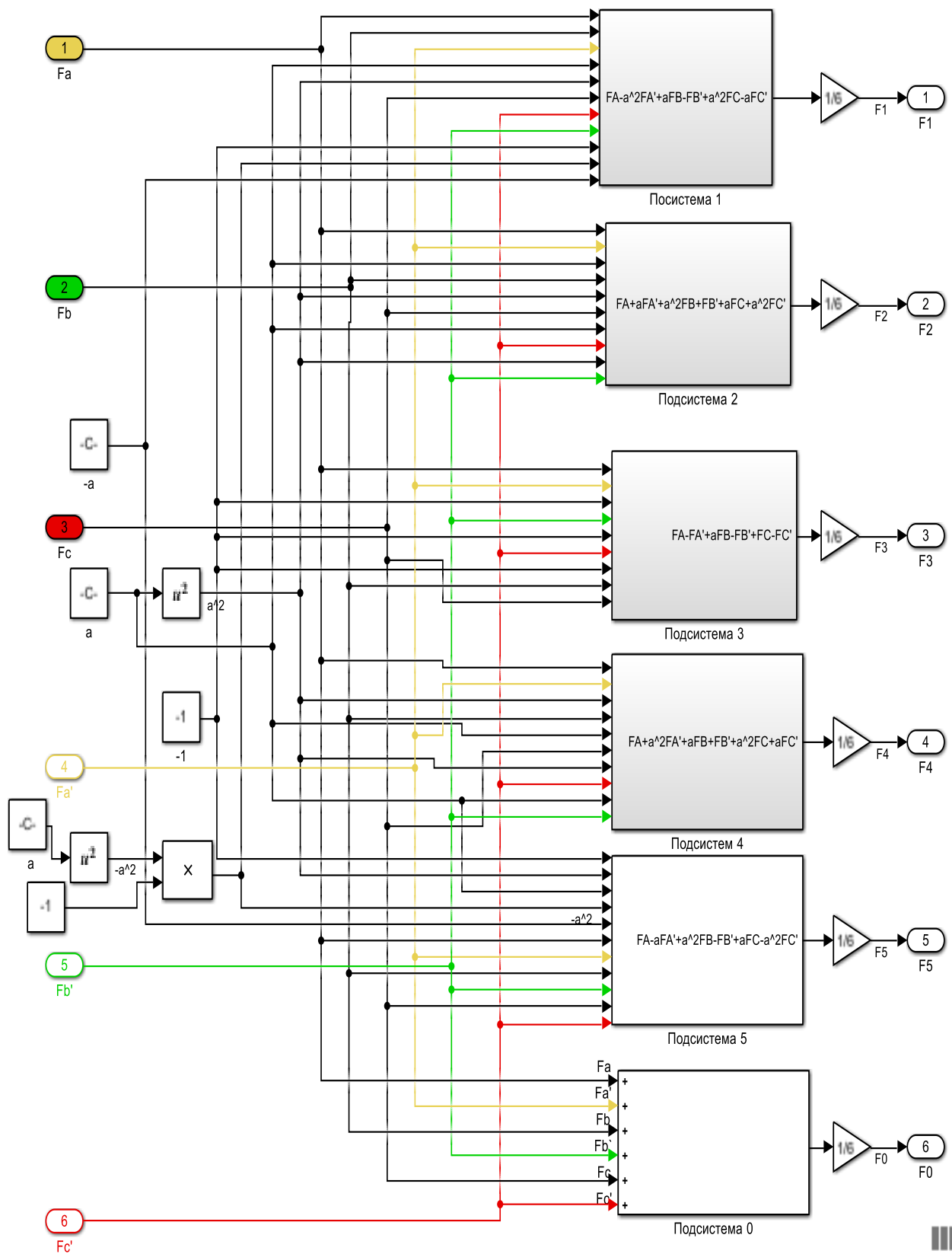


Рис. 4.9. Имитационная модель фильтра шести симметричных составляющих, реализованная в пакете Matlab Simulink [Источник: разработан автором]

Для реализации методики в библиотеке Math Operations для модели фильтра 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:

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_{A1} \\ \dot{F}_{A2} \\ \dot{F}_{A3} \\ \dot{F}_{A4} \\ \dot{F}_{A5} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j60^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j300^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} & 1 & e^{j180^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j300^\circ} & e^{j240^\circ} & e^{j180^\circ} & e^{j120^\circ} & e^{j60^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_{A'} \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_{B'} \\ \dot{F}_C \\ \dot{F}_{C'} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

- Блок Sum - суммирует на входах фазные составляющие, согласно (4.19)
- Блок Gain -умножает входной сигнал на постоянное значение (1/6), согласно (4.19).

Подсистемы 1, 2, 3, 4 и 5 отвечают за обработку измерительной информации членов матричного выражения (4.19). Подсистемы, реализующие выделение соответствующих последовательностей представлены на рисунок 4.10.

Модули, представленные в Matlab Simulink (рисунок 4.10), исходя из заданных значений $\dot{F}_A, \dot{F}_{A'}, \dot{F}_B, \dot{F}_{B'}, \dot{F}_C, \dot{F}_{C'}$, позволяют выделить симметричные составляющие $\dot{F}_0, \dot{F}_1, \dot{F}_2, \dot{F}_3, \dot{F}_4, \dot{F}_5$ последовательностей согласно выражению (4.19). Модель фильтра, разработанную в программном комплексе Matlab, можно использовать для получения симметричных составляющих СВЛ и УСВЛ, которые далее могут быть использованы соответствующими органами микропроцессорной релейной защиты как входные данные при различных коротких замыканиях и несимметричных режимах.

Для тестирования разработанной модели (рисунок 4.9) составлена комплексная модель шестифазной линии электропередачи с двухсторонним питанием и модель фильтра шести симметричных составляющих токов (напряжений). На рисунке 4.11 представлено короткое замыкание фазы A .

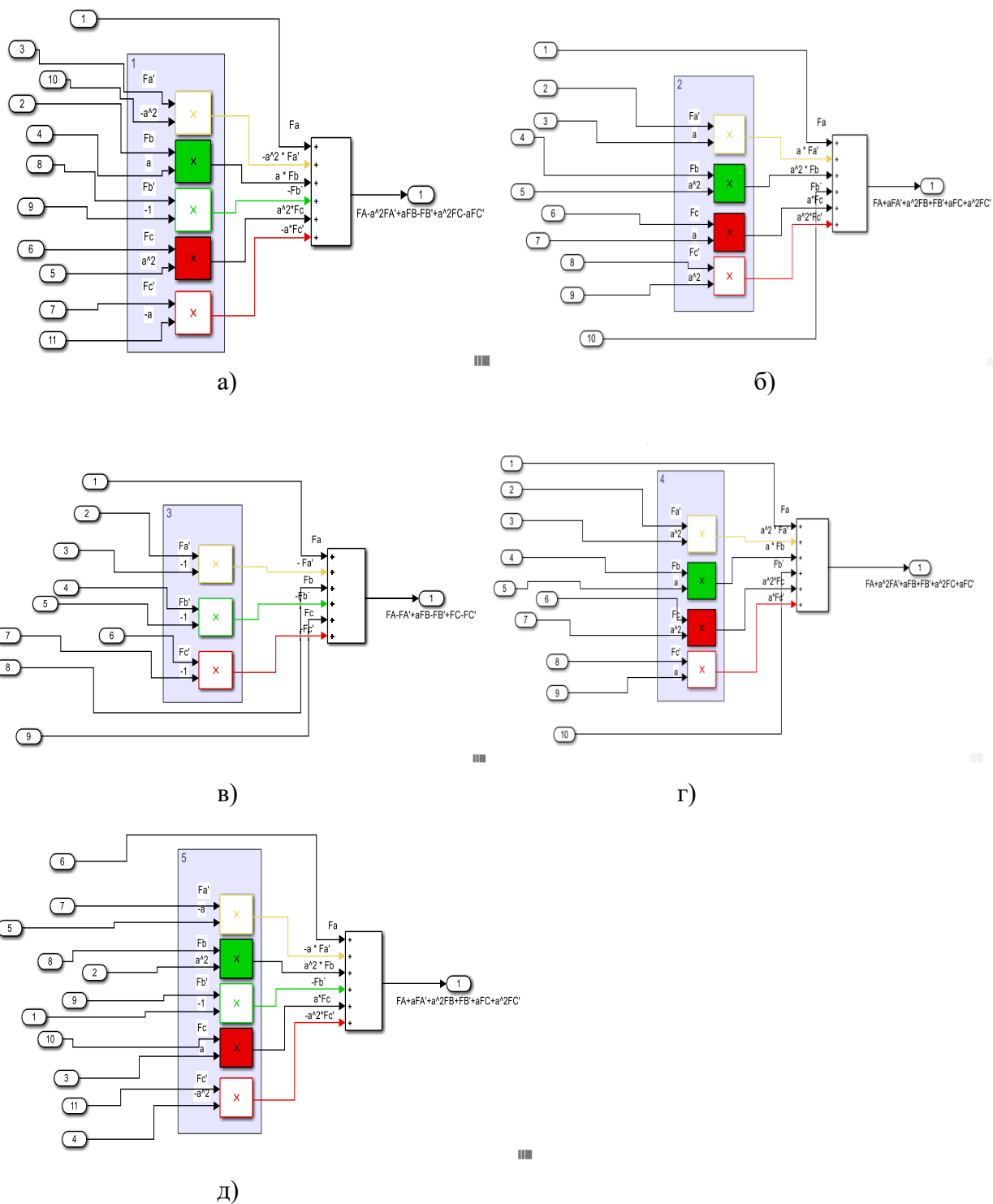


Рис. 4.10. Подсистемы составляющих: а) подсистема первой последовательности; б) подсистема второй последовательности; в) подсистема третьей последовательности; г) подсистема четвертой последовательности; д) подсистема пятой последовательности [Источник: разработан автором]

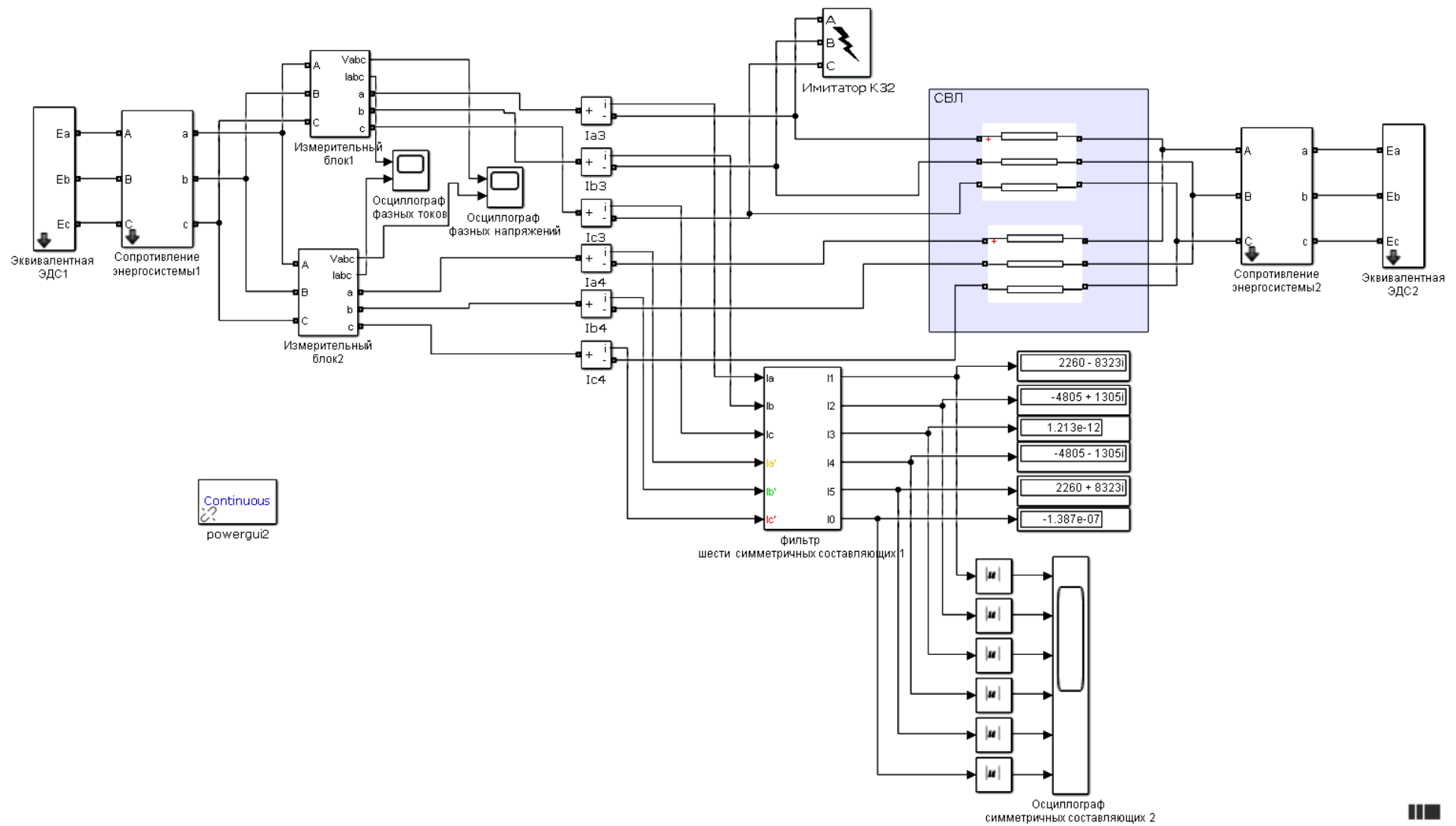


Рис.4.11. Модель для тестирования фильтра симметричных составляющих при к.з. фазы А [Источник: разработан автором]

Окна настройки параметров элементов, входящих в состав модели (рис.4.11), приведены на рисунках 4.12-4.14.

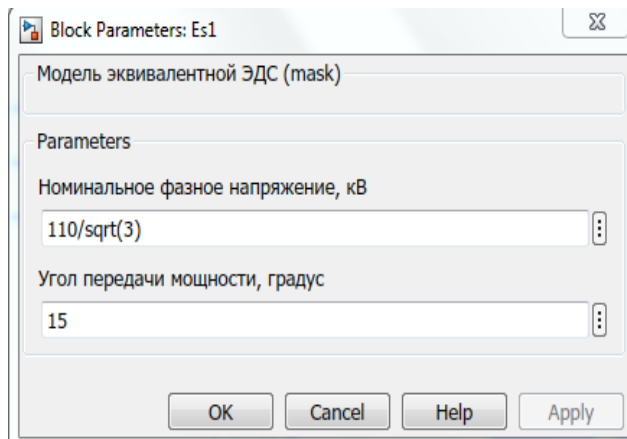


Рис. 4.12. Окно настроек параметров ЭДС энергосистемы

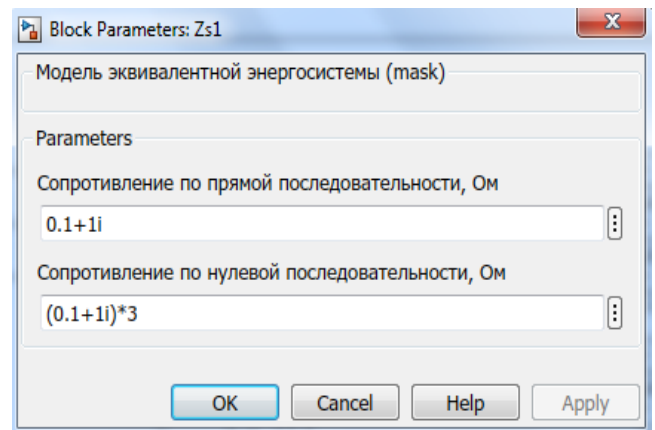


Рис. 4.13. Окно настроек параметров сопротивления энергосистемы

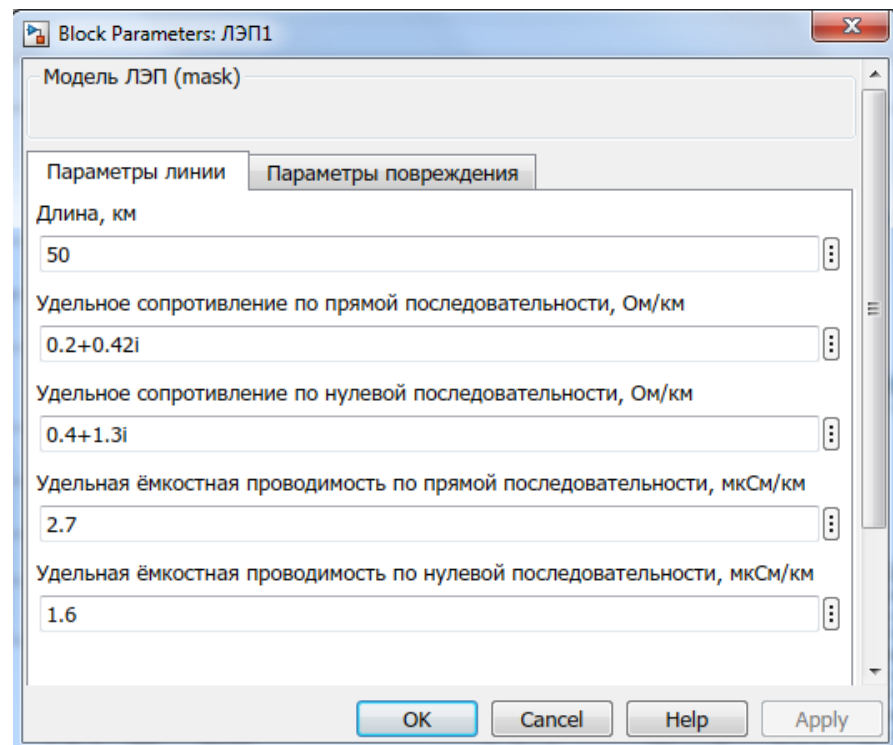


Рис. 4.14. Окно настроек параметров линии электропередачи

Параметры комплексной модели шестифазной линии электропередачи с двухсторонним питанием (рисунок 4.11) приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Параметры моделей шестифазной линии электропередачи с двухсторонним питанием [Источник: разработан автором]

Параметр модели	Обозначение	Значение
Номинальное линейное напряжение сети, кВ	$U_{\text{ном}}$	110
Угол передачи мощности передающей системы	δ	15
Сопротивление передающей ЭС прямой последовательности, Ом	$\underline{Z}_{1s}$	$1 e^{j84^\circ}$
Сопротивление передающей ЭС нулевой последовательности, Ом	$\underline{Z}_{0s}$	$3 e^{j84^\circ}$
Сопротивление принимающей ЭС прямой последовательности (системы ЭС _r), Ом	$\underline{Z}_{1r}$	$10 e^{j84}$
Сопротивление принимающей ЭС нулевой последовательности, Ом	$\underline{Z}_{0r}$	$20 e^{j84}$
Удельное сопротивление ЛЭП прямой последовательности, Ом/км	$\underline{Z}^0_1$	$0,47 e^{j65^\circ}$
Удельное сопротивление ЛЭП нулевой последовательности, Ом/км	$\underline{Z}^0_0$	$1,4 e^{j73^\circ}$
Удельная проводимость ЛЭП прямой последовательности, мкСм/км	$\underline{Y}^0_1$	$2,6 e^{j90^\circ}$
Удельная проводимость ЛЭП нулевой последовательности, мкСм/км	$\underline{Y}^0_0$	$1,6 e^{j90^\circ}$
Длина ЛЭП, км	len	50
Вид КЗ		$K^{(1)}_A$
Расстояние до места повреждения, км	x_f	10
Переходное сопротивление в месте повреждения, Ом	R_f	0.1

На рис. 4.15, 4.16 приведены осциллограммы фазных и симметричных составляющих токов при коротком замыкании фазы *A*. Начальный временной интервал осциллограмм (примерно до 0,3 с) соответствует нормальному режиму, конечный интервал – возникновение аварийного режима.

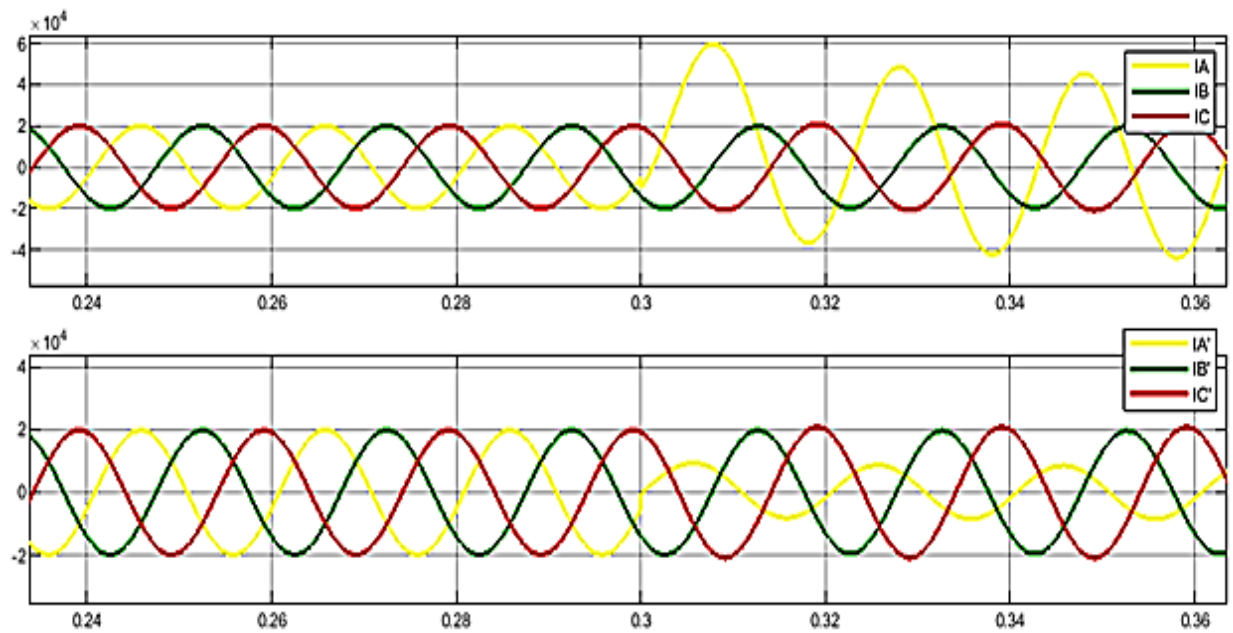


Рис .4.15. Осциллограммы фазных токов при коротком замыкании фазы A [Источник: разработан автором]

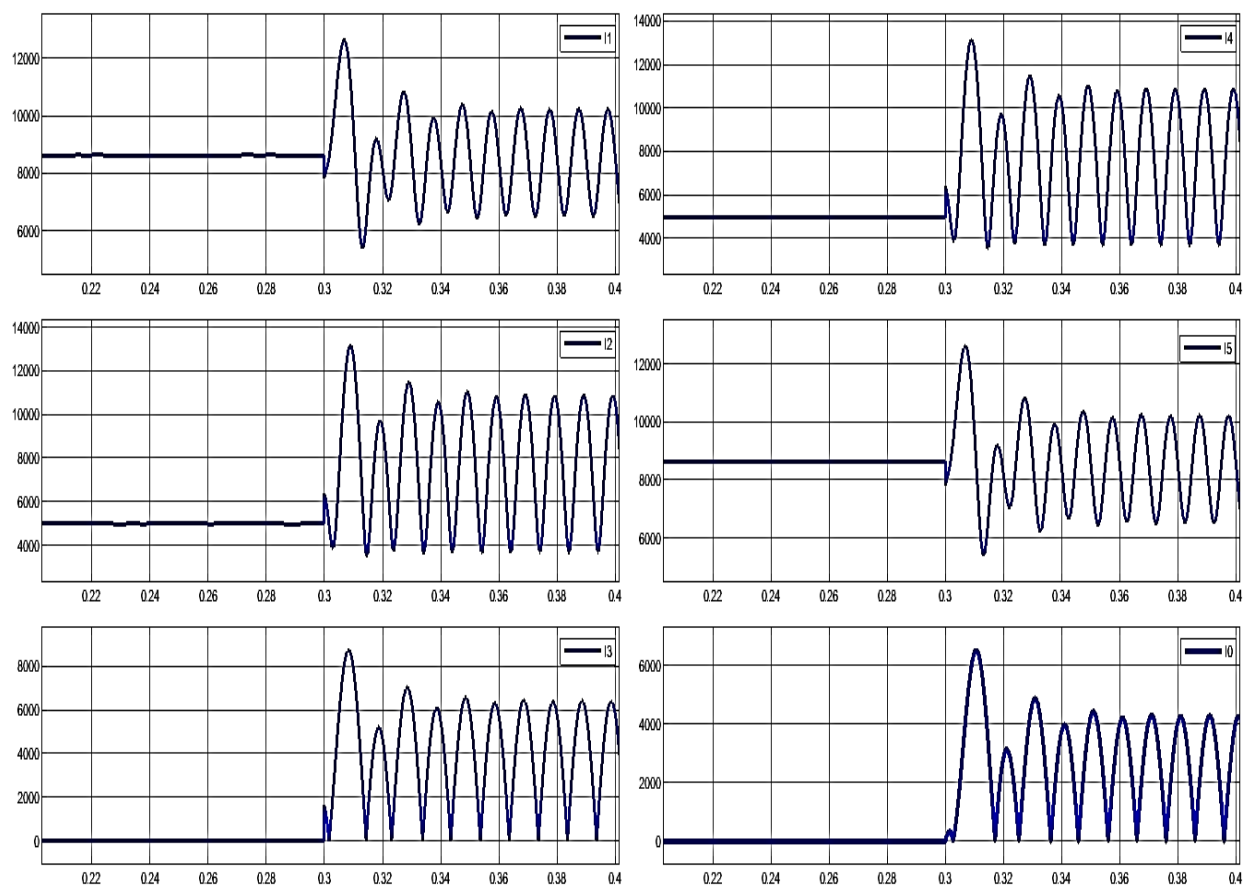


Рис.4.16. Осциллограммы симметричных составляющих токов при коротком замыкании фазы A [Источник: разработан автором]

При нормальном режиме ток 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей на выходе фильтра тока равны нулю, рисунок 4.16 (момент времени от 0-0,3 сек.). При к.з. фазы *A* в момент времени 0,3 секунды на выходе фильтра появляется ток 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей.

Выводы по четвёртой главе

1. Рассмотрены теоретические основы и обобщенный метод создания фильтров шести симметричных составляющих для шестифазной линии электропередачи (СВЛ, УСВЛ).
2. Метод дает возможность рассчитывать и определять электрические величины не только простых, но и сложных видов повреждений для создания эффективной релейной защиты требуемой чувствительности, которая реагирует не на фазные величины, а на их симметричные составляющие.
3. Разработаны принципиальные схемы физического создания фильтров шести фазных симметричных составляющих.
4. Получена математическая модель программной реализации фильтров шести симметричных составляющих на компьютере в Matlab Simulink, которая может быть использована для создания микропроцессорной релейной защиты СВЛ, УСВЛ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

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

1. Использование метода шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей при расчёте несимметричных к.з. на СВЛ и УСВЛ существенно упрощает расчёт, позволяет полностью диагонализировать матрицу их пассивных параметров. Благодаря этому можно рассчитывать простые несимметричные короткие замыкания на этих линиях по схемам замещения в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей, не связанных между собой взаимоиндукцией (Глава 1, параграф 1.3, 1.4).

2. На основании граничных условий в фазных координатах и в координатах шести симметричных составляющих при сложных видах повреждений получены конкретные обобщённые формулы для расчёта различных сложных видов повреждений на СВЛ и УСВЛ (Глава 2, параграф 2.1).

3. Для сложных видов продольной и поперечной несимметрии на СВЛ и УСВЛ (обрывы и короткие замыкания) разработаны и приведены конкретные и обобщённые схемы замещения СВЛ и УСВЛ в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей. Для 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 (Глава 2, параграф 2.2).

4. Расчет сложных видов повреждений (обрыв фазы *A*, обрыв фазы *A* с одновременным коротким замыканием её на землю) на обычной двухцепной ЛЭП обычным методом разложения на три симметричные составляющие 0, 1, 2 последовательностей, а также методом разложения на шесть симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей, показал хорошее совпадение результатов с точностью в среднем 7%. Данный факт подтверждает достоверность и приемлемость использования метода шести симметричных составляющих для расчёта несимметричных и сложных видов повреждений на двухцепных (шестифазных) ЛЭП, в том числе на СВЛ и УСВЛ. Моделирование вышеперечисленных сложных видов повреждений на двухцепной ЛЭП с использованием комплексных схем замещения в координатах шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4 и 5 последовательностей на компьютере с применением стандартных пакетов прикладных программ Multisim и Matlab Simulink также показало хорошее совпадение результатов с точностью 99% (Глава 3).

5. В работе рассмотрены теоретические основы и обобщенный метод создания фильтров шести симметричных составляющих для шестифазной линии электропередачи (СВЛ, УСВЛ), которые могут быть использованы при создании релейной защиты и автоматики СВЛ и УСВЛ (Глава 4).

Проведенное исследование по разработке методики расчета электрических величин при сложных видах повреждений СВЛ и УСВЛ позволило сформулировать основные **рекомендации**, которые могут быть полезны как с научной, так и с практической точки зрения:

1. Разработанную методику шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей можно применять и для расчёта сложных видов повреждений на любых шестифазных системах, включая двухцепные ЛЭП, что позволяет упростить расчёты.

2. Разработанная методика шести симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей может быть предложена для расчёта компактных и самокомпенсирующихся ЛЭП, в том числе СВЛ и УСВЛ, при их проектировании и внедрении в электрическую систему.

3. Разработанные математические модели фильтров шестифазных симметричных составляющих 0, 1, 2, 3, 4, 5 последовательностей в среде Matlab-Simulink рекомендуется использовать для разработки и создания современной микропроцессорной РЗА для любых шестифазных систем передачи электроэнергии, в том числе СВЛ и УСВЛ.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. АТАБЕКОВ, Г. И. *Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей*. Москва: Книга по требованию, 2021. 344 с. ISBN 978-5-458-48959-1.
2. БЕЛОВ, А.В., КОРОВИН, Ю.В., ПАХОМОВ, Е.И. *Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах напряжением выше 1000 В Учебное пособие (часть 1;2)*. Челябинск: ЧГАУ, 2010. 190 с. ISBN978-5-88-88156-3; ISBN978-5-88-88156-517-6.
3. БЕЛЯКОВ, Ю.С. *Распределительные параметры в расчетах режимов электрических систем*. Москва: НТФ Энергопрогресс, 2011. 96 с.
4. БЕССОНОВ, Л.А. *Теоретические основы электротехники*. Москва: ЮРАЙТ, 2020. 831 с. ISBN 978-5-534-10731-9.
5. БОБРОВ, А.Э., ДЯКОВ, А. М., ЗОРИН, В. Б., ПИЛЮШЕНКО, Л. И. *Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. указания по практ. занятиям*. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 92с. ISBN 978-5-7638-1648-8.
6. БОЧАРОВ, Ю.Н., КРИВОШЕЕВ, С.И., НЕНАШЕВ, А.П., ТАДЖИБАЕВ, А.И., ТИТКОВ, В.В., ЯНЧУС, Э.И. *Электроэнергетика моделирования параметров и процессов высоковольтного электрооборудования Практикум*. Санкт-Петербург, 2012. 111 с. ISBN: 978-5-89482-516-8.
7. БУЛЫЧЕВ, А.В., НАВОЛОЧНЫЙ, А.А. *Релейная защита в распределительных электрических сетях*. М.: ЭНАС, 2011. 208 с. ISBN: 978-5-4248-0006-1 .
8. ВАЙНШТЕЙН, Р.А., ЛОЗИНСКИЙ, К.С., КОЛОМИЕЦ, Н.В. *Расчёт несимметричных режимов в электроэнергетической системе на основе сочетания систем координат*. В: *Известия Томского политехнического университета*. Томск: 2010, № 4, с. 146-152. ISSN 1684-8519.
9. ВЕНИКОВ, В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. 4-е издание Москва: Высшая школа, 1985. 536 с.
10. ВЕНИКОВ, В.А., АСТАХОВ, Ю.Н., ПОСТОЛАТИЙ, В.М. *Управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи*. Москва: Информэнерго, Деп, 1985. № 1955. 20 с.
11. ВЕНИКОВ, В.А., ЧАЛЫЙ, Г.В., ПОСТОЛАТИЙ, В. М. *Способ передачи электроэнергии*. Патент СССР (Авторское свидетельство) № 218294 от 6.12.1966.

12. ВОРОНЦОВА, О.А., ДРУЖИНИНА, Т.В., МИРОНЕНКО, А.А. *Основы механического расчета опор воздушных линий электропередачи Учебно-методическое пособие*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 60 с. ISBN: 978-5-7996-1398-3.
13. ГАЛЕЕВА, Р.У., НАЗАРОВ, А.В., ХАСАНШИН, А.А. Влияние электромагнитных связей между проводами двухцепной воздушной линии и поверхностью земли на переходные режимы. В: *Проблемы энергетики*. Казань: 2019, том 21, № 1, с. 67-76. ISSN 2658-5456
14. ГЕРМАН-ГАЛКИН, С. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB–Simulink. В: *Ж. «Силовая электроника» Урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром*. Санкт-Петербург: 2013, № 40, с. 80-86. ISBN 978-5-8114-1520-5.
15. ГЛАЗЫРИН, В.Е. *Элементы автоматических устройств: учебное пособие*. Новосибирск: НГТУ, 2011. 130 с. ISBN: 5778217331.
16. ГЛУШАК, Л.В., ШЕИН, А.Н. *Анализ линейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах. Практикум по курсу «Теоретические основы электротехники»*. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2015. 287 с. ISBN 978-5-7444-3418-2.
17. ГОЛИКОВ, И. О., ВИНОГРАДОВ, А. В. Математическое моделирование системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрической сети 0,38 кВ. В: *ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ»*. Орел: 2016, 160 с, с. 30-38. ISSN 2227-9407.
18. ГОТМАН, В.И. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие*. Томск: Томский политехнический университет, 2009. 172 с. ISBN 978-5-98298-572-9.
19. ГОТМАН, В.И. *Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах: учебное пособие*. Томск: Томский политехнический университет, 2011. 240 с. ISBN 978-5-98298-848-5.
20. ГОТМАН, В.И., ХРУЩЕВ, Ю.В. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие по курсовому проектированию по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах»*. Томск: изд-во ТПУ, 2002. 68 с.
21. ДАВЫДОВ, В.А., ЩЕГЛОВ, А.И., БЫКОВА, Л.Б., ТРОФИМОВ, А.С. *Примеры расчета релейной защиты*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - 64 с.

22. ДОРОХИН, Е.Г., ДОРОХИНА, Т.Н. *Основы эксплуатации релейной защиты и автоматики*. Ростов-на-Дону: Феникс, 2015. 747 с. ISBN 978-5-222-26770-7.
23. ДЬЯКОВ, А.Ф. *Электрические сети сверх - и ультравысокого напряжения ЕЭС России*. Москва, 2012. 368 с. ISBN: 978-5-905918-01-8.
24. ДЬЯКОВ, А.Ф., ОВЧАРЕНКО. Н.И. *Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем*. Москва. Издательский дом МЭИ, 2008. 336 с. ISBN: 978-5-383-00244-5.
25. ДЬЯКОНОВ, В.П. *MATLAB 6.5 SP17.0 Simulink 56 Обработка сигналов и проектирование фильтров*. Москва: Солон-пресс, 2010. 560 с. ISBN 5-98003-206-1.
26. ЕРОШЕНКО, С. А., ЕГОРОВ, А. О., СЕНЮК, М. Д., ЗАГИДУЛИН, М. Р., ЗИНОВЬЕВ, К. А., ХАЛЬЯСМАА, А. И. *Расчет токов коротких замыканий в энергосистемах: учеб. пособие*. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2019. 104 с. ISBN 978-5-7996-2604-4.
27. ЖЕМЕРОВ, Г.Г., ТУГАЙ, Д.В. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных координатах. В: *Ж. Електротехніка і електромеханіка*. 2016, № 2, с. 11-19. ISSN 2074-272X.
28. ЗАКАРЮКИН, В.П., КРЮКОВ, А.В. *Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока под ред. А.В. Крюкова*. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 160 с. ISBN 978-5-98710-191-9.
29. ЗАКАРЮКИН, В.П., КРЮКОВ, А.В. *Моделирование сложных повреждений в электрических сетях на основе фазных координат*. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006. 139 с. ISSN 2077-5415.
30. ЗАКАРЮКИН, В.П., КРЮКОВ, А.В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: Изд-во Иркут ун-та, 2005. 273с. ISBN 5-7430-0568-0.
31. КИОРСАК, М. В., ФЕЙГИС, Ш. Л., ПОСТОЛАТИЙ, В. М. *Определение электрических величин и релейная защита УСВЛ*. Кишинёв: Штиинца АН МолССР, 1988. 222 с. рис., табл. ISBN 5-376-00485-6.
32. КИОРСАК, М. Шестифазное короткое замыкание на управляемой полуразомкнутой ЛЭП большой протяжённости. В: *Управляемые полуразомкнутые электропередачи*. Кишинёв: Штиинца, 1976, с. 38-50.
33. КИОРСАК, М., ПОСТОЛАТИЙ, В. *Метод расчета несимметричных коротких замыканий на двухцепных линиях электропередачи со сближенными фазами*. Кишинёв: Информаэnero, 1986.

34. КИОРСАК, М., ПОСТОЛАТИЙ, В. Теоретические основы методики расчета несимметричных коротких замыканий на управляемых самокомпенсирующихся линиях электропередачи. В: *изв. АН МССР Сер. физ.-техн. и математ. наук.* Кишинёв: 1977, №3.
35. КИОРСАК, М.; ТУРКУМАН, Л.; СИДЕЛЬНИКОВ, В. Комплексные схемы замещения для расчета сложных видов повреждений на шестифазных ЛЭП методом. In: *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare.* Ediția II, 4-6 octombrie 2012, Chișinău. Chișinău, Republica Moldova: Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, 2012, pp. 286-288.
36. КИОРСАК, М.В, ТУРКУМАН, Л.В, **АЛИСОВА, Н.Н.** Метод симметричных составляющих при расчете несимметричных коротких замыканий на спаренных проводах. В: *VII Международная конференция „Математическое моделирование в образовании, науке и производстве.* Тирасполь, 2011; с.207.
37. 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.
38. КИОРСАК, М.В, **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Моделирование на ЭВМ обрыва и короткого замыкания фазы на землю шестифазной ЛЭП В: *Доклады итоговой научной конференции ППС инженерно-технического института за 2017 год.* Тирасполь: 2017, с.15-17.
39. КИОРСАК, М.В, **ТУРТУРИКА, Н.Н.** П-образная схема замещения устройства продольно-емкостной компенсации с фазоповоротным трансформатором. В: *Доклады итоговой научной конференции ППС инженерно-технического института за 2016 год.* Тирасполь: 2016.
40. КИОРСАК, М.В. *Исследование, разработка и применение метода шести симметричных составляющих при расчете коротких замыканий и анализе электрических величин для релейной защиты на управляемых двухцепных линиях электропередачи повышенной пропускной способности.* Кишинёв: Автореферат канд. дисс., 1982. 19 с.
41. КИОРСАК, М.В. Шестифазное короткое замыкание на управляемой полуразомкнутой ЛЭП большой протяженности. В: *Управляемые полуразомкнутые электропередачи.* Кишинев: Штиинца, 1976, с. 38-50.

42. КИОРСАК, М.В., ТУРКУМАН, Л.В., **ТУРТУРИКА, Н.Н.** Принципы построения релейной защиты УСВЛ при к.з. между сближенными фазами на основе шести симметричных составляющих. В: *Технический университет Молдовы, Институт энергетики АНМ*. Кишинёв: Институт энергетики АНМ, 2015, с. 63-66. eISSN 1857-0070.
43. КОНСТАНТИНОВ, А.М. , ГРОМАШОВА, Ю.А. *Электромагнитные переходные процессы: расчет переходных режимов в электрической сети напряжением выше 1000. Метод. пособие по выполнению расчетно-графической и курсовой работы.* Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. 58 с.
44. КОРОТКЕВИЧ, М.А. *Проектирование линий электропередачи. Механическая часть.* Издательство Вышэйшая школа. 2010, 574 с. ISBN: 978-985-06-1700-2 .
45. КОСТЮЧЕНКО, Л.П. *Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие.* Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2012. 215 с.
46. КОТОВА, Е.Н., ПАНИКОВСКАЯ, Т.Ю. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.* Екатеринбург: Изд-во Урал ун-та, 2014- 216 с. ISBN:978-5-7996-1254-2 .
47. КРЮЧКОВ, И.П., СТАРШИНОВ, В.А., ГУСЕВ, Ю.П., ПИРАТОРОВ, М.В. *Переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов.* Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с. ISBN 978-5-383-00214-8.
48. КРЮЧКОВ, И.П., СТАРШИНОВ, В.А., ГУССА, Ю.П. и др. *Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов.* Москва: МЭИ, 2012. 568 с. ISBN 978-5-383-00709-9.
49. КУЗНЕЦОВ Ф.Д.; ПОД РЕД. АЛЕКСЕЕВА, Б.А. *Фильтры симметричных составляющих и их применение в системах релейной защиты: практ. пособие* Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 88с. ISBN 5-93196-377-4.
50. КУЛИКОВ, А.Л., АНАНЬЕВ, В.В. Использование имитационного моделирования для повышения точности волнового определения места повреждения линий электропередачи. В: *Релейщик*. Москва: №2, 2014, 30-33 с.
51. КУЛИКОВ, Ю.А. *Переходные процессы в электрических системах. Учеб.пособие.* 2-е издание. Новосибирск: НГТУ, 2006. 284 с. ISBN 5-7782-0723-9.
52. КУШКОВА, Е.И., ПЕТРОВ, Н.В., БЕССОЛИЦЫН, А.В. Определение возможности перевода ВЛ 110 кВ в неполнофазный нагрузочный режим. В: *Всероссийская*

ежегодная научно-практическая конференция: сборник материалов. 2013. с.26-30. ISBN: 2081-2083.

53. КУШОВ, А.А. Сопоставление методов расчетов несимметричных режимов в симметричных и несимметричных составляющих и в фазных координатах. В: *Режимы систем тягового электроснабжения*. Иркутск: Иркутский гос. ун. путей сообщения, 2014, №6, 37-43 с.
54. ЛОЗИНСКИЙ, К. С. *Совершенствование расчётов несимметричных режимов в ходе электромеханических переходных процессов для релейной защиты и автоматики: диссертация*. Томск: ТПУ, 2011. 22с.
55. ЛОСЕВ, С.Б., ЧЕРНИН, А.Б. *Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 528с. ISBN 0949985.
56. ЛОСЕВ, С.Б., ЧЕРНИН, А.Б. *Расчет электромагнитных электронных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности*. Москва: Энергия, 1972. 144 с.
57. МАКАРОВ, О.А., БАРБАШИНА, Е.А. Анализ проблем современной электроэнергетической отрасли и стратегические пути их решения в соответствии с концепцией энергетической стратегии до 2035 года. В: *Вестник*. Воронеж: ВГУИТ, 2016, №2 (98), с. 366-373. ISSN 2226-910X.
58. МАТВИЕНКО, В. А. *Основы теории цепей: учебное пособие для студентов высших учебных заведений*. Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2016. 162 с. ISBN 5-89594-026-9.
59. МЕЛЬНИК, Э.И.: под рук. ВАЛИХАНОВ, М.М. *Проектирование электрических схем в Simulink: курс. раб.* Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. 32с.
60. МИСРИХАНОВ, М. Ш., ПОПОВ, В. А., ЯКИМЧУК, Н. Н., МЕДОВ, Р. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на сеть. В: *Электрические станции № 2*. Киров: Южэнерго - Вятский гос. техн. ун-т. 2001. 5 с.
61. НАЗАРОВ, А.В. Учет влияния параметров двухцепных ЛЭП при симметричных коротких замыканиях при коррекции установок релейной защиты. В: *"Мировая наука"*. Саратов: 2017, №7(7), 135с. - 142с. ISSN 2541-9285.
62. НЕБРАТ, И.Л., ПОЛЕСИЦКАЯ, Т.П. *Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты: учебное пособие. Часть 2*. Санкт-Петербург: ИЭИПК, 2009. 48с.
63. НЕСТЕРОВ, А. С., ВАСИЛЬЕВ, П. Ф., КОБЫЛИН, В.П. Анализ и расчет пропускной способности воздушных линий электропередачи. В: *Вестник Южно-*

Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. Челябинск: 2018, vol. 18, no. 1, pp. 21-26. ISSN 2409-1057.

64. НЕСТЕРОВ, А.С., ЛЕБЕДЕВ, М.П., КОБЫЛИН, В.П., ВАСИЛЬЕВ, П.Ф., ДАВЫДОВ, Г.И., ХОДЖУТАНОВ, А.М. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой В: *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2016, вып. 4, с. 45-48, ISSN: 1991-9751.
65. ОБУХОВ, С.Г. *Математическое моделирование в системах электроснабжения: Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение промышленных предприятий»* Томск: Томский политехнический университет, 2014. 74 с.
66. ПАВЛЕЙНО, М.А, РОМАДАНОВ, В.М., САФРОНОВА, Ю.Ф., СТАТУЯ, А.А. *Моделирование работы электрических схем в Simulink. Применение операционных усилителей для фильтрации, усиления и генерации сигналов*. Санкт-Петербург: Научно-образовательный центр "Электрофизика", 2007. 210 с. ISBN 978-5-98340-119-8.
67. ПАНОВА, Е.А., КРЮКОВА, А.А. Применение метода фазных координат для моделирования линий электропередачи систем промышленного электроснабжения. В: *Электротехнические системы и комплексы*. Магнитогорск: 2017, №3(36), 29-34 с. ISSN 2311-8318.
68. ПАПКОВ, Б. В. *Токи короткого замыкания в системах: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры*. Москва: Юрайт, 2005. 276 с. ISBN 978-5-9916-8148-3.
69. ПЕТРОВ, Г. Н., СОКОЛОВ, Н. И. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях *Журн. «Электричество»*. Москва: Госэнергоиздат, авг. 8, 1949, №8 (96с.). ISSN 0013-5380.
70. ПИВНЯК, Г.Г., ВИНОВСЛАВСКИЙ, В.Н., РЫБАЛКО, А.Я., НЕСЕН, Л.И. *Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник для вузов*. 3-изд. Москва: Энергоатомиздат, 2003. 548 с. ISBN 5-11-001185-0.
71. ПОСПЕЛОВ, Г.Е., ПОСПЕЛОВА, Т.Г. Применение управляемых гибких линий электропередачи в электрических сетях энергосистем. В: *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2010. № 5. с. 5-9. ISSN: 0579-2983.

72. Постановление Правительства Республики Молдова о Национальной стратегии развития «Молдова 2030» № 377 от 10-06-2020 В: *Monitorul Oficial*, 26-06-2020, № 153-158 статья № 508
73. Постановление Правительства Республики Молдова «Об Энергетической стратегии Республики Молдова до 2030 года» № 102 от 5 февраля 2013 года В: *Monitorul Oficial*, 08-02-2013, пг. 27-30 статья №: 146.
74. ПОСТОЛАТИЙ, В. *Теоретические основы и принципы создания управляемых самокомпенсирующих линий электропередачи*: дис. д-ра тех. наук. Кишинев (Киеш), 1987 г. 521 с.
75. ПОСТОЛАТИЙ, В.М, БЫКОВА, Е.В. Применение УСВЛ для улучшения качества и параметров режимов энергетических систем и увеличения надежности электроснабжения. В: *Управляемые электропередачи. Лаборатория управляемых электропередач 35 лет (1972 – 2007)*. Chişinău, Republica Moldova: Институт энергетики, 2007, pp. 30-33. ISBN 978-9975-62-194-6.
76. ПОСТОЛАТИЙ, В.М. Возможные способы регулирования режимов управляемых самокомпенсирующих линий электропередачи и определение областей целесообразного их применения. В: *Управляемые самокомпенсирующиеся ЛЭП*. Кишинев: Штиинца, 1980, с. 3-23.
77. ПОСТОЛАТИЙ, В.М. КОМЕНДАНТ, И.Т. Анализ влияния регулирования угла фазового сдвига между системами напряжений цепей УСВЛ на величину потерь электроэнергии. В: *Линии электропередачи повышенной пропускной способности*. Кишинев: Штиинца, 1982, с. 3-15.
78. ПОСТОЛАТИЙ, В.М. *Компактные управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи переменного тока*. Кишинёв: Академия наук Молдовы, Институт энергетики, 2017. 732 с. ISBN 978-9975-62-404-6.
79. ПОСТОЛАТИЙ, В.М. *Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи*. Кишинёв: Академия наук Молдовы, Институт энергетики, Ch. Tipogr. A.Ş.M, 2010. 730 с. ISBN 978-9975-62-404-6.
80. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., БЫКОВА, Е.В., ТИМАШОВА, Л.В., ШАКАРЯН, Ю.Г. Повышение пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока. В: *Проблемы региональной энергетики*. 2008. № 3. с. 86-103. ISSN: 1857-0070
81. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., БЫКОВА, Е.В., ШАКАРЯН, Ю.Г., ТИМАШОВА, Л.В. Основные принципы создания и характеристики управляемых

- самокомпенсирующихся линий электропередачи. В: *Электротехнические и компьютерные системы*. 2017. № 25 (101). С. 216-229. ISSN: 2221-3805.
82. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., КОМЕНДАНТ, И.Т., ИВАНЮТА, Г.П. и др. Методика расчета параметров и технических характеристик управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач. В: *Управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи*. Кишинев: Штиинца, 1978, с. 12-26.
 83. ПОСТОЛАТИЙ, В.М. Compact Controllable Overhead Transmission Lines. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2019, nr. 1-3(42 S), pp. 68-85. ISSN 1857-0070.
 84. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., БЫКОВА, Е.В., ЕРХАН, Ф. Сравнительная оценка функциональной надежности компактных линий электропередачи напряжением 10КВ. In: *Inginerie agrară și transport auto*. 2018, Vol.51, pp. 199-204. ISBN 978-9975-64-300-9.
 85. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., БЫКОВА, Е.В., СУСЛОВ, В.М., ШАКАРЯН, Ю.Г., ТИМАШОВА, Л.В., КАРАЕВА, С.Н. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2010, nr. 2(13), pp. 1-18. ISSN 1857-0070.
 86. ПОСТОЛАТИЙ, В.М.; БЫКОВА, Е.В.; СУСЛОВ, В.М.; ШАКАРЯН, Ю.Г.; ТИМАШОВА, Л.В., КАРАЕВА, С.Н. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2015, nr. 3(29), pp. 1-17. ISSN 1857-0070.
 87. ПОСТОЛАТИЙ, В.М., БЫКОВА, Е.В., ТИМАШОВА, Л.В., ШАКАРЯН, Ю.Г. Повышение пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2008, nr. 3(8), pp. 1-18. ISSN 1857-0070.
 88. СЕНДЕРОВИЧ, Г. А. Использование мощности симметричных составляющих для определения фактического вклада субъекта в искажение симметрии. В: *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. Херсон: Херсонский государственный технический университет, 2005, № 2 (16), с. 169-176. ISSN 2078-4481.
 89. СИЛЮК, С.М., СВИТА, Л.Н. *Электромагнитные переходные процессы: уч. пособие для ВУЗов*. Минск: Технопринт, 2000. 262с..
 90. СУВОРОВ, И. Ф. *Переходные процессы в системах электроснабжения: курс лекций. Вторая часть*. Чита: ЧитГТУ, 2002. 98 с. ISBN 5-9293-0155-7.

91. СУСЛОВ, В.М., ПОСТОЛАТИЙ, В.М. Минимизация неравномерности загрузки цепей управляемой самокомпенсирующейся воздушной линии (УСВЛ). In: *Problemele Energeticii Regionale*. 2007, nr. 2, pp. 1-6. ISSN 1857-0070.
92. ТУГАЙ, Д.В. Моделирование режимов работы трехфазных систем электроснабжения при оценке составляющих суммарной мощности потерь. В: *Електротехніка і Електромеханіка*. Харьков: Б.и., 2016, №4, 43-53 с. ISSN 2074-272X.
93. ТУРТУРИКА, Н. Теоретические основы методики расчета сложных видов повреждений на многоцепных линиях электропередачи. In: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Științe a Moldovei, 10 martie 2015, p. 44.
94. ТУРТУРИКА, Н.Н. Обобщённая схема замещения для расчёта обрывов фаз на шестифазных ЛЭП методом симметричных составляющих. In: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători*. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Academiei de Științe a Moldovei, 15 martie 2016, Ediția 5, Vol.2, pp. 63-65. ISBN 978-9975-75-836-9.
95. 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.
96. 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.
97. УЛЬЯНОВ, С.А. *Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов и факультетов*. Москва: Энергия, 1968. 496 с.
98. УТЕГУЛОВ, Б.Б., И ГРЕБЕННИКОВА, В.О. «Пределы передаваемой мощности и устойчивость дальних электропередач переменного тока». В: *«Наука и техника Казахстана»*. Павлодар: Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, 2005, no. 4, pp. 158-164. ISSN 1680-9165.

99. УШАКОВА, Н.Ю., БЫКОВСКАЯ, Л.В. *Метод симметричных составляющих: методические указания к самостоятельному изучению раздела курса ТОЭ и к выполнению расчетно-графического задания*. Оренбург: ОГУ, 2010. 59 с.
100. ФЕДОРОВ, М.П., ОКороков, В.Р., ОКороков, Р.В. *Энергетические технологии и мировое экономическое развитие: прошлое, настоящее, будущее*. Санкт-Петербург: Наука, 2010. 411 с. ISBN 978-5-02-025517-3.
101. ФИЛЯЕВ, К.Ю. *Математические задачи энергетики Учебно-метод. комплекс*. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 212 с.
102. ЧЕРНИН, А.Б. *Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах*. Москва: Госэнергоиздата, 1963. 416 с.
103. ЧЕРНИН, А.Б., ЛОСЕВ, С.Б. *Основы вычисления электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах*. Москва: Энергия, 1971. 432 с.
104. ЧЕРНЫХ, И.В. *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink*. Москва: ДМК Пресс, 2008. 288 с. ISBN 5-94074-395-1.
105. ЧЕРНЫХ, И.В., ПОТЕМКИНА, В.Г. *SIMULINK: среда создания инженерных приложений*. Москва: Диалог-мифи, 2003. 496 с. ISBN 5-86404-186-6.
106. ШИШКОВ, Е.М., ВЕДЕРНИКОВ, А.С., ГОЛЬДШТЕЙН, В.Г. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы. В: *Журн. «Электричество»*. Москва: 2013, №4(70), с. 9-17. ISSN 0013-5380.
107. ШНЕЕРСОН, Э.М. *Цифровая релейная защита*. Москва: Энергоатомиздат, 2007. 549с. ISBN 978-5-283-03256-6.
108. ШТИН, А.Н., НЕСЕНЮК, Т.А. *Электрическая часть электростанций и подстанций Методические рекомендации по выполнению расчетно-графических работ*. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2021. 88 с.
109. ABDOLLAHZADEH, H., MOZAFARI, B. Delayless Extraction of Instantaneous Symmetrical Components in Power System Fault Conditions. In: *Transactions on Circuits and Systems*. 2018, vol. 65, no. 8, pp. 1064-1068, doi: 10.1109/TCSII.2017.2752262.
110. ABDULWAHID, A. H., SHAORONG, W., A new protection approach for microgrid based upon combined ANFIS with Symmetrical Components. In: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2016, pp. 1984-1989, doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779851.

111. ANIRUDH, C. V. S., KUMAR, V. S. S. Analysis of Filter Design Approaches for Extraction of Instantaneous Symmetrical Components. In: *IEEE Texas Power and Energy Conference*. 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC54980.2022.9750824.
112. ARMSTRONG, R., BUSAWON, K., MINNS, P. Polyphase symmetrical components revisited. In: 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering. 2020, pp. 12-17, doi: 10.1109/ELECOM49001.2020.9297021.
113. BENIDRIS, M., MITRA, J. Integrated Evaluation of Reliability and Stability of Power Systems. In: *Transactions on Power Systems* 2017, vol. 32, no. 5, pp. 4131-4139. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2656131.
114. BILAWAL REHMAN, C. L. L. W. Least Square Method: A Novel Approach to Determine Symmetrical Components of Power System. In: *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2017, vol. 12, no. 1, pp. 39-44. ISSN 2093-7423.
115. BURYANINA, N., KOROLYUK, Y., KORYAKINA, M., SUSLOV, K. Compact Power Transmission Lines. In: *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934866.
116. BURYANINA, N., KOROLYUK, Y., KORYAKINA, M., SUSLOV, K. Four Samples Method for the Selection of Sinusoidal Components Parameters of Power System Emergency Mode. In: *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934775.
117. CARVAJAL, J. R., RAMOS, G., RODRÍGUEZ, D. F., Directional Relay Based on Time-Domain Symmetrical Components With Incremental Quantities. In: *Transactions on Industry Applications*. 2021, vol. 57, no. 5, pp. 4587-4594, doi: 10.1109/TIA.2021.3095249.
118. CHAN, P. P. K. Three-phase fault location based on Multiple Classifier System in double-circuit transmission lines. In: *2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. 2012, pp. 250-254, doi: 10.1109/ICWAPR.2012.6294787. ISSN 2158-5695.
119. CHIORSAC, M., POTÂNG, A., SIDELNICOV, V., TURCUMAN, L. Filtrele componentelor simetrice hexafazate. In: *Conferință științifică Jubiliară a studenților și colaboratorilor* 2014, Chișinău.

120. DAS, J. C. Fundamental Concepts of Symmetrical Components. In: *Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling*. 2017, pp.15-37, doi: 10.1002/9781119226895.ch2.
121. DAS, J. C. Symmetrical Components Using Matrix Methods. In: *Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling*. 2017, pp.1-14, doi:10.1002/9781119226895.ch1.
122. ELREFAIE, H. B., MEGAHED, A. I. Fault identification of double circuit lines. In: *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*. 2001, pp. 287-290, doi: 10.1049/cp:20010156. ISSN 0537-9989.
123. FORTESCUE, C.L. Method of symmetrical coordinates applied to solution pf polyphase network. In: *"Transaction of AIEE"*. 1918, vol. 33, Pt. 11, doi: 10.1109/PTC.2003.1304739.
124. GASHIMOV, A. M., BABAYEVA, A. R., KHIDIROV, F. L. Improvement the reliability of HV — Power transmission lines protection by means of modern devices and methods. In: *2015 Modern Electric Power Systems (MEPS)*. 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEPS.2015.7477182.
125. GUO, J., YANG, X., SI, J., REN, K., P. YU, KHAN, R. Modeling and Simulation of a Positive and Negative Sequence Component Separation for Grid Voltage Based on the Improved Method of Instantaneous Symmetrical Components. In: *Chinese Control And Decision Conference* . 2019, pp. 4231-4237, doi: 10.1109/CCDC.2019.8833394.
126. HAO, T., GAO, F. AND XU, T. FAST Symmetrical Component Extraction From Unbalanced Three-Phase Signals Using Non-Nominal dq –Transformation. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018, vol. 33, no. 11, pp. 9134-9141, Nov. doi: 10.1109/TPEL.2018.2822941.
127. HOROWITZ, S.H. THE FUTURE OF POWER TRANSMISSION S.H. HOROWITZ, A. G. PHADKE, B.A. Renz IEEE Power and Energy Magazine. In: *The Future of Power Transmission*. 2010, Vol. 8, no. 2. pp. 34-40. ISSN 1540-7977.
128. HUPING, Y., DONGWEN, W., YIN, G., Analysis on fault voltage and secondary arc current of single phase refusing-shut of the 500kV extra high voltage transmission line. In: *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. 2009, pp. 9-12, doi: 10.1109/PEITS.2009.5406902.
129. JAMEHBOZORG, A., SHAHRTASH, S. M. A Decision Tree-Based Method for Fault Classification in Double-Circuit Transmission Lines. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. Oct 2010, vol. 25, no. 4, pp. 2184-2189.2010.2050911. ISBN 0-7803-7459-2.

130. JOE-AIR, JIANG, CHWAN-LU, TSENG, CHI-SHAN YU, YUNG-CHUNG WANG AND CHING-SHAN, CHEN. Digital protective relaying algorithms for double circuit lines protection. Proceedings. In: *International Conference on Power System Technology*. 2002, vol.4, pp. 2551-2555, doi: 10.1109/ICPST.2002.1047246.
131. JULIO, R. C., RAMOS, G., CELEITA, D. F. Fault Analysis based on time-domain Symmetrical Components. In: *57th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS51807.2021.9416590.
132. KAPOOR, G. Wavelet Transform Based Detection and Classification of Multilocation Double Line to Ground Faults in Twelve Phase Series Capacitor Compensated Transmission Line. In: *5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/I2CT45611.2019.9033591.
133. 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.
134. 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*. Chișinău: 11-13 octombrie, 2017, pp. 225-230. ISBN 978-1-5386-1846-2.
135. 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.
136. 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.
137. KOJOVIC, L. A., WITTE, J. F. Improved protection systems using symmetrical components. In: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*. Atlanta, GA, USA: 2001, vol.1, pp. 47-52, doi: 10.1109/TDC.2001.971207. ISBN 0-7803-7285-9.
138. KOROBENNIKOV, B. A., SHESTACK, R. , ISHCENKO, A. I. Symmetrical Components Filters for Power System Protection Based on Converters with Rotating

- Magnetic Field. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2018.8440341.
139. KOROBEYNIKOV, B. AISHCHENKO, D., ISHCHENKO, A. I. Multi-phase Converters with Rotating Magnetic Field for Power System Protection. . In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/TD39804.2020.9299934.
 140. KULKARNI, S., A. B. PARIT Comparative analysis of three phase, five phase and six phase symmetrical components with MATLAB. In: *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*. 2017, pp. 182-186, doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073507.
 141. Lege Parlamentul Republica Moldova cu privire la energia electrică Nr. 107 din 27.05.2016. In: *Monitorul Oficial*. 08.07.2016, Nr. 193-203 art. 413.
 142. LIAO, H., JIANG X. Zero-sequence voltages of UHV untransposed double-circuit lines and their influence on pilot protection. In: *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. 2015, pp. 846-851, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432352. ISBN 978-1-4673-7105-6
 143. MARTIN, F., AGUADO, J. A., MEDINA, M., MUNOZ, J. Classification of faults in double circuit lines using Wavelet transforms. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIT.2008.4608397. ISBN 978-1-4244-1705-6.
 144. MUSTAFA, M. W., MEMBER, IEEE, AHMAD, M. R. *Fault Analysis on Double Three Phase to Six-Phase Converted Transmission Line*. Singapore: IEEE, January 2006. 5 p. ISBN:981-05-5702-7.
 145. NATSAGDORJ, C. , BAT-ERDENE, B. The fault of electrical transmission lines and function relay protection & automation. In: *International Forum on Strategic Technology*. 2007, pp. 221-223, doi: 10.1109/IFOST.2007.4798564.
 146. NECHITAIEV, R. A., NOVIKOV, N. L. Verification Modeling of Magnetic Field Influence on Power Transmission Line Losses. In: *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 2021, pp. 166-170, doi: 10.1109/APEIE52976.2021.9647530.
 147. NEVES, E. T., SILVA, E. Parametric sensitivity analysis of longitudinal and transverse differential protections applied to double circuit transmission lines. In: *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395685. ISBN 978-1-5386-3364-9.

148. PAPAZOGLU, T. M. Benchmarking a double-circuit OHL for transmission efficiency. In: *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*. 2010, pp. 1-3. ISBN 978-1-4244-7667-1.
149. PIERZ, P., ROSOLOWSKI, E., IZYKOWSKI, J., BALCEREK, P., SAHA, M. A method for internal and external fault discrimination for protection of series compensated double-circuit line. In: *IEEE Grenoble Conference*. 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2013.6652404. ISBN 978-1-84919-212-5.
150. POSTOLATY, V. M., BYCOVA, E. V. Innovative 10-110 kV compact controlled overhead lines. In: *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. 2018, pp. 310-326. ISBN 978-152253868-4, 1522538674, 978-152253867-7.
151. POSTOLATY, V. M., BYCOVA, E.V., BERZAN, V. Compact and Controllable Electric Lines. In: *Sielmen Proceedings of the 13th international conference on electromechanical and power systems*. 2019, p. 10-16. ISBN 978-172814011-7.
152. QIN, NAN. Voltage Control. In: *The Future Power Transmission Systems*. Springer, 2017, 253 p. ISBN-10 3319698850, ISBN-13 978-3319698854.
153. QING, CHEN, WILSON, XU, XIAOYU, WANG. A symmetrical component based method for fault analysis of double-circuit lines. In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2005, pp. 553-556, doi: 10.1109/CCECE.2005.1556991. ISSN 0840-7789.
154. REHMAN, B., LIU, C. Effect of Harmonics on Symmetrical Components of Power Network Using Least Square Method. In: *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582151.
155. RIZVI, I. A., REESER, G. "Using symmetrical components for internal external fault discrimination in differential protection schemes," In: *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX*. 2013, pp. 68-79, doi: 10.1109/CPRE.2013.6822028. ISBN 978-1-4799-0119-7.
156. SEKHAR, G. C., SUBRAMANYAM, P. S. Protection of Six Phase Transmission system of Allegheny Power System, USA against shunt faults. In: *International Conference on Smart Electric Grid*. 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISEG.2014.7005603
157. SHAALAN, H. Transmission line analysis using interval mathematics. In: *2012 North American Power Symposium (NAPS)*. 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAPS.2012.6336307.
158. SONG, S., HAO, Z., ZHANG, B., BO, Z. Analyzation of current characteristics on untransposed double-circuit lines. In: *International Conference on Advanced Power System*

Automation and Protection. 2011, pp. 1439-1443, doi: 10.1109/APAP.2011.6180738. ISBN 978-1-4244-9622-8.

159. TIMASHOVA, L., SHAKARIAN, Yu., KAREVA, S., POSTOLATY, V. M., BYCOVA, E. V., GORYUSHIN, Yu. 110–500 kV compact controlled overhead lines. In: *Управляемые электропередачи Сборник трудов лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АН Молдовы*. 2017, pp. 8-14. CZU: 621.311 .
160. **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.
161. **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.
162. UNDE, S. V., DAMBHARE, S. S. Double circuit transmission line parameter estimation using PMU. In: *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584163. ISBN 978-1-5090-0128-6.
163. VASILYEV, P. F., NESTEROV, A. S. Increasing the Capacity of the Double-Circuit Transmission Line in Emergency Mode. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934821.
164. VASILYEV, P. F., NESTEROV, A. S., MALEEVA, E. I. Increasing the Capacity of the Double-Circuit Transmission Line in Emergency Mode. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934821. ISBN 978-94-6252-929-8.
165. VAYTELENOK, L. Modeling and Analysis of Operation of the Symmetrical Components Digital Filters. In: *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867716.
166. WANG, A., CHEN, Q. A new algorithm for faults on double-circuit lines in phase coordinates. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2009.5275645. ISSN 1932-5517.
167. XIANDA, DENG. *Exploring Six-Phase Transmission Lines for Increasing Power Transfer with Limited Right of Way. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science*. Arizona: Arizona State University, December 2012. 128p. ISSN 0094-4467.

168. XIAO, L., SUN, H., GAO, F., HOU, S., LI, L. A new diagnostic method for winding short-circuit fault for srm based on symmetrical component analysis. In: *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 74-82. doi: 10.23919/CJEE.2018.8327374.
169. YINGDAN, QIU, HAIFENG, LI, LVXING, GUO, JIYANG, WU, YUANSHENG LIANG. A fault location method for double-circuit HVDC transmission lines on the same tower based on mixed modulus. In: *IEEE Eindhoven PowerTech*. 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2015.7232352. ISBN 978-1-4799-7693-5.
170. ZENK, H., AKPINAR, A. S. PI. PID and fuzzy logic controlled SSSC connected to a power transmission line, voltage control performance comparison. In: *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2013, pp. 1493-1497, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635836.
171. ZHANG, S., HAO, Z., CHAO, G., HUANG, M., BO, Z. A practical fault phase selection scheme for untransposed double-circuit transmission lines on the same tower. In: *International Conference on Power System Technology*. 2014, pp. 788-793, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993870.
172. ZHANG, T., CHEN, Q., GAO, Z., HUANG, D., TANG, Y. Fault diagnosis of double circuit lines on the same tower based on six-sequence component and expert system. In: *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*. 2012, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2012.0118. ISBN 978-1-84919-620-8.

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Ниже подписавшийся заявляю под личную ответственность, что материалы, представленные в докторской диссертации, являются результатом личных научных исследований и разработок. Осознаю, что в противном случае буду нести ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Туртурика Наталья

Подпись

Число

ОБ АВТОРЕ

Фамилия, имя:	Туртурика Наталья
Дата и место рождения:	13.07.1987, Тирасполь, Молдова.
Образование:	Высшее: • 2005-2010 ПГУ им. Т.Г. Шевченко Инженерно – технический институт, Тирасполь, специальность "Электроснабжение "; • 2012-2015 аспирантура Института Энергетики Академии Наук Молдовы, Кишинёв.
Профессиональная деятельность:	2010 – настоящее время. преподаватель кафедры ЭЭиЭТ, Инженерно-технический Институт, Университет им. Т.Г. Шевченко (г. Тирасполь)
Область научных интересов:	Электрические величины для релейной защиты УСВЛ(СВЛ)
Участие в научных форумах:	Международная конференция „Математическое моделирование в образовании, науке и производстве”, Тирасполь, 2011; Conferinței Științifice Internaționale a Doctoranzilor: <i>Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători</i> , Chișinău, 2015; Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2015, Chișinău, 2015; International Conference: Energy of Moldova - 2016. Regional aspects of development”, Chișinău, 2016; Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2017, Chișinău, 2017; Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2019, Chișinău, 2019. Conferinței Internaționale de Sisteme Electromecanice și Energetice Sielmen-2021, Chișinău, 2021; XI международная научная конференция, Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, Казань, 2021
Научные и научно-методические работы:	Опубликовано 11 научных статей
Контактная информация	
E-mail:	natalya_siti@mail.ru
Тел.	+37377823245