

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ԳՈՀԱՐ ՎԱՉԱԳԱՆԻ

ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԹՎԵՐԻ ՀԱՆՐԱՀԱՇՎԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ

ՇՂԹԱՆԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ե.09.01 - «Էլեկտրատեխնիկա, էլեկտրամեխանիկա, էլեկտրատեխնոլոգիաներ»

մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական

աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2020

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

АРУТЮНЯН ГОАР ВАЧАГАНОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

МЕТОДОМ АЛГЕБРЫ СТРУКТУРНЫХ ЧИСЕЛ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.09.01 – “Электротехника, электромеханика, электротехнологии”

ЕРЕВАН 2020

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.դ. Վ.Ս. Սաֆարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Մ.Ա. Արամյան

տ.գ.թ. Է.Վ. Կուրդիկյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2020թ. օգոստոսի 28-ին, ժամը 11⁰⁰ - ին
Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ԲՈԿ-ի 038
մասնագիտական խորհրդի նիստում (0009, Երևան, Տերյան փող., 105):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ- ի գրադարանում:

Մեղմագիրն առաքված է 2020թ. հուլիսի 17-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

Գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Ա.Լ. Մայիլյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете
Армении (НПУА)

Научный руководитель:

д.т.н. В.С.Сафарян

Официальные оппоненты:

д.т.н. М.А. Арамян

к.т.н. Э. В. Кургинян

Ведущая организация:

ЗАО «Научно-исследовательский
институт энергетики»

Защита диссертации состоится 28-го августа 2020г. в 11⁰⁰ часов на заседании
Специализированного совета ВАК 038, действующего при Национальном
политехническом университете Армении (НПУА) по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна,
105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 17- го июля 2020г.

Ученый секретарь

Специализированного совета, к.т.н.



А.Л. Маилян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемам анализа обобщенных параметров линейных электрических цепей посвящено много исследований.

В многочисленных фундаментальных трудах по теоретическим основам электротехники задача исследования режимов однородных цепных схем (каскадного соединения четырехполюсников), с точки зрения определения входных сопротивлений и передаточных функций, рассматривает частные случаи, когда звенья цепочки являются несимметричными четырехполюсниками, нагруженными по принципу согласования, либо симметричными четырехполюсниками в режиме согласованной нагрузки. В связи с этим результаты исследований обобщенных параметров однородных цепных схем, состоящих из одинаковых несимметричных четырехполюсников при произвольной нагрузке, имеют важное значение. Полученные выражения позволили исследовать свойства экстремальности режимов цепных схем.

Вопросы, возникающие в теоретических исследованиях, а также в инженерной практике, связанные с получением аналитической зависимости режимного параметра электрической цепи от пассивного параметра, весьма актуальны и имеют практическое значение.

Задача определения обобщенных параметров составных четырехполюсников при различных способах соединения в некоторых источниках приводится без указания условия регулярности. Как правило, условие регулярности соединения четырехполюсников нарушается, и приведенные решения неприемлемы.

Определение обобщенных параметров составного четырехполюсника, выраженное обобщенными параметрами входящих в соединение четырехполюсников, представляет интерес в автоматизированных системах управления.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методов исследования обобщенных параметров линейных электрических цепей методом алгебры структурных чисел, а также определение параметров многополюсников при их объединении.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка метода исследования режимов разветвленной цепной схемы, нагруженной на произвольную нагрузку;
- исследование экстремальных свойств функций передач однородных цепных схем;
- получение аналитического выражения зависимости режимного параметра от пассивного элемента электрической цепи и исследование ее свойств;
- определение обобщенных параметров составных многополюсников при объединении двух многополюсников.

Методы исследования. Теоретической основой для работы послужили теория линейных электрических цепей, метод алгебры структурных чисел, теория графов, теория функции действительной и комплексной переменной. Программной основой работы стали среда графического программирования LabVIEW, среда программирования Delphi.

Информационной базой послужили официальные издания, научные публикации, различные периодические научные издания и др.

Научная новизна работы. В диссертационной работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

1. Предложен метод исследования режимов однородной разветвленной цепной схемы с несимметричными четырехполосниками, нагруженной на произвольную нагрузку.
2. Исследовано экстремальное свойство функции передачи по току и напряжению однородной цепной схемы.
3. Получено и исследовано аналитическое выражение зависимости режимного параметра от пассивного элемента электрической цепи.
4. Выявлены трудности обнаружения регулярности соединения четырехполосников и предложен метод определения обобщенных параметров составных многополосников.

Практическая ценность работы. Полученные результаты имеют следующее практическое значение:

1. Метод определения режимов разветвленных цепных схем, а также условие экстремальности режимов цепных схем могут быть использованы при проектировании сетей внешнего освещения, цепей с распределенными параметрами, электрических фильтров.
2. Аналитическое выражение зависимости тока трехфазной цепи от сопротивления заземления может быть использовано для расчета заземляющего сопротивления при проектировании схем релейной защиты.
3. Исследование обобщенных параметров составных многополосников может быть применено для определения обобщенных параметров объединенной энергосистемы в случае параллельной работы отдельных энергосистем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод исследования режимов разветвленной цепной схемы с одинаковыми несимметричными четырехполосниками, нагруженной на произвольную нагрузку.
2. Экстремальное свойство функции передачи по току и напряжению однородной цепной схемы.
3. Аналитическая зависимость режимного параметра от пассивного элемента электрической цепи и ее свойства.
4. Метод определения обобщенных параметров составных многополосников.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- годичной научной конференции НПУА (Ереван, 2017 г.);
- семинарах кафедры “Электротехника и электропривод” НПУА (Ереван, 2017-2019 гг.)

Публикации. Основные научные результаты работы опубликованы в девяти научных работах, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 98 наименований. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, включая 67 рис., 13 таблиц.

Диссертация написана на русском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, практическое значение работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор научно-технической литературы, посвященной методам исследования параметров и функций электрических цепей, а именно - определению входных сопротивлений и коэффициентов передачи по току и напряжению цепных схем, получению аналитической зависимости режимного параметра от пассивного элемента электрической цепи, определению обобщенных параметров составных четырехполосников.

Аналитический обзор позволил сформулировать задачи и выявить трудности классической теории электрических цепей, а именно

- исследование однородной цепной схемы при произвольной нагрузке;
- определение коэффициентов уравнений составного четырехполосника при различных способах соединения;
- исследование режимов кольцевой цепи;
- исследование функции передачи напряжения в цепи обратной связи.

Во второй главе исследуются экстремальные свойства режимов цепных схем с одинаковыми несимметричными четырехполосниками. Показано, что при определенных соотношениях параметров четырехполосника действующие значения тока и напряжения на выходах звеньев цепной схемы имеют экстремальные значения. Приведена методика исследования режимов разветвленной цепной схемы, полученной соединением отдельных однородных цепных схем.

Расчет режимов однородной цепной схемы (рис. 1) основан на выражениях функций передачи по напряжению $\dot{K}_{IU}$ и току $\dot{K}_{IU}$, определяющих токи и напряжения

любого звена цепной схемы, а также на выражении входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ цепной схемы:

$$\dot{K}_{\text{иУ}} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_0} = \frac{Z_{\infty a} - Z_{\infty b} \alpha C^{n-i}}{Z_{\infty a} - Z_{\infty b} \alpha C^n} \cdot C^{i/2}, \quad (1)$$

$$\dot{K}_{\text{иI}} = \frac{i_i}{i_0} = \frac{1 + \alpha C^{n-i}}{1 + \alpha C^n} \cdot C^{i/2}, \quad (2)$$

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_{\infty a} - Z_{\infty b} \alpha C^i}{1 + \alpha C^i}, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{Z_{\infty a} - Z_n}{Z_{\infty b} + Z_n}$, $C = \frac{Z_b - Z_{\infty b}}{Z_b + Z_{\infty a}}$, i – порядковый номер четырехполосника в схеме, n – количество четырехполосников в цепной схеме.

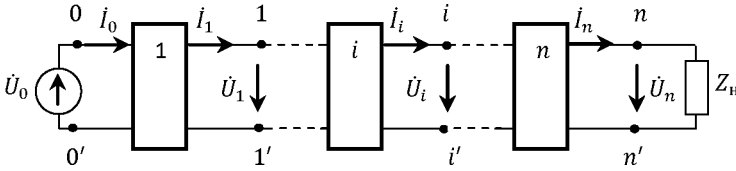


Рис. 1. Однородная цепная схема при произвольной нагрузке Z_n

Величины $Z_{\infty a}$, $Z_{\infty b}$ – особые сопротивления несимметричного четырехполосника (рис. 2а, б), такие, что если к выходным зажимам четырехполосников при прямой и обратной передаче соответственно подключить $Z_n = Z_{\infty a}$ ($Z_n = Z_{\infty b}$), тогда входное сопротивление четырехполосника также будет равно $Z_{\infty a}$ ($Z_{\infty b}$), причем при такой нагрузке квадрат коэффициента передачи по напряжению и току будет равен C .

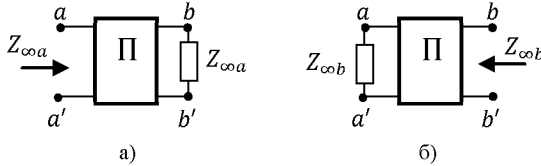


Рис. 2. Четырехполосник загружен на сопротивление $Z_{\infty a}$ (а) и $Z_{\infty b}$ (б)

Сопротивления $Z_{\infty a}$, ($Z_{\infty b}$) определяются обобщенными параметрами четырехполосника:

$$Z_{\infty a} = \frac{1}{2} \left((Z_a - Z_b) + \sqrt{(Z_a - Z_b)^2 + 4Z_a Z_{ba}} \right),$$

$$Z_{\infty b} = \frac{1}{2} \left((Z_b - Z_a) + \sqrt{(Z_b - Z_a)^2 + 4Z_b Z_{ab}} \right),$$

где Z_a , Z_b – сопротивления холостого хода; Z_{ab} , Z_{ba} – сопротивления короткого замыкания четырехполосника.

В работе приведены результаты численных примеров зависимости действующих значений напряжения $U(i)$, тока $I(i)$, активной и реактивной мощностей $P(i)$ и $Q(i)$ от

выхода i -го четырехполосника цепной схемы при одностороннем и двустороннем питании.

С применением основных выражений (1)-(3) приведена следующая методика расчета режимов разветвленной цепной схемы (рис. 3):

- эквивалентная замена первой и второй цепных схем входным сопротивлением $Z'_{\text{экв}}$ и $Z''_{\text{экв}}$ соответственно;
- замена сопротивлений $Z'_{\text{экв}}$ и $Z''_{\text{экв}}$ эквивалентным сопротивлением Z_n ;
- получение режима (токи и напряжения) на выходе каждого звена основной цепной схемы, в том числе в нагрузке, т.е. на входе разветвленных участков;
- возврат к исходной разветвленной цепной схеме и получение токов и напряжений каждого звена.

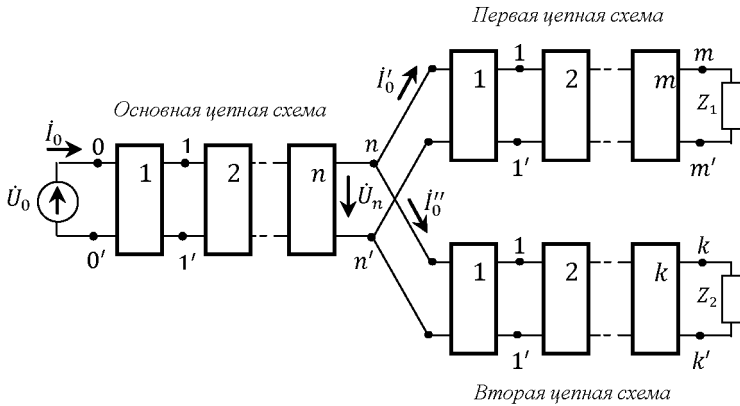


Рис. 3. Разветвленная цепная схема

Полученные выражения, связывающие режимные параметры звеньев цепной схемы в зависимости от параметров одного звена и их количества в цепи в аналитической форме, позволили не только рассмотреть численные примеры режимов цепной схемы, но и исследовать свойства этих выражений. Анализ полученных выражений позволил аналитическим путем доказать свойство экстремальности режимов цепных схем (рис. 1). Графическим путем определены экстремальные величины действующих значений напряжений и токов при холостом ходе на выходе.

Ток любого звена цепной схемы в режиме холостого хода ($\alpha = -1$) определяется согласно выражению (2):

$$I_i = I_0 \frac{1 - c^{n-i}}{1 - c^n} \cdot c^{i/2} = \frac{I_0}{1 - c^n} \left(\dot{c}^{\frac{i}{2}} - \dot{c}^{n - \frac{i}{2}} \right) = \frac{I_0}{1 - c^n} \dot{A}(i), \quad (4)$$

где множитель $\frac{I_0}{1 - c^n}$ не зависит от i и является комплексной постоянной.

Поведение функции (4) сводится к исследованию функции

$$\dot{A}(i) = \left(\dot{c}^{\frac{i}{2}} - \dot{c}^{n - \frac{i}{2}} \right) = a(i) + jb(i).$$

Исследуем модуль комплексной величины $\dot{A}(i)$ на экстремум:

$$A(i) = \sqrt{[a(i)]^2 + [b(i)]^2} = \sqrt{C^i + C^{2n-i} - 2C^n \cos(i-n)\varphi}.$$

Для этого производную $A'(i)$ приравняем к нулю:

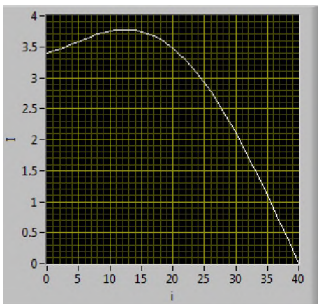
$$A'(i) = \frac{C^i \ln C - C^{2n-i} \ln C + 2\varphi C^n \sin(i-n)\varphi}{2 \cdot \sqrt{C^i + C^{2n-i} - 2C^n \cos(i-n)\varphi}} = \frac{f_2(i) - f_1(i)}{2 \cdot \sqrt{C^i + C^{2n-i} - 2C^n \cos(i-n)\varphi}} = 0,$$

где $f_1(i) = 2\varphi C^n \sin(n-i)\varphi$, $f_2(i) = C^i \ln C - C^{2n-i} \ln C$.

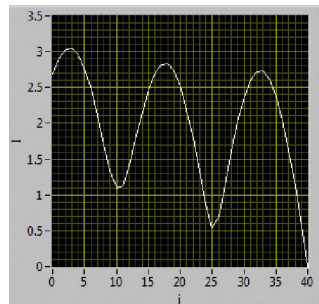
Возможны следующие варианты решения трансцендентного уравнения $f_2(i) = f_1(i)$:

- нет точек пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи изменяется монотонно;
- имеется одна точка пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи имеет один экстремум;
- имеется множество точек пересечения, следовательно, действующее значение тока вдоль цепи имеет множество экстремумов.

На рис. 4а, б представлены графики действующих значений токов цепной схемы при различных значениях обобщенных параметров четырехполосника, когда действующее значение тока вдоль цепи имеет один экстремум и множество экстремумов.



а)



б)

Рис. 4. Графики действующих значений токов $I(i)$ цепной схемы
(а) имеется один экстремум и (б) имеется множество экстремумов

Третья глава посвящена вопросам получения и исследования аналитической зависимости режимного параметра от сопротивления пассивного элемента в линейных электрических цепях. Как правило, эти функции являются дробно-линейными функциями комплексной переменной. Исследуются свойства полученной зависимости для электрической цепи на основе кругового свойства и свойства симметричности, а также принципа максимума модуля дробно-линейной функции комплексной переменной. Определяются радиус и центр образа отображения.

Рассмотрим зависимость $\dot{I}_k(Z_m)$ (рис.5) комплексного тока k – й ветви $\dot{I}_k$ от комплексного сопротивления Z_m ветви m :

$$\dot{I}_k(Z_m) = \frac{aZ_m + b}{cZ_m + d} = A + \frac{B}{Z_m + C} \quad (5)$$

и исследуем ее свойства.

Зависимость $\dot{I}_k(Z_m)$ получается методом алгебры структурных чисел. Вывод требуемой зависимости сводится к получению детерминанта матрицы контурных сопротивлений и ее алгебраических дополнений в символьном виде. После выделения в цепи интересующих ветвей электрическая цепь представляется активным четырехполюсником (рис.5а) или при $k = m$ активным двухполюсником (рис. 5б).

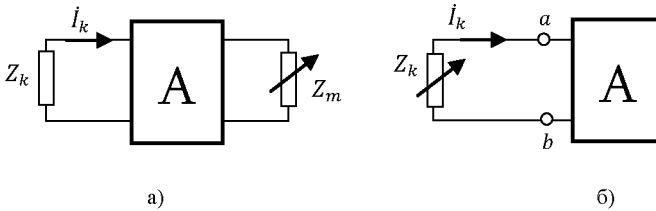


Рис.5. Зависимости $\dot{I}_k(Z_m)$ активного четырехполюсника (а) и $\dot{I}_k(Z_k)$ активного двухполюсника (б)

Определяются прообраз и образ дробно-линейного отображения $\dot{I}_k(Z_m)$ активного четырехполюсника. Прообразом дробно-линейного отображения $\dot{I}_k(Z_m)$ является полуплоскость $\text{Re}(Z_m) \geq 0$. Согласно круговому свойству дробно-линейной функции, ось $\text{Re}(Z_m) = 0$ отобразится в окружность, если не имеет особой точки ($Z_m \neq -\frac{d}{c}$), а полуплоскость $\text{Re}(Z_m) > 0$ - во внутренность окружности.

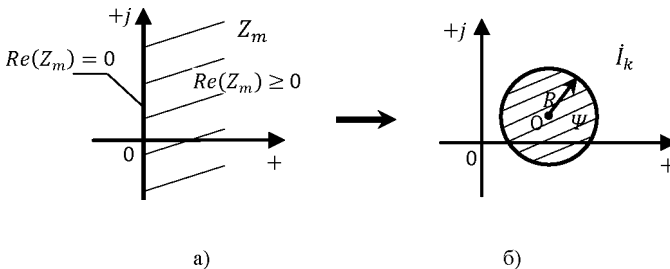


Рис.6. Графическое изображение прообраза (а) и образа (б) отображения $\dot{I}_k = f(Z_m)$

На рис. 6а, б приведено графическое изображение прообраза и образа Ψ дробно-линейного отображения $\dot{I}_k = f(Z_m)$. Координаты центра O и радиуса R окружности образа отображения, выраженные через комплексные постоянные A, B, C , получаются в следующем виде:

$$O \left[\left(\frac{|B|}{2C_1} \cos \beta + |A| \cos \alpha \right); \left(\frac{|B|}{2C_1} \sin \beta + |A| \sin \alpha \right) \right], R = \frac{|B|}{2C_1}, \quad (6)$$

где $\alpha = \arg(A)$, $\beta = \arg(B)$.

Основываясь на отображении

$$Z_m = f^{-1}(I_k) = \frac{b - d I_k}{-a + c I_k}, \quad (7)$$

обратном к отображению $I_k = f(Z_m)$, решаются следующие задачи:

- определение образа отображения $Z_m = f^{-1}(I_k)$ области $|I_k| = \text{const}$;
- определение образа отображения $Z_m = f^{-1}(I_k)$ области $\arg I_k = \text{const}$;
- исследование отображения полной мощности $\mathfrak{S}(Z_m)$ выделенной ветви электрической цепи.

Рассмотрим перечисленные задачи.

Функция (7), обратная по отношению к дробно-линейной, сама является дробно-линейной.

Исследуем свойство зависимости (7) на предмет обнаружения множества комплексных сопротивлений $\Phi \subset Z_m$, при которых ток k -й ветви не изменится по модулю. Прообразом отображения $Z_m = f^{-1}(I_k)$ является область $|I_k| = \text{const}$, а образом отображения - множество $\Phi \subset Z_m$.

Проведем окружность на комплексной плоскости I_k с центром в начале координат и радиусом r , равным интересующему по величине значению тока $r = |I_k|$. В общем случае результатом пересечения окружности с областью Ψ будет дуга $\bar{AB}$ (рис. 7б). Для определения искомого множества сопротивлений Z_m воспользуемся обратным отображением (7). Образом дуги $\bar{AB}$ на плоскости Z_m будет дуга $\bar{A_1B_1}$ (рис. 7а), являющаяся искомым множеством сопротивлений, при которых ток $|I_k|$ будет равен заранее заданной величине.

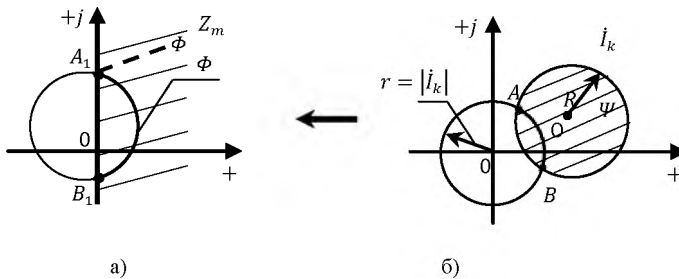


Рис.7. Графическое изображение прообраза (а) и образа (б) отображения области $|I_k| = \text{const}$

Если одна из точек A (B) особая $I_k|_{Z_m \rightarrow \infty} = \frac{a}{c}$, тогда образом дуги $\bar{AB}$ на плоскости Z_m будет луч с началом в точке A_1 (B_1), являющийся искомым множеством Φ (пунктирная линия на рис. 7а). Таким образом, для всех значений сопротивлений

множества $\Phi \subset Z_m$ ток I_k по величине будет равен току при холостом ходе в ветви m активного четырехполосника.

Исследуем свойство зависимости (7) на предмет обнаружения множества комплексных сопротивлений $\Phi \subset Z_m$, при которых $\arg I_k = \text{const}$. На комплексной плоскости I_k проведем луч из начала координат, составляющий с действительной осью требуемый угол $\arg(I_k)$ (рис. 8). В общем случае результатом пересечения луча с множеством Ψ будет хорда $FE \subset \Psi$ (рис. 8б). Очевидно, что для любого значения $I_k \in FE$ получается $\arg(I_k) = \text{const}$. Для определения искомого множества сопротивлений Z_m воспользуемся обратным отображением (7). Образом хорды $\overline{FE}$ на плоскости Z_m будет дуга $\overline{F_1E_1}$ (рис. 8а), являющаяся искомым множеством сопротивлений, при которых аргумент тока I_k будет равен заранее заданной величине.

Образом отображения хорды FE на плоскости Z_m будет луч с началом в F_1 (E_1) (пунктирная линия на рис. 8а), если одна из точек F (E) особая $I_k|_{Z_m \rightarrow \infty} = \frac{a}{c}$.

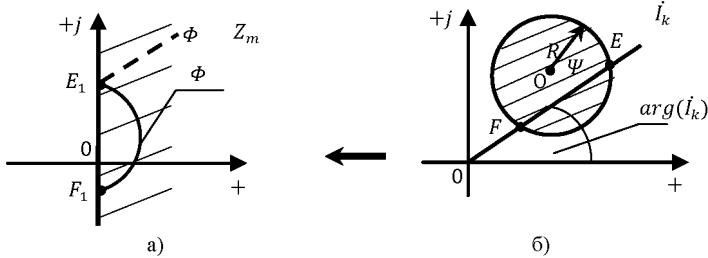


Рис.8. Графическое изображение прообраза (а) и образа (б) отображения области $\arg(I_k) = \text{const}$

Исследуем полную мощность k -й ветви $\tilde{S}_k(Z_m)$ в зависимости от сопротивления Z_m активного четырехполосника (рис.5а). Полная мощность k -й ветви электрической цепи определяется выражением $\tilde{S}_k(Z_m) = |I_k(Z_m)|^2 Z_k$. Очевидно, что по фазе полная мощность k -й ветви совпадает с фазой сопротивления Z_k :

$$\arg(\tilde{S}_k) = \arg(Z_k) = \text{const}.$$

На рис. 9а изображен образ отображения $I_k = f(Z_m)$. Точки A и B соответствуют наибольшему $|I_{k\max}|$ и наименьшему $|I_{k\min}|$ значениям тока.

Отображение полной мощности $\tilde{S}_k(Z_m)$ приведено на рис. 9б и получается следующим образом:

- на комплексной плоскости $\tilde{S}_k$ проводится луч OF с началом в точке $(0;0)$, составляющий с действительной осью угол $\arg Z_k$. В зависимости от характера сопротивления Z_k , луч OF будет в первой или в четвертой четверти;

- определяются значения комплексных мощностей:

$$\tilde{S}'_k = |i_{k_{max}}|^2 Z_k \quad \text{и} \quad \tilde{S}''_k = |i_{k_{min}}|^2 Z_k.$$

Отрезок $[\tilde{S}'_k; \tilde{S}''_k]$, а также его проекции на осях $Re(\tilde{S}_k)$ и $Im(\tilde{S}_k)$ отмечены жирной линией (рис. 9б).

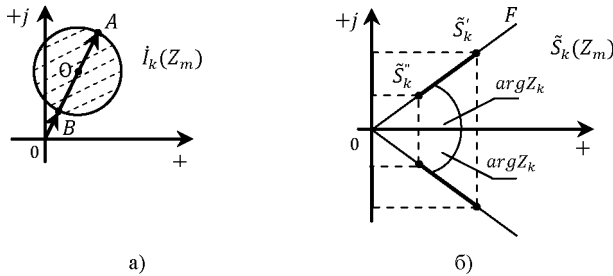


Рис.9. Полная мощность $\tilde{S}_k(Z_m)$ на комплексной плоскости:
а - функция $\tilde{S}_k = f(Z_m)$, б - функция $\tilde{S}_k(Z_m)$

Продemonстрируем применение метода алгебры структурных чисел для определения множества сопротивлений заземляющих элементов, обеспечивающих заданное значение тока в фазных проводах при однофазных замыканиях в трехфазных сетях напряжением 6, 10, 35 кВ. Заземление нейтрали дает возможность применять схемы релейных защит при однофазных замыканиях на землю.

Рассмотрим трехфазную сеть (рис. 10) в установившемся режиме после однофазного замыкания в третьей фазе (или в фазе С). Определим множество значений заземляющих элементов Z_4 , при которых ток в фазном проводе, где произошло замыкание, по величине будет равен заранее заданной величине I .

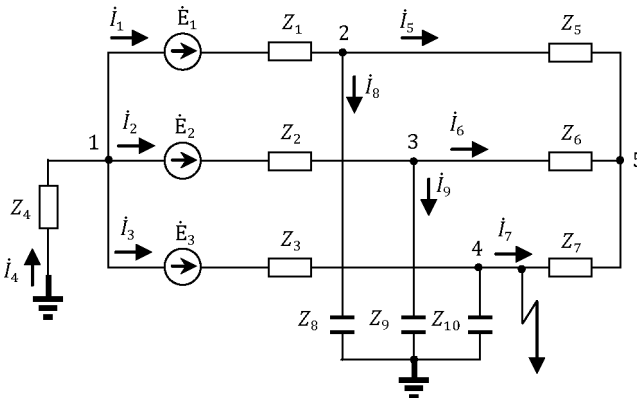


Рис.10. Схема трехфазной сети в режиме однофазного замыкания на землю

Даны параметры трехфазной цепи: $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3$ – трехфазная симметричная система ЭДС; $Z_1 = Z_2 = Z_3$ – сопротивление линии; $Z_5 = Z_6 = Z_7$ – эквивалентные сопротивления нагрузки, $C_8 = C_9 = C_{10}$ – поперечная емкость линии.

Определим аналитическую зависимость тока $\dot{I}_3$ от величины Z_4 заземляющего элемента - $\dot{I}_3(Z_4)$. Представим установившийся режим трехфазной цепи моделью контурных токов и представим топологию в удобном виде для применения метода структурных чисел (рис. 11).

Согласно методу контурных токов, имеем

$$\dot{I}_3(Z_4) = \dot{I}_{44}(Z_4) - \dot{I}_{22}(Z_4), \quad (8)$$

причем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{22}(Z_4) &= (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \frac{\Delta_{12}}{\Delta_z} + (\dot{E}_2 - \dot{E}_3) \frac{\Delta_{22}}{\Delta_z} + \dot{E}_3 \frac{\Delta_{42}}{\Delta_z}, \\ \dot{I}_{44}(Z_4) &= (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \frac{\Delta_{14}}{\Delta_z} + (\dot{E}_2 - \dot{E}_3) \frac{\Delta_{24}}{\Delta_z} + \dot{E}_3 \frac{\Delta_{44}}{\Delta_z}. \end{aligned}$$

Выражения определителя матрицы контурных сопротивлений Δ_z и алгебраических дополнений $\Delta_{12}, \Delta_{14}, \Delta_{22}, \Delta_{42}, \Delta_{44}$ в виде функции от Z_4 принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta_z(Z_4) &= Z_4(-273 - j277) \cdot 10^9 + (-268 - j1419,8) \cdot 10^9, \\ \Delta_{12}(Z_4) &= Z_4(-2,036 - j0,9) \cdot 10^9 + (-4,52 - j7,4) \cdot 10^9, \\ \Delta_{22}(Z_4) &= Z_4(-4,1 - j1,82) \cdot 10^9 + (-9 - j14,78) \cdot 10^9, \\ \Delta_{14}(Z_4) &= \text{const} = (-4,5 - j7,4) \cdot 10^9, \\ \Delta_{42}(Z_4) &= \text{const} = (-9 - j14,78) \cdot 10^9, \\ \Delta_{44}(Z_4) &= \text{const} = (-273 - j277) \cdot 10^9. \end{aligned}$$

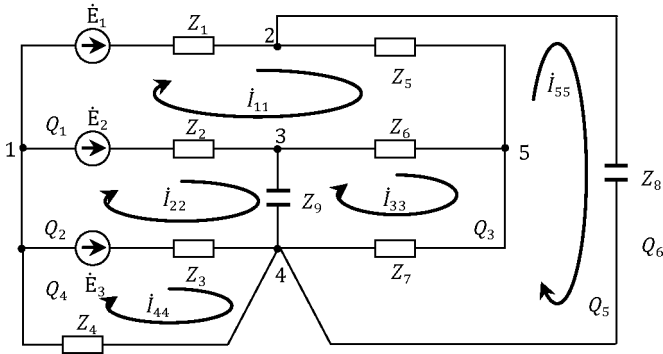


Рис. 11. Топология трехфазной цепи ($Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ – ячейки)

Аналитическое выражение тока $\dot{I}_3(Z_4)$ получится в виде (5):

$$\dot{I}_3(Z_4) = (-14,38 + j98,94) + \frac{(-2462,7 + j4537,5)}{Z_4 + (3,1 + j2,1)} = A_3 + \frac{B_3}{Z_4 + C}.$$

Координаты центра окружности и радиус образа отображения $\dot{I}_3(Z_4)$ согласно (6) будут следующими (рис. 12б):

$$O_3 = (-419,3; j827), R_3 = 832,7.$$

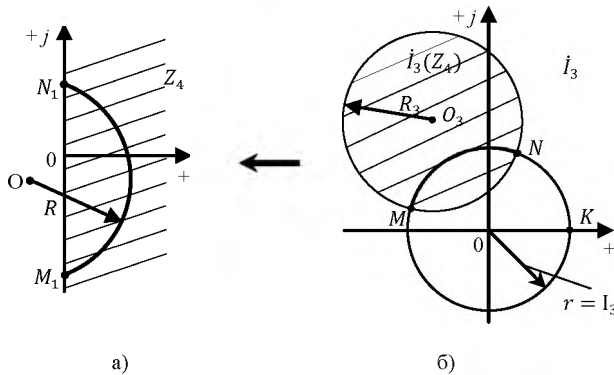


Рис.12. Графическое изображение образа отображения - дуга $\overline{M_1N_1}$ (а) и прообраза отображения - дуга $\overline{MN}$ (б)

Проведем окружность $(\text{Re}i)^2 + (\text{Im}i)^2 = r^2$ на комплексной плоскости $\dot{I}_3$ с центром в начале координат и радиусом r , равным интересующему по величине значению тока $r = |\dot{I}_3|$. В общем случае результатом пересечения окружности с областью $\dot{I}_3(Z_4)$ будет дуга $\overline{MN}$ (рис. 12б). Для определения искомого множества сопротивлений Z_4 воспользуемся обратным отображением (7) $Z_4 = f^{-1}(\dot{I}_3)$. образом области $|\dot{I}_3| = \text{const} = r$ на плоскости Z_4 будет дуга $\overline{M_1N_1}$, являющаяся искомым множеством сопротивлений Z_4 , при которых модуль линейного тока в фазе C будет равен заранее заданной величине $|\dot{I}_3|$.

В четвертой главе исследуются обобщенные параметры составных многоклеммников. Определение обобщенных параметров (сопротивления холостого хода и короткого замыкания) составных многоклеммников, получаемых объединением трехклеммников, проводится с применением структурных чисел второй категории и полных структурных чисел. Определение элементов матрицы узловых проводимостей составных многоклеммников, получаемых объединением двух многоклеммников, проводится с применением матричной алгебры.

Рассматривается определение обобщенных параметров многоклеммников, получаемых объединением двух трехклеммников.

На рис.13 приведены блок-графы составных многоклеммников при трех различных способах объединения трехклеммников.

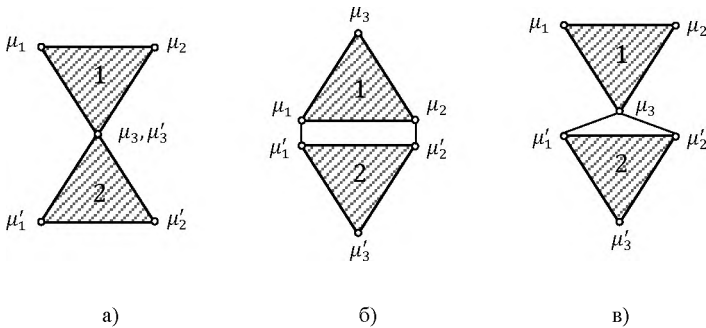


Рис.13. Соединение трехклеммников: а – первый способ, б – второй способ, в – третий способ

Выражение для определения входного сопротивления $Z_{\mu_m \mu_k}$ блок-схемы имеет следующий вид:

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\mu_m \mu_k} = \frac{\Delta_{\mu_m \mu_k(y)}}{\Delta_y}, \quad (9)$$

где Δ_y - детерминант матрицы узловых проводимостей блок-схемы; $\Delta_{\mu_m \mu_k(y)}$ - детерминант матрицы узловых проводимостей блок-схемы с совмещенными узлами μ_m и μ_k .

Согласно выражению (9) и с применением метода структурных чисел получены входные сопротивления $Z_{\mu_1 \mu'_1}$, $Z_{\mu_3 \mu'_3}$, $Z_{\mu_1 \mu'_3}$ соответственно для схем, приведенных на рис. 13 а, б, в:

$$\begin{aligned} Z_{\mu_1 \mu'_1} &= Z_{1a} + Z_{2a}; \\ Z_{\mu_3 \mu'_3} &= \frac{Z_{1ca}Z_{1a} + Z_{2ca}Z_{2a} + Z_{1a}Z_{2c} + Z_{1c}Z_{2a} - 0,5(Z_{1c} + Z_{1a} - Z_{1b})(Z_{2c} + Z_{2a} - Z_{2b})}{Z_{1c} + Z_{2c}}, \\ Z_{\mu_1 \mu'_3} &= \frac{Z_{1a} \cdot Z_{2c} + Z_{2ca}Z_{2a}}{Z_{2c}}. \end{aligned}$$

На рис. 14 изображены сопротивления холостого хода Z_{1c} , Z_{1a} , Z_{1b} и короткого замыкания Z_{1ca} трехклеммника.

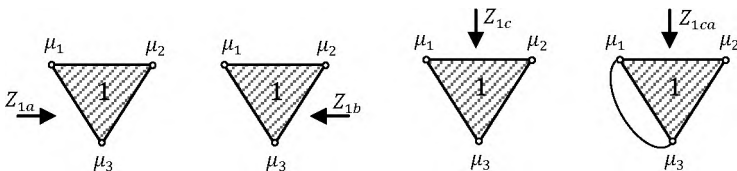


Рис.14. Изображение входных сопротивлений холостого хода и короткого замыкания трехклеммника

Рассмотрим параллельное соединение двух многоклеммников неодинаковых размерностей. Пусть имеем два многоклеммника: $(m + k)$ – клеммник и $(n + k)$ – клеммник (рис. 15) с известными матрицами узловых проводимостей.

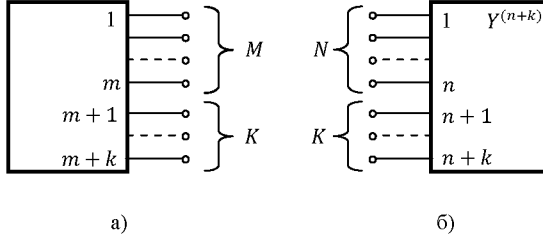


Рис.15: а - $(m+k)$ - клеммник и б - $(n+k)$ - клеммник

Матрицы узловых проводимостей первого $Y^{(m+k)}$ и второго $Y^{(n+k)}$ многоклеммников до соединения представим в следующем виде

$$Y^{(m+k)} = \begin{bmatrix} Y_{MM} & Y_{MK} \\ Y_{KM} & Y'_{KK} \end{bmatrix}, \quad Y^{(n+k)} = \begin{bmatrix} Y_{NN} & Y_{NK} \\ Y_{KN} & Y''_{KK} \end{bmatrix},$$

где Y_{MM} (Y_{NN}) – квадратная подматрица узловых проводимостей для множества M (N) клемм $(m+k)$ – клеммника ($(n+k)$ – клеммника); Y'_{KK} (Y''_{KK}) – квадратная подматрица для множества K клемм $(m+k)$ – клеммника ($(n+k)$ – клеммника); Y_{MK} (Y_{NK}) – матрица размера $m \times k$ ($n \times k$).

Соединяя многоклеммники k клеммами (рис. 16а), получим $(m+n+k)$ - клеммник (рис. 16 б).

Матрица узловых проводимостей $(m+n+k)$ - клеммника, выраженная через элементы исходных матриц, имеет вид

$$Y^{(m+n+k)} = \begin{bmatrix} Y_{MM} & 0 & Y_{MK} \\ 0 & Y_{NN} & Y_{NK} \\ Y_{KM} & Y_{KN} & Y'_{KK} \end{bmatrix},$$

где $Y_{KK} = Y'_{KK} + Y''_{KK}$.

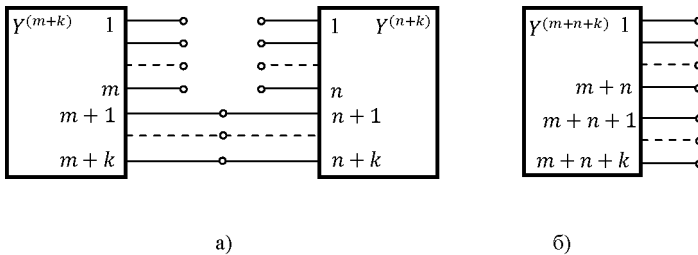


Рис.16. Блок-схема соединения $(m+k)$ - и $(n+k)$ - клеммников (а) и результирующий $(m+n+k)$ - клеммник (б)

Электрическое состояние полученного многоклеммника опишем методом узловых потенциалов:

$$\begin{bmatrix} Y_{MM} & 0 & Y_{MK} \\ 0 & Y_{NN} & Y_{NK} \\ Y_{KM} & Y_{KN} & Y_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_M \\ \phi_N \\ \phi_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_M \\ I_N \\ I_K \end{bmatrix}. \quad (10)$$

При свертывании k общих клемм и рассмотрении режима многоклемника относительно $(m+n)$ - клемм положим в (10), что узловые токи в k клеммах равны нулю. Для получения матрицы узловых проводимостей эквивалентного $(m+n)$ - клеммника исключим потенциалы ϕ_K из системы (10) при $I_K = 0$:

$$\begin{cases} Y_{KM}\phi_M + Y_{KN}\phi_N + Y_{KK}\phi_K = 0, \\ \phi_K = -Y_{KK}^{-1}(Y_{KM}\phi_M + Y_{KN}\phi_N) \end{cases} \quad (11)$$

и подставим ϕ_K (11) в (10). Матрица узловых проводимостей Y_Σ эквивалентного $(m+n)$ клеммника будет иметь вид

$$Y_\Sigma = \begin{bmatrix} Y_{MM} - Y_{MK}Y_{KK}^{-1}Y_{KM} & -Y_{MK}Y_{KK}^{-1}Y_{KN} \\ -Y_{NK}Y_{KK}^{-1}Y_{KM} & Y_{NN} - Y_{NK}Y_{KK}^{-1}Y_{KN} \end{bmatrix}.$$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Применение метода алгебры структурных чисел при исследовании обобщенных параметров электрических цепей позволяет получить функции электрических цепей (функции передачи по току и напряжению, входные сопротивления и т.д.) в символьной (аналитической) форме. В результате анализа этих функций выявляются новые свойства и закономерности.
2. Разработан алгоритм для расчета режимов цепных схем при одностороннем и двустороннем питании, а также установившегося режима разветвленной цепной схемы, основанный на методе алгебры структурных чисел. Приведены результаты численных расчетов цепных схем при одностороннем и двустороннем питании.
3. Аналитическим путем доказано свойство экстремальности режимов цепных схем. Приведены графики действующих значений напряжений и токов цепной схемы при различных значениях параметров четырехполосника, иллюстрирующие экстремальные свойства режимов цепной схемы.
4. Показано, что зависимость режимного параметра электрической цепи от сопротивления пассивного элемента выражается дробно-линейной функцией комплексной переменной, для которой определены радиус и центр образа (окружности) отображения.
5. Проведено исследование свойств полученной зависимости и предложен метод определения множества сопротивлений ветви Z_m , при которых модуль тока (аргумент) ветви $|I_k|$ ($\arg(I_k)$) остается постоянным.
6. Предложен метод выбора сопротивления заземления нейтрали электрических сетей напряжением 6, 10, 35 кВ, основанный на методе структурных чисел. Метод позволяет определить множество заземляющих сопротивлений,

обеспечивающих заданное значение тока в фазных проводах при однофазных замыканиях на землю.

7. Разработана методика получения обобщенных параметров при соединении трехполюсников с применением структурных чисел второй категории.
8. Приведены выражения для определения обобщенных параметров (узловые проводимости и контурные сопротивления) составного многоклеммника путем объединения двух многоклеммников неодинаковых размерностей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К анализу режимов однородных цепных схем методом структурных чисел // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. - 2016.- N2.- С. 9-18.
2. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. Исследование экстремальных свойств режимов однородной цепной схемы // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2017.- Т. LXX, N3.- С. 308-315.
3. Harutyunyan G.V. About equivalent replacement of a four – terminal network by a ladder circuit // Proceedings of Engineering Academy of Armenia.- 2017.- Vol. 14, N3.- P. 387-389.
4. Арутюнян Г.В. К исследованию зависимости режимных параметров от пассивных элементов электрической цепи методом структурных чисел // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика.- 2017.- N2.- С. 43-50.
5. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К обобщению понятия четырехполюсника // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. – 2018.- N2.- С. 30-38.
6. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К исследованию зависимости режимного параметра электрической цепи от сопротивления ветви // Изв. вузов. Электромеханика.- 2019.- Т. 62, № 1.- С. 25-29.
7. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К исследованию зависимости линейных токов от величины заземляющих элементов в трехфазной цепи // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. - 2019.- N1.- С. 42-51.
8. Арутюнян Г.В. К расчету режимов разветвленной цепной схемы // Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика.- 2019.- N2.- С. 73-79.
9. Сафарян В.С., Арутюнян Г.В. К исследованию обобщенных параметров составных многополюсников // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2020.- Т. LXXIII, N1.- С. 28-36.

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ԳՈՀԱՐ ՎԱՉԱԳԱՆԻ

ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԹՎԵՐԻ ՀԱՆՐԱՀԱՇՎԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ
ՇՂԹԱՆԵՐԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Էլեկտրական շղթաների տեսության բնագավառում առանձնակի գիտատեխնիկական հետաքրքրություն են ներկայացնում այնպիսի մեթոդների մշակումը, որոնք թույլ են տալիս ստանալ էլեկտրական շղթաների ռեժիմային և պասիվ պարամետրերի միջև անալիտիկ առնչություններ, ինչպես նաև էլեկտրական շղթաների ֆունկցիաները՝ ընդհանրացված պարամետրերը, լարման և հոսանքի փոխանցման ֆունկցիաները սիմվոլիկ տեսքով: Այդպիսի հնարավորություն է ընձեռում կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի մեթոդը, որը թույլ է տալիս ստանալ հանգուցային հաղորդականությունների և կոնտուրային դիմադրությունների մատրիցների դետերմինանտները և հանրահաշվական լրացումները սիմվոլիկ տեսքով:

Որոշ դեպքերում կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի կիրառմամբ մշակված մեթոդները անփոխարինելի են նաև թվային հաշվարկներում:

Բազմաթիվ ֆունդամենտալ աշխատություններում համասեռ շղթայական սխեմաների ռեժիմների հետազոտությունները բերված են մասնավոր դեպքերի համար, երբ բեռնավորումը կատարված է համաձայնեցման սկզբունքով: Այս առումով կարևոր նշանակություն ունեն ոչ սիմետրիկ քառաբևեռների կասկադային միացմամբ շղթայի ռեժիմների հետազոտումը կամայական բեռնավորման դեպքում: Կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի մեթոդով ստացված արտահայտությունների միջոցով հնարավոր դարձավ հետազոտել շղթայական սխեմաների ռեժիմների էքստրեմալության հատկությունը:

Բաղադրյալ քառաբևեռի ընդհանրացված պարամետրերի որոշման խնդիրը գիտական աղբյուրներում նույնպես բերված է մասնավոր դեպքի համար երբ պահպանվում է կանոնավորության պայմանը: Որպես կանոն,

կանոնավորության պայմանը խախտվում է և բերված լուծումները կիսառելի չեն:

Աշխատանքում ստացվել են հետևյալ արդյունքները՝

1. Կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի մեթոդի կիրառմամբ մշակված է շղթայական սխեմաների ռեժիմների հաշվարկի ալգորիթի միակողմանի և երկկողմանի սնուցման դեպքում: Ապացուցված է շղթայական սխեմաների ռեժիմների էքստրեմալության հատկությունը:
2. Ցույց է տրված, որ էլեկտրական շղթայի ռեժիմային պարամետրի կախվածությունը պասիվ տարրից կոմպլեքս փոփոխականի կոտորակագծային է, որի արտապատկերման կերպարի կենտրոնը և շառավիղը որոշված են:
3. Կատարված է ստացված կախվածության հատկությունների հետազոտում և ստացված արդյունքները վերագրված են էլեկտրական շղթային:
4. Կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի մեթոդով առաջադրվել է 6, 10, 35 կՎ ցանցերում գծային հոսանքի տրված արժեքն ապահովող չեզոքի հողակցող դիմադրության ընտրություն միաֆազ հողակցման դեպքում:
5. Երկրորդ կարգի կառուցվածքային թվերի կիրառմամբ մշակվել է եռաբևեռների միավորման հետևանքով ստացված բազմաբևեռի ընդհանրացված պարամետրերի որոշման մեթոդիկա: Բերված են տարբեր չափերի բազմասեղմանների միավորման արդյունքում ստացված բաղադրյալ բազմասեղմանի ընդհանրացված պարամետրերը:

DEVELOPMENT OF GENERALISED PARAMETERS OF ELECTRICAL CIRCUITS BY
THE METHOD OF STRUCTURAL NUMBERS

SUMMARY

Of particular scientific and technical interest in the field of electrical circuit theory are the development of methods that make it possible to obtain an analytical dependence of the operating parameters (current, voltage, power) on the passive elements of electrical circuits, as well as the functions of electrical circuits: generalized parameters, voltage and current transmission functions. Such an opportunity is provided by the method of algebra of structural numbers, which allows to obtain the determinants and algebraic additions of the matrix of node conductivities and loop resistances in the symbolic form.

In some cases, methods developed using the algebra of structural numbers is indispensable in numerical calculations too.

In many fundamental works, studies of homogeneous circuit modes research are given for specific cases where loading is done by agreement. In this regard, investigated modes of cascade connection of asymmetrical two-ports circuits in case of arbitrary loading is of great importance. Analytical expressions obtained by the method of algebra of structural numbers, it became possible to study the extreme properties of the ladder circuit modes.

The problem of determining the generalized parameters of the composite two-ports is also given in scientific sources for a particular case when the condition of regularity is observed. As a rule, the condition of regularity is violated and the solutions provided are not acceptable.

The following results have been achieved:

1. Using the algebraic method of structural number algebra, the algorithm for calculating ladder circuit modes has been developed for one-way and two-way power supply. The extremality property of the regimes of chain circuits is proved.
2. It is shown that the dependence of the operating parameters on the passive element (complex resistance) is a fractional-linear function of the complex variable whose image

of the mapping of the domain Z is a circle, the coordinate of the center and the radius of which are determined.

3. The properties of the resulting function are examined and the results are attributed to the electrical circuit.

4. By the method of algebra of structural numbers was proposed to select grounding resistance selection in the 6, 10, 35 kV networks providing a given value of linear current in case of single-phase earth fault.

5. Using the second-order structural numbers, a methodology for determining the generalized parameters of multiterminal obtained by combining three-terminals has been developed. The generalized parameters of the composite multiterminal obtained as a result of the combination of multiterminals of different sizes are given.

