

АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНЖЕНЕРИИ
И НАНОТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ Д. ГИЦУ

На правах рукописи

УДК: 621.3.011.7: 621.314.1: 621.316: 514.8

ПЕНИН АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

ПРОЕКТИВНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ
И НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

233.02- ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Научный реферат диссертации на соискание
ученой степени доктора хабилитат технических
наук на основе опубликованных научных работ

КИШИНЕВ 2017

Работа выполнена в лаборатории криогеника Института Электронной Инженерии и Нанотехнологий имени Д. Гицу АН Молдовы.

Научный консультант: Сидоренко А. С., док. хаб. физ. - мат. наук, проф., член-корр. АН Молдовы, Институт Электронной Инженерии и Нанотехнологий имени Д. Гицу АН Молдовы.

Официальные оппоненты:

Маевский Дмитрий Андреевич, док. хаб. тех. наук, проф., зав. кафедрой теоретических основ и общей электротехники национального политехнического университета, г. Одесса;
Семенко Анатолий Илларионович, док. хаб. тех. наук, проф. кафедры телекоммуникационных систем и сетей Гос. университета телекоммуникаций, г. Киев.
КИОРСАК Михаил Васильевич, док. хаб. тех. наук, проф., зав. кафедрой Технического университета Молдовы.

Члены специализированного научного Совета ДН 03-233.02-01:

1. **ПОСТОЛАТИЙ В. М.**, председатель, док. хаб. тех. наук, академик АН Молдовы, зав. лаб. института Энергетики АН Молдовы
2. **ТЫРШУ М. С.**, ученый секретарь, док. тех. наук, директор института Энергетики АН Молдовы
3. **ОЛЕЩУК В. И.**, док. хаб. тех. наук, институт Энергетики АН Молдовы
4. **ЕРМУРАТСКИЙ В. В.**, док. хаб. тех. наук, институт Энергетики АН Молдовы,
5. **ОСАДЧУК А. В.**, док. хаб. тех. наук, проф., зав. кафедрой радиотехники национального технического университета, г. Винница
6. **ЕРХАН Ф. М.**, док. хаб. тех. наук, проф., зав. кафедрой Агарного универ. Молдовы
7. **АРИОН В. Д.**, док. хаб. тех. наук, проф., Технический универ. Молдовы
8. **КАТАРАНЧУК С. Г.**, док. хаб. мат. наук, проф., Гос. универ. Молдовы.

Защита состоится 9 февраля 2017г. в 15⁰⁰ часов на заседании спец. научного совета ДН 03-233.02-01 в институте Энергетики АНМ, ул. Академией, 5, MD-2028, Chişinău, Republica Moldova.

С научным рефератом можно ознакомиться в библиотеке Института Электронной Инженерии и Нанотехнологий имени Д. Гицу АН Молдовы и на сайте Национального Совета по Аттестации и Аккредитации (www.cnaa.md).

Научный реферат разослан 05 января 2017г.

Учёный секретарь спец. научного совета
ДН 03-233.02-01, док. тех. наук,

Тыршу М. С.

Научный консультант, док. хаб. физ. - мат. наук,
проф., член-корр. АН Молдовы,

Сидоренко А. С.

Автор, док. тех. наук,

Пенин А. А.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ (РУССКИЙ, РУМЫНСКИЙ, АНГЛИЙСКИЙ).....	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ОСОБЕННОСТИ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	15
1.1. Построение и режимы работы распределенных систем электропитания.....	15
1.2. Особенности анализа цепей.....	16
1.3. Недостатки некоторых известных методов анализа.....	18
1.3.1. Цепь с одной нагрузкой – активный двухполюсник.....	18
1.3.2. Активный четырехполюсник с двумя нагрузками.....	20
1.3.3. Теорема вариации параметров линейной цепи.....	21
1.3.4. Преобразователи (регуляторы) напряжения нагрузок с источником напряжения ограниченной мощности.....	23
1.4. Выводы к главе 1	26
2. ПРОЕКТИВНАЯ ГЕОМЕТРИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	28
2.1. Суть и место метода проективной геометрии в теории цепей	28
2.2. Необходимые сведения о проективной геометрии.....	29
2.3. Геометрическая интерпретация графических характеристик цепей.....	33
2.4. Виды цепей и структура задач.....	40
2.5. Выводы к главе 2	43

3. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА К РЕЗИСТИВНЫМ ЦЕПЯМ.....	44
3.1. Активные многополюсники.....	44
3.1.1. Проективные координаты. Перерасчет токов нагрузок.....	44
3.1.2. Изменяемое внутреннее сопротивление.....	49
3.1.3. Заданные нагрузки. Изменяемая проводимость в общей шине питания.....	52
3.2. Пассивные многополюсники.....	53
3.3. Выводы к главе 3	54
4. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА К ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РАБОЧИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	55
4.1. Преобразователь напряжения с одной нагрузки.....	55
4.1.1. Регулирование напряжения нагрузки.....	55
4.1.2. Стабилизация напряжения нагрузки.....	56
4.1.3. Потребитель неизменной мощности	58
4.1.4. Повышающий импульсный преобразователь.....	62
4.2. Два преобразователя напряжения с общим источником напряжения питания.....	64
4.4. Выводы к главе 4.....	66
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	67
БИБЛИОГРАФИЯ.....	68
ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ.....	73
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ.....	74
БЛАГОДАРНОСТИ	75
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	76

АННОТАЦИЯ

К научному реферату диссертации Пенина А. А. «Проективная геометрия в теории электрических цепей с переменными и нелинейными нагрузками», представленной на соискание ученой степени доктора хабилитат технических наук (на основе опубликованных научных работ), Кишинев, 2017. Научный реферат содержит введение, четыре главы, общие выводы и рекомендации, 92 ссылки, 72 страниц основного текста, 56 рисунков. Полученные результаты опубликованы в 45 научных работах, включая 2 монографии, две главы в книгах, 20 статей в международных журналах, 4 статьи в национальных, 8 докладов на международных и национальных конференциях, 8 национальных патентов.

Ключевые слова: электрическая цепь, многополюсник, преобразователь напряжения, нагрузка, вольт – амперная и регулировочная характеристика, нормированные параметры, проективные преобразования, сложное отношение.

Область исследования: теоретическая электротехника, силовая электроника.

Цель и задачи: исследование «механизма» взаимовлияния элементов цепи с использованием положений проективной геометрии, раскрытии дополнительных свойств цепей и разработка на этой основе метода расчета параметров режима цепей.

Научная новизна и оригинальность настоящего исследования состоит в: предложенном методе анализа цепей на основе проективной геометрии; обосновании определения параметров режима цепей в относительном виде; формулировании сути нового научного направления.

Новое научное направление: групповые характеристики изменяемых режимов работы цепей, инвариантные к виду параметров режима и участкам цепи.

Теоретическая значимость работы состоит в: применении математического аппарата для интерпретации рабочих характеристик цепей; определении параметров режима цепей в относительном виде; формулах перерасчета параметров режима; обобщении эквивалентного генератора.

Практическая значимость работы состоит в: удобных алгоритмах перерасчета режимов цепи; упрощенных схемах замещения исходной цепи.

Реализация научных результатов состоит в: разработке технических решений (патентов) для передачи измерительных сигналов через линии связи; создания параметрических источников тока; линеаризации регулировочных характеристик преобразователей напряжения.

ADNOTARE

La referatul științific al tezei lui Penin A. “ Geometria proiectivă în teoria circuitelor electrice cu sarcini variabile și neliniare”, prezentată pentru gradul de doctor habilitat în tehnică (bazată pe lucrări științifice publicate), Chișinău, 2017.

Referatul științific conține o introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, 92 referințe bibliografice, 72 de pagini de text de bază, 56 de figuri. Rezultatele obținute sunt publicate în 45 lucrări științifice, inclusiv 2 monografii, 2 capitole în cărți, 20 articole în reviste internaționale, 4 articole în cele naționale, 8 lucrări la conferințele internaționale și regionale, 8 brevete de invenție naționale.

Cuvinte cheie: circuit electric, multipol, convertor de tensiune, sarcină, caracteristica volt-ampere și de reglare, parametri normalizați, transformări proiective, raport anarmonic.

Domeniul de studiu: Bazele teoretice ale electrotehnicii, electronică de putere.

Scopul și obiectivele: cercetarea "mecanismului" de interferență a elementelor circuitului cu utilizarea prevederilor geometriei proiective, dezvoltarea unor proprietăți suplimentare și elaborarea în bază a metodei de calcul a parametrilor regimului circuitelor electrice.

Noutatea și originalitatea științifică a acestui studiu constă în: metoda propusă de analiză a circuitului bazată pe geometria proiectivă; justificarea determinării parametrilor regimului de circuite în mod relativ; justificarea și formularea unei noi direcții științifice.

O nouă direcție științifică: caracteristicile de grup ale regimurilor de lucru variabile a circuitelor, invariante relativ tipului parametrilor regimului și porțiunii de circuit.

Semnificația teoretică a lucrării constă în: aplicarea de noi instrumente matematice pentru interpretarea caracteristicilor de lucru a circuitelor; determinarea parametrilor regimului de circuit sub forma relativă; formule de recalculare a parametrilor regimului, generalizarea generatorului echivalent.

Semnificația practică a lucrării constă în: utilizarea algoritmilor convenabile de recalculare a regimurilor de circuit, schemelor simplificate de substituție a circuitului inițial.

Implimentarea rezultatelor științifice constă în: elaborarea soluțiilor tehnice (brevete) pentru transmiterea semnalelor de măsurare prin liniile de comunicație; punerea în aplicare a surselor de curent parametric; liniarizarea caracteristicilor de reglare a convertoarelor de tensiune.

ABSTRACT

Of the scientific review of the habilitate doctor thesis “Projective geometry in the electrical circuit theory with variable and nonlinear loads.” in technic (based on published articles), presented by A. Penin, Chisinau, 2017. The review contains Introduction, 4 Chapters, General conclusions and recommendations, 92 references, 72 pages, 56 figures. The 45 scientific works were published, including two monographs, two books chapters, 20 research articles in international scientific journals, 4 articles in national journals, 8 abstracts in proceedings/books of international or national conferences and 8 national patents.

Keywords: electrical circuit, multi-port, voltage converter, load, volt-ampere and regulation characteristic, normalized parameters, projective transformations, cross ratio.

Field of research: electric circuit theory, power electronics.

The aim and objectives of the work consists in: the research of interference's „mechanism” of circuit’s elements using projective geometry, disclose of supplementary properties of the circuits and elaboration the calculation method of regime parameters.

The scientific novelty and originality of the research consists in: offered method of the analysis of circuits on the basis of projective geometry; justification of determination of regime parameters in a relative type; justification and a formulation of the new scientific direction.

The New scientific direction: group characteristics of changeable operating regimes of circuits, which are invariant to a type of the regime parameters and sections of circuits.

The theoretic value of the research consists in: the application of a new mathematical apparatus in the electric circuit theory for interpretation of changes or “kinematics” of electric circuits’ regimes; determination of regime parameters in a relative type; recalculation formulas of regime parameters; generalization of the equivalent generator.

The practical value of the research consists in: the convenient recalculation algorithms of loads’ currents; the simplified equivalent circuits of an initial network.

Implementation of scientific results consists in: development of original technical solutions (patents) for transfer of measuring signals via communication lines; elaboration of parametrical sources of load current; linearization of regulation characteristics of voltage converters.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

1. *ПН* – преобразователь напряжения
2. *ВАХ* – вольт - амперная характеристика
3. *ХХ* – режим холостого хода
4. *КЗ* – режим короткого замыкания
5. *ПНМ* – потребитель неизменной мощности

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задач исследования

Системы электропитания различного назначения (цифровые и телекоммуникационные системы, контрольно-измерительная аппаратура, технологическое оборудование, системы автоматики и телемеханики, охранные системы и т.д.) обычно представляют распределенную структуру (микросеть). В подобные системы входят источники энергии (основные и резервные), накопители энергии (например, аккумулятор, суперконденсатор), нагрузки и соответствующие согласующие преобразователи напряжения. Все указанные элементы подключены к общей или главной шине питания. В качестве источников энергии также используются возобновляемые источники энергии.

Система питания с общей шиной постоянного тока обладают рядом преимуществ по сравнению с шиной переменного тока. Эти преимущества достигаются за счет высоких параметров преобразователей напряжения как элементов силовой электроники. Если система питания связана с центральной сетью переменного тока, то используются инверторы напряжения. Для низковольтных нагрузок применяются импульсные и линейные стабилизаторы, расположенные рядом с нагрузкой.

Для проведения анализа или моделирования работы системы питания (например, в *Matlab*) необходимы математические модели источников напряжения, преобразователей напряжения, накопителей, нагрузок и самой цепи. В частности, стабилизированные преобразователи напряжения (с заданной мощностью нагрузки) ведут себя как потребители неизменной мощности или нелинейные нагрузки.

Анализ режимов работы является одной из основных задач теории электрических цепей. Нахождение фактических (абсолютных) значений параметров режима (напряжение, ток) и удельных показателей (коэффициент передачи по напряжению, по мощности) является характерной задачей анализа, включая энергетические показатели. Поэтому используются статические характеристики входящих элементов. В связи с этим, такая система питания представляет сложную цепь постоянного тока с определенным числом источников напряжения ограниченной мощности и нагрузок. Преобразователи постоянного напряжения являются трансформаторами постоянного тока. Резистивная сеть определяет потери преобразователей и линий питания. Таким образом, имеет место взаимовлияние и ограничение мощности нагрузок, двузначность регулировочных и входных вольт-амперных характеристик преобразователей напряжения.

Для определения эффективности системы питания необходимо сопоставить фактические значения параметры текущего режима с их характерными или максимальными (как масштабы) значениями, т.е. представить в нормированном или относительном виде. В этом случае возрастает информационное содержание параметров режима; можно оценить качественные характеристики текущего режима, сравнить режимы разных систем. Например, величина напряжения холостого хода и ток короткого замыкания будут соответствующими масштабами для напряжения и тока нагрузок. Но взаимовлияние нагрузок изменяет все эти возможные масштабы. Аналогично, изменение параметров режима в «разах» или «процентах» можно определить через разность и\или отношение (или еще каким образом) исходного и последующего значения. В этом смысле, для регулировочных характеристик стоит аналогичная задача - обоснованно задать изменение режима относительно максимально допустимых значений в однозначной области.

В общем случае, расчет текущих режимов работы связан со значительными затратами времени расчета. Поэтому, для резистивной сети предлагаются удобные формулы расчета потерь. Также разрабатываются более быстрые методы моделирования (аналоговые, комбинированные) и расчета.

С другой стороны, использование только компьютерных систем расчета не показывает физический смысл и «механизм» взаимовлияния элементов цепи. Поэтому, использование базовых положений теории электрических цепей с учетом изменяемых нагрузок (теорема об эквивалентном генераторе активной цепи, линейные соотношения между токами и напряжениями, теорема вариации) дает, как понимание процессов взаимовлияния элементов цепи, так и более простые методы анализа. Однако, известные методы анализа и расчета не достаточно развиты и не раскрывают полезные в практике свойства исследуемых цепей. Поэтому, необходимо более глубокое изучение свойств электрических цепей с переменными (изменяемыми) режимами работы, что составляет содержание нового научного направления.

Новое научное направление: *групповые характеристики изменяемых режимов работы цепей, инвариантные к виду параметров режима и участкам цепи.*

Целью работы является

исследование «механизма» взаимовлияния элементов цепи с использованием положений проективной геометрии и разработка на этой основе метода расчета фактических и нормированных параметров режима линейных электрических цепей и преобразователей напряжения с нелинейными (двузначными) характеристиками в квазистационарных переменных режимах.

Задачи исследования

- провести анализ известных подходов нормирования параметров режима и методов перерасчета;
- предложить классификацию электрических цепей, обосновать математические (геометрические) модели по виду цепей, режимам работы и числу нагрузок;
- выявить дополнительные характерные режимы помимо типовых (режимы холостого хода и короткого замыкания);
- обосновать показатели режима, инвариантные к виду величин (параметров) режима и участкам цепи;
- разработать метод перерасчета токов нагрузок при изменении нагрузок и параметров резистивной цепи;
- развить известный метод эквивалентного генератора;
- исследовать инвариантные соотношения вход-выход многополюсников;
- обосновать методологию определения однозначной области рабочих режимов преобразователей напряжения с двузначными характеристиками;
- предложить выражения для изменения показателей режима (законы регулирования) типовых преобразователей напряжения с двумя и более нагрузками.

Методы и средства исследования

Для решения поставленных задач использовались базовые положения теории электрических цепей, силовой электроники (преобразовательной техники) и математический аппарат, новый для теории цепей, - проективная и гиперболическая геометрия. Для расчетов и моделирования применялись математические системы *Maple*, *Matlab* и система схемотехнического проектирования *ORCAD*.

Научная новизна состоит в:

- обосновании и формулировании сути нового научного направления – групповые характеристики изменяемых режимов работы цепей, инвариантные к виду параметров режима и участкам цепи;
- предложенном методе анализа цепей постоянного тока и преобразователей напряжения на основе проективной геометрии и её подгрупп;
- использовании семейств рабочих характеристик цепей для выявления всех точек характерных режимов работы, обосновании обобщенного эквивалентного генератора;
- формулировании требований для определения параметров режима цепей в относительном виде с учетом точек характерных режимов, независимости к виду переменных и участков цепи и вывода формул перерасчета параметров режима.

Теоретическая значимость работы состоит в:

- оригинальном применении нового для теории цепей математического аппарата для интерпретации рабочих характеристик цепей;
- определении параметров режима цепей в относительном виде, инвариантном к виду переменных и участкам цепи;
- выводе формул перерасчета параметрах режима, введении обобщенного эквивалентного генератора;
- методике определения однозначной рабочей области типовых преобразователей напряжения с нелинейными двузначными характеристиками.

Практическая ценность работы состоит в:

- применение относительных выражений для анализа, задания и сравнения режимов цепей;
- разработке оригинальных технических решений (патентов) для передачи измерительных сигналов через многопроводные линии связи с потерями;
- простых и удобных формул перерасчета режимов цепи;
- применение обобщенного эквивалентного генератора для упрощения расчетов цепи и разработки оригинальных технических решений (патентов) для реализации параметрических источников тока;
- разработке оригинальных технических решений (патентов) для линеаризации регулировочных характеристик повышающего и инвертирующего импульсного преобразователя напряжения;
- предложенных выражений для организации управления преобразователями напряжения с нелинейными характеристиками.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Детальный анализ известных методов определения параметров режима работы в относительном виде на ряде типовых цепей постоянного тока и преобразователей напряжения.
2. Использование принципов проективной геометрии для интерпретации вольт- амперных характеристик линейных цепей постоянного тока и преобразователей напряжения с нелинейными вольт- амперными и регулировочными характеристиками;
3. Классификацию электрических цепей, геометрических моделей и структуру задач по виду резистивных цепей, режимов преобразователей напряжения и числу нагрузок;
4. Определение и использование дополнительных характерных (вырожденных) режимов;
5. Определение параметров режимов в относительном виде с системой точек характерных режимов, инвариантных к виду переменных и участкам цепи
6. Формулы перерасчета параметров режима при изменении нагрузок и параметров цепи;
7. Понятие сбалансированной цепи с тремя и более нагрузками;
8. Модифицированный или обобщенный эквивалентный генератор;
9. Применение инвариантных соотношений вход-выход многополюсников;
10. Понятие фактора загрузки параллельно соединенных источников напряжения.

Апробация работы

Материалы работы докладывались на следующих международных и региональных научно- технических конференциях в Молдове:

1. The 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering ICNBME-2015, Sept. 23-26, 2015, Chisinau, Moldova.
2. The 5th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics ICTEI- 2015, May 20-23, 2015, Chisinau, Moldova.
3. The 8th International Conference on Microelectronics and Computer Science: The 50th anniversary of Technical University of Moldova ICMCS-2014, Oct. 22-25, 2014, Chisinau, Moldova.
4. The 4th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics ICTEI- 2012, May 17-20, 2012, Chisinau, Moldova.
5. The 20th Conference on Applied and Industrial Mathematics dedicated to academician Mitrofan M. Ciobanu CAIM-2012, Aug 22- 25, 2012, Chisinau, Moldova.
6. The 7th International Conference on Microelectronics and Computer Science, ICMCS-2011, Sept 22-24, 2011, Chisinau, Moldova.

7. Conferința Fizicienilor din Moldova CFM-2014, Oct 22-25, 2014, Chisinau, Moldova.
8. Conferința Fizicienilor din Moldova CFM-2012, Oct 24-26, 2012, Belti, Moldova.

Публикации

На основе проведенных исследований было опубликовано 45 научных работ: 2 монографии, 2 главы в книгах, 24 статьи в рецензируемых журналах (Российская АН, международные журналы (одна статья в журнале с импакт фактором), из них 18 статей без соавторов), 8 докладов на международных и региональных конференциях, 8 патентов на изобретения. Публикации приведены в библиографии.

Структура научного реферата

Научный реферат содержит введение (общая характеристика работы), четыре главы, общие выводы и рекомендаций. Работа состоит из 72 страниц основного текста, содержит 56 рисунков, 92 ссылки на литературу.

Ключевые слова: электрическая цепь, активный многополюсник, преобразователь напряжения, переменная нагрузка, расчет токов, вольт – амперная и регулировочная характеристика, нормированные параметры режима, проективная геометрия, сложное отношение, стереографическая проекция, конформная плоскость, гиперболическая геометрия.

1. ОСОБЕННОСТИ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Построение и особенности режимов работы распределенных систем электропитания

Системы электропитания различного назначения (цифровые и телекоммуникационные системы, контрольно- измерительная аппаратура, технологическое оборудование, системы автоматики и телемеханики, охранные системы и т.д.) обычно представляют распределенную структуру (микросеть). В подобные системы входят источники энергии (основные и резервные), накопители энергии (например, аккумулятор, суперконденсатор), нагрузки и соответствующие согласующие преобразователи напряжения ПН. Все указанные элементы подключены к общей или главной шине питания [1-7]. В качестве источников энергии также используются возобновляемые источники энергии [8-14]. Типовая система распределенного электропитания (далее - система питания) показана на рисунке 1.1. Контроллер управления и мониторинга (на рисунке 1.1 не показан) связан со всем элементами системы.

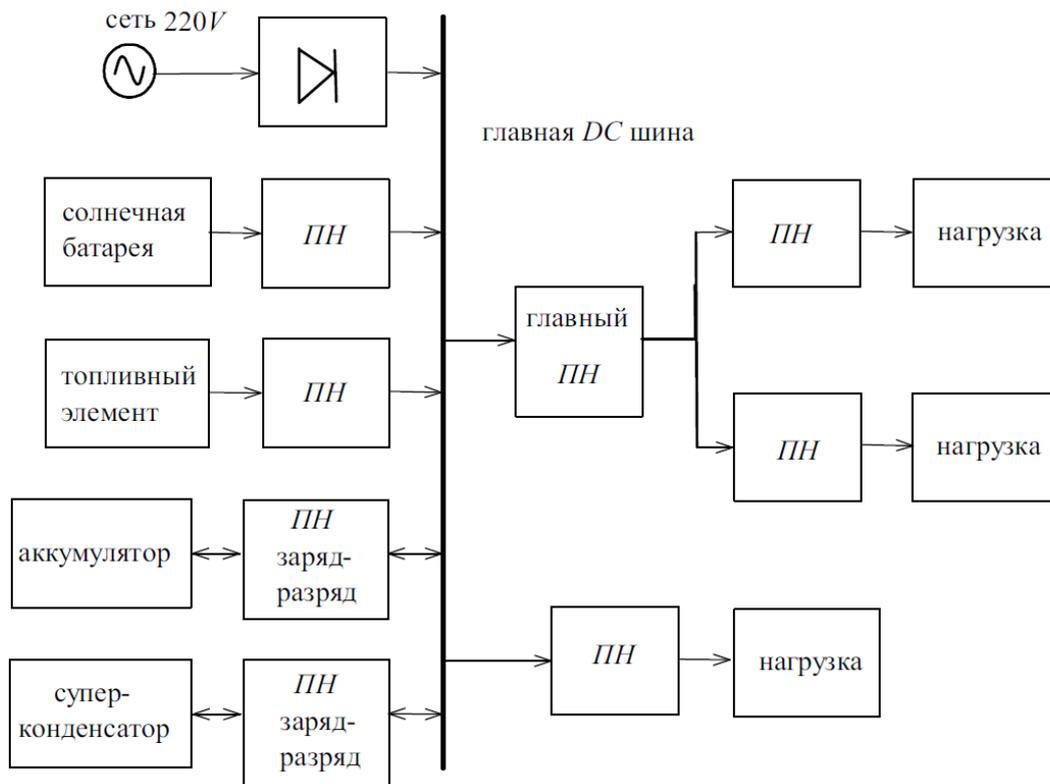


Рис.1.1. Типовая система распределенного электропитания

Система питания с общей шиной постоянного тока DC обладают рядом преимуществ по сравнению с шиной переменного тока [15-17]. Эти преимущества достигаются за счет высоких параметров $ПН$ как элементов силовой электроники [18, 19]. Если система питания связана с центральной сетью переменного тока, то используются инверторы напряжения [20, 21]. Для низковольтных нагрузок применяются импульсные и линейные стабилизаторы, расположенные рядом с нагрузкой [22, 23]. Солнечная батарея используется с преобразователем или регулятором поиска точки максимальной мощности [24-27].

Для проведения анализа или моделирования (например, в *Matlab*) работы системы питания необходимы математические модели источников напряжения, $ПН$, накопителей, нагрузок и самой цепи [28-31]. В частности, стабилизированные $ПН$ с заданной мощностью нагрузки ведут себя как потребители неизменной мощности $ПНМ$ или нелинейные нагрузки для изменяемого напряжения питания. Поэтому возникает проблема обеспечения устойчивости [32-34]. Также, условие устойчивости определяет максимальную мощность нескольких нагрузок при питании от источника напряжения конечной мощности [35]. Для обеспечения устойчивости используется скоординированное управление элементами сети [36-39]. Один из вариантов скоординированного управления является прогнозирующее управление [40, 41].

1.2. Особенности анализа цепей

Анализ режимов работы является одной из основных задач теории электрических цепей [42-45]. Нахождение фактических (абсолютных) значений параметров режима (напряжение, ток) и удельных показателей (коэффициент передачи по напряжению, по мощности) является характерной задачей анализа [46, 47], включая энергетические показатели приведенной системы на рисунке 1.1. Поэтому используются статические характеристики входящих элементов [48-50]. В связи с этим, такая система питания представляет сложную цепь постоянного тока с определенным числом источников напряжения ограниченной мощности и нагрузок на рисунке 1.2. Преобразователи напряжения DC/DC являются трансформаторами постоянного тока. Резистивная сеть определяет потери $ПН$ и линий питания. Таким образом, имеет место взаимовлияние и ограничение мощности нагрузок, двузначность регулировочных и входных вольт-амперных характеристик $ВАХ$ преобразователей напряжения.

Для определения эффективности системы питания необходимо сопоставить фактические значения параметры текущего режима с их характерными или максимальными (как

масштабы) значениями, т.е. представить в нормированном или относительном виде [51,52]. В этом случае возрастает информационное содержание параметров режима, можно оценить качественные характеристики текущего режима, сравнить режимы разных систем. Например, величина напряжения холостого хода $XХ$ и ток короткого замыкания $KЗ$ будут соответствующими масштабами для напряжения и тока нагрузок. Но взаимовлияние нагрузок изменяет все эти возможные масштабы. Аналогично, изменение параметров режима в «размах» или «процентах» можно определить через разность и/или отношение (или еще каким образом) исходного и последующего значения. В этом смысле, для регулировочных характеристик стоит аналогичная задача - обоснованно задать изменение режима относительно максимально допустимых значений в однозначной области.

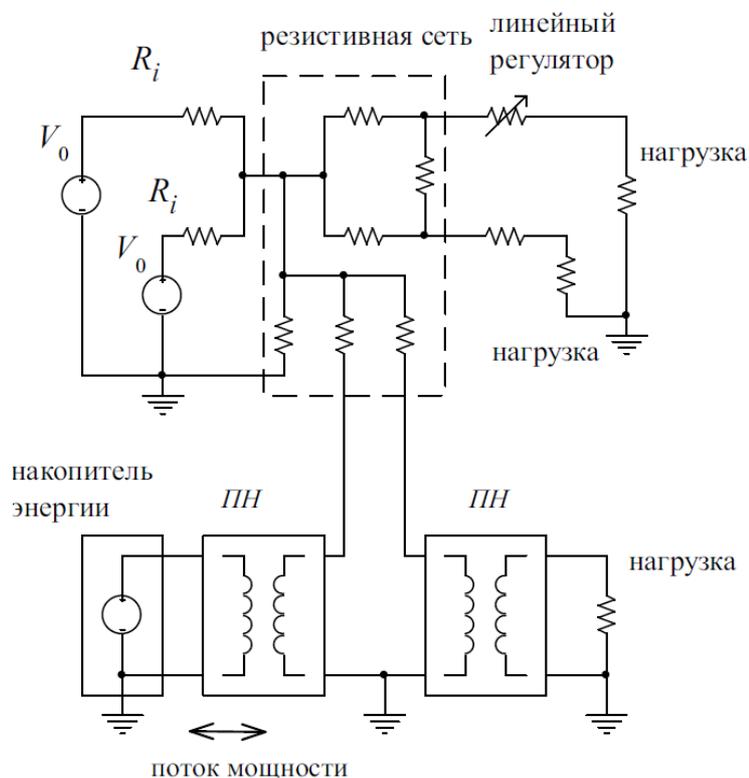


Рис.1.2. Упрощенная схема замещения системы питания.

В общем случае, расчет текущих режимов работы связан со значительными затратами времени расчета. Поэтому, для резистивной сети предлагаются удобные формулы расчета потерь [53, 54]. Также разрабатываются более быстрые методы моделирования (аналоговые, комбинированные) и расчета [55-57].

С другой стороны, использование только компьютерных систем расчета не решает задачу понимания физического смысла и «механизм» взаимовлияния элементов цепи.

Поэтому, использование базовых положений теории электрических цепей с учетом изменяемых нагрузок (теорема об эквивалентном генераторе активной цепи, линейные соотношения между токами и напряжениями, теорема вариации) дает как понимание процессов взаимовлияния элементов цепи, так и более простые методы анализа [58-62].

Однако, известные методы не полностью раскрывают особенности цепей с переменными элементами, что снижает эффективность анализа. Используя схему замещения на рисунке 1.2, выберем простые и важные в практике цепи. Анализ таких характерных цепей покажет недостатки известных методов и даст направление для более глубокого изучения подобных цепей.

1.3. Недостатки некоторых известных методов анализа

1.3.1. Цепь с одной нагрузкой - активный двухполюсник

Простейшая цепь в виде эквивалентного генератора активного двухполюсника с переменной нагрузкой R_L показана на рисунке 1.3. Нагрузочная прямая линия или *ВАХ* определяется линейным выражением

$$I_L = \frac{V_0}{R_i} - \frac{V_L}{R_i} = I_L^{SC} - \frac{V_L}{R_i}, \quad (1.1)$$

где R_i внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, I_L^{SC} ток КЗ.

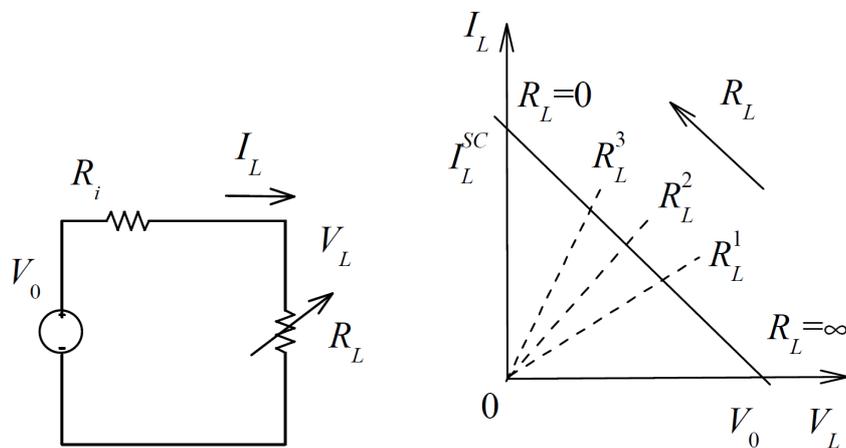


Рис.1.3. Эквивалентный генератор и *ВАХ* активного двухполюсника

Нагрузочной прямой линии соответствует нелинейная градуировка в значениях сопротивления нагрузки от нуля до бесконечно большого значения.

Используя очевидные масштабные величины, получаем нормированные параметры текущего режима

$$\frac{V_L}{V_0}, \frac{I_L}{I_L^{SC}}, \frac{R_L}{R_i}. \quad (1.2)$$

Полученные величины обладают разными значениями, что усложняет анализ.

Ситуация усложняется в случае изменение режима

$$R_L^1, I_L^1, V_L^1 \rightarrow R_L^2, I_L^2, V_L^2.$$

Известны такие нормированные или относительные выражения

$$\frac{I_L^2}{I_L^1}, \frac{I_L^2 - I_L^1}{I_L^{SC}} = \frac{\Delta I_L^{21}}{I_L^{SC}}, \frac{I_L^2 - I_L^1}{I_L^2 + I_L^1}, \frac{\Delta I_L^{21}}{I_L^1}. \quad (1.3)$$

Аналогичные выражения для остальных параметров R_L, V_L .

Получаются привычные «разы» и «проценты», но эти величины также имеют разные значения. Возникает естественный вопрос, какие требования надо положить к определению изменения режима; как задать «одинаковые» изменения режима для разных исходных рабочих точек?

Пусть режим ещё раз изменился, $R_L^2, V_L^2, I_L^2 \rightarrow R_L^3, V_L^3, I_L^3$. Но тогда можем ввести результирующее изменение $R_L^1, V_L^1, I_L^1 \rightarrow R_L^3, V_L^3, I_L^3$.

Поэтому возникает вопрос о выполнении группового свойства (операция умножения или сложения) - будет ли конечное изменение режима выражаться через промежуточные изменения? Для пояснения распишем выражения (1.3)

$$\frac{I_L^3}{I_L^1} = \frac{I_L^3}{I_L^2} \cdot \frac{I_L^2}{I_L^1}, \frac{\Delta I_L^{31}}{I_L^{SC}} = \frac{\Delta I_L^{32}}{I_L^{SC}} + \frac{\Delta I_L^{21}}{I_L^1} - \text{групповое свойство выполняется,}$$

$$\frac{I_L^3 - I_L^1}{I_L^3 + I_L^1} \neq \frac{I_L^3 - I_L^2}{I_L^3 + I_L^2} \cdot \frac{I_L^2 - I_L^1}{I_L^2 + I_L^1}, \frac{\Delta I_L^{31}}{I_L^1} \neq \frac{\Delta I_L^{32}}{I_L^2} + \frac{\Delta I_L^{21}}{I_L^1} - \text{групповое свойство не выполняется.}$$

Возникает противоречие, – для одних показателей групповое свойство выполняется, а для других нет. Таким образом, показатели должны вводиться с каких – то общих позиций.

Активный двухполюсник с изменяемым сопротивлением. Пусть активный двухполюсник А помимо основной нагрузки R_{L1} содержит ещё и изменяемое сопротивление (дополнительную нагрузку) R_{L2} на рисунке 1.4. Видно, что изменяется напряжения XX и ток $KЗ$ как масштабы или параметры эквивалентного генератора. Поэтому нормированные параметры текущего режима приводят к неопределенности анализа.

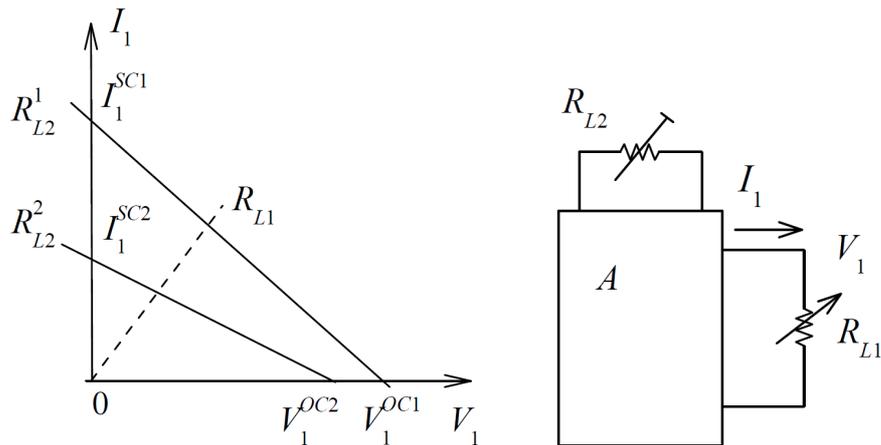


Рис.1.4. Семейство VAX активного двухполюсника с изменяемым сопротивлением

Следовательно, необходимо использовать такие масштабные или базовые величины, которые не зависят от дополнительной нагрузки.

Нестабильный четырехполюсник. Рассмотрим передачу измерительного сигнала или расчёта проводимости резистивного датчика через нестабильный (влияние температуры, наводок и т.д.) четырехполюсник на рисунке 1.5.

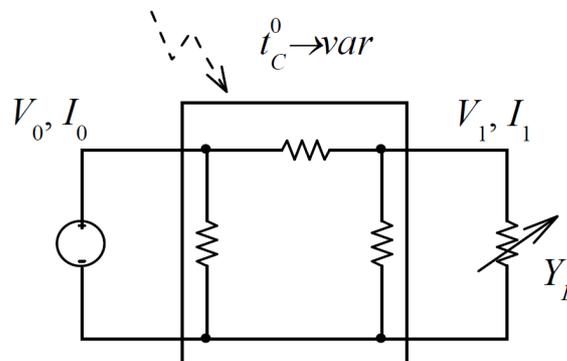


Рис.1.5. Пример нестабильного четырехполюсника.

Естественно, зная параметры передачи четырехполюсника, по измеренным входным токам можно рассчитать проводимость нагрузки. Но для определения постоянно изменяемых параметров необходимо организовывать режимы XX и $KЗ$ или манипуляции на входе и выходе, что не всегда технически удобно для удаленных датчиков.

1.3.2. Активный четырехполюсник с двумя нагрузками

Для цепи на рисунке 1.6 явно проявляется взаимовлияние переменных нагрузок - изменяется наклон нагрузочных характеристик или прямых линий $V_2(V_1, Y_{L1})$, $V_2(V_1, Y_{L2})$.

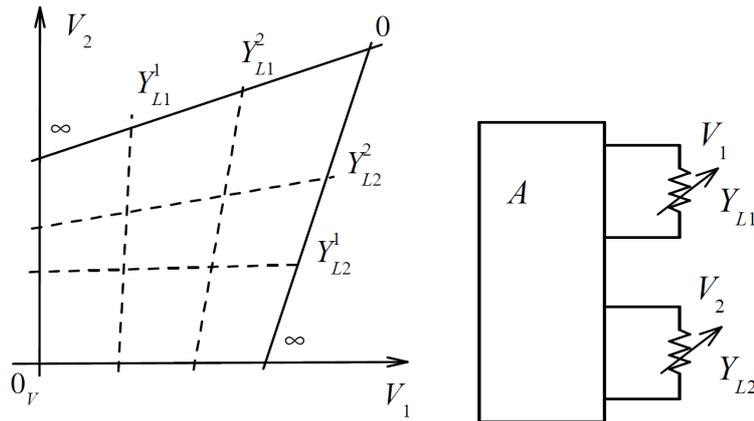


Рис.1.6. Семейство нагрузочных характеристик активного четырехполюсника

Видно, что изменяются напряжения V_1 и V_2 двух нагрузок как масштабы для возможного нормирования текущего режима. Можно ли ввести независимые от нагрузок масштабные или базовые величины?

Активные многополюсники. В этом случае набор параметров, нормированных выражений и масштабов увеличивается.

1.3.3. Теорема вариации параметров линейной цепи

Рассмотрим задачу перерасчета токов при изменении сопротивления нагрузок или теорему вариации, которая имеет давнюю историю [63-65]. Идея в том, чтобы всю цепь не перерасчитывать, а получить прямые выражения для изменения $R \rightarrow I$.

Пусть исходный режим цепи с двумя нагрузками соответствует режиму КЗ. Токи нагрузок равны соответственно I_1^{SC}, I_2^{SC} . Далее режим изменяется; обозначим первые значения нагрузок R_{L1}^1, R_{L2}^1 на рисунке 1.7.

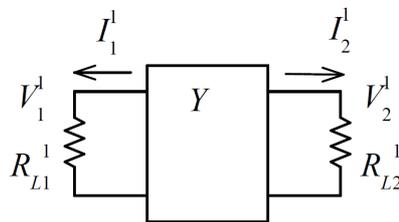


Рис.1.7. Активная цепь с первыми значениями сопротивления нагрузок.

Используем матричное уравнение активного четырехполюсника

$$\begin{bmatrix} I_1^1 \\ I_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & -Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^{SC} \\ I_2^{SC} \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

$$V_1^1 = R_{L1}^1 I_1^1, V_2^1 = R_{L2}^1 I_2^1, \Delta_Y = Y_{11} Y_{22} - (Y_{12})^2.$$

Тогда получаем уравнение цепи

$$\begin{bmatrix} 1 + Y_{11} R_{L1}^1 & -Y_{12} R_{L2}^1 \\ -Y_{12} R_{L1}^1 & 1 + Y_{22} R_{L2}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1^1 \\ I_2^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^{SC} \\ I_2^{SC} \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Решение этого уравнения

$$\begin{cases} I_1^1 = \frac{I_1^{SC} + R_{L2}^1 (Y_{22} I_1^{SC} + Y_{12} I_2^{SC})}{1 + Y_{11} R_{L1}^1 + Y_{22} R_{L2}^1 + R_{L1}^1 R_{L2}^1 \Delta_Y} = I_1^1(I_1^{SC}, I_2^{SC}, R_{L1}^1, R_{L2}^1) \\ I_2^1 = \frac{I_2^{SC} + R_{L1}^1 (Y_{11} I_2^{SC} + Y_{12} I_1^{SC})}{1 + Y_{11} R_{L1}^1 + Y_{22} R_{L2}^1 + R_{L1}^1 R_{L2}^1 \Delta_Y} = I_2^1(I_1^{SC}, I_2^{SC}, R_{L1}^1, R_{L2}^1). \end{cases} \quad (1.6)$$

Сразу можно отметить проблему – как получить нормированные выражения для токов?

Если формально ввести традиционные нормированные величины токов $\frac{I_1^1}{I_1^{SC}}, \frac{I_2^1}{I_2^{SC}}$, то в

числителях выражения (1.6) получаются взаимные величины $\frac{I_2^{SC}}{I_1^{SC}}, \frac{I_1^{SC}}{I_2^{SC}}$. Поэтому не

получаются чисто относительные выражения для возможного сравнения режимов разных цепей (даже без учета знаменателя).

Перерасчет токов. Пусть вторые значения нагрузок равны R_{L1}^2, R_{L2}^2 . Тогда выражения для токов (1.6) вычисляются относительно тех же токов SC

$$I_1^2 = I_1^2(I_1^{SC}, I_2^{SC}, R_{L1}^2, R_{L2}^2), \quad I_2^2 = I_2^2(I_1^{SC}, I_2^{SC}, R_{L1}^2, R_{L2}^2). \quad (1.7)$$

Возникает естественная задача - выразить последующие значения токов через предыдущие значения токов.

Представим вторые значения сопротивления нагрузок через приращения

$$R_{L1}^2 = \delta R_{L1}^{21} + R_{L1}^1, R_{L2}^2 = \delta R_{L2}^{21} + R_{L2}^1.$$

Из выражений (1.7) исключаем токи I_1^{SC}, I_2^{SC} . Тогда вторые значения токов относительно первых значений

$$I_1^2 = I_1^2(I_1^1, I_2^1, \delta R_{L1}^{21}, \delta R_{L2}^{21}, R_{L1}^1, R_{L2}^1), \quad I_2^2 = I_2^2(I_1^1, I_2^1, \delta R_{L1}^{21}, \delta R_{L2}^{21}, R_{L1}^1, R_{L2}^1). \quad (1.8)$$

Получаются громоздкие выражения. Также, в эти выражения входят первые значения сопротивления нагрузок, т.е., не выполняются групповые свойства. Поэтому нет возможности сопоставить изменение режима цепей.

В этом смысле желаемое групповое свойство должно имеет вид

$$I_1^2 = I_1^2(I_1^1, I_2^1, m_1^{21}, m_2^{21}), \quad I_2^2 = I_2^2(I_1^1, I_2^1, m_1^{21}, m_2^{21}). \quad (1.9)$$

Величины $m_1^{21}(R_{L1}^1, R_{L2}^1), m_2^{21}(R_{L1}^1, R_{L2}^1)$ - какие-то возможные безразмерные или относительные изменения сопротивлений нагрузок.

Что это дает? Третьи значения токов будут выражаться через промежуточные величины

$$I_1^3 = (I_1^1, I_2^1, m_1^{31}, m_2^{31}) = (I_1^2, I_2^2, m_1^{32}, m_2^{32}), \quad I_2^3 = (I_1^1, I_2^1, m_1^{31}, m_2^{31}) = (I_1^2, I_2^2, m_1^{32}, m_2^{32}),$$

$$m_1^3 = m_1^{32} \cdot m_1^2 = m_1^{32} \cdot m_1^{21} \cdot m_1^1 = m_1^{31} \cdot m_1^1, \quad m_2^3 = m_2^{32} \cdot m_2^2 = m_2^{32} \cdot m_2^{21} \cdot m_2^1 = m_2^{31} \cdot m_2^1.$$

В этом случае возможно прямое сопоставление изменения режима цепей.

1.3.4. Преобразователи (регуляторы) напряжения нагрузок с источником напряжения ограниченной мощности

В системах питания с ограниченной мощностью источника питания наблюдается взаимовлияние и ограничение мощности нагрузок, двузначность регулировочных характеристик. Для определенности рассмотрим систему с двумя преобразователями ПН1, ПН2 или регуляторами напряжениями на рисунке 1.8.

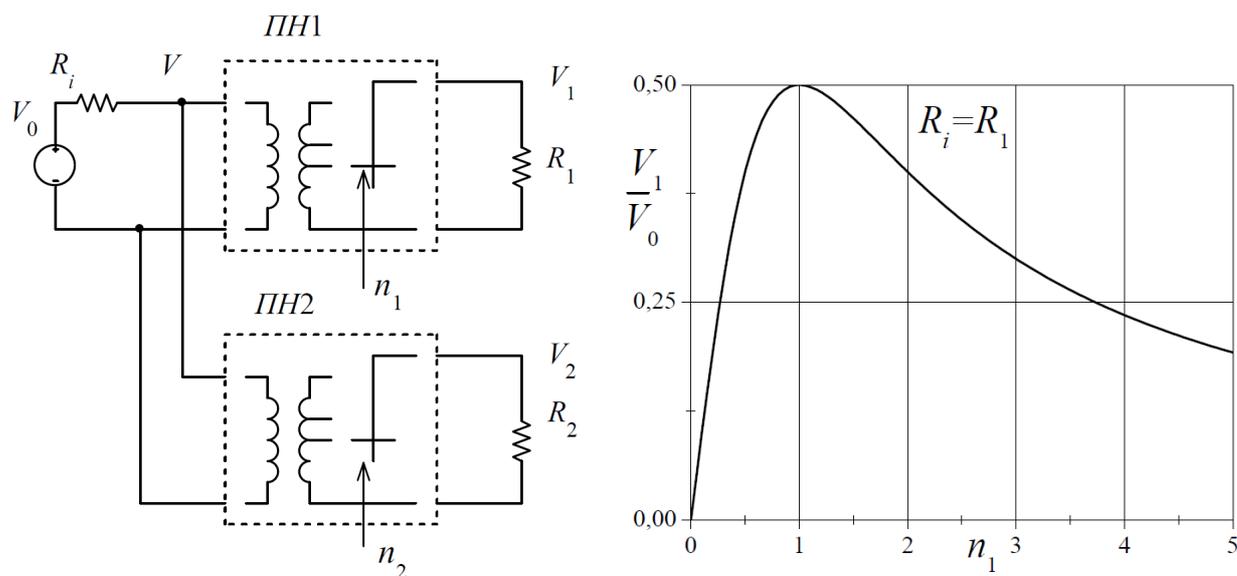


Рис.1.8. Система питания и регулировочная характеристика преобразователя напряжения.

Таковыми преобразователи могут быть преобразователи с переключаемыми отводами обмоток трансформаторов (дискретно-исполнительные органы), многоячейковые, повышающие импульсные преобразователи [66].

По определению, регулируемые коэффициенты трансформации или коэффициент

передачи по напряжению $n_1 = \frac{V_1}{V}, n_2 = \frac{V_2}{V}$.

Пусть режим работы задан условиями $V_1 = \text{const}$, $V_2 = \text{var}$. Тогда на плоскости $V_1 V_2$ получается семейство прямых линий, а на плоскости $n_1 n_2$ - характерное семейство окружностей, рисунок 1.10. Это семейство окружностей представляет преобразование Мебиуса комплексной переменной [67]

$$n^2(n^1) = \frac{n^1 \cos \alpha + i \sin \alpha}{in^1 \sin \alpha + \cos \alpha}, \quad n = n_1 + in_2. \quad (1.12)$$

Указанные траектории соответствуют группе вращений сферы на заданный угол α . Но может получиться, что на каком-то шаге в цикле переключения рабочая точка перейдет за экватор сферы, а значение напряжения V_2 пойдет на уменьшение, что недопустимо. Поэтому лучше использовать такое групповое преобразование, чтобы рабочая точка находилась в однозначной области, т.е. внутри круга $(n_1)^2 + (n_2)^2 < 1$, $n_{1M} = n_{2M} = 1$.

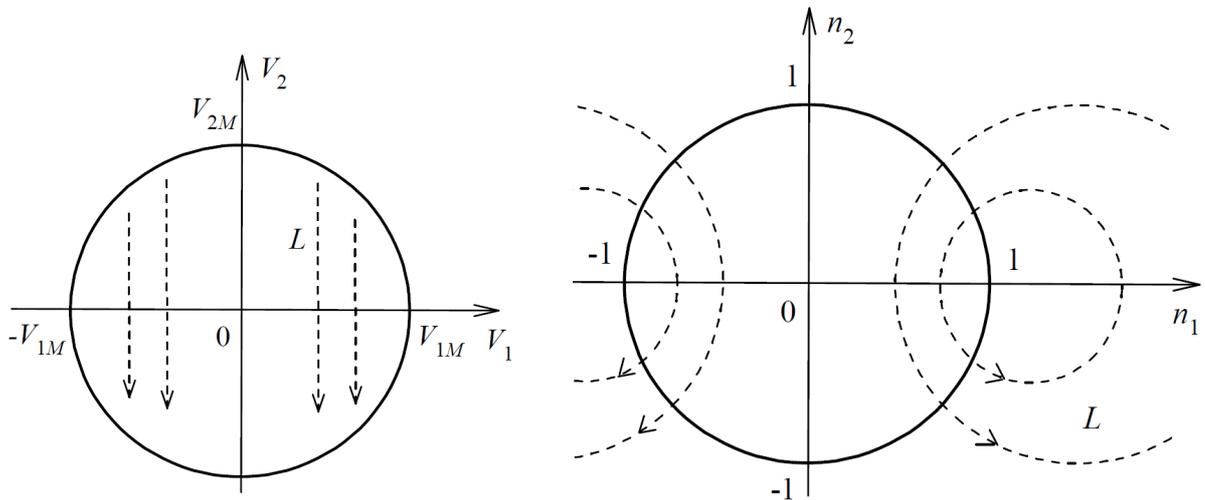


Рис.1.10. Траектории рабочих точек для переменных V_1, V_2 и n_1, n_2 .

Повышающий импульсный преобразователь. Сопротивление R потерь дросселя L приводит к характерной двузначной регулировочной характеристики такого преобразователя на рисунке 1.11. Уравнение регулировочной характеристики [68]

$$V_L = V_0 \frac{1-D}{(1-D)^2 + (\sigma)^2}, \quad \frac{R}{R_L} = (\sigma)^2, \quad (1.13)$$

где D – относительная длительность импульсов управления, σ - потери.

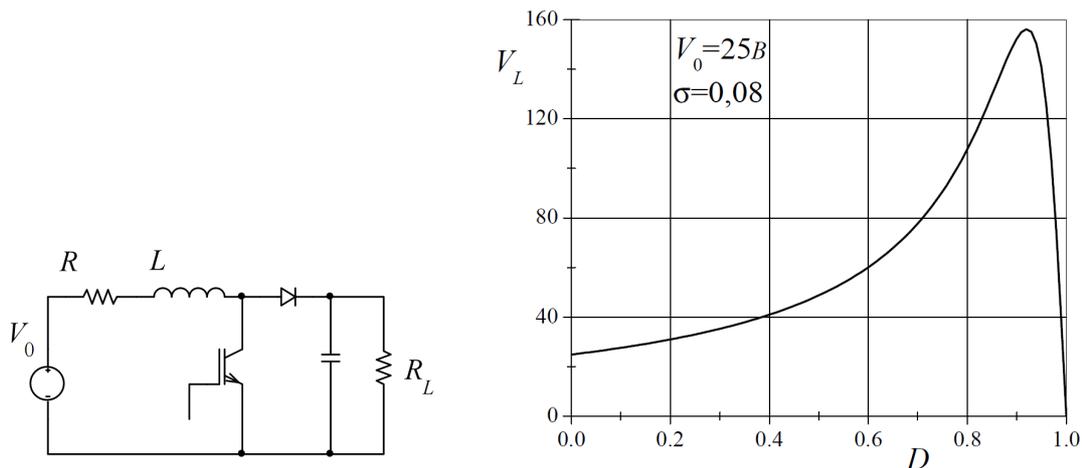


Рис.1.11. Схема и регулировочная характеристика повышающего ШИМ преобразователя.

Если ввести скважность [48]

$$n = \frac{1}{1-D} \geq 1,$$

то получаем уравнение, аналогичное (1.11)

$$V_L = V_0 \frac{n_1}{1 + (\sigma n_1)^2}.$$

Также, максимальное значение напряжения нагрузки $V_{LM} = V_0 / 2\sigma$, допустимые значения $D_M = 1 - \sigma$ и $n_M = 1/\sigma$ определяются потерями. Отсюда возникает проблема нормирования текущих параметров режима для сравнения преобразователей с разными потерями.

Похожие вопросы характерны для широкого класса устройств силовой электроники с нелинейными VAX и регулировочными характеристиками: стабилизаторы напряжения, инвертирующие импульсные преобразователи, потребители неизменной мощности и т.д.

1.4. Выводы к главе 1

1. Рассмотренные примеры цепей и методов показывают, что отсутствует общий и обоснованный подход и критерии (по сути - теория) для составления нормированных или относительных выражений. Поэтому «очевидное», но формальное их введение и использование приводит к неопределенности при их выборе и даже противоречиям. Это в большей степени проявляется при усложнении электрической цепи: увеличивается число характерных значений параметров режима, увеличивается число самих параметров режима, проявляется нелинейность и двузначность характеристик.

2. Чтобы исключить формальное введение относительных режимов, необходимо достаточно строго подойти к их определению на ряде разобранных примеров цепей, которые наиболее просто продемонстрирует предлагаемый подход.

3. Более глубокое изучение электрических цепей с изменяемыми параметрами элементов и режимами работы ставит задачу о подходящем математическом аппарате для интерпретации зависимостей параметров режима и выявления ещё не раскрытых свойств таких цепей, что составляет содержание **нового научного направления: групповые характеристики изменяемых режимов работы цепей, инвариантные к виду параметров режима и участкам цепи.**

4. В связи с изложенным, **целью работы** является *исследование «механизма» взаимовлияния элементов цепи с использованием положений проективной геометрии и разработка на этой основе метода расчета фактических и нормированных параметров режима линейных электрических цепей и преобразователей напряжения с нелинейными (двузначными) характеристиками в квазистационарных переменных режимах.*

5. В соответствии с этим, необходимо решить *следующие задачи:*

- провести анализ известных подходов нормирования параметров режима и методов перерасчета;
- предложить классификацию электрических цепей, обосновать математические (геометрические) модели по виду цепей, режимам работы и числу нагрузок;
- выявить дополнительные характерные виды режимов помимо типовых (режимы XX , $K3$);
- обосновать показатели режима, инвариантные к виду величин (параметров) режима и участкам цепи;
- разработать метод перерасчета токов нагрузок при изменении нагрузок и параметров резистивной цепи;
- развить известный метод эквивалентного генератора;
- исследовать инвариантные соотношения вход-выход многополюсников;
- обосновать методологию определения однозначной области рабочих режимов преобразователей напряжения с двузначными характеристиками;
- предложить выражения для изменения показателей режима (законы регулирования) типовых преобразователей напряжения с двумя и более нагрузками.

2. ПРОЕКТИВНАЯ ГЕОМЕТРИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

2.1. Суть и место метода проективной геометрии в теории цепей

Как было показано выше в разделе 1.2, использование базовых положений теории электрических цепей (теорема об эквивалентном генераторе активной цепи, линейные соотношения между токами и напряжениями, теорема вариации) дает понимание процессов взаимовлияния элементов цепи. Теперь покажем развитие этих базовых положений, выделенных полужирным шрифтом на рисунке 2.1.

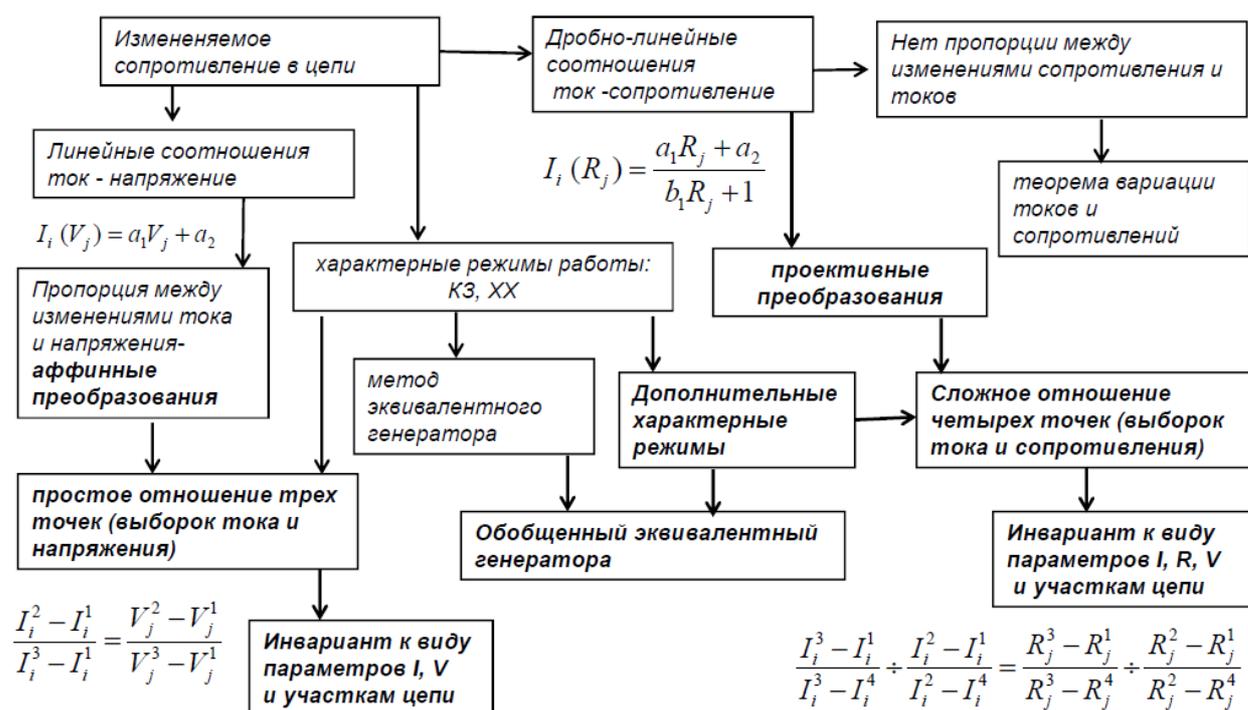


Рис.2.1. Развитие базовых положений теории цепей.

При изменении какого – либо сопротивления в цепи имеют место известные линейные соотношения между токами и/или напряжениями на разных участках цепи или аффинные преобразования $(V_j) \rightarrow (I_i)$. Поэтому проявляется пропорции между изменениями этих параметров. Отсюда следует простое отношение трех точек (выборок), как инвариант аффинного преобразования. В свою очередь, дробно- линейные соотношения между токами и изменяемым сопротивлением рассматриваем как проективное преобразование. Также отметим проявление дополнительных характерных режимов. Отсюда следует инвариант - сложное отношение (отношение двух простых отношений) четырех точек (выборок) параметров режима и обобщение эквивалентного генератора.

Таким образом, исследование «механизма» взаимовлияния элементов цепи с привлечением проективной геометрии позволяет раскрыть дополнительные свойства цепей, что составляют содержание настоящей работы.

2.2. Необходимые сведения о проективной геометрии

Рассмотрим прямую линию a и треугольник ABC в плоскости α и β соответственно на рисунке 2.2. Спроектируем эти фигуры на плоскости α' и β' , используя точки O как центры проектирования. В результате такого центрального проектирования получаем соответственно прямую линию a' и треугольник $A'B'C'$. Полученные проекции отличаются от исходных фигур. В частности, нарушаются пропорции длины отрезков.

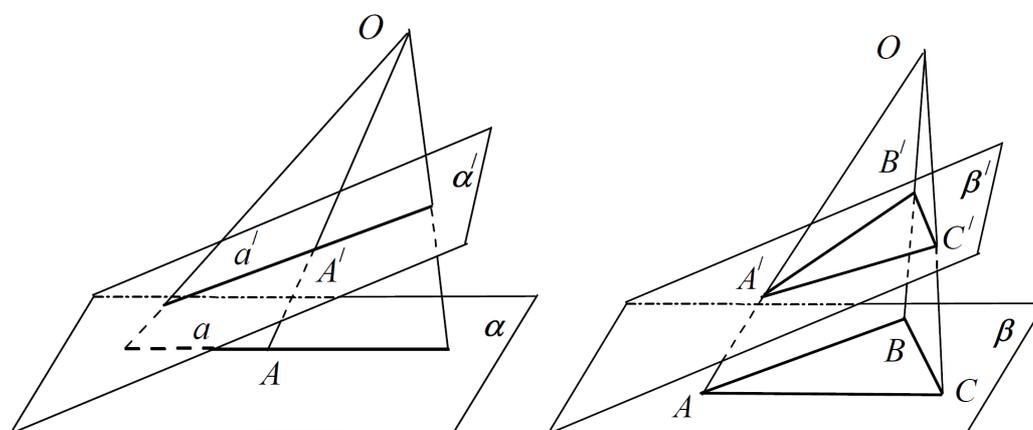


Рис.2.2. Проекция (преобразование) фигур в разных плоскостях.

С другой стороны, фигуры обладают свойствами, которые сохраняются при проектировании, и с фигурами могут быть сопоставлены величины, также сохраняющиеся при любом проектировании. Такие свойства и величины называются инвариантами проектирования. Именно эти свойства и величины составляют объекты исследования в проективной геометрии [69]. Аналогично можно рассмотреть проекции фигур в совмещенных плоскостях (или одной плоскости) на рисунке 2.3.

Преобразования (или движения) фигуры на плоскости задаются проективными преобразованиями $(x, y) \rightarrow (x', y')$ в виде дробно-линейных выражений [69, 70]

$$x' = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + c_3}, \quad y' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + c_3}. \quad (2.1)$$

Также можно отобразить точки на совмещенных прямых линиях $a \rightarrow a''$, используя центр проекции O' на рисунке 2.3.

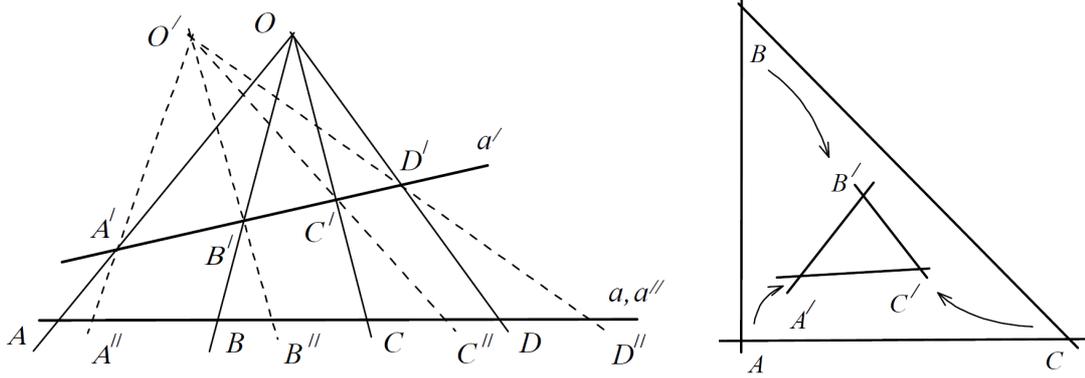


Рис.2.3. Проекции (преобразования) фигур в одной плоскости.

В этом случае получается одномерное преобразование $x \rightarrow x'$

$$x' = \frac{a_1 x + a_3}{c_1 x + c_3}. \quad (2.2)$$

В частности, точки A, D могут совпадать соответственно с точками A'', D'' , т.е. точки A, D являются неподвижными. В теории проективных преобразований неподвижные точки играют особую роль. Две действительные точки соответствуют гиперболическому преобразованию или гиперболической (Лобачевского) геометрии.

Инвариантом проективного преобразования является сложное отношение (двойная пропорция) координат четырех точек на прямой линии [71-74]

$$(A B C D) = \frac{B-A}{B-D} \div \frac{C-A}{C-D} = (A' B' C' D') = (A'' B'' C'' D''). \quad (2.3)$$

Известное аффинное преобразование представляет собой частный случай проективного преобразования. В этом случае инвариантом является простое отношение (обычная пропорция) трех точек. В свою очередь, Евклидовое преобразование - частный случай аффинного, сохраняет обычную длину отрезка. Для наглядности, вид аффинного и проективного преобразований относительно исходной прямоугольной декартовой сетки координат представлен на рисунке 2.4.

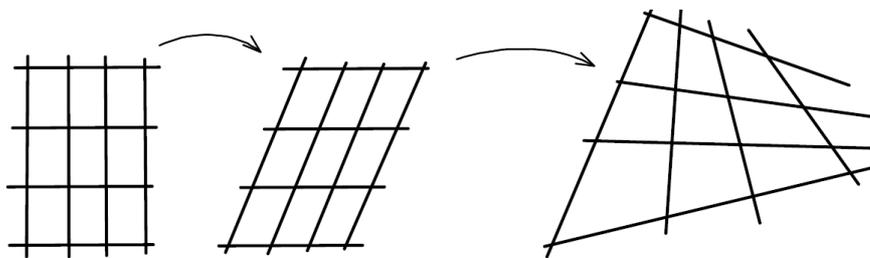


Рис.2.4. Декартова сетка при аффинном и проективном преобразовании.

Необходимо отметить и преобразование Мебиуса (проективные преобразования комплексной переменной) исходной прямоугольной декартовой сетки координат на рисунке 2.5. В полученной конформной плоскости сохраняется сложное отношение четырех точек на дугах окружностей.

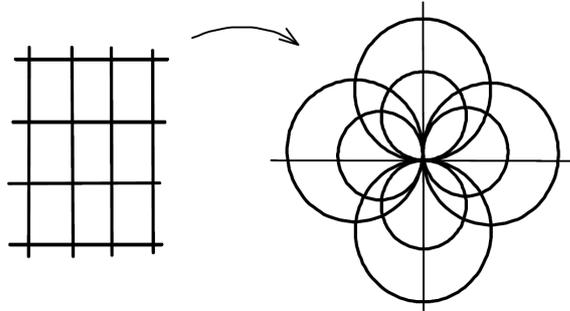


Рис.2.5. Конформное преобразование Мебиуса.

Координаты точки в Евклидовой и проективной плоскости. Пусть в Евклидовой плоскости заданы декартовы координаты X, Y на рисунке 2.6.

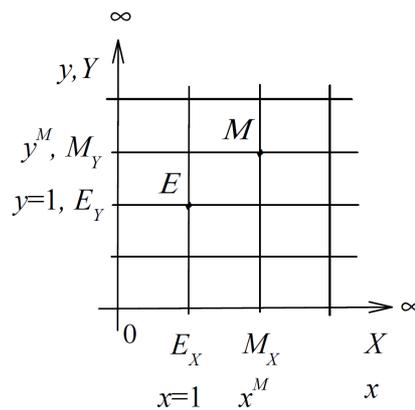


Рис.2.6. Декартовы координаты X, Y .

Пусть точка E - единичная (масштабная) точка. Тогда координаты точки M

$$x^M = \frac{M_X}{E_X}, y^M = \frac{M_Y}{E_Y}. \quad (2.4)$$

Проективная плоскость в отличие от Евклидовой плоскости дополняется бесконечно удаленной прямой линией ∞ [75]. Тогда сетка координат в проективной плоскости представляет два пучка прямых линий с центрами пучков в бесконечно удаленных точках ∞ на рисунке 2.7. Осям координат X, Y соответствует нелинейная градуировка.

С другой стороны, вводятся оси I_1, I_2 с линейной градуировкой. Поэтому, координатный треугольник $G_1 0 G_2$ определяет два вида координат.

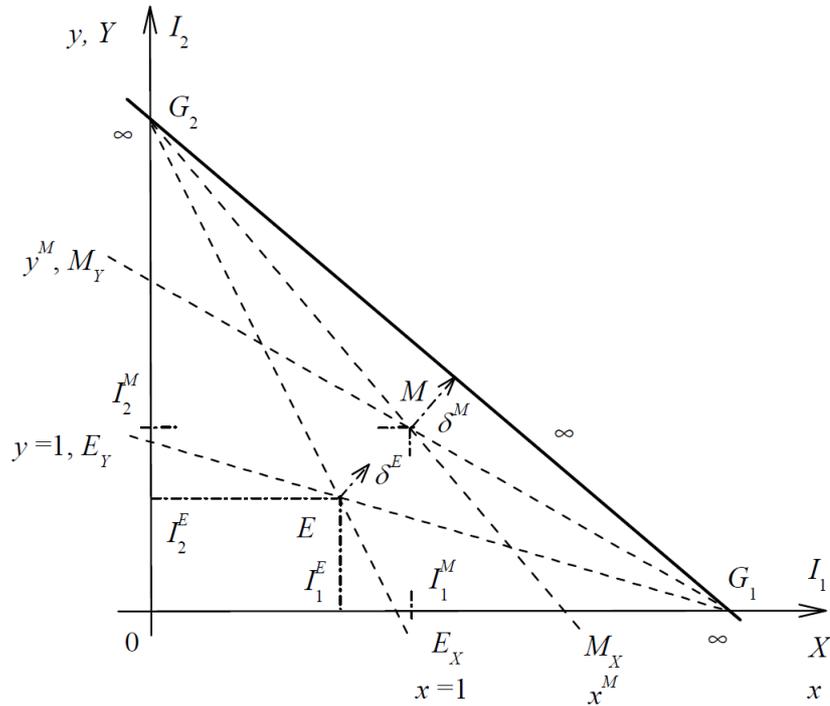


Рис.2.7. Сетка координат X, Y в проективной плоскости как два пучка прямых.

Неоднородные координаты точки M соответствуют сложному отношению

$$x^M = (0 M_X E_X \infty) = \frac{M_X - 0}{E_X - 0} \div \frac{M_X - \infty}{E_X - \infty} = \frac{M_X}{E_X}, \quad y^M = (0 M_Y E_Y \infty) = \frac{M_Y}{E_Y}. \quad (2.5)$$

Полученные выражения совпадают с (2.4) в виду выбора крайних точек $0, \infty$.

Для устранения неопределенности, когда точка находится на бесконечно удаленной прямой линии ∞ , вводятся однородные координаты (пропорциональные отношениям расстояний точек M, E до сторон координатного треугольника)

$$\xi_1^M \sim \frac{I_1^M}{I_1^E}, \quad \xi_2^M \sim \frac{I_2^M}{I_2^E}, \quad \xi_\infty^M \sim \frac{\delta^M}{\delta^E}. \quad (2.6)$$

В свою очередь, отношения однородных координат задают неоднородные координаты

$$x^M = \frac{\xi_1^M}{\xi_\infty^M}, \quad y^M = \frac{\xi_2^M}{\xi_\infty^M}. \quad (2.7)$$

Необходимые сведения о гиперболической (Лобачевского) геометрии. Известна конформная модель Пуанкаре гиперболической геометрии в круге на рисунке 2.8. Соответствующая окружность определяет бесконечно удаленную границу или абсолют. Прямые линии изображаются полуокружностями, ортогонально пересекающими абсолют.

Преобразования Мебиуса оставляют неподвижным абсолютом и сохраняют сложное отношение четырех точек (2.3)

$$(A B C D) = (A B' C' D). \quad (2.8)$$

Точки A, D являются неподвижными. Расстояние $H(B, C)$ между точками B, C

$$H(B C) = H(B' C') = Ln(A B C D). \quad (2.9)$$

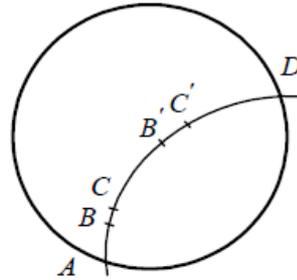


Рис.2.8. Конформная модель Пуанкаре гиперболической геометрии.

2.3. Геометрическая интерпретация графических характеристик цепей

Рассмотрение уравнений и графических характеристик ряда простых цепей показывает возможность интерпретации последних основными положениями проективной геометрии. Рассмотрим конкретные примеры [76].

Цепи с одной нагрузкой. Проективные координаты рабочей точки на прямой линии.

Уравнение активного двухполюсника на рисунке 2.9 имеет дробно-линейный вид

$$V_L = V_0 \frac{R_L}{R_i + R_L}. \quad (2.10)$$

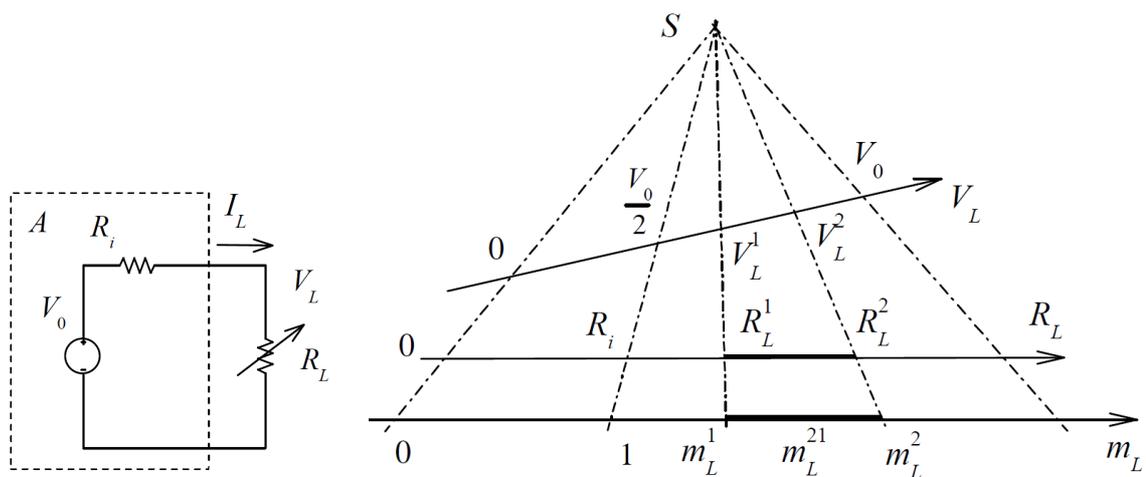


Рис.2.9. Активный двухполюсник и проективное преобразование $R_L \rightarrow V_L$.

Это дает основание считать отображение $R_L \rightarrow V_L$ как одномерное проективное преобразование [76]. Проективное преобразование задается центром проекции S или тремя парами соответственных точек. В качестве пар соответственных точек удобно использовать точки характерных режимов, которые определяются на качественном уровне, например, точки режимов $XX, K3$, максимальной мощности.

Составим сложное отношение m_L^1 четырех точек, где четвертыми точками являются точки текущего режима R_L^1, V_L^1, I_L^1

$$m_L^1 = (0 R_L^1 R_i \infty) = \frac{R_L^1}{R_i} = (0 V_L^1 \frac{V_0}{2} V_0) = \frac{V_L^1}{V_0 - V_L^1} = (I_L^{SC} I_L^1 \frac{I_L^{SC}}{2} 0). \quad (2.11)$$

Сложное отношение в геометрии ложится в основу определения расстояния между точками $R_L^1, R_L = R_i$ относительно крайних или базовых значений $0, \infty$. Сама точка R_i является масштабной или единичной. Таким образом, проективная координата точки текущего режима или относительный режим задается числом m_L , которое равным образом определяется через различные параметры режима типа R_L, V_L, I_L .

В свою очередь, изменение режима $R_L^1 \rightarrow R_L^2$ (соответственно $V_L^1 \rightarrow V_L^2, I_L^1 \rightarrow I_L^2$)

$$m_L^{21} = (0 R_L^2 R_L^1 \infty) = \frac{R_L^2}{R_L^1} = (0 V_L^2 V_L^1 V_0) = \frac{V_L^2}{V_0 - V_L^2} \div \frac{V_L^1}{V_0 - V_L^1} = (I_L^{SC} I_L^2 I_L^1 0). \quad (2.12)$$

Имеют место необходимые групповые свойства сложного отношения, $m_L^2 = m_L^{21} m_L^1$.

Для последующего изменение режима $R_L^2 \rightarrow R_L^3$ также проявляются групповые свойства

$$m_L^3 = m_L^{32} m_L^2 = m_L^{32} m_L^{21} m_L^1 = m_L^{31} m_L^1. \quad (2.13)$$

Пусть теперь необходимо задать одинаковые изменения режима m_L^{21} , но для разных точек исходных режимов. Для этого из (2.12) получим в явном виде выражение $V_L^2(V_L^1)$

$$\frac{V_L^2}{V_0} = \frac{\frac{V_L^1}{V_0} m_L^{21}}{\frac{V_L^1}{V_0} (m_L^{21} - 1) + 1}. \quad (2.14)$$

Полученное преобразование с параметром m_L^{21} переводит точку исходного режима V_L^1 в последующую точку V_L^2 . В этом случае, параметр m_L^{21} образует отрезок неизменной «длины», а рисунок 2.10 соответствует движению этого отрезка по замкнутой проективной прямой линии V_L . При приближении к базовым (или неподвижным) точкам $0, V_0$ евклидова (обычная) длина уменьшается до нуля, а потом увеличивается при

переходе во внешнюю область. Внешняя область соответствует участкам ВАХ с отрицательным значением сопротивления нагрузки и означает обратную отдачу энергии в источник напряжения. Поэтому в бесконечно удаленной точке $R_L = -R_i$ градуировки ВАХ совпадут для областей $V_L > V_0, V_L < 0$.

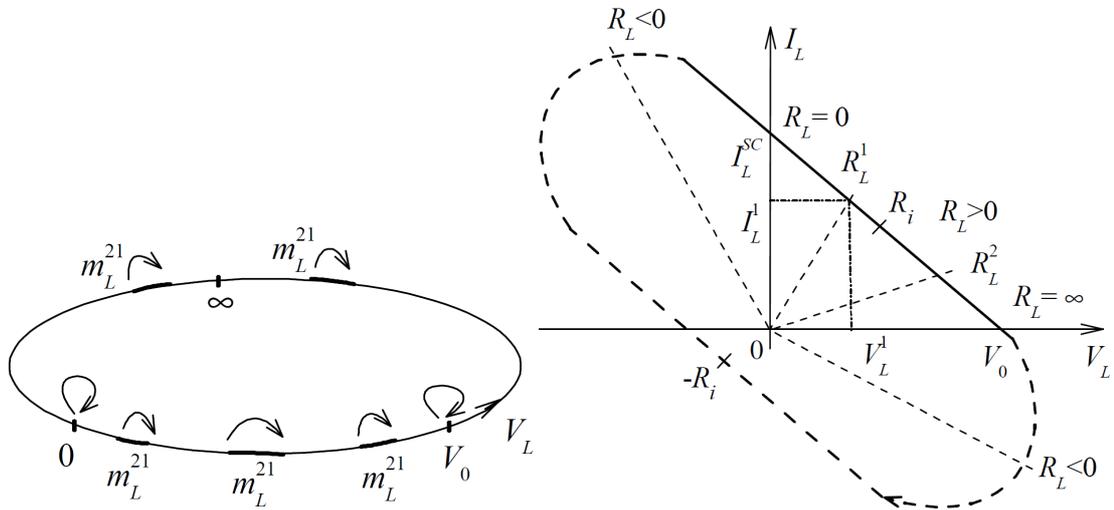


Рис.2.10. Движение отрезка неизменной «длины» по проективной прямой линии и ВАХ как замкнутая проективная прямая линия.

Для нахождения неподвижных точек решается уравнение (2.14) при условии $V_L^1 = V_L^2$. Поэтому получаем два действительных корня $V_L = 0, V_L = V_0$, что соответствует гиперболическому преобразованию.

Частные случаи. Уравнение ВАХ определяется линейным соотношением

$$I_L = \frac{V_0}{R_i} - \frac{V_L}{R_i} = I_L^{SC} - \frac{V_L}{R_i}. \quad (2.15)$$

Подобное выражение определяет аффинное преобразование на рисунке 2.11.

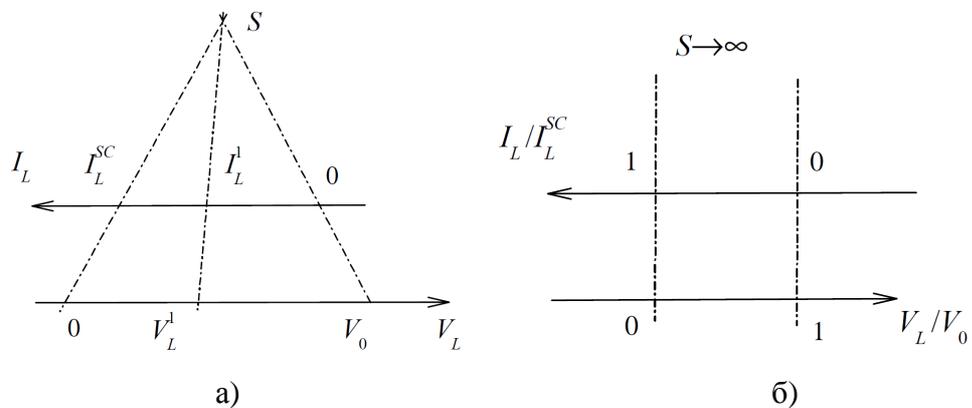


Рис.2.11. Частные случаи проективного преобразования: а) - аффинное, б) - евклидовое.

Также имеет место центр проекции S , но прямые V_L, I_L являются параллельными. Инвариантом аффинного преобразования является простое отношение трех точек или обычная пропорция. Если выразить изменения режима, то получаются привычные «разы» и «проценты».

Если центр проекции $S \rightarrow \infty$, то проектирование осуществляется параллельными линиями, что соответствует евклидовому преобразованию - параллельный перенос отрезка. В приведенной простой цепи в этом случае $R_i = 0$, а ток пропорционален проводимости нагрузки Y_L . Поэтому параметры режима имеет только абсолютное значение и нельзя составить относительное выражение ввиду отсутствия масштаба. Инвариантами евклидовых преобразований служат разность или отношение значений токов исходного и последующего режимов. Эти два случая соответствуют известному подобию [77].

В геометрии установлено, что эти три вида преобразований (проективное, аффинное, евклидовое) исчерпывают возможные варианты групповых преобразований, которые ложатся в основу определения метрики прямой [78]. Таким образом, геометрический подход позволяет обоснованно подойти к определению режимов в относительном виде.

Параллельное соединение источников напряжения ограниченной мощности.

Необходимым условием параллельного соединения источников напряжения, работающих на общую нагрузку, является обеспечение распределения или баланс токов. В наиболее простом методе используются уравнивающие резисторы. В случае изменяемой нагрузки исходное распределение токов будет нарушаться. Поэтому возникает задача оценки способности цепи к обеспечению баланса токов.

Рассмотрим цепь на рисунке 2.12. Уравнивающие резисторы R_{e1}, R_{e2} определяют баланс токов. Загрузку каждого источника можно задать в относительном виде с учетом внутренних сопротивлений R_{i1}, R_{i2} и приведенных сопротивлений нагрузки R_{L1}, R_{L2}

$$m_1 = \frac{R_{L1}}{R_{i1}}, m_2 = \frac{R_{L2}}{R_{i2}}.$$

В свою очередь, характеристика относительной загрузки $m_2(m_1)$ описывается дробно – линейным выражением и представляет гиперболу на рисунке 2.15. Желаемый режим работы тогда соответствует выражению $m_2 = m_1$ или прямой линии. Точки пересечения $m^{(1)}, m^{(2)} = -1$ гиперболы и прямой линии соответствуют режиму равной загрузки.

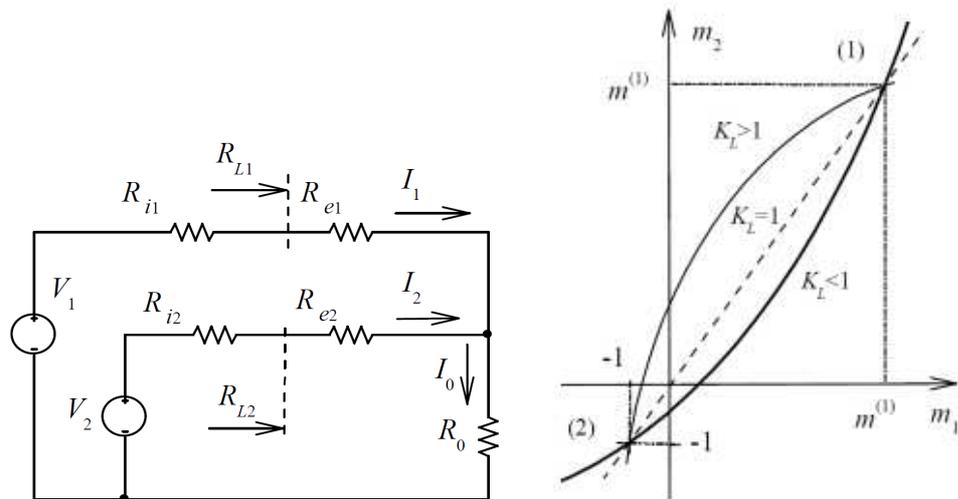


Рис.2.12. Схема параллельного соединения и характеристики относительной загрузки источников напряжения.

Выражение $m_2(m_1)$ будем рассматривать как проективное преобразование $m_1 \rightarrow m_2$ с двумя неподвижными точками. Сложное отношение для текущих значений m_1, m_2 относительно неподвижных точек

$$(m^{(2)} \ m_2 \ m_1 \ m^{(1)}) = \frac{m_2 - m^{(2)}}{m_2 - m^{(1)}} \div \frac{m_1 - m^{(2)}}{m_1 - m^{(1)}}.$$

В проективной геометрии известно, что значение сложного отношения относительно неподвижных точек не зависит от текущих значений m_1, m_2

$$(m^{(2)} \ m_2 \ m_1 \ m^{(1)}) = \frac{V_2}{V_1} \frac{1 + \frac{R_{e2}}{R_{i2}}}{1 + \frac{R_{e1}}{R_{i1}}} = K_L.$$

Величина K_L определяется только параметрами цепи и не зависит от изменяемой нагрузки. Анализ выражения K_L показывает, что могут быть значения $K_L > 1, K_L < 1, K_L = 1$. Таким образом, эта величина (*фактор загрузки*) характеризует «способность» цепи к относительной равной загрузке источников напряжения. В частном случае, когда

$$V_1 = V_2, \quad \frac{R_{e2}}{R_{i2}} = \frac{R_{e1}}{R_{i1}},$$

фактор загрузки $K_L = 1$. Поэтому выполняется равная загрузка источников напряжения для всех значений нагрузки.

Цепи с двумя нагрузками. Проективные координаты точки на плоскости.

Независимое изменение токов. Рассмотрим цепь на рисунке 2.13а с двумя нагрузками с проводимостями Y_{L1}, Y_{L2} . Семейство нагрузочных характеристик (параллельные линии) совпадает с прямоугольной системой координат в евклидовой плоскости на рисунке 2.13б. В проективной плоскости это семейство представляет пучки прямых линий, которые образуют координатный треугольник с центрами пучков в бесконечно удаленных точках ∞ на рисунке 2.13в.

Зависимое изменение токов. Пусть внутреннее сопротивление R_i источника напряжения принимает конечное значение. Зависимое изменение токов нагрузок на рисунке 2.14, как «искаженная» сетка координат, соответствует проективной плоскости. Координатный треугольник образован тремя базовыми точками $I_M, 0, I_M$. Центры пучков (характерные режимы) нагрузочных характеристик лежат в точках $I_M = V_0 / R_i$. Через эти центры проходит линия максимального тока I_M как бесконечно удаленная прямая.

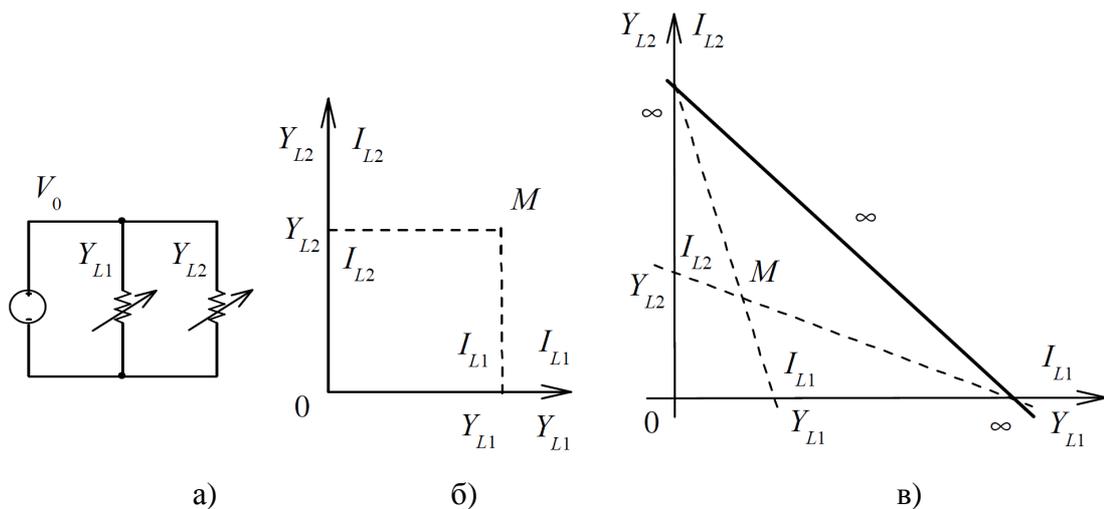


Рис.2.13. Активный четырехполюсник - а), нагрузочная характеристика:

б)- в евклидовой плоскости, в)- в проективной плоскости.

Координатные оси можно проградуировать в значениях соответствующих токов или проводимостей нагрузок. В данном случае уже есть внутренний масштаб – значение проводимости $Y_i = 1/R_i$ или значение тока I_M . Наличие четвертой единичной (характерной) точки M_i позволяет ввести сложные отношения m_{L1}, m_{L2} и задать режим в относительном виде аналогично выражениям (2.11, 2.12).

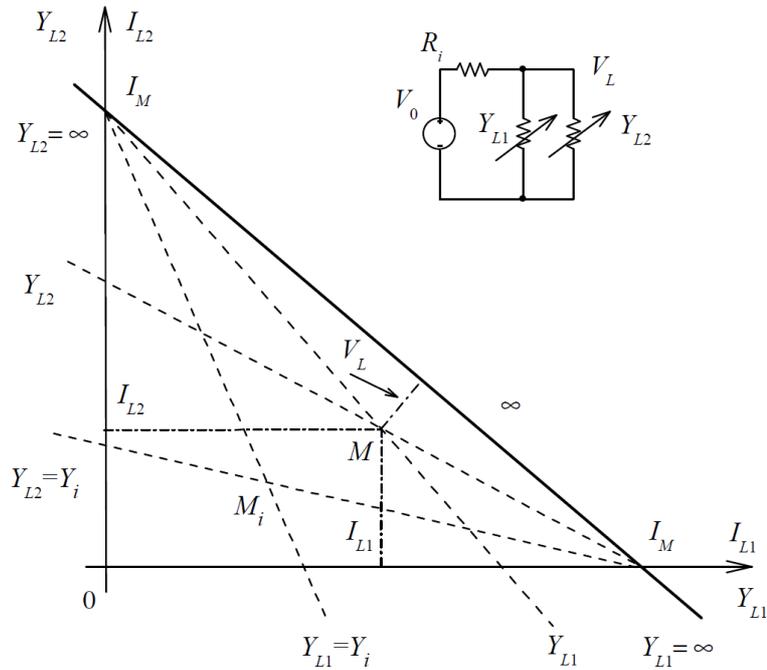


Рис.2.14. Зависимое изменение токов нагрузок активного четырехполюсника.

Точку текущего режима M можно задать или через проводимости нагрузок (неоднородные координаты) $M(Y_{L1}, Y_{L2})$, или через токи нагрузок (однородные координаты) $M(I_{L1}, I_{L2}, V_L)$.

Преобразователи напряжения нагрузок с источником напряжения ограниченной мощности. Рассмотрим систему питания с двумя нагрузками на рисунке 2.15. Пусть режим работы соответствует условиям

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = \text{const} = V_{1=}, R_1 = \text{var} \\ V_2 = \text{var}, R_2 = \text{const} \end{array} \right\} n_1, n_2 = \text{var}.$$

Тогда в конформной плоскости n_1, n_2 получаем характерные траектории - семейство дуг окружностей L , ортогональных к внешней окружности или абсолюту. Рабочая точка должна лежать внутри рабочей области или круга $(n_1)^2 + (n_2)^2 \leq 1$. Таким образом, мы приходим к модели Пуанкаре гиперболической плоскости. Дуги окружностей L являются «прямыми линиями» в этой модели. В свою очередь, дуги окружностей K ортогональны к окружностям L . Гиперболическое расстояние между этими окружностями K (эквидистантами) постоянное.

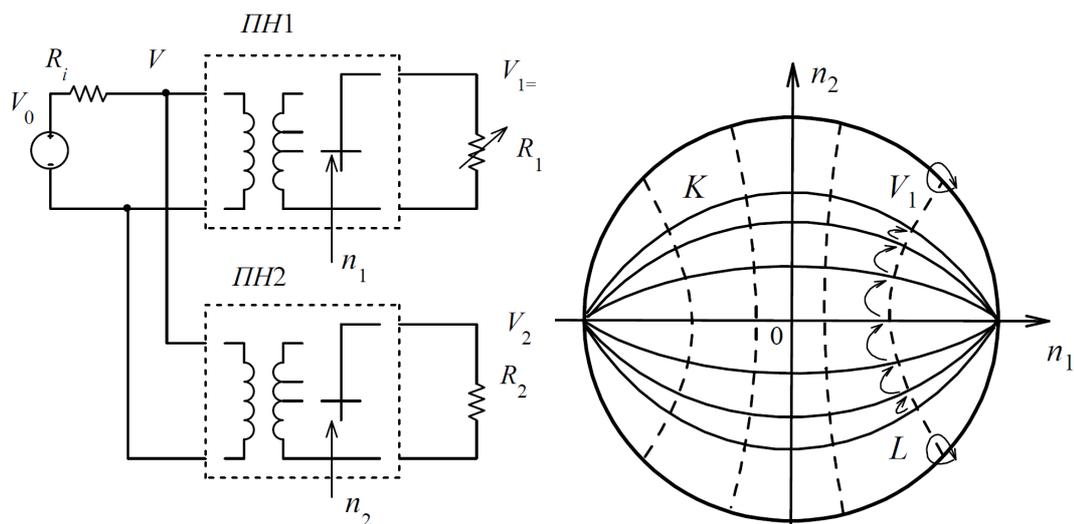


Рис.2.15. Система питания с преобразователями напряжения и семейство регулировочных характеристик как модель гиперболической плоскости.

При приближении к абсолюту, изменения значений n_1, n_2 будут уменьшаться, как показано стрелками. На абсолюте рабочая точка будет неподвижной.

2.4. Виды цепей и структура задач

Исходя из рассмотренных примеров цепей, возникает два направления исследований – резистивные цепи (сети) и цепи с преобразователями напряжения ПН. В свою очередь, резистивные цепи разделяются на два вида согласно рисунку 2.16. Изменение режима работы приводит к искаженной сетке рабочих характеристик (пучки прямых линий) и использованию соответствующих проективных преобразований.

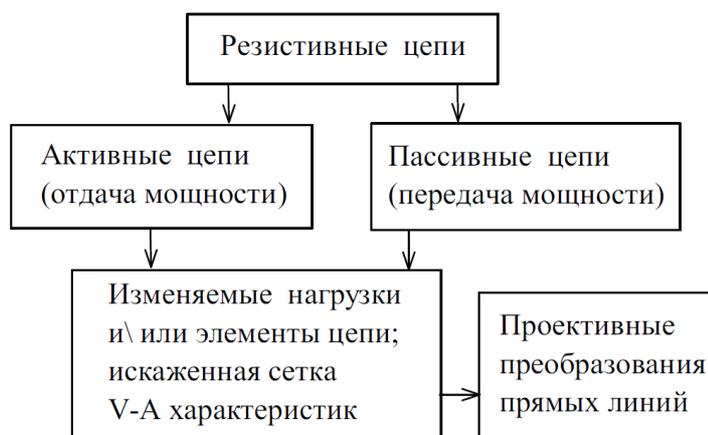


Рис.2.16. Виды резистивных цепей и содержание геометрической интерпретации.

Цепи с *ПН* по типу рабочих характеристик разделяются на два вида согласно рисунку 2.17.



Рис.2.17. Виды цепей с *ПН* и содержание геометрической интерпретации.

Регулировочные характеристики *ПН* с регулированием и стабилизацией напряжения приводят к стереографической проекции и конформной плоскости. В свою очередь, входная вольт – амперная характеристика потребителя неизменной мощности определяет использование соответствующих проективных преобразований.

Рассмотрим теперь решаемые задачи для резистивных цепей и *ПН*. Для активных резистивных цепей исследуются три случая изменения параметров: только изменяемые нагрузки – а), изменяемое сопротивление (элемент) цепи и изменяемые нагрузки – б), только изменяемое сопротивление – в), представленные рисунком 2.18. Во всех случаях используется общий подход. Находятся характерные значения изменяемых параметров, что позволяет ввести инвариантные показатели режима, систему проективных координат и получить формулы перерасчета токов нагрузок.

Для пассивных резистивных цепей на рисунке 2.19 вводятся системы проективных координат на входе и выходе, используются инвариантные координаты рабочих точек, что позволяет рассчитать проводимости нагрузок по входным токам.

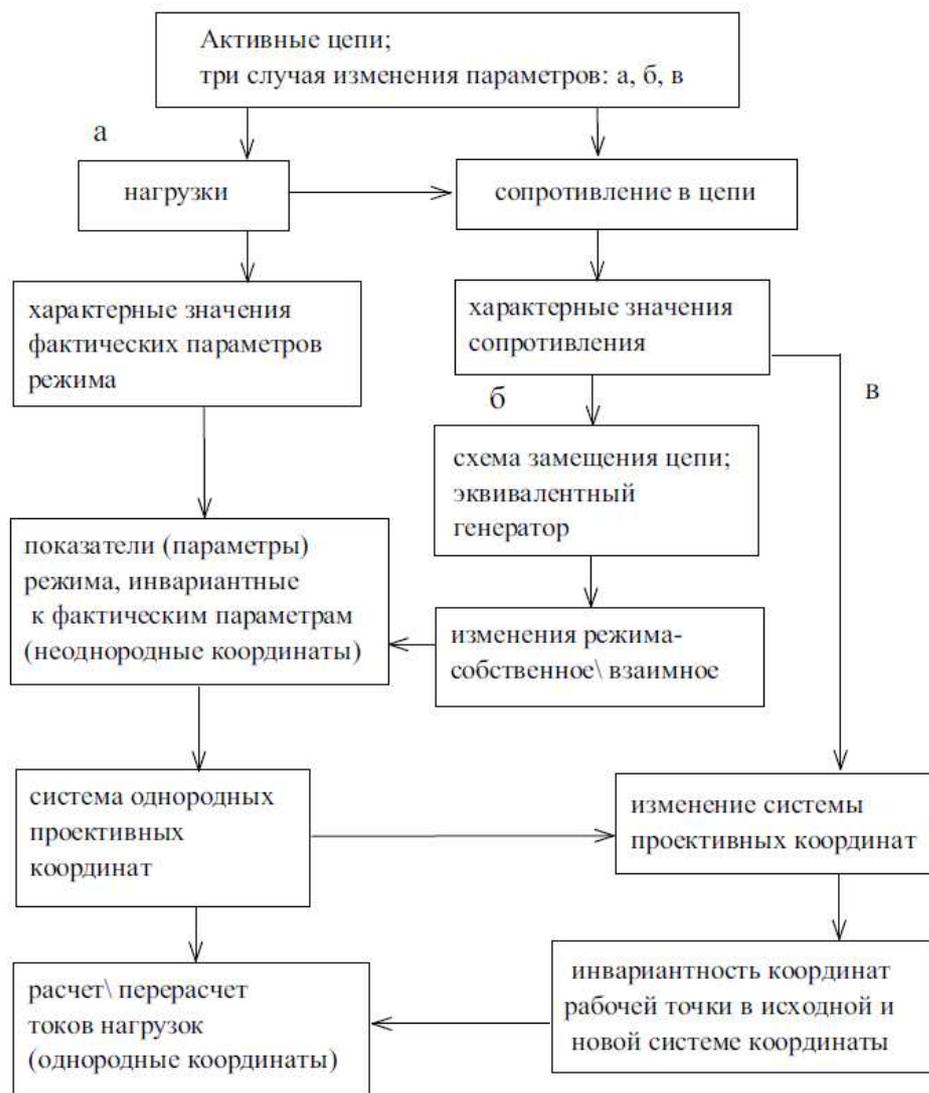


Рис. 2.18. Структура задач активных резистивных цепей.



Рис.2.19. Структура задач пассивных резистивных цепей.

Для цепей с *ПН* на рисунке 2.20 вводятся инвариантные показатели режима, изменения параметров режима и предложены формулы расчета последующих параметров режима.

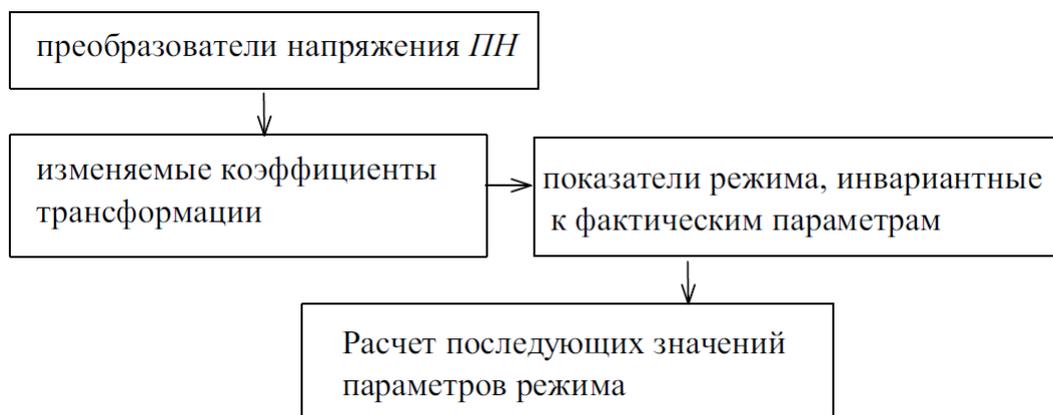


Рис.2.20. Структура задач цепей с *ПН*.

2.5. Выводы к Главе 2

1. Рассмотренные примеры цепей показывают возможность применения проективной геометрии к интерпретации рабочих характеристик.
2. Представленный геометрический подход обосновывает определение режима работы в относительном или нормированном виде. Глобальное изменение параметров режима позволяет найти необходимые точки характерных режимов.
4. Полученные результаты дают основу для дальнейшего представления важных в практике цепей.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА К РЕЗИСТИВНЫМ ЦЕПЯМ

3.1. Активные многополюсники

3.1.1. Проективные координаты. Перерасчет токов нагрузок

Цепь с двумя нагрузками. Общий случай координат центров пучков нагрузочных прямых линий на плоскости. Построим нагрузочные характеристики активного четырехполюсника с двумя нагрузками на рисунке 3.1. Уравнение этой цепи

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & -Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^{SC} \\ I_2^{SC} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

С учетом напряжения нагрузок $V_1 = I_1 / Y_{L1}$, $V_2 = I_2 / Y_{L2}$ получаем выражения двух пучков $(I_1, I_2, Y_{L1}) = 0$, $(I_1, I_2, Y_{L2}) = 0$ прямых линий. Проводимости Y_{L1} , Y_{L2} являются параметрами пучков. Центры этих пучков определяют дополнительные характерные режимы [79]. В частности, центр пучка G_1 не зависит от проводимости Y_{L2} , что соответствует току $I_2 = 0$ и параметрам первой нагрузки $Y_{L1} = Y_{L1}^{G1} = I_1^{G1} / V_1^{G1} < 0$.

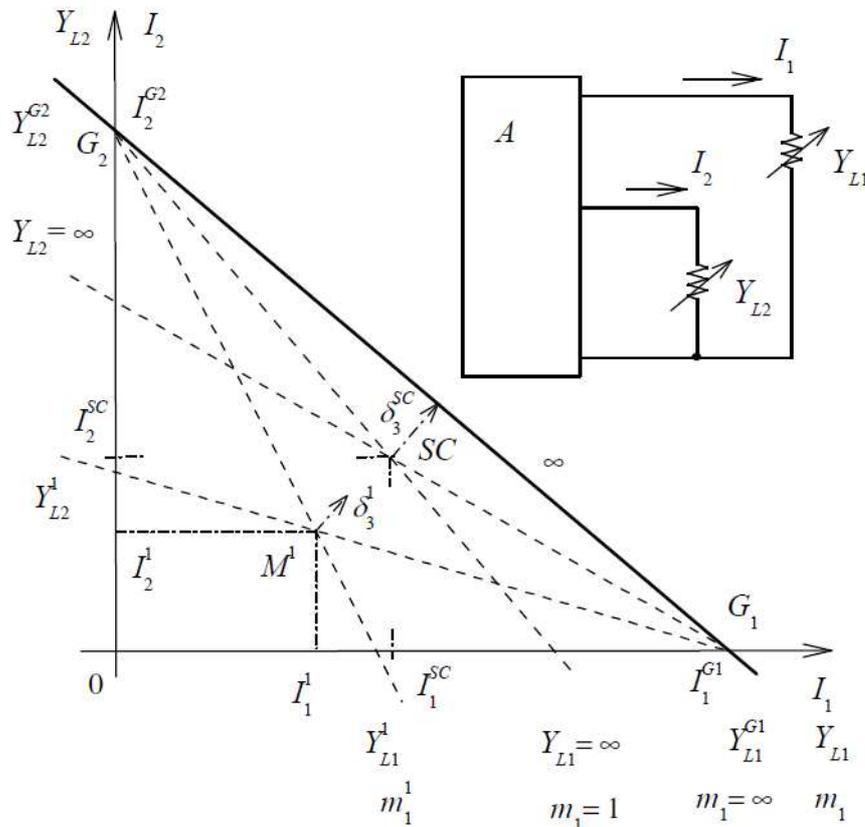


Рис.3.1. Два пучка нагрузочных прямых линий с параметрами Y_{L1}, Y_{L2} .

Аналогично, центр пучка G_2 определяется параметрами второй нагрузки

$$Y_{L2} = Y_{L2}^{G2} = I_2^{G2} / V_2^{G2} < 0.$$

Полученный координатный треугольник $G_1 0 G_2$ и единичная точка SC (режим $K3$) задают проективную систему координат. Прямую $G_1 G_2$ принимаем как бесконечно удаленную прямую линию. Тогда проявляется по три характерных значения нагрузок

$$Y_{L1} = 0, Y_{L1} = \infty, Y_{L1}^{G1}; \quad Y_{L2} = 0, Y_{L2} = \infty, Y_{L2}^{G2}.$$

Поэтому можем выразить неоднородные координаты для текущих (исходных) значений нагрузок как сложное отношение четырех точек

$$m_1^1 = (0 Y_{L1}^1 \infty Y_{L1}^{G1}) = \frac{Y_{L1}^1}{Y_{L1}^1 - Y_{L1}^{G1}} = \frac{\xi_1^1}{\xi_3^1}, \quad m_2^1 = (0 Y_{L2}^1 \infty Y_{L2}^{G2}) = \frac{Y_{L2}^1}{Y_{L2}^1 - Y_{L2}^{G2}} = \frac{\xi_2^1}{\xi_3^1}, \quad (3.2)$$

где однородные координаты

$$\xi_1^1 = \frac{I_1^1}{I_1^{SC}}, \quad \xi_2^1 = \frac{I_2^1}{I_2^{SC}}, \quad \xi_3^1 = \frac{\delta_3^1}{\delta_3^{SC}}. \quad (3.3)$$

Расчет токов нагрузок. Из соотношений (3.3, 3.2) получим выражения для токов

$$\frac{I_1^1}{I_1^{G1}} = \frac{\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}} m_1^1}{\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}} (m_1^1 - 1) + \frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}} (m_2^1 - 1) + 1}, \quad \frac{I_2^1}{I_2^{G2}} = \frac{\frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}} m_2^1}{\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}} (m_1^1 - 1) + \frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}} (m_2^1 - 1) + 1}. \quad (3.4)$$

Таким образом, сначала находим характерные значения проводимостей и токов. Далее, для заданных проводимостей нагрузок находим неоднородные координаты, а потом сами токи нагрузок.

Полученные обоснованные нормированные величины (3.4) определяют качественные характеристики режима - насколько параметры текущего режима близки к характерным значениям $I_1^{G1}, I_2^{G2}, Y_{L1}^{G1}, Y_{L2}^{G2}$. Можно отметить, что исходная система уравнений (3.1)

менее информативна, так как содержит абсолютные (фактические) значения параметров.

Покажем, как представить в относительном виде исходную систему уравнений. Для этого неоднородные координаты (3.2) выражаются через токи и напряжения нагрузок.

Тогда получаем чисто относительные выражения

$$\frac{I_1}{I_1^{G1}} = \left(1 - \frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}}\right) \frac{V_1}{V_1^{G1}} - \left(\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}}\right) \frac{V_2}{V_2^{G2}} + \frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}},$$

$$\frac{I_2}{I_2^{G2}} = -\left(\frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}}\right) \frac{V_1}{V_1^{G1}} + \left(1 - \frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}}\right) \frac{V_2}{V_2^{G2}} + \frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}}.$$

Компоненты в скобках представляют своего рода «нормированные» Y параметры.

Перерасчет токов нагрузок. Пусть последующий режим соответствует точке M^2 и задается проводимостями нагрузок Y_{L1}^2, Y_{L2}^2 . Изменение режима выражаем через сложное отношение

$$m_1^{21} = (0 \ Y_{L1}^2 \ Y_{L1}^1 \ Y_{L1}^{G1}) = \frac{Y_{L1}^2 - 0}{Y_{L1}^2 - Y_{L1}^{G1}} \div \frac{Y_{L1}^1 - 0}{Y_{L1}^1 - Y_{L1}^{G1}} = m_1^2 \div m_1^1, \quad m_2^{21} = (0 \ Y_{L2}^2 \ Y_{L2}^1 \ Y_{L2}^{G2}) = m_2^2 \div m_2^1.$$

Используя формулы расчета токов (3.4), аналогично получаем последующие или вторые токи относительно исходных или первых токов

$$I_1^2 = \frac{I_1^1 m_1^{21}}{\frac{I_1^1}{I_1^{G1}} (m_1^{21} - 1) + \frac{I_2^1}{I_2^{G2}} (m_2^{21} - 1) + 1}, \quad I_2^2 = \frac{I_2^1 m_2^{21}}{\frac{I_1^1}{I_1^{G1}} (m_1^{21} - 1) + \frac{I_2^1}{I_2^{G2}} (m_2^{21} - 1) + 1}. \quad (3.5)$$

Отметим достоинство полученных выражений – выполняется групповое свойство. Тогда, следующий третий режим выражается через изменения относительно первого или второго режима

$$m_1^3 = m_1^{32} \cdot m_1^2 = m_1^{32} \cdot m_1^{21} \cdot m_1^1 = m_1^{31} \cdot m_1^1, \quad m_2^3 = m_2^{32} \cdot m_2^2 = m_2^{32} \cdot m_2^{21} \cdot m_2^1 = m_2^{31} \cdot m_2^1.$$

Поэтому третьи токи выражаются относительно первых или вторых токов

$$I_1^3 = (I_1^1, m_1^{31}, I_2^1, m_2^{31}) = (I_1^2, m_1^{32}, I_2^2, m_2^{32}), \quad I_2^3 = (I_1^1, m_1^{31}, I_2^1, m_2^{31}) = (I_1^2, m_1^{32}, I_2^2, m_2^{32}).$$

Для ясности, изложенный алгоритм расчета и перерасчета токов представлен на рисунке 3.2. Отметим, что не надо непосредственно рассчитывать всю цепь с исходными значениями нагрузками.

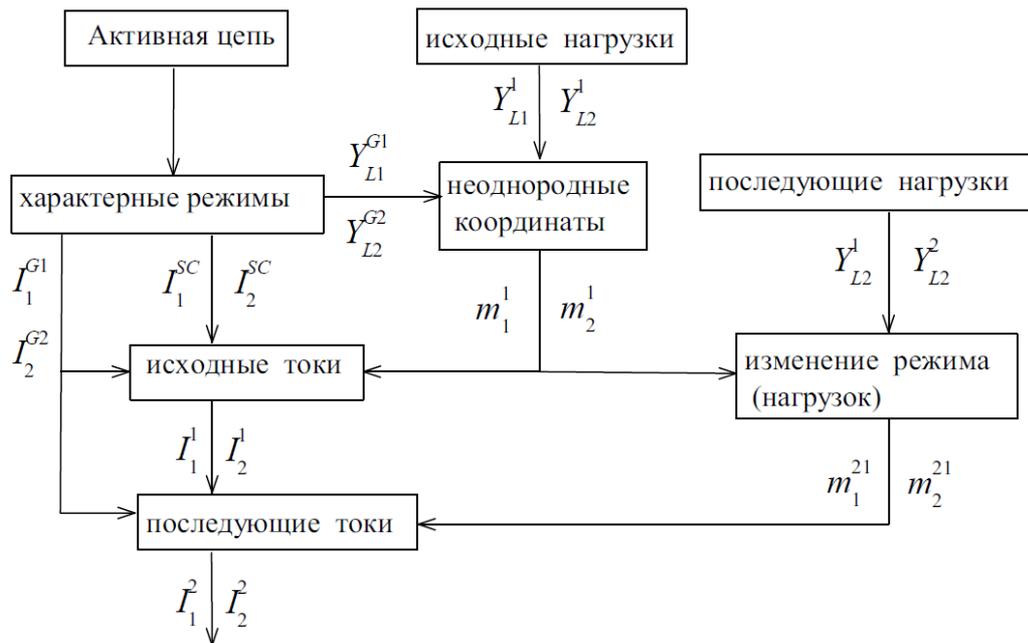


Рис.3.2. Алгоритм расчета и перерасчета токов изменяемых нагрузок.

Цепь с тремя нагрузками. Проективные координаты в пространстве.

Распространенный случай системы электропитания представлен на рисунке 3.3. Три (и более нагрузки) подключены к общему источнику напряжения (общий узел N) через индивидуальные резистивные четырехполосники $4П1$, $4П2$, $4П3$. Проявляется взаимовлияние нагрузок из-за внутренних проводимостей y_{0N}, y_N источника напряжения.

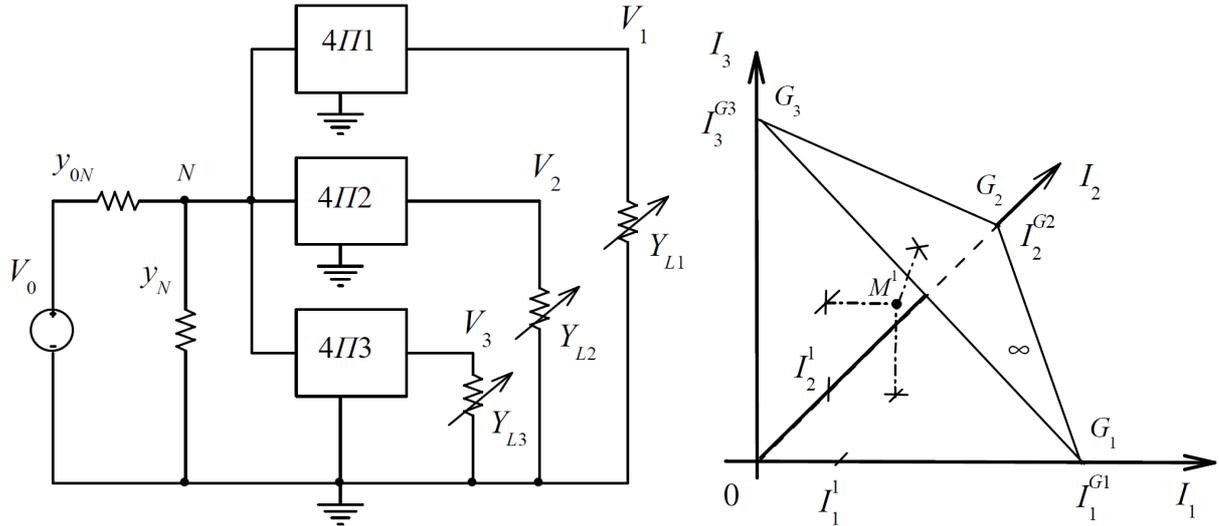


Рис.3.3. Система питания с общим источником напряжения и координатным тетраэдром $0G_1G_2G_3$.

Оси пучков плоскостей $(I_1, I_2, I_3, Y_{L1}) = 0$, $(I_1, I_2, I_3, Y_{L2}) = 0$, $(I_1, I_2, I_3, Y_{L3}) = 0$ лежат в бесконечно удаленной плоскости. Полученный координатный тетраэдр $0G_1G_2G_3$ и единичная точка SC (режим $K3$) задают проективную систему координат. Аналогично получаем неоднородные координаты m_1^1, m_2^1, m_3^1 и формулы расчета токов

$$\frac{I_1}{I_1^{G1}} = \frac{\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}} m_1}{(m_1, m_2, m_3)}, \quad \frac{I_2}{I_2^{G2}} = \frac{\frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}} m_2}{(m_1, m_2, m_3)}, \quad \frac{I_3}{I_3^{G3}} = \frac{\frac{I_3^{SC}}{I_3^{G3}} m_3}{(m_1, m_2, m_3)},$$

$$\frac{1}{(m_1, m_2, m_3)} = \frac{1}{\frac{I_1^{SC}}{I_1^{G1}} (m_1 - 1) + \frac{I_2^{SC}}{I_2^{G2}} (m_2 - 1) + \frac{I_3^{SC}}{I_3^{G3}} (m_3 - 1) + 1}.$$

В общем случае многополюсника оси трех пучков плоскостей не лежат в одной плоскости на рисунке 3.4. Но эти оси будут лежать в одной плоскости, если обеспечить условия $I_1(Y_{L2}) = I_1(Y_{L3}) = I_1^{G1}$, $I_2(Y_{L1}) = I_2(Y_{L3}) = I_2^{G2}$, $I_3(Y_{L1}) = I_3(Y_{L2}) = I_3^{G3}$.

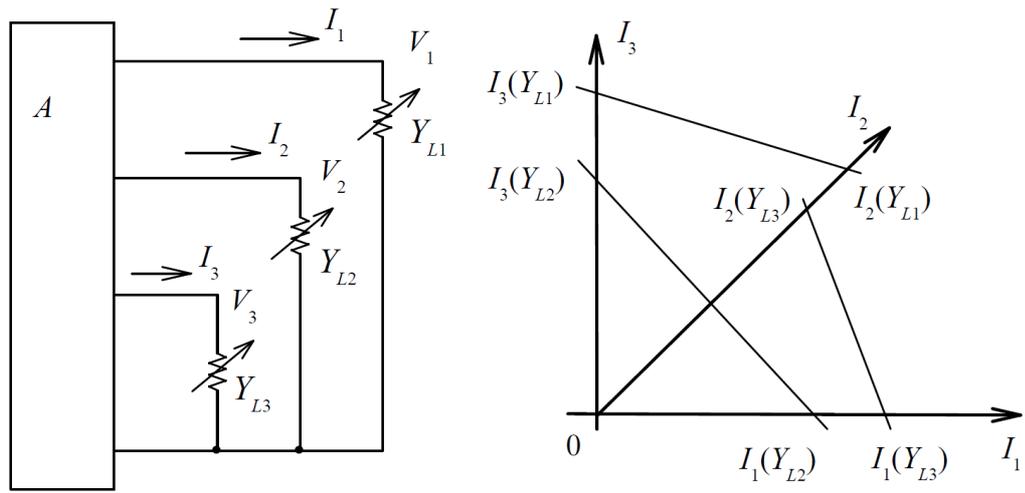


Рис.3.4. Цепь с тремя нагрузками с произвольным положением осей пучков нагрузочных плоскостей с параметрами Y_{L1}, Y_{L2}, Y_{L3} .

В этом случае приходим к так называемой сбалансированной цепи [76] на рисунке 3.5.

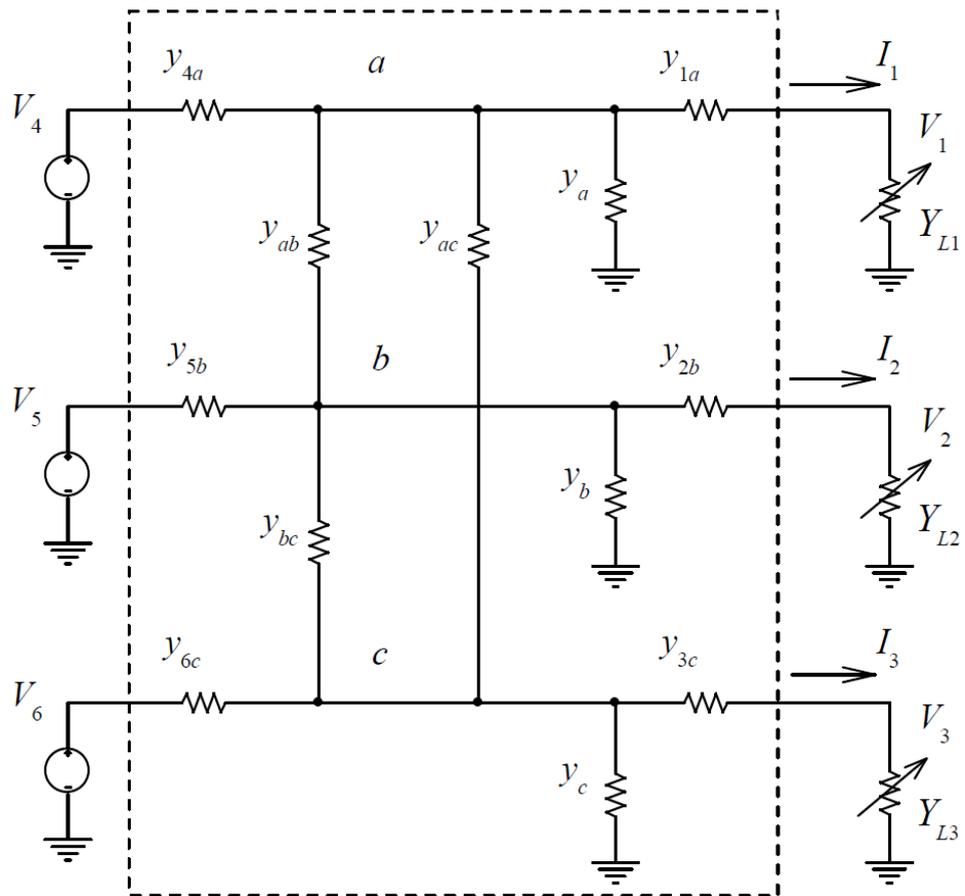


Рис.3.5. Система распределенного питания как сбалансированная цепь.

Пусть наиболее мощные элементы соответствуют V_5, Y_{L2} . Тогда проводимости

$y_{5b}, y_{bc}, y_{ab}, y_{4a}$ задаются независимо. Для остальных элементов выполняются условия

$$\frac{y_{4a}}{y_{ab}} V_4 = \frac{y_{6c}}{y_{bc}} V_6, \quad \frac{y_{4a}}{y_{ac}} V_4 = \frac{y_{5b}}{y_{bc}} V_5.$$

Полученные значения не ограничивают возможности цепи, но существенно упрощают перерасчет токов.

3.1.2. Изменяемое внутреннее сопротивление

Активный двухполюсник с изменяемым сопротивлением. Рассмотрим эквивалентный генератор цепи с изменяемым внутренним сопротивлением R_i на рисунке 3.6. Семейство характеристик с параметром R_i представляет пучок прямых линий с центром G . Координата этого центра не зависит от сопротивления R_i . Сопротивление R_i принимает два характерных значения $0, \infty$. Аналогично, семейство характеристик с параметром R_L представляет пучок прямых линий с центром 0 . Сопротивление R_L может принимать также два характерных значения $0, \infty$. Таким образом, точки $0, G$ на оси напряжения являются точками характерных режимов.

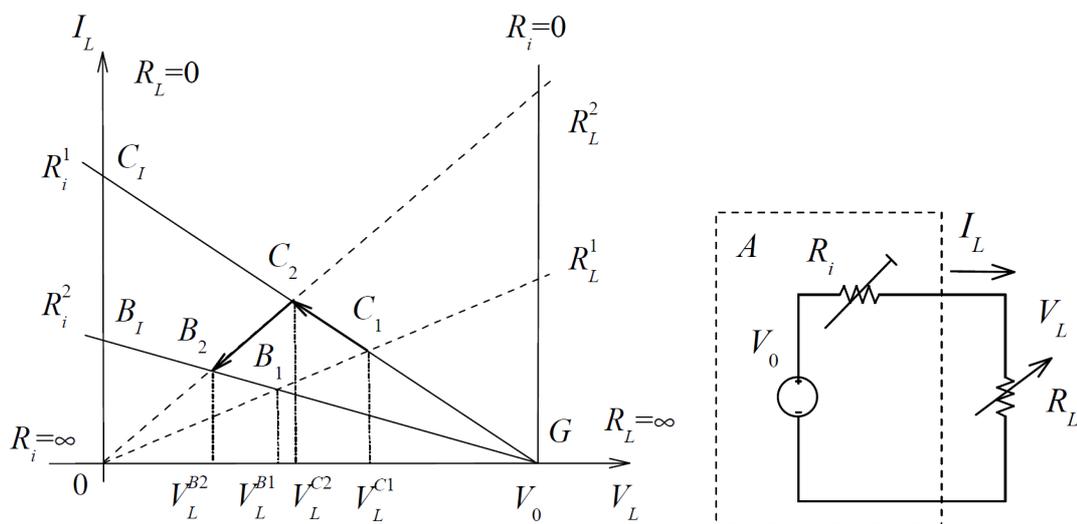


Рис.3.6. Семейство VAX эквивалентного генератора с изменяемым внутренним сопротивлением.

Собственное изменение режима $C_1 \rightarrow C_2, B_1 \rightarrow B_2$ за счет изменения нагрузки [80]

$$m_L^{21} = (C_1 \ C_2 \ C_1 \ G) = (B_1 \ B_2 \ B_1 \ G) = (0 \ R_L^2 \ R_L^1 \ \infty) = \frac{R_L^2}{R_L^1}, \quad (3.6)$$

$$m_L^{21} = (0 \ V_L^{C2} \ V_L^{C1} \ V_0) = \frac{V_L^{C2} - 0}{V_L^{C2} - V_0} \div \frac{V_L^{C1} - 0}{V_L^{C1} - V_0}.$$

Аналогично, взаимное изменение режима $C_2 \rightarrow B_2, C_1 \rightarrow B_1$ за счет изменения внутреннего сопротивления

$$m_i^{21} = (0 \ B_2 \ C_2 \ A_2) = (0 \ B_1 \ C_1 \ A_1) = (\infty \ R_i^2 \ R_i^1 \ 0) = \frac{R_i^1}{R_i^2}, \quad m_i^{21} = (0 \ V_L^{B2} \ V_L^{C2} \ V_0). \quad (3.7)$$

Общее изменение режима соответствует $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow B_2$ с общими базовыми точками $0, G$

$$m^{21} = m_i^{21} m_L^{21} = \frac{R_i^1 R_L^2}{R_i^2 R_L^1}, \quad m^{21} = \frac{V_L^{B2} - 0}{V_L^{B2} - V_0} \div \frac{V_L^{C1} - 0}{V_L^{C1} - V_0} = (0 \ V_L^{B2} \ V_L^{C1} \ V_0).$$

Отсюда следует формула перерасчета напряжения, как дробно-линейное выражение

$$\frac{V_L^{B2}}{V_0} = \frac{\frac{V_L^{C1}}{V_0} m^{21}}{\frac{V_L^{C1}}{V_0} (m^{21} - 1) + 1}.$$

Обобщенный эквивалентный генератор активного двухполюсника с изменяемым сопротивлением. Пусть в активном двухполюснике изменяется какое – то сопротивление R на рисунке 3.7. Для разных значений сопротивления $R (R^1, R^2$ и т.д.) получаем соответствующие нагрузочные характеристики.

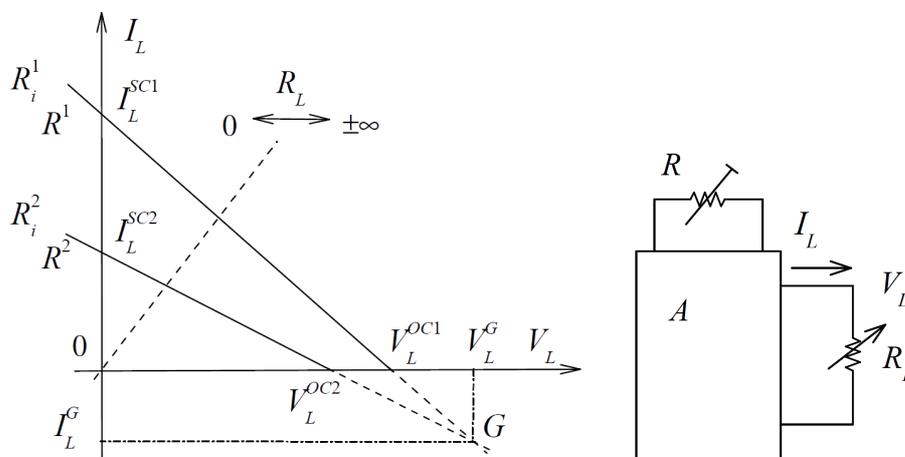


Рис.3.7. Семейство ВАХ активного двухполюсника с изменяемым сопротивлением R .

Пучок характеристик определяет два вида эквивалентных генераторов на рисунке 3.8.

В традиционном эквивалентном генераторе меняются внутреннее сопротивление R_i и напряжение V_L^{oc} . Поэтому необходим перерасчет двух параметров.

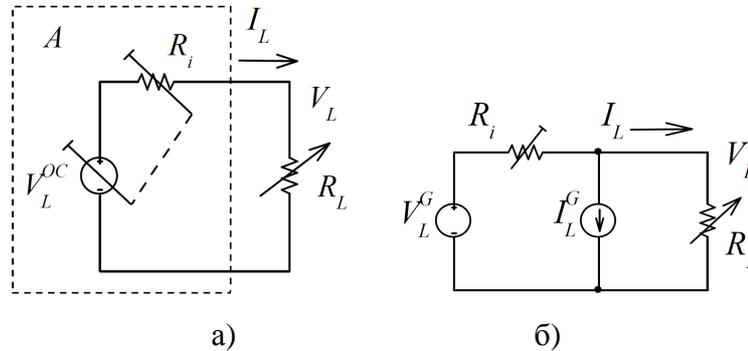


Рис.3.8. Традиционный эквивалентный генератор - а) и обобщенный эквивалентный генератор - б) активного двухполюсника.

С другой стороны, обращает на себя внимание дополнительный характерный режим на рисунке 3.7 - точка G не зависит от изменяемого сопротивления R . Тогда уравнение BAX , проходящей через точку G , имеет вид

$$I_L + I_L^G = \frac{V_L^G}{R_i} - \frac{V_L}{R_i}.$$

Это выражение определяет обобщенный эквивалентный генератор [81]; требуется перерасчет одного параметра R_i . Аналогично выражениям (3.6, 3.7) вводится изменение режима, но относительно точек $0, G$.

Обобщенные генераторы активных многополюсников с общим узлом можно ввести для двух, трех и более нагрузок [82]. На рисунке 3.9 приведен подобный эквивалентный генератор для двух нагрузок. В случае трех нагрузок, с учетом принципа суперпозиции, параметры генератора уменьшаются в три раза.

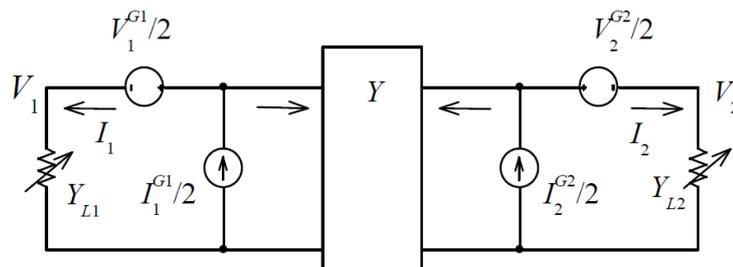


Рис.3.9. Обобщенный эквивалентный генератор активного многополюсника с двумя нагрузками.

3.1.3. Заданные нагрузки. Изменяемая проводимость в общей шине питания.

Пусть теперь изменяется проводимость $y_N \rightarrow \bar{y}_N$ в схеме на рисунке 3.10. Это приводит к изменению исходной рабочей точки $M \rightarrow \bar{M}$ и точки короткого замыкания $SC \rightarrow \bar{SC}$ на семействе VAX . Но прямая линия $G_1 G_2$ является неподвижной. Точка 0 , как режим XX , тоже не зависит от элемента y_N .

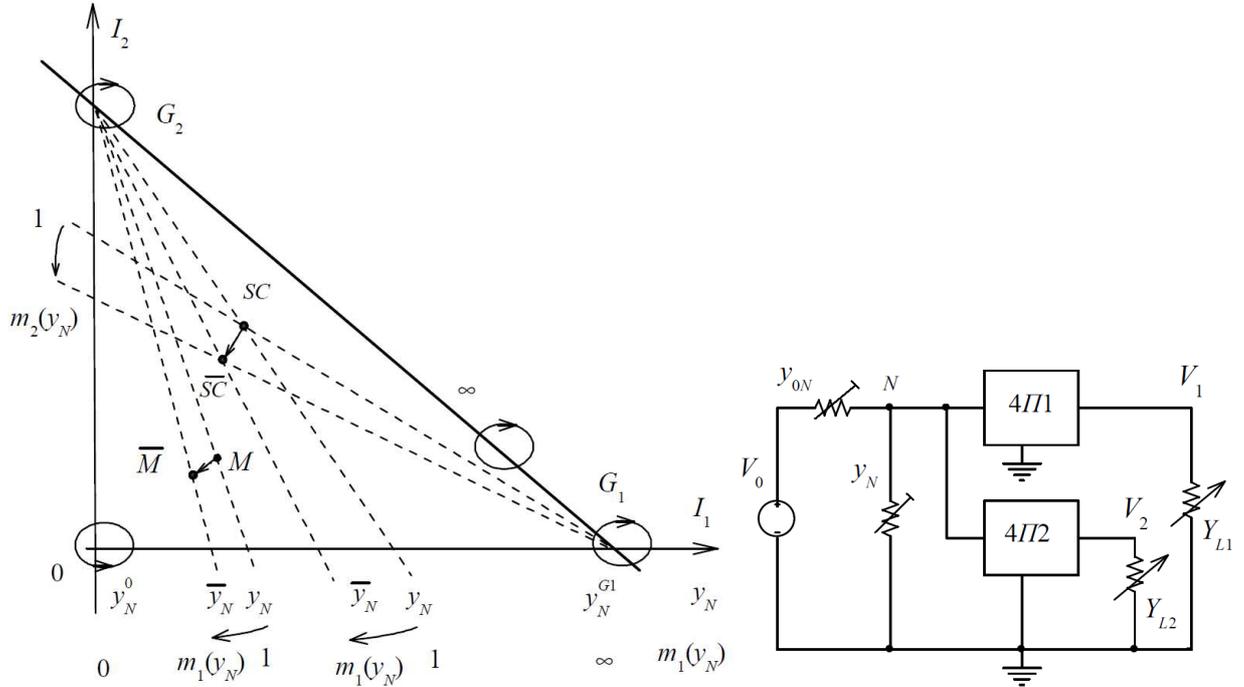


Рис.3.10. Семейство VAX системы питания с изменяемой проводимостью y_N .

Влияние проводимости y_N интерпретируем как проективное преобразование плоскости I_1, I_2 . Это преобразование подобно преобразованию (3.5) и позволяет рассчитать последующие токи \bar{I}_1, \bar{I}_2 точки \bar{M} [83]

$$\bar{I}_1 = \frac{I_1 m_N}{\frac{I_1}{I_1^{G1}} (m_N - 1) + \frac{I_2}{I_2^{G2}} (m_N - 1) + 1}, \quad \bar{I}_2 = \frac{I_2 m_N}{\frac{I_1}{I_1^{G1}} (m_N - 1) + \frac{I_2}{I_2^{G2}} (m_N - 1) + 1}.$$

В этих выражениях изменение y_N представлено сложным отношением четырех точек

$$m_N = (\infty \bar{y}_N y_N - y_N^i) = \frac{y_N + y_N^i}{\bar{y}_N + y_N^i}.$$

Величина y_N^i есть внутренняя проводимость всей цепи относительно зажимов отключенной проводимости y_N . Аналогичные рассуждения позволяют получить формулы перерасчета токов нагрузок при изменении проводимости y_{0N} .

3.2. Пассивные многополюсники

Известна зависимость входной проводимости симметричного четырехполюсника 4Π от проводимости нагрузки в виде дробно – линейного выражения

$$\frac{Y_{IN1}}{\rho} = \frac{\frac{Y_{L1}}{\rho} + th\gamma}{1 + \frac{Y_{L1}}{\rho} th\gamma}, \text{ где } \rho - \text{ характеристическая проводимость, } \gamma - \text{ затухание.}$$

Данное, по сути, проективное преобразование $Y_{L1} \rightarrow Y_{IN1}(Y_{L1})$ представлено рисунком 3.11.

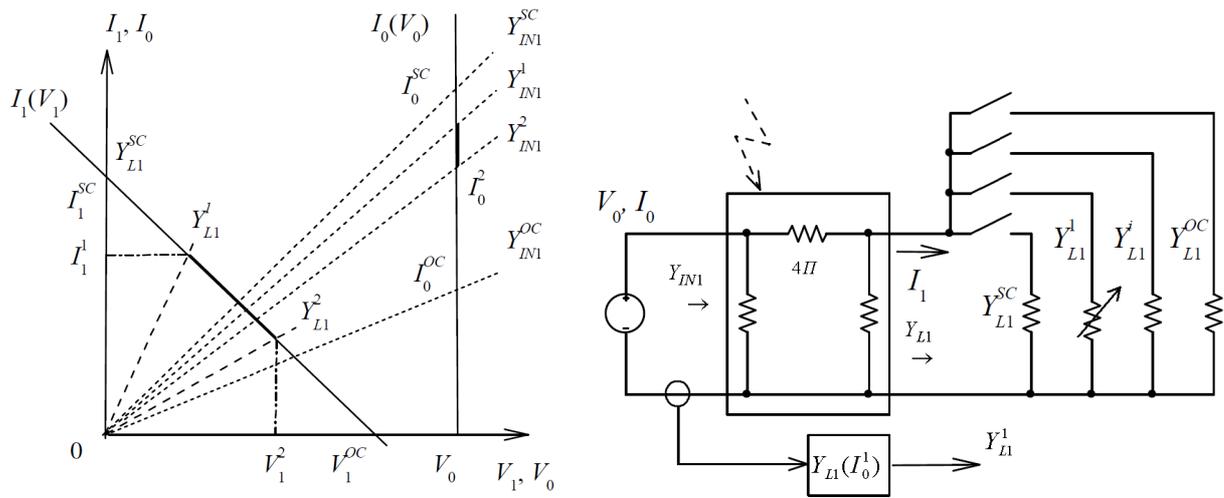


Рис.3.11. Соответствие входной и выходной ВАХ четырехполюсника.

Инвариант проективного преобразования [84]

$$\begin{aligned} m_{L1}^1 &= (Y_{L1}^{SC} \ Y_{L1}^1 \ Y_{L1}^i \ Y_{L1}^{OC}) = (Y_{IN1}^{SC} \ Y_{IN1}^1 \ Y_{IN1}^i \ Y_{IN1}^{OC}) = \\ &= (I_0^{SC} \ I_0^1 \ I_0^i \ I_0^{OC}) = \frac{I_0^1 - I_0^{SC}}{I_0^1 - I_0^{OC}} \div \frac{I_0^i - I_0^{SC}}{I_0^i - I_0^{OC}}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Представленный инвариант позволяет измерить проводимость нагрузки через нестабильный четырехполюсник. Для этого передаются четыре выборки значений проводимостей за достаточно короткое время: тестовые $Y_{L1}^{SC}, Y_{L1}^i, Y_{L1}^{OC}$ и информационная выборка Y_{L1}^1 . Тогда информационная компонента восстанавливается по входным токам $Y_{L1}^1 = Y_{L1}(m_{L1}^1); m_{L1}^1 = m_{L1}(I_0)$.

Отметим, что нет особых требований на точность измерения входных токов, так как погрешности в (3.8) взаимно сокращаются.

Аналогично рассматривается преобразование вход - выход трехпроводной линии с двумя нагрузками [85] на рисунке 3.12.

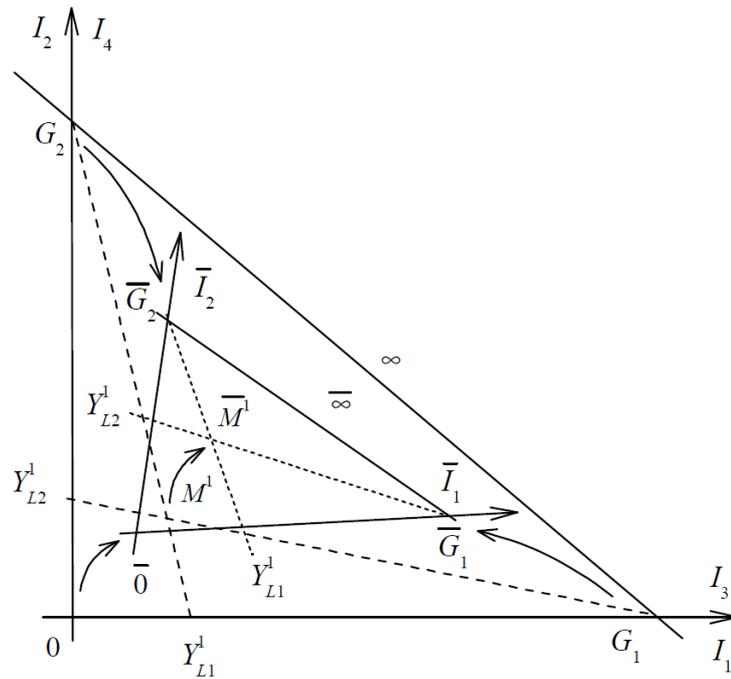


Рис.3.12. Соответствие координатных треугольников
вход – выход трехпроводной линии

Координаты рабочих точек M^1, \bar{M}^1 в своих системах координат одинаковые. Это свойство позволяет измерить проводимость нагрузок. В данном случае используются четыре тестовых проводимости. Это же подход обобщается на четырехпроводные линии с тремя нагрузками [86].

3.3. Выводы к Главе 3

1. Рассмотренные примеры цепей показали методику применения проективной геометрии.
2. Проективная геометрия адекватно интерпретирует «кинематику» цепи, позволяет провести более глубокий анализ, установить или сравнить режимы разных цепей.
3. Получены формулы перерасчета токов нагрузок формализованным методом.
4. Проективные координаты позволяют вычислить проводимость нагрузок только по измеренным величинам токов. Это полезно в практике, когда технически сложно измерить напряжения.
5. Изложенный подход применим к анализу процессов «потокосового» характера различной физической природы.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА К ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РАБОЧИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Преобразователи напряжения в случае источника питания конечной мощности проявляют двузначность регулировочных и входных вольт- амперных характеристик. Также наблюдается взаимовлияние нагрузок и ограничение мощности нагрузок. Рассмотрим основные варианты схем [76].

4.1. Преобразователь напряжения с одной нагрузки

4.1.1. Регулирование напряжения нагрузки

Рассмотрим цепь на рисунке 4.1. Режим регулирования напряжения нагрузки соответствует условию $R_i = \text{const}$, $V_1 = \text{var}$, $n_1 = \text{var}$.

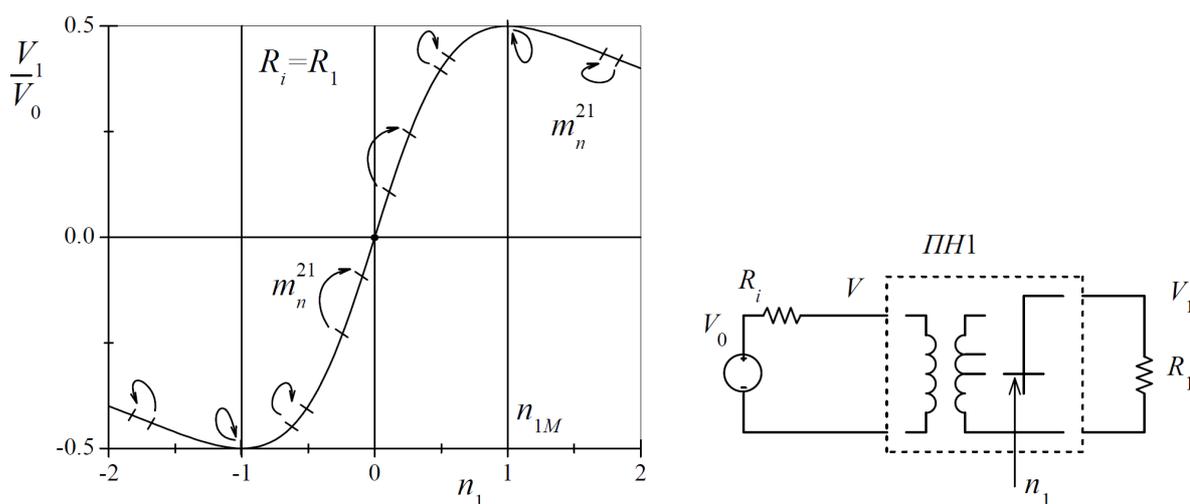


Рис.4.1. Расширенная регулировочная характеристика преобразователя напряжения ПН1.

Используем выражение регулировочной характеристики (1.11)

$$V_1 = \frac{n_1 V_0}{1 + \frac{R_i}{R_1} (n_1)^2}. \quad (4.1)$$

Введем расширенную регулировочную характеристику с учетом области $n_1 < 0$. Тогда однозначная рабочая область соответствует изменению коэффициента трансформации в пределах $-n_{1M} \leq n_1 \leq n_{1M}$.

Составим выражения сложного отношения для исходного режима [87]

$$m_n^1 = (-n_{1M} \ n_1^1 \ 0 \ n_{1M}) = \frac{n_1^1 + n_{1M}}{n_{1M} - n_1^1}, \quad m_V^1 = (-V_{1M} \ V_1^1 \ 0 \ V_{1M}) = \frac{V_1^1 + V_{1M}}{V_{1M} - V_1^1}$$

Расчеты показывают выполнение свойства

$$m_V = (m_n)^2.$$

Поэтому можно ввести гиперболическую метрику

$$H = Ln m_V = 2Ln m_n.$$

Полученный инвариант соответствует равным значениям для таких переменных как n_1, V_1 . Получается своего рода линеаризация регулировочной характеристики ПН.

Сложное отношение для изменения режима

$$m_n^{21} = (-1 \ \bar{n}_1^2 \ \bar{n}_1^1 \ 1) = \frac{\bar{n}_1^2 + 1}{1 - \bar{n}_1^2} \div \frac{\bar{n}_1^1 + 1}{1 - \bar{n}_1^1} = \left(1 + \frac{\bar{n}_1^2 - \bar{n}_1^1}{1 - \bar{n}_1^2 \bar{n}_1^1}\right) \div \left(1 - \frac{\bar{n}_1^2 - \bar{n}_1^1}{1 - \bar{n}_1^2 \bar{n}_1^1}\right).$$

Поэтому есть все основания ввести изменение коэффициента трансформации в виде

$$n_1^{21} = \frac{\bar{n}_1^2 - \bar{n}_1^1}{1 - \bar{n}_1^2 \bar{n}_1^1}. \quad (4.2)$$

Аналогично получается изменение напряжения нагрузки

$$V_1^{21} = \frac{\bar{V}_1^2 - \bar{V}_1^1}{1 - \bar{V}_1^2 \bar{V}_1^1}.$$

Дополнительным аргументом таких выражений для изменений параметров режима является соответствие выражению регулировочной характеристики (4.1)

$$V_1^{21} = \frac{2n_1^{21}}{1 + (n_1^{21})^2}.$$

В свою очередь, последующие значения параметров режима имеют вид

$$\bar{n}_1^2 = \frac{\bar{n}_1^1 + n_1^{21}}{1 + \bar{n}_1^1 n_1^{21}}, \quad \bar{V}_1^2 = \frac{\bar{V}_1^1 + V_1^{21}}{1 + \bar{V}_1^1 V_1^{21}}.$$

Отмечаем, что каждый раз при регулировании последующие значения увеличиваются в меньшей степени. В пределе, $n_1^1 = 1 = n_1^2$.

4.1.2. Стабилизация напряжения нагрузки

Режим стабилизации соответствует условию $V_1 = V_{1\pm} = \text{const}, R_1 = \text{var}, n_1 = \text{var}$.

Согласно выражению регулировочной характеристики (4.1)

$$\frac{R_1}{R_i} = \frac{(n_1)^2}{n_1 \frac{V_0}{V_{1=}} - 1}.$$

Полученное соотношение представляет гиперболу на рисунке 4.2

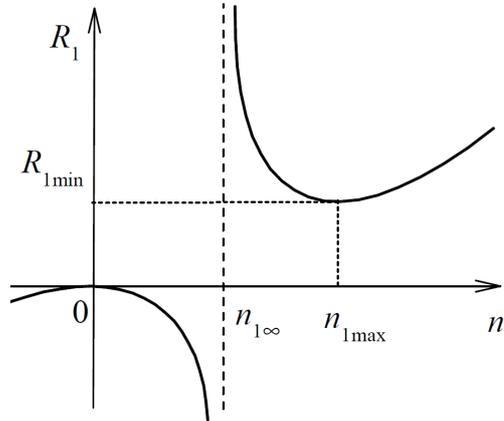


Рис.4.2. График зависимости коэффициента трансформации от сопротивления нагрузки

Однозначное отображение гиперболы на ось n_1 определяет область изменения параметров

$$n_1 \leq n_{1\max} = 1, R_1 \geq R_{1\min},$$

$$\text{где } n_{1\max} = 2 \frac{V_{1=}}{V_0}, R_{1\min} = 4R_i \frac{(V_{1=})^2}{(V_0)^2}, n_{1\infty} = \frac{V_{1=}}{V_0}.$$

Выражения сложного отношения для исходного режима [88]

$$m_n^1 = (0 \ n_1^1 \ n_{1\infty} \ n_{1\max}) = \frac{n_1^1 - 0}{n_1^1 - n_{1\max}} \div \frac{n_{1\infty} - 0}{n_{1\infty} - n_{1\max}} = \frac{n_1^1}{n_{1\max} - n_1^1},$$

$$m_R^1 = (0 \ R_1^1 \ \infty \ R_{1\min}) = \frac{R_1^1 - 0}{R_1^1 - R_{1\min}} = \frac{1}{1 - 4 \frac{R_i}{R_1^1} \frac{(V_{1=})^2}{(V_0)^2}}.$$

Также проявляется свойство

$$m_R = (m_n)^2.$$

Поэтому можно ввести гиперболическую метрику

$$H = Ln m_R = 2Ln m_n.$$

Этот инвариант соответствует равным значениям для таких переменных как n_1, R_1 .

Приведем сразу аналогичные изменения нормированных параметров

$$R_1^{21} = \frac{R_1^2 - R_1^1}{R_1^2 + R_1^1 - 2R_1^2 R_1^1}, \quad n_1^{21} = \frac{n_1^2 - n_1^1}{n_1^2 + n_1^1 - 2n_1^2 n_1^1}, \quad (4.3)$$

причем также выполняется соотношение

$$R_1^{21} = \frac{2n_1^{21}}{1 + (n_1^{21})^2}.$$

4.1.3. Потребитель неизменной мощности

Рассмотрим входную *ВАХ* стабилизированного *ПН* для заданной мощности нагрузки на рисунке 4.3. Мощности нагрузки

$$P = \frac{(V_{1=})^2}{R_1} = IV \quad (4.4)$$

определяет гиперболу $I = P/V$. Таким образом, вводится новый элемент - потребитель неизменной мощности *ПНМ* [89, 90].

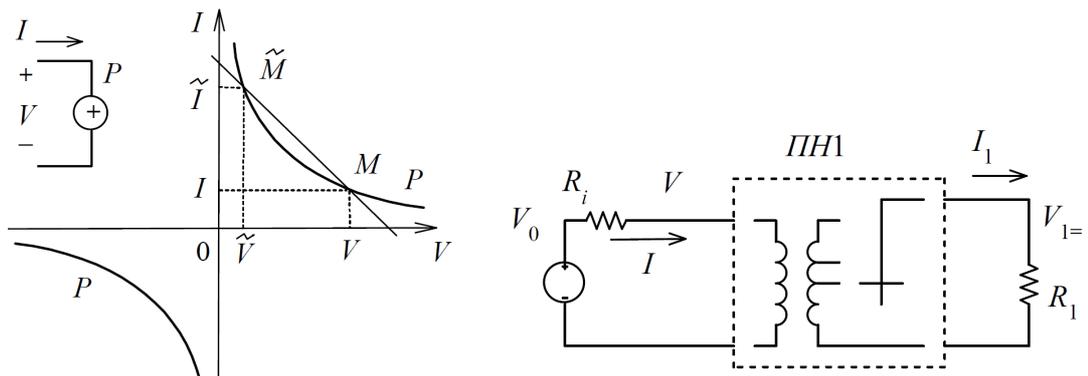


Рис.4.3. *ВАХ* преобразователя напряжения как *ПНМ*.

В свою очередь, *ВАХ* источника напряжения V_0 ограниченной мощности

$$I = \frac{V_0}{R_i} - \frac{V}{R_i}, \quad (4.5)$$

пересекает гиперболу в двух точках, M и \tilde{M} . С учетом исходного уравнения (4.4) и выражения (4.5), получаем соответствующее квадратичное уравнение

$$\frac{V_0 V}{R_i} - \frac{(V)^2}{R_i} = P. \quad (4.6)$$

Решение этого уравнения дает два корня. Так проявляется двузначность режима *ПНМ*.

Рассмотрим влияние величины напряжения источника напряжения V_0 на режим работы приведенного преобразователя. Для различных значений напряжения источника (V_0^1, V_0^2 и т.д.) получаем семейство VAX как параллельных линий на рисунке 4.4. Двухзначность режима соответствует отображению точек $M_1 \rightarrow \tilde{M}_1$, $M_2 \rightarrow \tilde{M}_2$ и т.д. В этом смысле, точки M^+, M^- являются неподвижными точками, когда напряжение $V = V_M = V_{0M} / 2 = \pm \sqrt{PR_i}$.

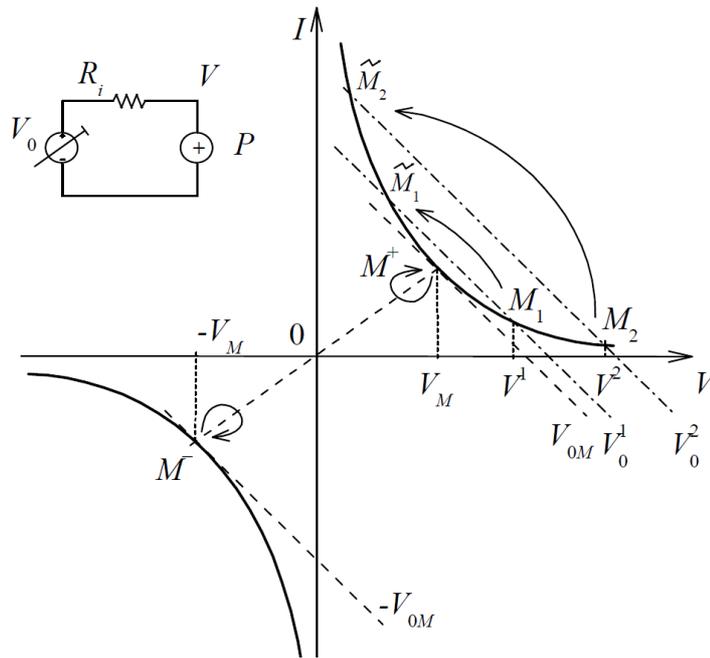


Рис.4.4. Двухзначность режима ПНМ для различных значений напряжения источника напряжения

Мы должны обосновать однозначную рабочую область. Для этого рассмотрим эту характеристику в проективной системе координат на рисунке 4.5 [91].

Точка пересечения S всех VAX источника напряжения, как параллельных линий, находится на бесконечно удаленной прямой. Далее, эта точка S является полюсом, а прямая линия M^+M^- будет полярной. Поэтому, мы получаем некую симметрию или отображение «нижней» части кривой на «верхнюю» часть. Тогда точки M^+, M^- будут базовыми точками, а область однозначного режима включает точки $V_M, \infty, -V_M$. Определим соответствующую область однозначного режима для напряжения V_0 .

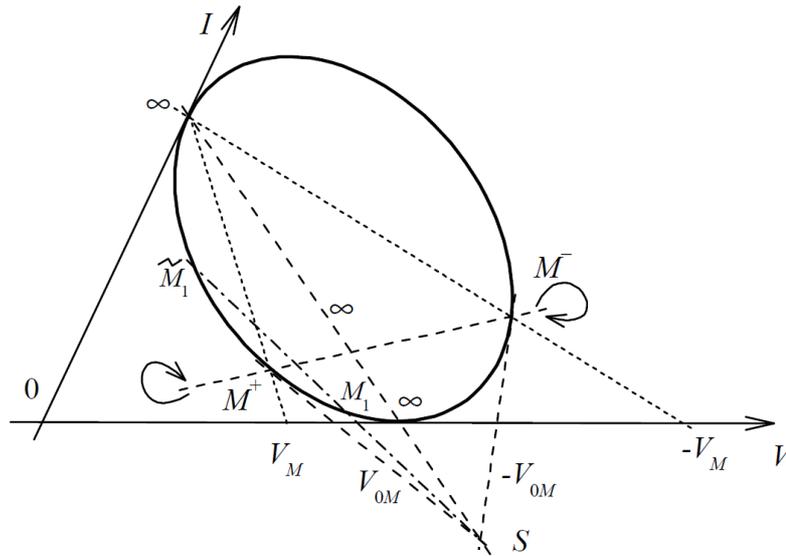


Рис.4.5. Характеристика ПНМ в проективной системе координат

Согласно выражению (4.6), получаем

$$V_0 = \frac{R_i P}{V} + V \quad (4.7)$$

и гиперболу на рисунке 4.6.

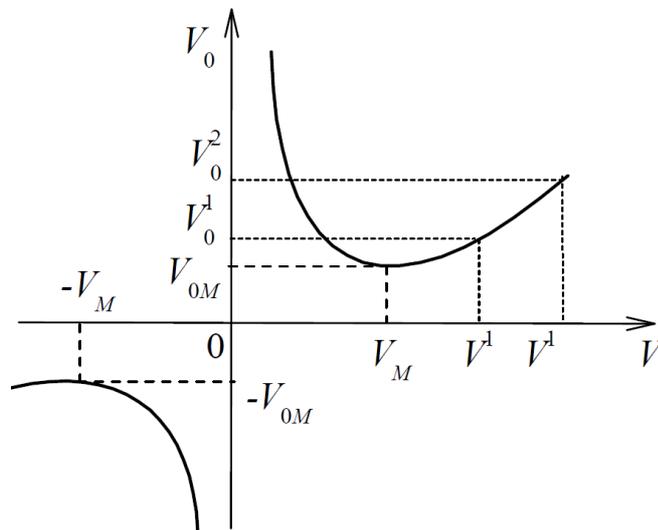


Рис.4.6. Зависимость $V_0(V)$ для заданной мощности нагрузки

Полученное однозначное отображение гиперболы на ось V определяет область однозначного режима, которая включает точки $V_{0M}, \infty, -V_{0M}$ на оси V_0 .

Выражения сложного отношения для исходного режима

$$m_V^1 = (V_M \quad V^1 \quad \infty \quad -V_M) = \frac{V^1 - V_M}{V^1 + V_M}, \quad m_0^1 = (V_{0M} \quad V_0^1 \quad \infty \quad -V_{0M}) = \frac{V_0^1 - V_{0M}}{V_0^1 + V_{0M}}.$$

Также проявляется свойство

$$m_0^1 = (m_V^1)^2.$$

Поэтому можно ввести гиперболическую метрику

$$H^1 = Ln m_0^1 = 2Ln m_V^1.$$

Этот инвариант соответствует равным значениям для таких переменных как V_0, V .

Приведем сразу изменения нормированных параметров

$$V^{21} = \frac{\bar{V}^2 \bar{V}^1 - 1}{\bar{V}^2 - \bar{V}^1}, \quad V_0^{21} = \frac{\bar{V}_0^2 \bar{V}_0^1 - 1}{\bar{V}_0^2 - \bar{V}_0^1}, \quad n_1^{21} = \frac{n_1^2 n_1^1 - 1}{n_1^2 - n_1^1}. \quad (\text{Cerere de inventie MD})$$

Также выполняется соответствие с соотношением (4.7)

$$2V_0^{21} = \frac{1}{V^{21}} + V^{21}.$$

Аналогичные рассуждения для учета потерь сети питания и параметров ПНМ.

Для наглядности, выражения изменений коэффициентов трансформации приведенных режимов работы ПН представлены на рисунке 4.7.

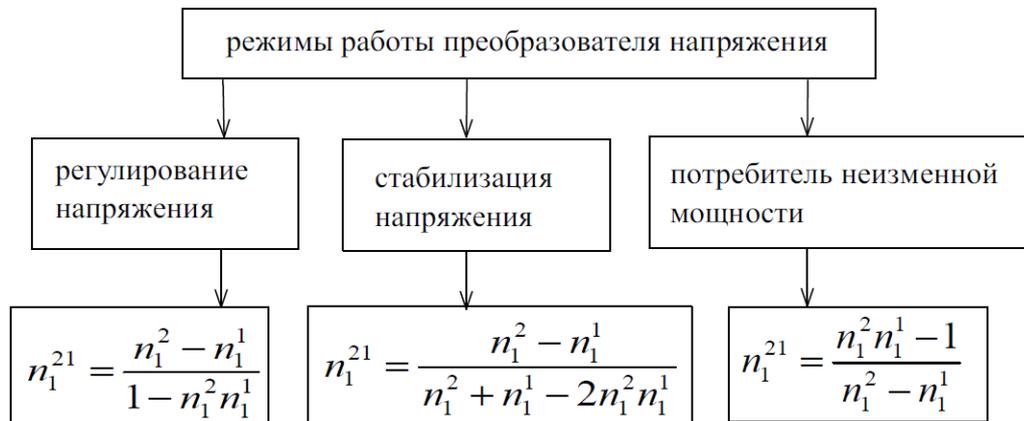


Рис. 4.7. Изменения коэффициентов трансформации различных режимов работы преобразователей напряжения

Очевидно, вид режима работы определяет требования на определение уже системных параметров; будет не корректно заранее вводить изменения параметров в виде приращений, отношений и т.д.

4.1.4. Повышающий импульсный преобразователь

Используем выражение статической регулировочной характеристики (1.13)

$$V_L = V_0 \frac{1-D}{(1-D)^2 + \frac{R_i}{R_L}} = V_0 \frac{1}{1 + \frac{(\sigma)^2}{(1-D)^2}}. \quad (4.8)$$

Также известно выражение регулировочной характеристики через скважность импульсов управления n [48]. Тогда получаем знакомое базовое выражение

$$V_L = V_0 \frac{n}{1 + (\sigma n)^2}, \quad n = \frac{1}{1-D} \geq 1, \quad n = \frac{V_L}{V}, \quad D = \frac{n-1}{n}.$$

Это позволяет применить полученные результаты к повышающему импульсному преобразователю на рисунке 4.8.

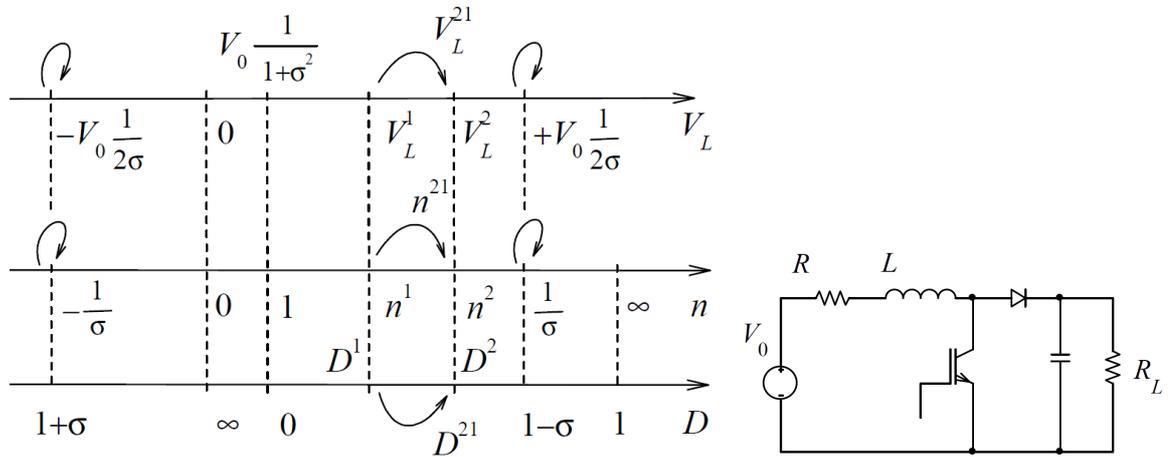


Рис.4.8. Соответствие параметров расширенной регулировочной характеристики повышающего импульсного преобразователя.

Введем расширенную регулировочную характеристику для отрицательных значений напряжения нагрузки, что формально соответствует области $D > 1$. Выделим точки характерных режимов. Для максимального напряжения $V_{LM} = \pm \frac{V_0}{2\sigma}$, $n_M = \pm \frac{1}{\sigma}$, $D_M = 1 \mp \sigma$.

Также вводим единичную точку $V_{L0} = \frac{V_0}{1 + (\sigma)^2}$, $n = 1$, $D = 0$.

Однозначная рабочая область соответствует

$$V_L \in (-V_{LM}, V_{L0}, V_{LM}), \quad D \in (1 + \sigma, 0, 1 - \sigma), \quad n \in \left(-\frac{1}{\sigma}, 1, \frac{1}{\sigma}\right).$$

Выражения сложного отношения для исходного режима

$$m_n^1 = \left(-\frac{1}{\sigma} \quad n^1 \quad 1 \quad \frac{1}{\sigma} \right) = \frac{\frac{1}{\sigma} + n^1}{\frac{1}{\sigma} - n^1} \cdot \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma},$$

$$m_D^1 = m_n^1 = \left((1 + \sigma) \quad D^1 \quad 0 \quad (1 - \sigma) \right) = \frac{(1 + \sigma) - D^1}{(1 - \sigma) - D^1} \cdot \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma},$$

$$m_V^1 = \left(-\frac{V_0}{2\sigma} \quad V_L^1 \quad \frac{V_0}{1 + \sigma^2} \quad \frac{V_0}{2\sigma} \right) = \frac{\frac{V_0}{2\sigma} + V_L^1}{\frac{V_0}{2\sigma} - V_L^1} \cdot \frac{(1 - \sigma)^2}{(1 + \sigma)^2}. \quad (4.9)$$

Также имеет место инвариант

$$m_V = (m_D)^2 = (m_n)^2.$$

Можем ввести гиперболическую метрику

$$H = Ln \, m_V = 2Ln \, m_D. \quad (4.10)$$

Получены равные значения для параметров V_L, D .

Приведем сразу изменение параметров режима

$$D^{21} = \frac{D^1 - D^2}{1 - \sigma^2 + D^1 D^2 - (D^1 + D^2)}, \quad n^{21} = D^{21}, \quad n^{21} = \frac{n^2 - n^1}{1 - (\sigma)^2 n^2 n^1}, \quad V_L^{21} = \frac{V_L^2 - V_L^1}{1 - 4(\sigma)^2 \frac{V_L^2 V_L^1}{(V_0)^2}}.$$

Используя (4.9, 4.10), получим гиперболическое расстояние

$$H^1 = Ln \frac{\frac{V_0}{2\sigma} + V_L^1}{\frac{V_0}{2\sigma} - V_L^1} + 2Ln \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma} = Ln \frac{\frac{V_0}{2\sigma} + V_L^1}{\frac{V_0}{2\sigma} - V_L^1} - 2Ln \frac{1 + \sigma}{1 - \sigma}.$$

В частности, для единичной точки гиперболическое расстояние равно нулю.

Помимо рассмотренных трех точек характерных режимов, есть еще четвертая точка, $V = 0, n = 0, D = \infty$. Будем считать эту точку масштабом. Тогда обратная величина сложного отношения и гиперболическое расстояние для этой точки

$$m_V^{SCL} = \left(\frac{1 + \sigma}{1 - \sigma} \right)^2 > 1, \quad H^{SCL} = Ln \, m_V^{SCL} = 2Ln \frac{1 + \sigma}{1 - \sigma} > 0.$$

Далее, естественно ввести нормированное гиперболическое расстояние для текущего (исходного) режима, используя полученный масштаб

$$r = \frac{H}{H^{SCL}} = Ln \frac{\frac{V_0}{2\sigma} + V_L}{\frac{V_0}{2\sigma} - V_L} \cdot \frac{1}{2Ln \frac{1+\sigma}{1-\sigma}} - 1. \quad (4.11)$$

Тогда напряжение нагрузки и соответственно длительность импульсов управления

$$V_L = \frac{V_0}{2\sigma} \frac{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{2(r+1)} - 1}{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{2(r+1)} + 1}, \quad D = 1 - \sigma \frac{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{r+1} + 1}{\left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right)^{r+1} - 1}. \quad (4.12)$$

Полученные выражения позволяют предложить своего рода взаимную линейризацию зависимости $V_L(D)$ [76, 92].

4.2. Два преобразователя напряжения с общим источником напряжения питания

Рассмотрим снова систему питания на Рис. 2.17. Пусть режим работы соответствует прежним условиям

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = \text{const} = V_{1\text{e}}, R_1 = \text{var} \\ V_2 = \text{var}, R_2 = \text{const} \end{array} \right\} n_1, n_2 = \text{var}.$$

Получим необходимые выражения для заданного режима работы и его изменений. Для этого рассмотрим рисунок 4.11, где обозначены точки исходных и последующих режимов на семействе дуг окружностей L и K . Каждая окружность из семейства L соответствует возможным значениям напряжения первой нагрузки. Например, точки C_{1n}, D_{1n} (исходный и последующий режим) соответствуют заданному напряжению V_1^1 . Сложное отношение четырех точек относительно крайних точек A_{1n}, F_{1n}

$$m_{nL1}^{21} = (A_{1n} D_{1n} C_{1n} F_{1n}) = \frac{D_{1n} - A_{1n}}{D_{1n} - F_{1n}} \div \frac{C_{1n} - A_{1n}}{C_{1n} - F_{1n}}. \quad (4.13)$$

Точки $A_{1n}, C_{1n}, D_{1n}, F_{1n}$ определяются нормированными комплексными величинами

$$\bar{n}^{A1} = \bar{n}_1^{A1} + j\bar{n}_2^{A1}, \bar{n}^{C1} = \bar{n}_1^{C1} + j\bar{n}_2^{C1}, \bar{n}^{D1} = \bar{n}_1^{D1} + j\bar{n}_2^{D1}, \bar{n}^{F1} = \bar{n}_1^{F1} + j\bar{n}_2^{F1}.$$

В частности, координаты точек A_1, F_1 являются комплексно сопряженными величинами

$$\bar{n}_1^{A1} = \bar{n}_1^{F1}, \bar{j}\bar{n}_2^{A1} = -\bar{j}\bar{n}_2^{F1}, \text{ где } \bar{n}_1^{F1} = \bar{V}_1^1, (\bar{n}_1^{F1})^2 + (\bar{n}_2^{F1})^2 = 1.$$

Тогда сложное отношение (4.13)

$$m_{nL1}^{21} = (\bar{n}^{A1} \bar{n}^{D1} \bar{n}^{C1} \bar{n}^{F1}) = \frac{\bar{n}^{D1} - \bar{n}^{A1}}{\bar{n}^{D1} - \bar{n}^{F1}} \div \frac{\bar{n}^{C1} - \bar{n}^{A1}}{\bar{n}^{C1} - \bar{n}^{F1}} \quad (4.14)$$

и является действительной величиной. Это же сложное отношение соответствует точкам C_{2n} , D_{2n} и т. д.

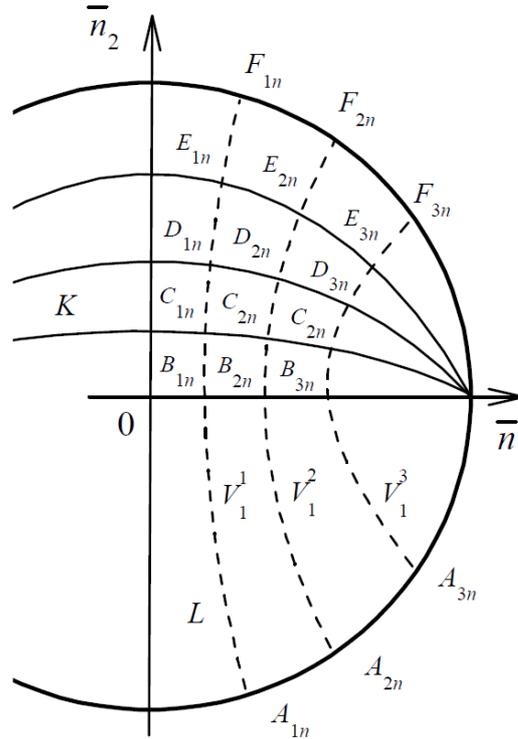


Рис.4.11. Семейство регулировочных характеристик с обозначенными точками исходного и последующего режима.

Как было указано, изменение режима (коэффициентов трансформации) определяется преобразованием Мебиуса

$$\dot{n}^2 = \frac{a\dot{n}^1 + b}{c\dot{n}^1 + d}.$$

Тогда из выражения (4.14) получаем конкретный вид соответствующего преобразования

$$\bar{n}^{D1} = \frac{\left(\bar{n}_1^{F1} + j\bar{n}_2^{F1} \frac{1+m_{nL1}^{21}}{m_{nL1}^{21}-1} \right) \bar{n}^{C1} - 1}{\bar{n}^{C1} - \left(\bar{n}_1^{F1} - j\bar{n}_2^{F1} \frac{1+m_{nL1}^{21}}{m_{nL1}^{21}-1} \right)}.$$

Если точки исходного и последующего режимов лежат на оси \bar{n}_2 , это выражение сводится к случаю одной нагрузки

$$\bar{n}_2^{D1} = \frac{\bar{n}_2^{C1} + \frac{1 + m_{nL1}^{21}}{m_{nL1}^{21} - 1}}{1 + \bar{n}_2^{C1} \frac{1 + m_{nL1}^{21}}{m_{nL1}^{21} - 1}}.$$

Естественно, предложенная модель обобщается на большее число нагрузок. Также получаются аналогичные выражения для других режимов.

4.3. Выводы к главе 4

1. Геометрическая интерпретация характеристик преобразователей позволяет обосновать определение показателей режима, инвариантных к виду фактических параметров и участкам цепи.
2. Тип режима накладывает требования на определение системных параметров.
3. Предложена методология определения однозначной рабочей области двухзначных рабочих характеристик.
4. Получены соотношения для перерасчета параметров регулирования в однозначной области характеристик, обладающие групповым свойством.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведен анализ возможностей известных методов определения параметров режима работы на ряде типовых цепей постоянного тока и преобразователей напряжения. Отмечена недостаточная проработанность этих вопросов в известной литературе. В частности, с отсутствием рекомендуемых выражений с увеличением числа характерных значений параметров режима и нагрузок. Показана необходимость более глубокого изучения «кинематических» свойств цепи с изменяемыми параметрами элементов.
2. Предложено использовать проективную геометрию, отображающей «кинематику» цепи с изменяемыми параметрами элементов (нагрузками). Разработанный геометрический подход составляет содержание **нового научного направления: групповые характеристики (свойства) изменяемых режимов работы цепей, инвариантные к виду параметров режима и участкам цепи.**
3. Основой метода проективной геометрии являются дробно-линейные соотношения (как проективные преобразования) между токами и изменяемым сопротивлением в произвольном участке цепи. Отсюда следует инвариант - сложное отношение четырех выборок или значений параметров режима [91]. Исследование «механизма» взаимовлияния элементов цепи с привлечением проективной геометрии позволяет раскрыть дополнительные свойства цепей.
4. Выведены прямые и обратные формулы перерасчета токов многополюсников при изменении нагрузок. Изменения нагрузок задаются в виде сложного отношения четырех значений. Поэтому формулы перерасчета обладают групповыми свойствами и позволяют найти результирующие значения токов через промежуточные изменения сопротивлений цепи [79, 83].
5. Представленный обобщенный эквивалентный генератор позволяет упростить схему замещения и расчет режима нагрузок в случае изменения сопротивления самой цепи [81, 82]. В схеме этого генератора уменьшается число изменяемых элементов за счет введения неизменяемых дополнительных источников энергии.
6. Для преобразователей напряжения с нелинейными и двузначными рабочими характеристиками обоснованы выражения для изменения параметров режимов работы в однозначной рабочей области [87]. Вид самих выражений зависит от типа режима работы (регулирование или стабилизация напряжения нагрузки).

Рекомендации

1. Полученные результаты дают основу для введения в практику предложенных перспективных технических решений (патентов):
 - передача измерительных сигналов удаленных датчиков физических величин через многопроводные линии связи,
 - параметрический источник тока удаленной нагрузки,
 - линеаризация регулировочных характеристик повышающего и инвертирующего импульсного преобразователя напряжения.
2. Перспективным направлением исследований является развитие данного подхода к анализу цепей переменного тока, в том числе с распределенными параметрами.
3. Углубленное изучение свойств электрических цепей с изменяемыми параметрами элементов представляет интерес к анализу «поточковых» процессов разной физической природы в виду известной аналогии (механические цепи, тепловые, гидро, транспортные сети и т.д.).

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Лукин А. В. Распределенные системы электропитания. *În: Электронные компоненты*, 1997, №. 7, с.28-32.
2. Горяшин Н. Н. Анализ эффективности использования резонансных режимов в импульсных высокочастотных преобразователях напряжения. *În: Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика МФ Решетнева*, 2009, №. 1-2, с.32-37.
3. Лазурченков А. Построение современных систем электропитания. *În: Компоненты и технологии*, 2000, №. 2.
4. Kakigano H., Miura Y., Ise T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution. *În: IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol.25, nr.12, p. 3066-3075.
5. Lu X. et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications. *În: IEEE Transactions on Industrial electronics*, 2014, vol. 61, nr.6, p. 2804-2815.
6. Guerrero J. et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids. A general approach toward standardization. *În: IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, nr.1, p.158-172.
7. Dragičević T. et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability. *În: IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol.29, nr.2, p.695-706.
8. Худяков В. В. Возобновляемые источники энергии. *În: Электричество*, 2011, №10, с. 35-40.
9. Харченко В. В. Микросети на основе ВИЭ: концепция, принципы построения, перспективы использования. *În: Энергия: Экономика, Техника, Экология*, 2014, № 5, с.20-27.
10. Энергетическая стратегия республики Молдова до 2030 г. <http://lex.justice.md/ru/346670/> (vizitat 13.10.2016).
11. Национальный план действий в области возобновляемых источников энергии на 2013-2020 гг. <http://lex.justice.md/viewdoc.php?action=view&view=doc&id=351034&lang=2> (vizitat13.10.2016).
12. Bostan I. et al. Resilient energy systems: renewables: wind, solar, hydro. Springer Science & Business Media, 2012, vol.19. 507p.
13. Tîrșu M., Uzun M. Analiza situației în domeniul celulelor fotovoltaice pe piața internațională și națională. *În: Problemele Energeticii Regionale*, 2011, nr.2(16), p.74-84.
14. Ambros T., Ursatii N. Unele aspecte privind istoria MСHE din Republica Moldova. *În: Problemele Energeticii Regionale*, 2015, nr.3(29), p.100-105.
15. Oñederra O. et al. Overview of DC technology - energy conversion. In: International Conference on Renewable Energy and Power Quality, ICREPQ 2013, Bilbao, Spain, 20- 22 March, 2013, p.1-6.
16. Ammous A., Morel H. LVDC: An efficient energy solution for on-grid photovoltaic applications. *În: Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, nr.5, p. 63-76.
17. Янченко С. А., Кривошта Д. А. Оценка эффективности питания бытовой электроаппаратуры на постоянном токе. *În: Потенциал Современной Науки*, 2015, №1(9), с.34-40.
18. Sun K. et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. *În: IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol.26, nr.10, p.3032-3045.

19. Venmathi M., Ramaprabha R. A comprehensive survey on multi-port bidirectional DC–DC converters for renewable energy systems. *In: ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2013, vol.8, nr.5, p. 348-356.
20. Исембергенов Н.Т. Многоступенчатый инвертор для преобразования энергии солнечных батарей. *In: Электричество*, 2011, №7, с.32-37.
21. Moia J. et al. Comparison of three-phase PWM rectifiers to interface AC grids and bipolar DC active distribution networks. *In: 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems PEDG 2012, IEEE, 25-28 June, 2012, p.221-228.*
22. Жданкин В. К. Низковольтные DC/DC-преобразователи типа POL для бортовой авиационной и ракетно-космической аппаратуры. *In: Силовая Электроника*, 2011, №2, с.37-42.
23. Алексеев В. Стабилизаторы напряжения с низким падением между входом и выходом с приемкой «5». *In: Силовая Электроника*, 2010, №3, с. 46-47.
24. Zazo H. et al. MPPT for photovoltaic modules via newton-like extremum seeking control. *In: Energies*, 2012, vol.5, nr.8, p. 2652-2666.
25. Yau H., Wu C. Comparison of extremum-seeking control techniques for maximum power point tracking in photovoltaic systems. *In: Energies*, 2011, vol.4, nr.12, p. 2180-2195.
26. Хегazi P., Виссарионов В. И. Моделирование системы слежения за максимумом мощности фотоэлектрической панели. *In: Электричество*, 2012, №2, с.50-53.
27. Singh G. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review. *In: Energy*, 2013, vol.53, p.1-13.
28. Naik G., Avinash N. Grid connected fuel cell based on boost inverter system. *In: International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*, 2015, vol.7, nr.7, p. 1062-1068.
29. El Shahat A. Photovoltaic power system simulation for micro-grid distribution generation. *In: 8th International Conference on Electrical Engineering ICEENG 2012, Cairo, Egypt, 29-31 May, 2012, p.29-31.*
30. Lago J., Moia J., Heldwein M. Evaluation of power converters to implement bipolar DC active distribution networks—DC-DC converters. *In: Energy Conversion Congress and Exposition ECCE 2011, IEEE, 17-22 Sept. 2011, p.985-990.*
31. Farag S., Kuperman A. Battery/supercapacitor emulator for chargers functionality testing. *In: International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering*, 2014, vol.8, nr.11, p.1545-1548.
32. Tahim A. et al. Control of interconnected power electronic converters in dc distribution systems. *In: XI Brazilian Power Electronics Conference, Natal, Brasilia, 11-15 Sept. 2011, p. 269-274.*
33. Singh S., Fulwani D. Constant power loads: A solution using sliding mode control. *In: 40th Annual Conference of the IEEE. Industrial Electronics Society IECON 2014, IEEE. Oct. 29- Nov.1, 2014, p.1989-1995.*
34. Liu X., Ma S. Large signal stabilization method of constant power loads. *In: International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering, EAME 2015, Phuket, Thailand, July 26-27, 2015, p.79-82.*
35. Yehia D. et al. Deliverable-power dependence on distribution-line resistance and number of loads in low-voltage DC distribution system. *In: IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol.7, nr.1, p.23-30.
36. She X. et al. On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid. *In: IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, vol.3, nr. 2, p.975-985.
37. Mahmoodi M. et al. A suitable power transfer control system for interconnection converter of DC microgrids. *In: International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ'07, Sevilla, Spain, 28-30 Mach, 2007, p.223.1- 223.7*

38. Liu X., Wang P., Loh P. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control. *În: IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, vol. 2, nr. 2, p. 278-286.
39. Nookaraju G., Gangadharan S., Subbareddy B. Co-ordinate control for fuel cell and photovoltaic cell. *În: International Journal of Science Engineering and Advance Technology*, 2014, vol. 2, nr.11, p. 680-684.
40. Laldin O., Moshirvaziri M., Trescases O. Predictive algorithm for optimizing power flow in hybrid ultracapacitor/battery storage systems for light electric vehicles. *În: IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, nr.8, p. 3882-3895.
41. Azazi H. et al. DSP-based control of boost PFC AC-DC converters using predictive control. *În: Yanbu Journal of Engineering and Science*, 2011, vol.1, nr.2, p.23-33.
42. Irwin J., Nelms R. Basic engineering circuit analysis, 10th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2011. 839p.
43. Демирчян К. С. и др. Теоретические основы электротехники: в 3 т. СПб.: Питер, 2006. т.1, 463 с.
44. Erhan F. Bazele teoretice ale electrotehnicii. Chişinău: UASM, 2009. 675p.
45. Berzan V. Electrofizica și energetica. Chişinău: Universitatea Academiei de Ştiinţe a Moldovei, IE AŞM, 2014. 262p.
46. Glisson T. Introduction to circuit analysis and design. Springer Science & Business Media, 2011. 768p.
47. Nelatury S. Didactic uses of maximum power transfer theorem and guided problem solving. *În: International Journal of Electrical Engineering Education*, 2014, vol.51, nr.3, p.244–260.
48. Иванов-Цыганов А. И. Электропреобразовательные устройства РЭС. Москва: Высшая школа, 1991. 270с.
49. Levron Y., Shmilovitz D. On the maximum efficiency of systems containing multiple sources. *În: IEEE Transaction on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2010, vol.57, nr.8, p. 2232–2241.
50. Kasemsan S., Michael W. Optimum energy harvesting for series-connected power sources with uniform voltage distribution. *În: Journal of Energy and Power Engineering*, 2012, nr.6, p.1250-1262.
51. Артым А. Д. и др. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств. Москва: Радио и связь, 1989. 176с.
52. Климов В., Павленко В., Климов И. Энергетическая эффективность приводов погружных насосов в нефтедобывающей отрасли и их электромагнитная совместимость с сетью. *În: Силовая электроника*, 2011, №4, с.46- 49.
53. Kim S., Chou P. A Recursive solution for power-transmission loss in DC-powered networks. *În: Energies*, 2014, vol. 7, nr.11, p.7519-7534.
54. Zhao X., Li K., Zheng M. Analysis of transmission loss in droop control of a multi-terminal HVDC system. *În: Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol.2, nr.4, p.564-572.
55. Leger A., Nwankpa C. Analog and hybrid computation approaches for static power flow. *In: 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2007, Big Island, Hawaii, 3- Jan. 2007*, p. 119a.
56. Lanz G. et al. Power network transient stability electronics emulator using mixed-signal calibration. *In: Proceedings of the 20th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2013, Gdynia, Poland, 20-22 June, 2013*, p. 369-373.
57. Берзан В. П. Расчет цепи трехфазного тока при произвольном числе подключенных нагрузок. *În: Проблемы региональной энергетики*, 2014, №2 (25), с. 30-37.
58. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Москва: Высшая школа, 1996. 640 с.

59. Alexander C., Sadiku M. Fundamentals of Electric Circuits, 5th ed. New York: McGraw–Hill, 2013. 996p.
60. Simpson-Porco J., Dörfler F., Bullo F. On Resistive Networks of Constant-Power Devices. In: IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, vol.62, nr.8, p. 811-815.
61. Chang Y. et al. A study of the electrical properties of complex resistor network based on NW model. In: Journal of Physics: Conference Series, 2015, vol. 604, nr.1, p.012003.
62. Bhattacharyya S. P., Keel L. H., Mohsenizadeh D. N. Linear Systems: A measurement based approach. Springer India, 2014. 89p.
63. Поливанов К. М. Теорема вариации для n - параметров электрической цепи. In: Электричество, 1947, №7, с.41-46.
64. Жуков Л. А., Стратан И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. Москва: Энергия, 1979. 415с.
65. Мелешкин В. Н. Чувствительность линейных цепей к вариации структуры и параметров элементов. In: Электричество, 1987, №2, с.20-23.
66. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 376с.
67. Постников М. М. Аналитическая геометрия. Москва: Наука, 1986. 415с.
68. Da Silva E. R., Elbuluk M. E. Fundamentals of power electronics. In: Simões, M. G., Kramer, W. E., Chakraborty, S., eds. Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems: A Sourcebook of Topologies, Control and Integration. Springer, 2013, pp. 7-59.
69. Ефимов Н. В. Высшая геометрия. 7-е изд. Москва: Физматлит, 2004. 584с.
70. Глаголев Н. А. Проективная геометрия. Москва: Высшая школа, 1963. 343с.
71. Mazin V. Method for raising the precision of measuring instruments and transducers. In: Measurement Techniques, 1980, vol.23, nr.6, p.479–480.
72. Abdullaev A., Mazin V. Conditions of minimum errors in the measurement of ac circuit parameters by the cross ratio method. In: Measurement techniques, 1993, vol.36, nr.2, p.206-209.
73. Bryant R., Tygar J., Huang L. Geometric characterization of series- parallel variable resistor networks. In: Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on, 1994, vol.41, nr.11, p.686–698.
74. Цыбульский О. А. Инварианты измерительного преобразования. In: Законодательная и прикладная метрология, 2011, № 1 (110), с. 22-26.
75. Цыбульский О. А. Применение метода сложного отношения в широкодиапазонных измерительных приборах. In: Измерительная техника, 2013, № 3, с.11-12.
76. Penin A. Analysis of electrical circuits with variable load regime parameters: projective geometry method. 2nd edition, Springer International Publishing Switzerland, 2016. 417p.
77. Веников В. А. Теория подобия и моделирования: применительно к задачам электроэнергетики. Москва: Высшая школа, 1976. 479с.
78. Каган В. Ф. Основания геометрии. Часть 2. Интерпретация геометрии Лобачевского и развитие её идей. Москва: Гостехиздат, 1956. 335с.
79. Penin A. Recalculation of the loads current of active multi-port networks on the basis of projective geometry. In: Journal of Circuits, Systems and Computers, 2013, vol. 22, nr.5, 1350031, 13 pp.
80. Penin A. Projective geometry method in the theory of electric circuits with variable parameters of elements. In: International Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering, 2013, vol.3, nr.2, p.18-34.

81. Penin A. Generalized Thévenin/ Helmholtz and Norton/ Mayer theorems of electric circuits with variable resistances. *În: WSEAS transactions on circuits and systems*, 2014, vol.13, p.104-116.
82. Пенин А. А. Параметры и характеристики модифицированного эквивалентного генератора активного многополюсника. *În: Электричество*, 2012, № 5, с.32-39.
83. Пенин А. А. Перерасчет токов нагрузок активного многополюсника с изменяемыми параметрами на основе проективной геометрии. *În: Электричество*, 2012, № 10, с.66-73.
84. Penin A. The invariant properties of two-port circuits. *În: International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2009, vol. 4, nr.12, p.740-746.
85. Penin A. Invariant properties of cascaded six-pole networks. *În: International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2012, vol.6, nr.5, p. 305-312.
86. Penin A., Sidorenko A. Transmission of three resistance sensor signals over four wire line with losses. In: Bonca J.; Kruchinin S., eds. *Nanomaterials for security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology: Springer*, 2016, p.311-325.
87. Penin A. Non-Euclidean geometry and regulated characteristics of limited capacity power supply. *În: Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol.2, nr.4, p. 175–186.
88. Penin A. Non-Euclidean geometrical transformation groups in the electric circuit theory with stabilization and regulation of load voltages. *În: International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2014, nr.8, p. 182-194.
89. Сергеев Б. С. и др. Анализ работы электрической цепи с потребителем неизменной мощности. *În: Электричество*, 2002, № 6, с.17-22.
90. Singer S., Erickson R. Power–source element and its properties. *În: IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems*, 1994, vol.141, nr.3, p. 220–226.
91. Пенин А. А. Анализ изменения режимов потребителя неизменной мощности. *În: Электричество*, 2008, № 12, с.43-49.
92. Brevet de inventie. 4067 B2, MD, G05F 1/46. Procedeu de reglare cu convertizoarele de impuls de ridicare și inversare. Alexandru Penin (MD). Cererea depusă 26.08.2008, BOPI nr.8/2010.

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

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



Пенин Александр

5 января 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Пенин Александр Анатольевич.

Дата рождения: 13 октября 1952 г.

Место рождения: г. Вижница, Черновицкая обл., Украина.

Образование:

1959-1969, Средняя школа, г.Окница, Молдова,

1969- 1974, Высшее образование, радиотехнический факультет, Одесский политехнический институт,

04/02/2011, доктор технических наук, специальность 05.27.01- электроника твердого тела, микроэлектроника, нано электроника.

Профессиональная деятельность:

1974- 1980 – радиоинженер, Котовский Совет Колхозов, МССР,

1980- 1991- инженер - конструктор 2-й категории; главный конструктор проекта, СКТБ Твердотельной электроники Института Прикладной Физики АН Молдовы,

1991- 1994- ведущий инженер, Институт Энергетики АН Молдовы,

1994- 2006- гл. инженер, частное предприятие “Elcon”,

С 2006 по настоящее время – старший научный сотрудник лаборатории криогеники Института Электронной Инженерии и Нанотехнологий имени Д. Гицу АН Молдовы.

Область научных интересов: силовая электроника, теория электрических цепей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Моя глубокая благодарность основателю Института Электронной Инженерии и Нанотехнологий академику Гицу Дмитрию Васильевичу за предоставленную возможность работать по индивидуальному плану.

Я признателен моему научному консультанту, профессору Сидоренко Анатолию Сергеевичу за помощь и поддержку на всех этапах исследований и подготовки диссертации.

Благодарю мою семью за понимание.



5 января 2017

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Monografii

1.1. monografii monoautor

1. Penin A. Analysis of electrical circuits with variable load regime parameters: projective geometry method. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 343p.
2. Penin A. Analysis of electrical circuits with variable load regime parameters: projective geometry method. 2nd edition, Springer International Publishing Switzerland, 2016. 417p.

1.2. Capitole în monografii

3. Penin A., Sidorenko A. Transmission of measuring signals and power supply of remote sensors. In: Bonca J., Kruchinin S., eds. Nanotechnology in the Security Systems. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security: Springer, 2014, pp. 267-281.
4. Penin A., Sidorenko A. Transmission of three resistance sensor signals over four wire line with losses. In: Bonca J.; Kruchinin S., eds. Nanomaterials for security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology: Springer, 2016, p.311-325.

2. Articole în diferite reviste științifice

2.1. în reviste internaționale cotate ISI și SCOPUS

5. Penin A. Recalculation of the loads current of active multi-port networks on the basis of projective geometry. În: Journal of Circuits, Systems and Computers, 2013, vol. 22, nr.5, 1350031, 13 pp.
6. Penin A. Analysis of paralleling limited capacity voltage sources by projective geometry method. În: The Scientific World Journal, 2014, vol. 2014, article ID 359893, 5 pp.
7. Penin A. Non-Euclidean geometrical transformation groups in the electric circuit theory with stabilization and regulation of load voltages. În: International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2014, nr.8, p. 182-194.
8. Penin A., Sidorenko A., Vaseashta A. On the analogy of non- Euclidean geometry of human body with electrical networks. În: International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2014, vol.4, nr.3, p. 378-388.
9. Penin A. Invariant properties of cascaded six-pole networks. În: International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 2012, vol.6, nr.5, p. 305-312.

2.2. în reviste din străinătate recunoscute

10. Penin A. Non-Euclidean geometry and regulated characteristics of limited capacity power supply. În: Journal of Electrical Engineering, 2014, vol.2, nr.4, p. 175–186.
11. Penin A. Generalized Thévenin/ Helmholtz and Norton/ Mayer theorems of electric circuits with variable resistances. În: WSEAS transactions on circuits and systems, 2014, vol.13, p.104-116.
12. Пенин А., Сидоренко А. Проективная геометрия в электронике, технике и живой природе. În: Россия и Германия, 2014, том 2, № 6, с. 44-49.
13. Penin A. Projective geometry method in the theory of electric circuits with variable parameters of elements. În: International Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering, 2013, vol.3, nr.2, p.18-34.
14. Penin A. Comparison of regimes of active two-port networks with stabilization of load voltages. În: International Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering, 2013, vol. 3, nr.6, p.1-18.
15. Пенин А. Параметры и характеристики модифицированного эквивалентного генератора активного многополюсника. În: Электричество, 2012, № 5, с.32-39.

16. Пенин А. Перерасчет токов нагрузок активного многополюсника с изменяемыми параметрами на основе проективной геометрии. *În: Электричество*, 2012, № 10, с.66-73.
 17. Penin A. About the definition of parameters and regimes of active two-port networks with variable loads on the basis of projective geometry. *În: Wseas Transactions on Circuits and Systems*, 2011, vol.10, nr.5, p.157-172.
 18. Пенин А. Источники мощности и их свойства. *În: Электричество*, 2010, № 4, с.60-65.
 19. Penin A. The invariant properties of two-port circuits. *În: International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2009, vol. 4, nr.12, p.740-746.
 20. Пенин А. Анализ изменения режимов потребителя неизменной мощности. *În: Электричество*, 2008, № 12, с.43-49.
 21. Penin A. Determination of regimes of the equivalent generator based on projective geometry: the generalized equivalent generator. *În: World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, vol.22, p. 846-854.
 22. Пенин А. «Относительные режимы» параллельно соединенных четырехполюсников: геометрический подход. *În: Электричество*, 1997, № 2, с.49-57.
 23. Пенин А. Характеристики модифицированного эквивалентного генератора активного двухполюсника с изменяемым сопротивлением. *În: Электричество*, 1995, № 4, с. 55-59.
- 2.3. *în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, Categoria B*
24. Пенин А. Определение нормированных энергетических показателей при изменении параметров резистивных четырехполюсников. *În: Проблемы региональной энергетики*, 2013, № 2(22), с.20-37.
 25. Penin A. Normalized representation of the equations of active multiport networks on the basis of projective geometry. *În: Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 2011, vol.10, nr. (3-4), p.350-357.
 26. Penin A., Sidorenko A. Investigation of the effect of an equalizing resistor on the paralleling voltage sources by projective geometry. *În: Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 2012, vol.11, nr.(1-2), p.124-131.
 27. Penin A., Sidorenko A. Balanced multi-port electric network and its projective coordinates. *În: Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 2015, vol.14, nr.(1-2), p.102-112.

3. Articole în culegeri științifice

3.1. culegeri de lucrări ale conferințelor internaționale

28. Penin A. Projective Geometry Invariants of Human Body and Multi-port Electrical Circuits. In: 3rd Intern. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, ICNBME-2015, Chisinau, Republic of Moldova, 23-26 Sept. 2015. IFBME Proceedings. 2015, **55**, 336-339.
29. Penin A., Sidorenko A. Transmission of Resistance Sensor Signals over Multi-wire Line with Losses. In: 3rd Intern. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, ICNBME-2015, Chisinau, Republic of Moldova, 23-26 Sept. 2015. IFBME Proceedings. 2015, **55**, 332-335.
30. Penin A., Sidorenko A. Stabilization of load voltages in power supply systems with limited capacity voltage sources. In: Telecommunications, Electronics and Informatics: proc. of the 5th Intern. Conf., 20-23 May 2015. Ch.: UTM, 2015, 1, p. 79-83.
31. Penin A., Sidorenko A. Voltage regulators with limited capacity power supply and Non-Euclidean geometry. In: Proceeding of the 8th International Conference on

- Microelectronics and Computer Science: The 50th anniversary of Technical University of Moldova, Oct. 22 -25, 2014 Chisinau, Rep. of Moldova. Chisinau: Tehnica, p. 54-57.
32. Penin A. Generalization of the Thevenin and Norton equivalent generator. In: Proceedings of the 4th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics ICTEI 2012, Chisinau, Moldova, May 17-20, 2012. Chisinau: Universitatea Tehnica a Moldovei, 2012, vol. I, p.127-132.
 33. Penin A., Sidorenko A. Characteristic of paralleling limited capacity voltage sources. In: Proceedings of the 4th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics ICTEI 2012, Chisinau, Moldova, May 17-20, 2012. Chisinau: Universitatea Tehnica a Moldovei, 2012, vol. I, p.211-215.
 34. Penin A. Analysis of active two-port circuits with variable loads on the basis of projective geometry. In: Proceedings of the 7th International Conference on Microelectronics and Computer Science, Chisinau, Moldova, September 22-24, 2011, Chisinau: Tehnica - UTM, 2011, p. 113-116.

4. Materiale/ teze la forurile științifice

4.1. conferințe cu participare internațională

35. Пенин А., Сидоренко А. Проблема перерасчета токов цепи. In: The 5th Conference of the Physicists of Moldova (CFM-2014), Oct. 22-25, 2014. Chisinau, p. 88.
36. Penin A. Projective geometry in the problems of analysis of electric circuits with variable parameters of elements. In: The 20th conference on applied and industrial mathematics. Chisinau, 22- 25 August, 2012, Communications, p. 177.
37. Пенин А., Сидоренко А. Передача двух сигналов по трех проводной линии. In: Conferința Fizicienilor din Moldova (CFM-2012), Oct. 24-26, 2012. Belti, p. 124-125.

5. Brevete de invenții, patente, certificate de înregistrare, materiale la saloanele de invenții

1. Brevet de invenție. 1011 Y, MD, H04B 3/32, G01R 27/16. Metodă de transmitere a trei semnale prin linia de comunicație cu patru fire. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD) , Sofia Donu (MD). Cererea depusă 18.06.2015, BOPI nr.2/2016.
2. Brevet de invenție. 987 Y, MD, H02J 1/00. Sistem distribuit de alimentare cu energie electrică. Anton Iacuin (MD), Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 02.04.2015, BOPI nr. 12/2015.
3. Brevet de invenție. 801 Y, MD, G05F 3/08. Metodă de stabilizare a curentului de sarcină reglabil. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 15.10.2013, BOPI nr. 7/2014.
4. Brevet de invenție. 692 Y, MD, H04B 3/32, H04B 3/54. Procedeu de transmitere a semnalelor de măsurare în linia de curent continuu cu trei fire. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 13.02.2013, BOPI nr.10/2013.
5. Brevet de invenție. 543 Y, MD, H04B 3/32, H04B 3/54. Procedeu de transmitere a două semnale prin linia de curent continuu cu trei conductoare. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 13.01.2012, BOPI nr. 08/2012.
6. Brevet de invenție. 536 Y, MD, H04B 3/54. Procedeu de transmitere a semnalelor prin linia de curent continuu. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 12.12.2011, BOPI nr. 7/2012.
7. Brevet de invenție. 534 Y, MD, G01R 27/16. Procedeu de măsurare la distanță a conductanței active a rezistorului. Alexandru Penin (MD), Anatol Sidorenko (MD). Cererea depusă 12.12.2011, BOPI nr 7/2012.
8. Brevet de invenție. 4067 B2, MD, G05F 1/46. Procedeu de reglare cu convertizoarele de impuls de ridicare și inversare. Alexandru Penin (MD). Cererea depusă 26.08.2008, BOPI nr.8/2010.

ПЕНИН АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПРОЕКТИВНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ
И НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ**

233.02- ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Научный реферат диссертации на соискание
ученой степени доктора хабилитат технических
наук на основе опубликованных научных работ

Подп. в печ.: 05.01. 2017.
Бум. стандарт. Печ. лазер
Усл. печ. л.: 3,0

Формат А4
Тираж 50 экз.
Заказ №2

Отпечатано в Институте Электронной Инженерии и Нанотехнологий АН Молдовы,
ул. Академическая, 3\3, г. Кишинев, MD- 2028, Республика Молдова

ACADEMIA DE ȘTIINȚA A MOLDOVEI

**INSTITUTUL DE INGINERIE ELECTRONICA
ȘI NANOTEHNOLOGII "D. GHIȚU"**

Cu titlu de manuscris

CZU: УДК: 621.3.011.7: 621.314.1: 621.316: 514.8

PENIN ALEXANDRU

**GEOMETRIA PROIECTIVĂ ÎN TEORIA
CIRCUITELOR ELECTRICE CU SARCINI
VARIABILE ȘI NELINIARE**

233.02 Echipamente și sisteme electronice

Referatul științific al tezei de doctor
habilitat în tehnică în baza lucrărilor publicate

Chișinău 2017