

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ДЪРВОВИДНИ СТРУКТУРИ ЗА АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ВЕРИГА ПРИ СИНУСОИДАЛЕН И ПЕРИОДИЧЕН НЕСИНУСОИДАЛЕН РЕЖИМ НА РАБОТА

Цветелина Симеонова, Алекс Велков

Резюме: Предложена е методика за анализ на линейна електрическа верига с един източник, базирана на използването на дървовидна структура. Анализът на електрическата схема чрез дървовидно описание на еквивалентните преобразования дава еднозначна връзка между параметри на елементи и параметри на еквивалентни елементи и съответстващите им електрически величини ток и напрежение при зададено влияние на източника. Показан е пример за анализ на електрическа верига при синусоидален и периодичен несинусоидален режим, съгласно предложен алгоритъм, за прилагане на дървовидните структури в обучението на студенти по теоретична електротехника, включващ еквивалентна дървовидна схема и примерни изчисления по нея.

Ключови думи: анализ на електрическа верига, дървовидни структури, еквивалентни преобразования, синусоидален режим, периодичен несинусоидален режим.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Адекватното усвояване на основните закони в електротехниката¹ е основа за правилното и безпогрешно прилагане от студентите на съответните еквивалентни преобразувания² при различните видове схеми на свързване [1, 2, 3].

Основните закони, формулирани при електрически вериги (ЕВ) за постоянен ток, са валидни и при променливотокови ЕВ, но се отнасят за моментните стойности (комплексните образи) на величините. Комплексното изобразяване на синусоидалните величини е удобно при анализ на установените синусоидални режими, като на негова база е разработен **символичен метод** (замяна на действителните функции на времето с техните комплексни образи). Символичният метод изисква преобразуване на величините и съпротивленията до техните комплексни образи. **Хармоничният анализ** е метод базиран на принципа на наслагването, като се изследва поотделно влиянието на всеки хармоник от реда на Фурие върху ЕВ и е разработен за анализ на периодични несинусоидални режими.

Предложен е подход (методика) за онагледяване на еквивалентните преобразувания при анализ на ЕВ (при един източник), базиран на дървовидна структура³ и отчитащ логическата последователност (в права и обратна посока) - при синусоидален и периодичен несинусоидален режим.

Показано е примерно приложение и е проследена логическата последователност с използване на дървовидни структури с цел решаване на аналитични задачи за намиране на частни решения (отнасящи се до конкретна електрическа схема) при линейни ЕВ⁴ при синусоидален режим с един източник.

¹ Основните закони в електротехниката са: закона на Ом - за пасивен и активен участък и законите на Кирхоф (първи - за възел и втори - за контур). Законите на Кирхоф са свързани с определени топологични свойства.

² Условие за еквивалентност на преобразуването е, че токовете и напреженията в непреобразуваната част на веригата трябва да останат непроменени.

³ Структура е система от връзки, правила, отношения и пр., която въвежда порядък в дадено множество от елементи. Съществуват два основни типа структури - топологични и метрични.

⁴ Електрическа верига е съвкупност от устройства за съсредоточено преобразуване, разпределение и пренасяне на електромагнитна енергия или информация чрез посредничеството на електрически ток, при

Тъй като периодичния несинусоидален режим може да се разгледа като съвкупност от нулев хармоник (постоянна съставка) и синусоидални хармоници, в този случай само е проследена логиката на база на дадения пример, при направени допускания.

Направена е съпоставка на предложената методика от една страна, а от друга - с методики за онагледяване на еквивалентните преобразувания чрез въвеждане на подсхеми в права и обратна посока, и сигнален граф за обратна посока с коефициенти на предаване еквивалентни параметри.

Дървовидни структури

Дървовидните структури моделират йерархични структури и са подмножество на графите (свързан граф без цикли), които са обобщена и доста разпространена структура, позволяваща моделирането и анализа на обширна съвкупност от реални случаи в практиката и използвана за описването на разнообразни взаимовръзки между различни обекти. Теорията на графите е добре развита, използвана е за голям брой задачи от практиката, за които е дадено съответно решение [4, 5]. За дървовидните структури са валидни част от по-важните понятия и дефиниции отнасящи се до графите.

За логическата последователност в права посока ще използваме дървовидни структури за определяне на еквивалентните параметри на ЕВ. За логическата последователност в обратна посока ще използваме дървовидни структури, базирани на сигнален граф. Сигнален граф е графично изображение на причинно-следствените връзки между зависимите и независимите сигнали (в литературата са описани еквивалентни преобразувания на сигналните графи [1]).

При използването на дървовидни структури се отразява топологията на схемата, отчита се свързването (последователно/паралелно) на пасивните елементи спрямо източника в ЕВ. Този подход се отличава с максимална простота и нагледност в сравнение с възможните общи решения, именно поради факта, че дава частни решения (това от друга страна може да се счита като недостатък).

В сравнение, от една страна, използването на структурни матрици⁵ базирани на схемен граф⁶ при анализ на ЕВ с един източник не е оптималното решение (от гледна точка на студентите), тъй като съществува и подход базиран на еквивалентни преобразувания и закона на Ом, който е значително по-прост за анализ. Недостатък на този подход е необходимостта от въвеждане на определен брой подсхеми за онагледяване, свързани с последователността на преобразуванията в права и обратна посока за определяне на еквивалентното съпротивление и величините ток и напрежение. В предложения подход, от друга страна, всъщност логическите връзки могат да бъдат описани чрез дървовидна структура, като частен случай за всяка ЕВ, което води до оптимизиране на анализа (една дървовидна схема описва всички етапни преобразувания) и при определени допускания е приложима за анализ както в права, така и в обратна последователност.

При линейна ЕВ с един източник е удобно описването на последователността от връзки с една линейна дървовидна структура, които са връзки между параметър и величини (закон на Ом), както и връзки определени от последователността на начина на свързване. Величините на елементите се определят след еквивалентни преобразувания (на елементите).

което основните величини на ЕВ са интегралните характеристики на електромагнитното поле ток и напрежение.

⁵ Структурни матрици - представляват средство за трансформиране на топологични структури (изобразени чрез графи) в алгебрични изрази и системи уравнения за анализ на процесите в ЕВ [3].

⁶ Схемни (линейни) графи - отразяват топологията на ЕВ и биват насочени и ненасочени. Схемен граф отразява топологичната структура [3].

Като пример е представен анализ на линейна ЕВ при синусоидален режим за определяне на комплексните величини ток и напрежение (на изводите на пасивните елементи, представени като двуполусници) с използване на комплексни еквивалентни съпротивления.

Въвеждаме следните ограничения:

- разглеждаме само линейни ЕВ;
- източникът е само един и е независим;
- параметрите са съсредоточени;
- режимът е синусоидален (периодичен несинусоидален) режим;
- не се разглеждат вериги при резонанс (тъй като са свързани с шунтиране на определен клон);
- не се разглеждат ЕВ с индуктивни връзки (по принцип е възможно при триполюсно съединение след освобождаване от индуктивната връзка);
- използваме правила за еквивалентно преобразуване за определяне на еквивалентни параметри и закон на Ом за намиране на търсените величини.

Постановка на задачата⁷: Да се направи преобразуване на смесено съединение от пасивни елементи на ЕВ при синусоидален (също и при периодичен несинусоидален) режим с използване на дървовидна структура на преобразованията и да се направи съответен анализ - определяне на комплексни еквивалентни параметри (съпротивления/проводимости) на преобразуваните елементи, като етап при намирането на комплексните клонови токове и напрежения на изводите на схемните елементи, разгледани като двуполусници. Величините в ЕВ са скалярни и са напрежение и ток и са цел на оразмеряването в процеса на анализ на ЕВ.

Таблица на съответствие на електрическата схема с модела

Дърво е структура, която се състои от върхове, които са свързани помежду си с ребра. Включените логически елементи описват начина на свързване и съответните зависимости за права или обратна посока.

Всеки схемен елемент участва само веднъж (дървото не поддържа повторения), извършваме еквивалентни преобразувания и намираме междинни еквивалентни елементи, а в резултат и общ еквивалентен елемент. Параметрите на схемните елементи са независими, а параметрите на междинните еквивалентни елементи са зависими от схемните елементи.

Приети форми за изобразяване	Модел – дървовидна структура	Ел. схема
Окръжност	Връх (възел) източник	активен схемен елемент - източник
Елипса	Връх (възел) лист	пасивен схемен елемент - резистор
Правоъгълник	Вътрешен връх (възел) - всички върхове, различни от връх източник и връх лист.	преобразувания на схемни елементи
Стрелки - стрелките са двупосочни тъй като в права	Ребра (клонове) - свързват отделните върхове (паралелно или	Клон на ЕВ, участък от веригата, в който за всеки момент токът има

⁷ Възможно е при определени схеми и използването на еквивалентни преобразувания, както на пасивни участъци така и на активни, като логиката може да бъде използвана и за анализ на ЕВ с повече от един източник, посредством принципа на наслагването, но приложението е свързано със значително усложняване.

посока (нагоре) се определят еквивалентни параметри, а в обратна посока (надолу) - величините ток и напрежение, чрез правилата на еквивалентните преобразувания.	последователно) и имат логика на предаване свързана с посока : Права посока - показва как даден зависим елемент зависи от останалите. Характеризират се с логическа връзка, описана с логически елемент. Обратна посока - показва как дадена величина зависи от останалите. Характеризират се с коефициент на предаване.	една и съща стойност. Възел на ЕВ , точка в която се свързват три или повече клона. Основни видове свързване : последователно (сериенно, когато елементите са в един клон) или паралелно .
Шестоъгълник	Логически елемент , отразяващ последователно или паралелно свързване: ИЛИ (събиране) - за параметри ; И (умножаване) - за величини .	-

Схемният елемент разглеждан като двуполусник има параметър и по отношение на него и влиянието на източника се определят съответните величини. Схемните елементи се номерират от 1 до M_i (при последователно (сериенно) свързване) или от 1 до M_p (при паралелно свързване), където i е номер на нивото.

Нива на дървовидната структура – характеризират последователността на преобразованията в схемата (нивата са например от 0 до N).

2. ПРЕОБРАЗУВАНИЯ СВЪРЗАНИ СЪС СИНУСОИДАЛЕН РЕЖИМ

В табл. 1 са показани правото (оригинал или моментна стойност в комплексен образ) и обратно (комплексен образ в оригинал) преобразуване свързани със синусоидален режим, както и трите форми на комплексния образ: експоненциален, тригонометричен и алгебричен и алгебричните връзки между тях.

Табл. 1. Преобразувания свързани със синусоидален режим (означенията са дадени в [1, 2, 3]).

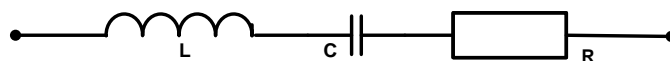
а) Премаиване от оригинал към комплексен образ	б) Премаиване от комплексен образ към оригинал
Моментна стойност на синусоидална величина: $e(t) = E_{max} \sin(\omega t \pm \varphi)$	Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в алгебричен вид: $\dot{I} = Re \pm jIm$ До преход към друг вид се стига чрез: $\dot{I}e^{\varphi} = \sqrt{Re^2 + Im^2}$ $\varphi_i = \arctg \pm \frac{Im}{Re}$
Връзка между максимална и ефективна стойности, за получаване на ефективна стойност. Ефективна стойност : $Ee^{\varphi} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$	Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в тригонометричен вид: $\dot{I} = I \cdot (\cos \varphi_i \pm j \sin \varphi_i)$
Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в експоненциален вид: $\dot{E} = E \cdot e^{\pm j\varphi}$	Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в експоненциален вид: $\dot{I} = I \cdot e^{\pm j\varphi_i}$

<p>Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в тригонометричен вид:</p> $\dot{E} = E \cdot (\cos \varphi \pm j \sin \varphi)$	<p>Връзка между максимална и ефективна стойности, за получаване на максимална стойност. Максимална стойност: $I_{max} = \sqrt{2} \cdot I_{ef}$</p>
<p>Комплексна ефективна стойност на синусоидалната величина в алгебричен вид: $\dot{E} = Re \pm jIm$ или $\dot{E} = E \cdot \cos \varphi \pm jE \sin \varphi$</p>	<p>Моментна стойност на синусоидална величина: $i(t) = I_{max} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi_i)$</p>

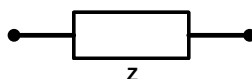
Заб.: В таблицата комплексния вид е на ефективната стойност на разглежданата величина, възможно е да се определи по аналогичен начин и на максималната стойност, поради тази причина в изразите тези величини не са конкретизирани.

Основните закони, принципи и теореми за ЕВ при синусоидален режим, са както при постоянни режими, при условие, че всички величини са записани в комплексен вид. Законите в комплексен вид се записват по аналогичен начин, както при постоянни режими, като записът се отнася за комплексните образи на величините (в записите и съпротивленията са комплексни). Комплексната форма на основните закони е дадена в [1, 2, 3].

При определяне на еквивалентното комплексно клоново съпротивление, елементите с техните параметри се разглеждат като двуполусници (свързани последователно) – фиг. 1.а и фиг. 1.б.



Фиг. 1.а. Клон на електрическа верига.



Фиг. 1.б. Еквивалентно комплексно съпротивление.

Комплексното съпротивление се определя на базата на определянето на неговите компоненти:

Резистивно съпротивление - реално число:

(1) $Z = R$

Индуктивно съпротивление:

(2) $Z = j2\pi fL = jX_L$

Капацитивно съпротивление:

(3) $Z = -j \frac{1}{2\pi fC} = -jX_C$

Комплексни съпротивления - на последователно съединение от елементи.

Алгебричен вид:

(4) $Z = R + j(X_L - X_C)$

или

(5) $Z = Re \pm jIm$

Експоненциален вид:

(6) $Z = z \cdot e^{\pm j\varphi}$

където,

$$(7) z = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2},$$

$$(8) \varphi_z = \arctg \pm \frac{\text{Im}}{\text{Re}}.$$

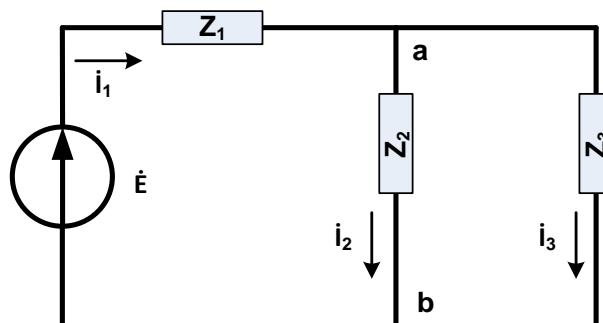
В примера ще разгледаме само комплексни съпротивления, като параметри на схемни елементи. Схемата е преобразувана до дадената схема на фиг. 3 по описаните правила.

Заб.: В разглеждания пример всички комплексни схемни елементи са със същия вид от фиг. 1, т.е. наличие на резистивен, индуктивен и капацитивен елемент свързани последователно.

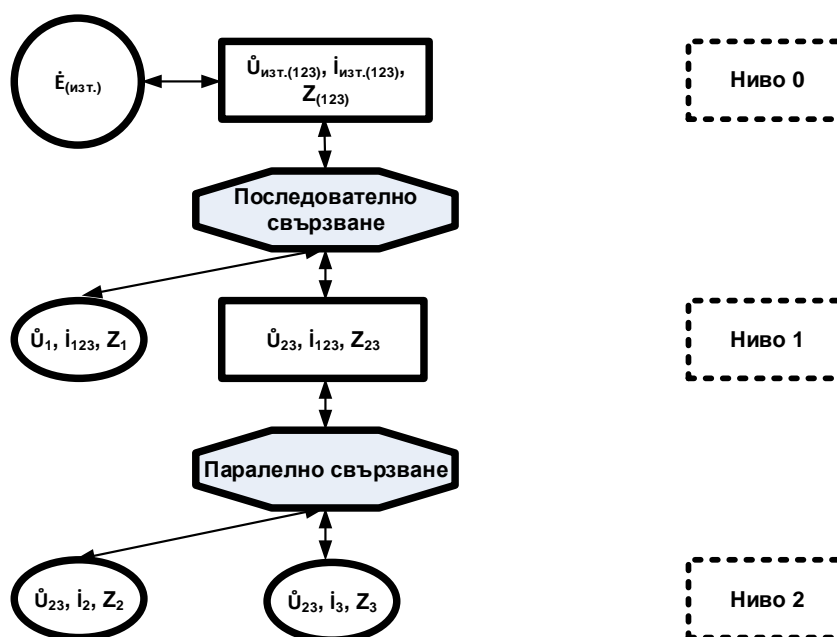
3. ЛОГИЧЕСКА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ НА АНАЛИЗ ЧРЕЗ ДЪРВОВИДНА СТРУКТУРА НА СИНУСОИДАЛЕН РЕЖИМ НА РАБОТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ВЕРИГА С ЕДИН ИЗТОЧНИК.

Структурата на примерна ЕВ е показана на фиг. 2, а еквивалентна дървовидна структура на същата ЕВ е показана на фиг. 3.

Клоновете съпротивления са представени в еквивалентен комплексен алгебричен или експоненциален вид. Напрежението на източника е в същия комплексен вид като комплексните клонови съпротивления.



Фиг. 2. Схема на примерна ЕВ.



Фиг. 3. Еквивалентна дървовидна структура на електрическата верига.

Представено е примерно приложение на **дървовидна структура** за анализ на ЕВ при синусоидален режим, като за целите на примера се извършват предварително разгледаните преобразувания (до комплексна стойност на синусоидалната величина на източника и комплексни съпротивления).

Еквивалентната дървовидна структура на ЕВ отразява връзки между елементите и еквивалентните им преобразувания заедно с техните параметри, както и последователността за намиране на величините на тази ЕВ.

За нагледност, чрез съответстващи на фиг. 3 подсхеми, разграничаваме определянето:

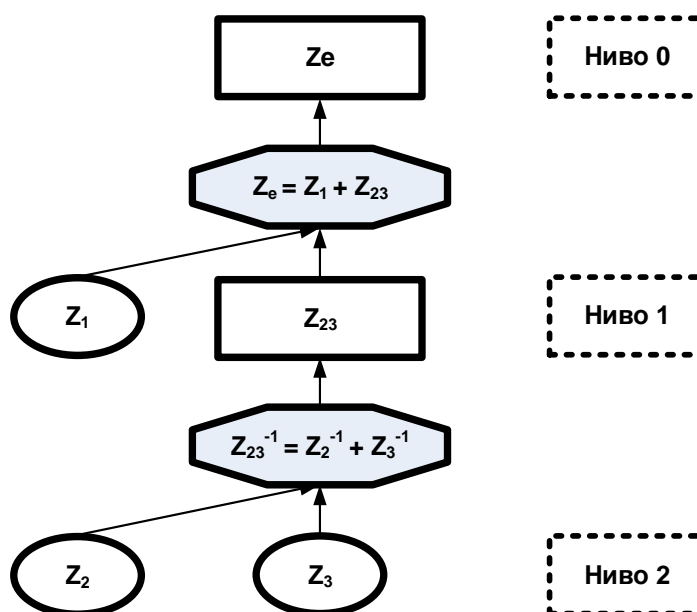
- на **параметри** (права посока - нагоре) – чрез фиг. 4;
- на **величини** (обратна посока - надолу) – чрез фиг. 5.

За тези два случая са показани правилата, елементите и последователността на преобразуването.

3.1. Права последователност, за определяне на еквивалентни елементи (параметри) с използване на дървовидна структура

При анализ **в права посока** са известни параметрите на елементите (разглеждат се като комплексни съпротивления), начина на свързване и въздействието на източника (преобразувано в комплексен вид). Преобразуванията до комплексни стойности се извършват съгласно табл. 1 и т. 1 за изразяване на въздействието на източника и съпротивленията представени в комплексен вид.

Чрез последователни еквивалентни преобразувания на елементите (при неизвестни величини) постепенно елиминираме върхове (възли) и получаваме краен комплексен еквивалентен елемент (еквивалентен вътрешен връх) със съответен комплексен еквивалентен параметър.



Фиг. 4. Еквивалентна дървовидна структура за определяне на еквивалентното комплексно съпротивление (права посока - нагоре).

Вижда се, че основно предимство на тази методика е удобното проследяване на целия процес на анализ в права посока чрез една схема и вследствие на това – минимизиране на грешките.

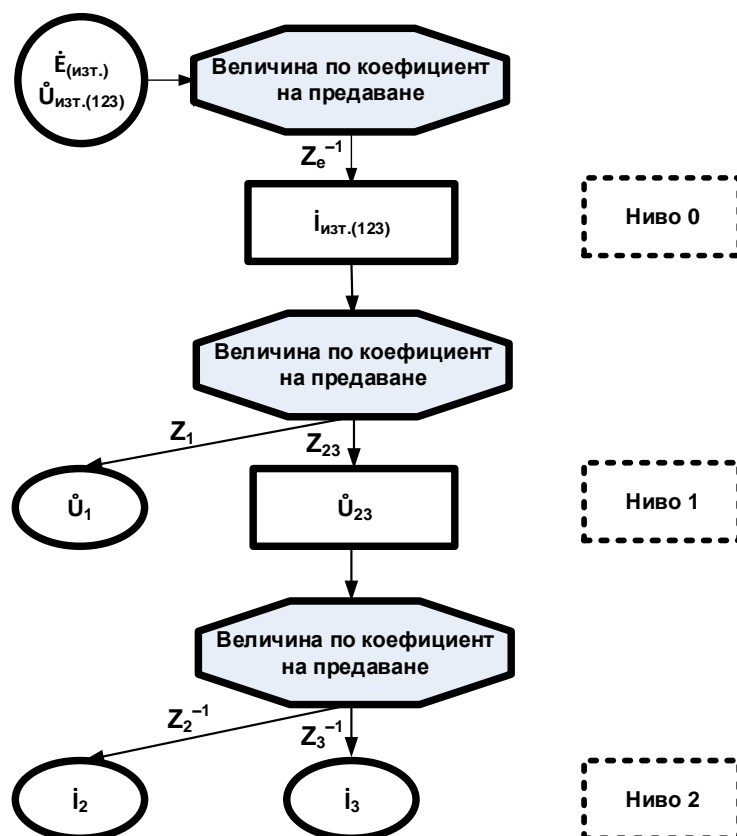
Еквивалентните преобразования в права посока за намиране на еквивалентно съпротивление в схемата също така могат да се онагледят чрез последователност от схеми, които показват етапните преобразования [1, 2, 3], чрез което може да се направи съпоставка между методите (Бележки Б1).

3.2. Обратна последователност, за определяне на клоновите токове и напреженията на изводите на елементите с използване на дървовидна структура

При анализ в **обратна посока** са известни параметрите на елементите, начина на свързване, въздействието на източника (комплексен вид), както и получените стойности на параметрите на всички еквивалентни елементи, получени при анализа в права посока в комплексен вид.

Дървовидна структура.

Обратната последователност за определяне на клоновите токове и напреженията на изводите на елементите може да бъде онагледена с подсхема на основната дървовидна структура, като в обратна посока се използват еквивалентните параметри, получени при анализ в права посока – фиг. 5.



Фиг. 5. Еквивалентна дървовидна структура на електрическата верига за определяне на комплексните величини (обратна посока - надолу).

Еквивалентните преобразования в обратна посока за намиране на величините се онагледяват чрез последователност от схеми (фиг. 2, фиг. Б1-1, фиг. Б1-2) [1, 2, 3] или чрез

сигнален граф [1] (фиг. Б2-1), базирани на еквивалентните параметри, чрез което може да се направи **съпоставка** между методите (Бележки Б2).

Получените стойности на величините от анализа при синусоидален режим са в комплексен вид, което налага извършване на обратно преминаване от комплексен образ в оригинал, съгласно табл. 1.

4. АНАЛИТИЧНО ОПИСАНИЕ НА АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ВЕРИГА ПРИ СИНУСОИДАЛЕН РЕЖИМ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДЪРВОВИДНИ СТРУКТУРИ

4.1. Определяне на комплексно еквивалентно съпротивление

Анализът за определяне на еквивалентното комплексно съпротивление/проводимост се извършва в посока нагоре (фиг. 5).

Използваме известното съотношение между комплексните параметри съпротивление и проводимост на един схемен елемент:

$$(9) Y = \frac{1}{Z},$$

където Z е комплексно съпротивление, а Y е комплексна проводимост.

Правилата на еквивалентното преобразуване са:

➤ При паралелно съединение на елементи се събират комплексните проводимости (и се получава еквивалентна комплексна проводимост), тъй като напреженията на изводите на двуполусниците са едни и същи.

➤ При последователно съединение на елементи се събират комплексните съпротивления (и се получава еквивалентно комплексно съпротивление), тъй като токовете през двуполусниците са едни и същи.

Въведените 3 нива на дървовидната структура (източникът е на нулево ниво) характеризират последователността на преобразованията в конкретната схема.

На ниво 2 (елементите са свързани паралелно)- за преход до ниво 1 (където участва намерения еквивалентен параметър):

$$(10) Y_{23} = Y_2 + Y_{53}$$

или

$$(11) Z_{23} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

На ниво 1 (елементите са свързани последователно) - за преход до ниво 0 (където участва намерения еквивалентен параметър):

$$(12) Z_e = Z_1 + Z_{23}$$

4.2. Определяне на величините ток и напрежение

При анализ по дървовидна структура за определяне на комплексните величини ток и напрежение използваме закона на Ом в комплексен вид и въведената дървовидна структура.

При паралелно съединение - напреженията на изводите на двуполусниците са едни и същи, а при последователно съединение - токовете през двуполусниците са едни и същи.

На ниво 0 (имаме източник на напрежение и еквивалентен комплексен елемент) прилагаме закона на Ом в комплексен вид спрямо комплексните стойности.

Премаваме от моментна стойност на електродвижещите величини на източника в комплексна величина, използвайки табл. 1:

$$(13) \dot{\mathbf{i}}_{123} = \frac{\dot{\mathbf{E}}}{\mathbf{Z}_e}$$

На ниво 1 на дървовидната структура токът (през последователно свързаните елементи) е един и същ, а напреженията са различни, извършва се тяхното определяне. Използваме правилото за еквивалентни преобразувания на пасивни участъци (преобразуването не трябва да води до преразпределение на токовете и напреженията в непроменената част от ЕВ). От горното и от закона на Ом в комплексен вид следва, че за

$$(14) \dot{\mathbf{U}}_{23} = \mathbf{Z}_{23} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{123}$$

\mathbf{U}_1 се определя по аналогичен начин.

Премаваме на по-долно ниво 2 на дървото за да определим съответните токове при едно и също напрежение:

$$(15) \dot{\mathbf{i}}_2 = \frac{\dot{U}_{23}}{\mathbf{z}_2}$$

и

$$(16) \dot{\mathbf{i}}_3 = \frac{\dot{U}_{23}}{\mathbf{z}_3}$$

Следва преминаване от комплексна величина в моментна стойност (от табл. 1).

За анализ на ЕВ с един източник могат да бъдат използвани освен разгледаните методи и всички методи за анализ на сложни ЕВ. Предложеният подход за анализ на ЕВ чрез дървовидно описание на еквивалентните преобразования дава еднозначна връзка между параметрите на схемни и еквивалентни елементи от една страна и електрическите величини ток и напрежение от друга.

Дадените правила на дървовидните структури свързани с анализ на ЕВ показват основното им предназначение да трансформират топологичните структури до дървовидни структури отразяващи алгебричната (алгоритмичната) последователност.

5. АЛГОРИТМИ ЗА АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ЧРЕЗ ДЪРВОВИДНИ СТРУКТУРИ

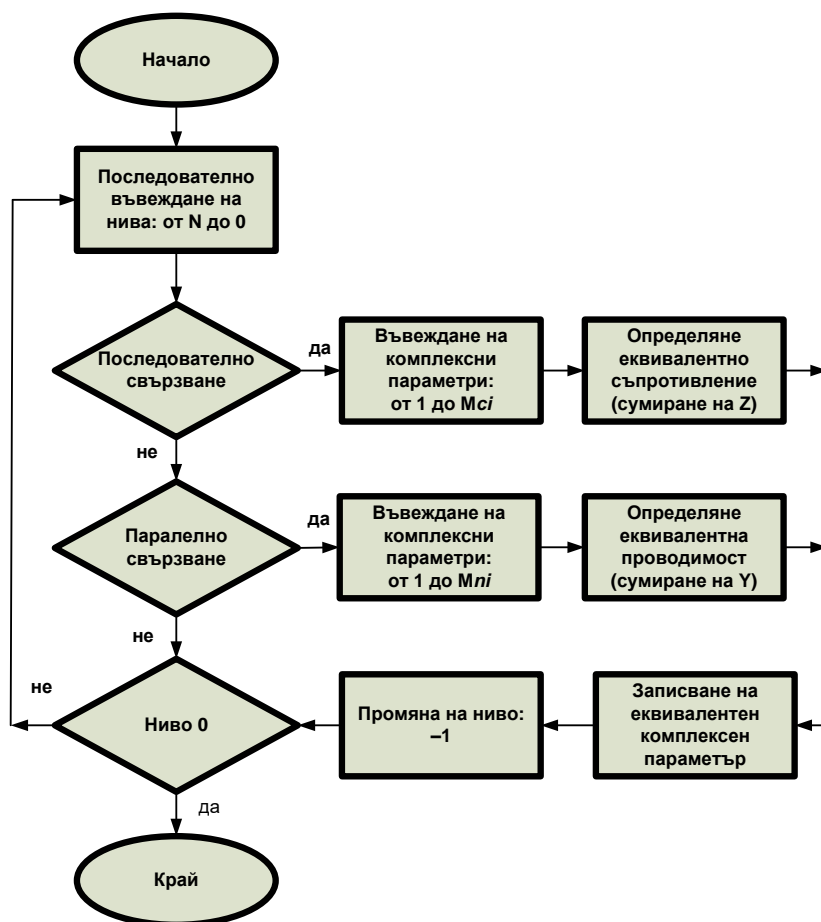
Анализът на електрическата схема чрез дървовидно описание на преобразуванията дава еднозначна връзка между елементи и еквивалентни елементи и съответните им електрически величини (ток и напрежение). Дървовидните структури имат голяма роля в разработването на алгоритми и за тях са разработени много съответстващи структури и методи.

Описани са алгоритми (с използване на дървовидна структура) проследяващи логиката за определяне на комплексното еквивалентно съпротивление \mathbf{Z}_e (фиг. 6), както и на търсените комплексни величини (фиг. 7).

При свързване на схемни елементи, различно от последователно или паралелно, в алгоритмите е предвиден изход, означаващ, че задачата не може да се реши по описания начин. За всеки вид свързване на схемни елементи са предвидени съответни формули, показани в т. 3.

5.1. Алгоритъм за определяне на комплексното съпротивление \mathbf{Z}_e

На фиг. 6 е представен алгоритъм за определяне на \mathbf{Z}_e .



Фиг. 6. Алгоритъм за определяне на комплексното съпротивление (Z_c).

5.2. Алгоритъм за намиране на величините

На фиг. 7 е показан алгоритъм за определяне на величините, базиран на еквивалентните преобразувания.

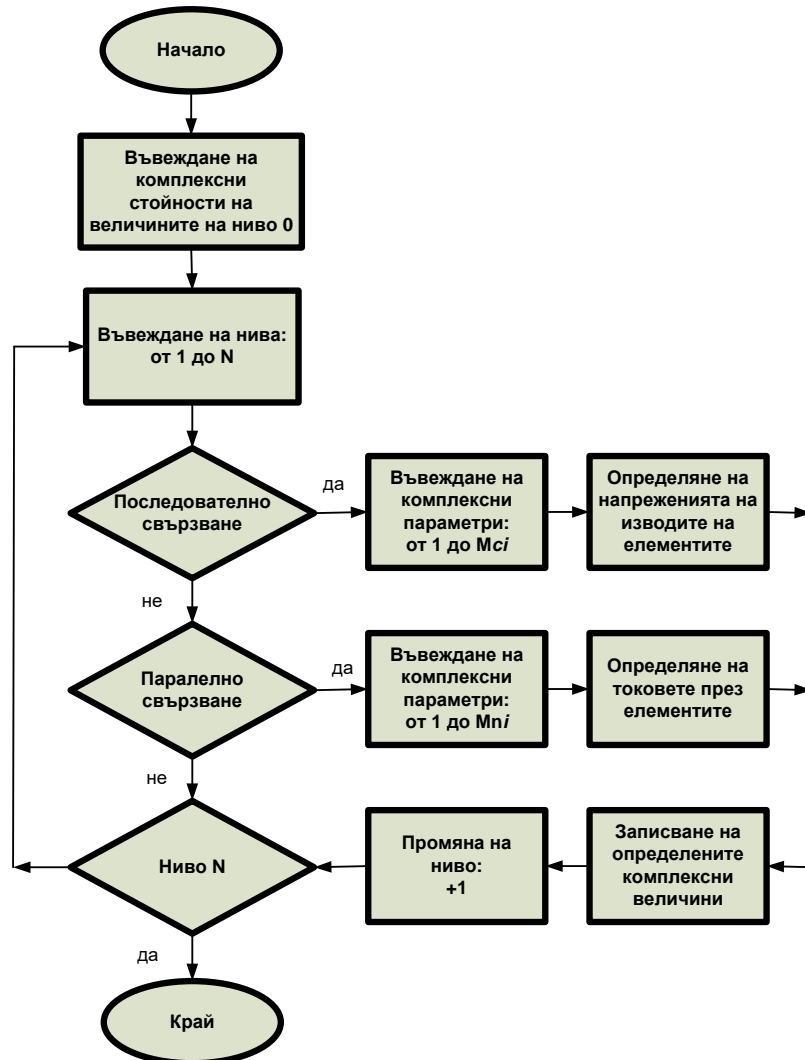
6. АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ВЕРИГА С ЕДИН ИЗТОЧНИК С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДЪРВОВИДНИ СТРУКТУРИ ПРИ ПЕРИОДИЧЕН НЕСИНУСОИДАЛЕН РЕЖИМ НА РАБОТА

Анализът на периодични несинусоидални режими се базира на принципа на наслагването, като се изследва поотделно влиянието върху ЕВ на всеки хармоник от реда на Фурие. Удобно е използването на дървовидни структури при анализ на ЕВ с един източник, тъй като се избягва изчертаването на множество еквивалентни схеми за еквивалентните преобразувания, а целият анализ се извършва върху една структурна схема отчитаща логическите връзки, независимо от хармоника, като на база на структурата при аналитичните изрази се отчита номера хармоника.

Периодично несинусоидалното напрежение или ток представено в ред на Фурие се разделя на хармоничните му съставки (използва се метода на наслагването).

При влияние на **нулевия хармоник** задачата се свежда до постояннотокова, като се отчита спецификата, че индуктивният елемент е със съпротивление нула, а капацитивният е с безкрайно съпротивление и прекъсва клона. Поради тази специфика отпадат схемни елементи по дървото при наличие на капацитивен елемент в клона (прекъсване на клона на ЕВ). Също така дървото се прекъсва, ако има последователно съединение на

капацитивен елемент по дървовидната структура изградена спрямо източника. Поради тази специфика е по-удобно въвеждането на допълнителна подсхема за нулевия хармоник.



Фиг. 7. Алгоритъм за определяне на величините, базиран на еквивалентните преобразувания.

При влияние на **първи хармоник** задачата се свежда до задача от синусоидален режим.

При влияние на всеки **висш хармоник** задачата се свежда до задача от синусоидален режим, като се отчита промененото капацитивно и индуктивно съпротивление на база на номера на хармоника.

Определянето на реактивните съпротивления, съобразено с хармоника, се извършва по следния начин (за формули (17), (18) и (19) - при $k = 1 \div n$):

Индуктивно съпротивление на k -ти хармоник е:

$$(17) Z_{(k)} = jk2\pi fL = jX_{L(k)}$$

Капацитивно съпротивление на k -ти хармоник:

$$(18) Z_{(k)} = -j \frac{1}{2k\pi fC} = -jX_{C(k)}$$

Комплексни съпротивления - на последователно съединение от елементи на k -ти хармоник.

Алгебричен вид:

$$(19) \mathbf{Z}_{(k)} = \mathbf{R} + j(\mathbf{X}_{L(k)} - \mathbf{X}_{C(k)})$$

Ако на входа се подава периодичен несинусоидален сигнал, включващ нулев и първи хармоник по основната схема фиг. 2, то анализът за **първи хармоник** съвпада с разгледания в точки 2 и 3. При влияние на **нулевия хармоник** резултантните еквивалентни параметри са с безкрайно големи съпротивления, а клоновите токове са нула поради наличието на капацитивен елемент във всички клонове. При същата постановка, **при наличие на висши хармоници**, стойностите на комплексните съпротивления са различни за различните висши хармоници, а това води до различни стойности на еквивалентните елементи и величините им при изследването на определен влияещ хармоник, като дървовидната структура по която се определят, е идентична.

Величините се получават в комплексен вид, преобразуват се до моментни стойности и ефективни стойности.

Общото решение за клоновите токове и напреженията на изводите на елементите е сума от частните решения относно хармониците на източника, а общата ефективна стойност на всеки клонов ток се определя по формула [1, 2, 3].

При периодични несинусоидални задачи прилагането на принципа на наслагването свежда задачата до няколко в зависимост от номера на хармоника (в общия случай - една постояннотокова и една или няколко при синусоидален режим), като тук са описани само разликите при периодичен несинусоидален режим спрямо синусоидален режим.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена е методика за анализ на линейна ЕВ с един източник, базирана на използването на дървовидна структура. Дадено е сравнение на тази методика и други съществуващи методи. Предимствата на предложения подход са: нагледност, ясни връзки, една дървовидна схема. Анализът на електрическата схема чрез дървовидно описание на еквивалентните преобразования дава еднозначна връзка между параметри на елементи и параметри на еквивалентни елементи и съответстващите им електрически величини ток и напрежение при зададено влияние на източника.

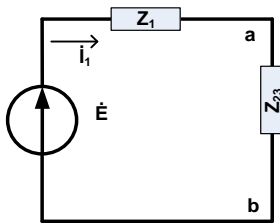
Показан е пример за анализ на ЕВ при синусоидален и периодичен несинусоидален режими, съгласно предложен алгоритъм, за прилагане на дървовидните структури в обучението на студенти по теоретична електротехника, включващ еквивалентна дървовидна схема и примерни изчисления по нея.

БЕЛЕЖКИ

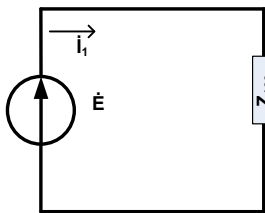
Показана е методиката на еквивалентните преобразования чрез въвеждането на подсхеми (права и обратна последователност) и методиката на сигнален граф за определяне на търсените величини, чрез (при известни) еквивалентни параметри.

Б1. Схемни еквивалентни преобразования в права посока.

На фиг. 2 е показана основната схема на ЕВ, а на фиг. Б1-1 и фиг. Б1-2 са показани последователните схематични преобразования. Същите тези схеми могат да бъдат заместени от една дървовидна структура включваща и логическата последователност на анализа (фиг. 3). Формулите и по двата подхода съвпадат и са дадени в точка 3.1. и 3.2., тъй като задачата е една и независимо от метода и начина за онагледяване, тя има едно решение.



Фиг. Б1-1. Електрическа верига, преобразувана схема (Z_{23} - еквивалентно на Z_2 и Z_3).



Фиг. Б1-2. Електрическа верига, преобразувана схема (Z_{123} - еквивалентно на Z_1 и Z_{23}).

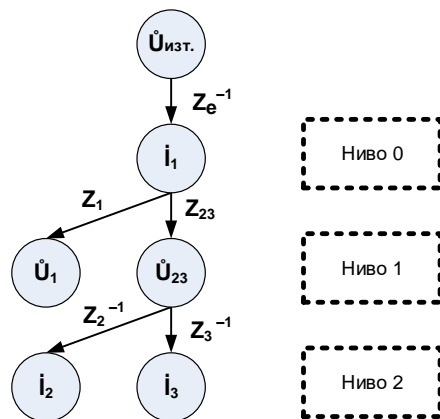
Вижда се, че по класическия метод, онагледяването води до толкова подсхеми колкото са междинните еквивалентни преобразувания на елементите.

Б2. Схемни еквивалентни преобразувания в обратна посока.

Еквивалентните преобразувания в **обратна посока** за намиране на величините в схемата се онагледяват чрез последователност от схеми, които показват етапните преобразувания [1, 2, 3]. От фиг. Б1-1 на еквивалентната ЕВ се определя тока I_1 от закон на Ом. От фиг. Б2-2 се определят напреженията U_1 и U_{23} при един ток (I_1). От фиг. 2 се определят токовете I_2 и I_3 при едно и също напрежение (U_{23}).

Сигнален граф използващ еквивалентни параметри.

Обратната последователност за определяне на клоновите токове и напреженията на изводите на елементите може да бъде онагледена и със сигнален граф, използващ еквивалентните параметри, получени при анализ в права посока – фиг. Б2-1. Сигнален граф има описан в [1], но не е базиран на получените параметри на еквивалентни преобразувания в права посока.



Фиг. Б2-1. Сигнален граф, схема (определят се токовете и напреженията).

При известно входно въздействие и последователност от еквивалентни елементи, по обратен път намираме всички търсени величини на схемните елементи. Коэффициентите на предаване (връзките) са схемните и еквивалентните параметри.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чернева Г., Теоретична електротехника ч.1, ВТУ „Т. Каблешков”, София, 2011.
- [2] Асенова И., Д. Данаилов, Г. Чернева, Методично ръководство за решаване на задачи и подготовка на курсови работи по Теоретична електротехника ч.1, ВТУ „Т. Каблешков”, София, 2013.
- [3] Фархи С., С. Папазов, Теоретична електротехника ч.1, Държавно издателство „Техника”, София, 1987.

[4] Ramesh M. Patelia, Shilpan D. Vyas, Parina S. Vyas, Nayan Patel, Basic Tree Terminologies, their Representation and Applications / (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6 (1), 2015, pp.384-387, ISSN:0975-9646.

[5] Christine Jakobs (B), Peter Tröger and Matthias Werner, Configurable Fault Trees, Software Engineering for Resilient Systems, 8th International Workshop, SERENE 2016, Gothenburg, Sweden, September 5-6, 2016, Proceedings, pp.13-27, ISBN 978-3-319-45891-5.

За контакти:

Ас. д-р инж. Цветелина Богданова Симеонова, Катедра СОТС, ВТУ "Т. Каблешков", ул. "Гео Милев 158", Тел.: 02 9709240, e-mail: ts.b.simeonova@abv.bg

Алекс Ангелов Велков, студент, Катедра СОТС, ВТУ "Т. Каблешков", ул. "Гео Милев 158", Тел.: 02 9709240, e-mail: aleks.velkov@abv.bg

Дата на постъпване на ръкописа Date of receipt of the manuscript: 15.12.2017

Дата на получена рецензия Date of review received: 28.12.2017

Дата на приемане за публикуване Date of adoption for publication: 28.12.2017

APPLICATION OF WOOD STRUCTURES FOR THE ANALYSIS OF THE ELECTRICAL CHAIN IN A SINUSOIDAL AND PERIODICAL NON-SINUSOIDAL MODE OF WORK

Tsvetelina Simeonova, Alex Velkov

Abstract: A methodology is proposed for analyzing a linear electrical circuit with a single source based on the use of a tree structure. The analysis of the circuit diagram through a tree description of equivalent transformations gives a unique connection between element and parameter parameters of equivalent elements and the corresponding electrical quantities of current and voltage at the given influence of the source. An example of a sinewave and periodic non-sinusoidal mode circuit analysis, according to a proposed algorithm, is given for the application of tree structures in the training of students in theoretical electrical engineering, including an equivalent tree scheme and sample calculations thereon.

Keywords: chain analysis, tree structures, equivalent transformations, sinusoidal mode, periodic non-sinusoidal mode.