

- гидротурбины / В. А. Колычев, В. Э. Дранковский, М. Б. Мараховский [и др.] // Вестник ХГПУ. – Харьков, 2000. – Вып. 89. – С. 138–150.
24. Селезнев К. П. Центробежные компрессоры / К. П. Селезнев, Ю. Б. Галеркин. – Л. : Машиностроение, 1982. – 271 с.
25. Викторов Г. В. Классификация гидромашин и баланс энергии : учеб. пособие / Герман Владимирович Викторов. – М., 1979. – 94 с.
26. О влиянии геометрических параметров проточной части радиально-осевой гидротурбины / В. А. Колычев, В. Э. Дранковский, М. Б. Мараховский [и др.] // Вестник ХГПУ. – Харьков, 1998. – Вып.15. – С. 50–57.
27. Колычев В. А. Приближенный расчет гидродинамических характеристик лопастных систем гидротурбин / В. А. Колычев, Е. П. Иваницкая // Тяжелое машиностроение. – 1993. – № 2. – С. 25–32.

УДК 621.317.733

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОСТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

П. Ф. Лебедев

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра автоматизации производственных процессов
Харьковский государственный технический университет
строительства и архитектуры
ул. Сумская, 40, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (057) 372-47-56 и 097-270-66-74

Приведено нові дані про структури електричних мостів. Дано визначення понять «Електричний міст», простий і досконалий міст. Введені уявлення про мости по напрузі, по струму, по напрузі і струму

Ключові слова: електричний міст, досконалий міст, «зірка», «багатокутник», визначник

Приведены новые данные о структурах электрических мостов. Даны определения понятий «электрический мост», простой и совершенный мост. Введены представления о мостах по напряжению, по току, по напряжению и току

Ключевые слова: электрический мост, совершенный мост, «звезда», «многоугольник», определитель

New information is resulted about the structures of electric bridges. Determination is Given concepts «Electric bridge», simple and perfect bridge. Pictures are entered of bridges on tension, on a current, on tension and current

Keywords: electric bridge, perfect bridge, «star», «polygon», determinant

Введение

Электрические мосты постоянного тока известны более ста пятидесяти лет. Электрические мосты переменного тока на одну треть моложе. Однако и те и другие до сегодняшнего дня практически эксплуатируют две мостовые структуры: мост Уинстона (известен как четырёхплечевой мост) и двойной мост Томсона (известен как шестиплечевой мост). Две названные структуры мостов дали миру многочисленную плеяду их модификаций как по заполнению этих структур элементами, так и различных дополнений к структурам не

изменяя их сути [1]. На самом деле вариантов мостовых структур много больше и они оказались скрытыми ввиду отсутствия удачного преобразования звёзд в многоугольники и наоборот. Сама теория мостовых структур оказалась однобокой, так как связала параметры только четырёхплечевой структуры. По этой причине, и классификация мостов, и даже определения, относящиеся к ним, оказались несовершенными.

Здесь приведём известное определение понятия «электрический мост». Электротехнический справочник [2] даёт следующую его трактовку: «Мостом называется электрическая цепь, в которой можно вы-

делить две ветви с взаимным сопротивлением, равным бесконечности при определённом соотношении между сопротивлениями цепи и равным конечному значению, если соотношение между сопротивлениями цепи изменится». Такая формулировка мостовой структуры сегодня не может удовлетворить даже исследователя электрических величин с помощью моста. Во-первых, современные мосты связывают десятки ветвей, а не две. Во-вторых, взаимное сопротивление играет не основную роль в мостовых структурах, о чем пойдёт речь ниже по тексту. Мосты сегодня используют не только для измерения параметров электрических цепей. Они востребованы в теории и практике не электрических измерений, в автоматизации производственных процессов, в электронике, радиотехнике и oggiдается широкое внедрение в энергетике.

Поскольку речь пойдёт о старых структурах при новом содержании и новых мостовых структурах, еще не опробованных серьёзно практикой, вполне логично их связать пока что с теоретической электротехникой.

Структуры мостовых цепей

В табл. 1 представлены шесть простейших структур в виде графов. Такое представление оправдывается тем, что эффект физического явления зависит от того, какими элементами заполнена структура. Между прочим, каждая из них может дать десятки вариантов применения, а значит и заполнения. Автору известна добрая сотня применений четырёхплечевого моста. Однако он нашел еще пару достаточно новых вариантов. Один из них опубликован в [3, 4]. Ниже предложен анализ ряда представленных сочетаний эквивалентных звёзд и многоугольников и изложены некоторые их особенности.

Таблица 1

№	Четное число узлов	№	Нечетное число узлов
1		2	
3		4	
5		6	

На каждом из представленных графов приведены положительные направления токов при заданной

форме включения источника. Он может быть включен в ветвь многоугольника и это существенно повлияет как на выбор направлений токов, как и на их значения. Указаны номера узлов и принцип их обозначения для каждой из структур. Это же относится и к номерам для контурных токов. Наперёд заметим, что эти структуры цепей требуют согласования для уравнений по методу контурных токов и методу узловых напряжений, что и обусловило начальный выбор узлов и направлений для контурных токов.

Поскольку основная цель этой работы состоит из попытки как можно полнее отразить новые понятия, термины и определения в обновлённой теории мостов, приходится избегать обстоятельности при описании каждого из мостов. Тем не менее, будем стремиться к изложению основных и принципиальных свойств каждой из структур по возможности подробно. Структуры мостов СД2_М и СД5_М здесь не представлены. Они частично рассмотрены в [4, 5].

Отметим, что нормальное вхождение в теорию мостов аналогично вхождению в теорию линейных электрических цепей. Оно должно начинаться с мостов при постоянных токах и напряжениях, которые дают возможность, методически проще разобраться с терминологией им свойственной и качественно новыми определениями.

Новые теоретические представления

Обновлённая теория структур «электрических мостов» начинается с опубликования закона о двух дуальных структурах [5, 6] и представления о самодуальных цепях [7]. Закон связывает параметры каждой пары дуальных ветвей не только однотипно, но и количественно (табл. 2). И потому, запись закона для двух структур по каждой паре элементов в отдельности даёт объединённой структуре (самодуальной цепи) систему отношений токов и напряжений такой, что возможны появления их нулевых значений. Нулевые значения напряжений появляются либо между парой (или несколькими парами) узлов.

Нулевые значения токов возникают либо в одной из ветвей (или в нескольких ветвях). Допустимы варианты появления нулевых значений и токов и напряжений, либо и то, и другое совместно и по отдельности. Рассмотрим высказанные тезисы подробнее. Но сначала несколько особенностей по применению закона дуальных структур. Он в электрических мостах при гармонических воздействиях имеет особенности применения. Поскольку в качестве основы используется определитель звезды или многоугольника в виде вещественного числа, то ясно, что задействованная пара сопротивлений в законе может быть представлена либо комплексно сопряженными числами, либо сопряжено подобными. В табл. 2 представлена запись закона структур для каждой пары связанных произведением сопротивлений. Для цепей постоянного тока следует вместо «Z» использовать букву «R». Вся остальная индексация остаётся неизменной. Что касается определителей для звёзд и многоугольников, то они представлены в табл. 3. Представлена простейшая форма их применения при определённом сходстве записи для звезды и для многоугольника.

Определения, новые термины и классификация

Предлагается следующая формулировка для мостовой цепи: **Электрическим мостом линейной электротехники называется самодуальная цепь, в которой созданы условия для равенства нулю, по крайней мере, либо напряжения между парой узлов, либо тока в одной из ветвей, либо и тока и напряжения вместе.** Покажем эту сторону на примерах второй и третьей структур. Вторая структура, это известный мост Уинстона. Однако, если связать эквивалентно звезду сопротивлений со звездой многоугольника, то получим совершенно новую структуру, которую назовём «совершенным мостом». **Определение: Совершенный мост, это электрический мост с той особенностью, что перенос источника в любую ветвь цепи сохраняет свойства электрического моста. Простой мост, это мост с фиксированным размещением источника.** Перенос источника в другую ветвь моста приводит к исчезновению критерия существования моста в условиях структуры простого моста. Другими словами, пропорциональные отношения сопротивлений известного четырёхплечевого моста, это свойство простого моста.

Пример 1. *Заданы сопротивления четырёхплечевого моста (табл.1, рис. 2,) в виде чисел: R₁₂=1 Ом; R₂₃=2 Ом; R₃₁=3 Ом; R₁=0.5 Ом; R₂=0.333 Ом; R₃=1 Ом.*

Треугольник сопротивлений и звезда связаны критерием их эквивалентности. Доказать, что при заданных сопротивлениях структура соответствует критерию совершенного моста.

№ п/п	СД2_М	СД3_М	СД4_М	СД5_М	СД6_М	СД7_М
1	$Z_{12} \cdot Z_2 = \Delta$	$Z_{12} \cdot Z_3 = \Delta$	$Z_{12} \cdot Z_4 = \Delta$	$Z_{12} \cdot Z_4 = \Delta$	$Z_{12} \cdot Z_6 = \Delta$	$Z_{12} \cdot Z_5 = \Delta$
2	$Z_{21} \cdot Z_1 = \Delta$	$Z_{23} \cdot Z_1 = \Delta$	$Z_{23} \cdot Z_3 = \Delta$	$Z_{23} \cdot Z_5 = \Delta$	$Z_{23} \cdot Z_5 = \Delta$	$Z_{23} \cdot Z_6 = \Delta$
3		$Z_{31} \cdot Z_2 = \Delta$	$Z_{34} \cdot Z_2 = \Delta$	$Z_{34} \cdot Z_1 = \Delta$	$Z_{34} \cdot Z_4 = \Delta$	$Z_{34} \cdot Z_7 = \Delta$
4			$Z_{41} \cdot Z_1 = \Delta$	$Z_{45} \cdot Z_2 = \Delta$	$Z_{45} \cdot Z_3 = \Delta$	$Z_{45} \cdot Z_1 = \Delta$
5				$Z_{51} \cdot Z_3 = \Delta$	$Z_{56} \cdot Z_2 = \Delta$	$Z_{56} \cdot Z_2 = \Delta$
6					$Z_{61} \cdot Z_1 = \Delta$	$Z_{67} \cdot Z_3 = \Delta$
7						$Z_{71} \cdot Z_4 = \Delta$

Таблица 3

№ п/п	Наименование структуры	Определитель звезды	Определитель многоугольника
1	СД2	$2 \cdot Z_1 \cdot Z_2$	$Z_{12} \cdot Z_{21} / 2$
2	СД3	$Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_1$	$1 / (Y_{12} \cdot Y_{23} + Y_{23} \cdot Y_{31} + Y_{31} \cdot Y_{12})$
3	СД4	$Z_1 \cdot Z_2 + \dots + Z_4 \cdot Z_1$	$1 / (Y_{12} \cdot Y_{23} + \dots + Y_{41} \cdot Y_{12})$
4	СД5	$Z_1 \cdot Z_2 + \dots + Z_5 \cdot Z_1$	$1 / (Y_{12} \cdot Y_{23} + \dots + Y_{51} \cdot Y_{12})$
5	СД6	$Z_1 \cdot Z_2 + \dots + Z_6 \cdot Z_1$	$1 / (Y_{12} \cdot Y_{23} + \dots + Y_{61} \cdot Y_{12})$
6	СД7	$Z_1 \cdot Z_2 + \dots + Z_7 \cdot Z_1$	$1 / (Y_{12} \cdot Y_{23} + \dots + Y_{71} \cdot Y_{12})$

Решение. *Методика анализа стандартная: контурные токи и узловые напряжения. В табл. 4 представлены результаты расчета двух вариантов схемы с источником напряжения E = 6 В, размещенном в ветви 1 и источником напряжения E₂₃ = 12 В, размещенном в ветви 2 – 3 треугольника (внешняя ветвь структуры). В таблицах напряжения и токи с индексом в виде одной цифры относятся к узловым напряжениям и токам в ветвях звезды соответственно. Напряжения, токи и мощности с индексами “mn” относятся к ветвям треугольника. Порядок значений этих величин в таблицах в виде столбцов связан со звездой и соответствует внешним ветвям схемы. Напротив значения U1, всегда размещено значение U23 и т. д. Все изложенное одинаково касается и тока и мощности. Причина такого размещения понятна из табл. 4.*

Таблица 4

E1 = 6 В				Rbx = 0.5+1=1,5 Ом	
Uk В	Umn В	Ik А	Imn А	Pzv Вт	Pmn Вт
U1 = 4	U23 = 0	I1 = 4	I23 = 0	P1 = 8	P23 = 0
U2 = 1	U13 = 3	I2 = 3	I13 = 1	P2 = 3	P13 = 3
U3 = 1	U12 = 3	I3 = 1	I12 = 3	P3 = 1	P12 = 9
E14 = 12				bx = 2 + 1 = 3	
Imn А	Ik А	Umn В	Uk В	Pmn Вт	Pzv Вт
I23 = 4	I1 = 0	U32 = 4	U1 = 0	P23 = 32	P1 = 0
I31 = 1	I2 = 3	U31 = 3	U2 = 1	P31 = 3	P2 = 3
I12 = 1	I3 = 3	U12 = 1	U3 = 3	P12 = 1	P3 = 9

Таблица 2

Это упрощает понимание соответствия, полученных в таблицах значений. Обратим внимание на первую таблицу в отношении нулевых значений и тока и напряжения. Это касается узлов 2 – 3 и ветви их соединяющей. В нижней части таблицы нулевые значения напряжений и токов возникают в противоположенной ветви, соединённой с узлом 1. Несложно убедиться, что подобные соотношения ожидаются при переносе источника в другие ветви.

Поставленное условие доказано, но предлагается посмотреть на полученные результаты ещё раз. Значение E₂₃ = 12 В выбрано не случайно. В таблице даны значения входных сопротивлений для каждого из двух рассматриваемых вариантов.

Они тоже отличаются в два раза, при этом входные сопротивления относительно ветвей с источниками одинаковы – каждое по одному Ому. Интересным является то, что значения напряжений одного из вариантов, становятся значениями токов другого и наоборот. Числовые соответствия представлены всегда парой столбцов. Даже значения мощностей звезды сопротивлений и треугольника меняются местами и только значения мощностей на сопротивлениях ветвей с источниками отличаются по величине. Таким образом, имея в виду, что значения токов и мощностей выражаются целыми числами, можно констатировать два новых факта: цепь является отличным делителем

токов и напряжений и является преобразователем значений токов в значения напряжений и наоборот.

Не менее интересен вариант этой же схемы с равными сопротивлениями. Например, сопротивления треугольника каждое по $\sqrt{3}=1.273$ Ом и соответственно сопротивления звезды по $1/\sqrt{3}=0.577$ Ом, при $E=6В$ и $E_{23}=10,392$ В обеспечивают при других числовых значениях те же соотношения между токами и напряжениями. Оба варианта относятся к типу совершенных мостов и по току и по напряжению.

Пример 2. *Заданы сопротивления шестиплеечевого моста (рис. 3, табл.1) в виде простых чисел: $R_{12} = R_{23} = R_{34} = R_{41} = 2$ Ом; $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.5$ Ом. Определить, как изменяются токи и напряжения самодуальной цепи при $E_1 = 24$ В и $E_{14} = 48$ В и выяснить особенности моста.*

Решение. *Здесь, как и в первом примере, ограничимся приведением сводных данных (табл. 4), так как методика анализа стандартная (контурные токи и узловые напряжения).*

При внимательном рассмотрении данных верхней таблицы можно обнаружить, что напряжение между узлами 2 и 4 всё же равно нулю. Но, ни одного тока равного нулю нет. Если рассматривать данные при источнике $E_{14} = 48$ В, то обнаружим, что токи звезды, непосредственно примыкающие к источнику $I_1 = I_4 = 14$ А, а токи звезды удалённые от источника в каждой ветви по 2 А. Следовательно в сечении центрального узла ток равен нулю. Что касается числовых данных, то они снова целые числа и четко показывают смену значений напряжений и токов при источнике в звезде на токи и напряжения при источнике во внешней цепи. Однако следует заметить, что здесь входные сопротивления не так гармонично связаны, как в предшествующем варианте. Однако структура относится в данном случае также к совершенному мосту.

Рассматривая два примера можно сделать ряд выводов: кроме мостов простых и совершенных следует различать **мосты по напряжению и мосты по току.**

Мостовые структуры способны преобразовывать величины токов в величины напряжений и, наоборот, при этом служить прекрасными делителями и токов, и напряжений, и мощностей.

Таблица 5

E1 = 24 В		Rbx = 0.5+1.214=1,714 Ом			
Uk В	Umn В	Ik А	Imn А	Pzv Вт	Pmn Вт
U1 = 17	U14 = 14	I1 = 14	I14 = 7	P1 = 98	P14 = 98
U2 = 3	U43 = 2	I2 = 6	I43 = 1	P2 = 18	P43 = 2
U3 = 1	U23 = 2	I3 = 2	I23 = 1	P3 = 2	P23 = 2
U4 = 3	U12 = 1.4	I4 = 6	I12 = 7	P4 = 18	P12 = 98
E14 = 48		Rbx = 2 + 0.824 = 2.824			
Imn А	Ik А	Umn В	Uk В	Pmn Вт	Pzv Вт
I14 = 17	I1 = 14	U41 = 14	U1 = 7	P14 = 578	P1 = 98
I43 = 3	I2 = 2	U43 = 6	U2 = 1	P43 = 18	P2 = 2
I32 = 1	I3 = 2	U32 = 2	U3 = 1	P32 = 2	P3 = 2
I21 = 3	I4 = 14	U21 = 6	U4 = 7	P21 = 18	P4 = 98

Все предложенные варианты структур мостов относятся либо к типу с четным числом узлов (пример 2), либо к типу с нечетным числом узлов (пример 1).

Свойства мостов с четным числом узлов в основном таковы, что это либо мост по напряжению, либо по току. Всё зависит от места включения источника энергии. Они требуют или равенства сопротивлений, например, многоугольника, или, по меньшей мере, наличия симметрии относительно ветви с источником. Мосты с нечетным числом узлов, как правило, мосты и по току и по напряжению. В мостовых структурах этого типа с числом узлов больше трёх могут существовать или пары узлов с нулевыми напряжениями, или ветви с токами, равными нулю дополнительно к основному свойству. В последнем случае речь идёт о ветвях, не имеющих существенного сопротивления – это сечения проводов. Кроме того, мосты с нечетным числом узлов не привередливы в отношении численных значений сопротивлений. Главный критерий – звёзды и многоугольники должны быть согласованы.

Краткие сведения о новых мостах при гармонических токах

Структуры мостов остаются такие же, как при постоянных токах. Тонкости заполнения зависят от потребности и фантазии разработчика. Предсказать какие они будут – сегодня сказать трудно. Здесь предложены на рассмотрение мосты типа RLC, с цепочками RL и RC с добротностью единица.

Для мостов при гармонических токах и напряжениях – это использование закона обратных структур для звёзд и многоугольников (табл. 2). Ниже рассмотрены мосты СД6_М и СД7_М. Буква «М» в имени, призвана фиксировать принадлежность СД структуры к категории мостов. Первый мост при гармонических воздействиях СД6_М выполнен на следующих сопротивлениях шестиугольника: $Z_{12} = Z_{23} = Z_{34} = 1 + j$ Ом, $Z_{45} = Z_{56} = Z_{61} = 1 - j$ Ом. Что касается сопротивлений звезды, то они равны: $Z_1 = Z_4 = 0.5$ Ом; $Z_2 = Z_3 = 0.5 + j0.5$ Ом; $Z_5 = Z_6 = 0.5 - j0.5$ Ом. Другими словами, сопротивления источника и условной нагрузки оставили активными, сохранив равенство определителей многоугольника и звезды единице. Это вариант данных, соответствующий ЭДС источника с $E_1 = 56$ В, размещенной в звезде. Результаты анализа приведены в табл. 6 (верхние шесть строчек). Кроме того заметим, что главный определитель системы уравнений по методу контурных токов здесь равен 210 Ом⁶, а главный определитель системы уравнений по методу узловых напряжений – 420 Ом⁶. Входное сопротивление составляет 1.867 Ом. При этом входное сопротивление по отношению к ветви источника составило 1.367 Ом.

Анализ полученных результатов показывает, что при источнике в звезде мост относится к мостам по напряжению – имеются две пары узлов, между которыми нет разности напряжений. Ветви с нулевыми токами отсутствуют. Все напряжения выражены целыми числами, что свидетельствует и о сохранении только что описанных свойств мостов при постоянных токах и о наличии резонанса токов

При переносе источника в ветвь многоугольника с изменением значения ЭДС до 112 В изменили и сопротивления следующим образом: сопротивления источника и нагрузки вновь сделали активными, каждое по 2 Ом; все сопротивления звезды стали ак-

тивно реактивными. $Z_{61} = Z_{34} = 2 \text{ Ом}$; $Z_1 = 0.5 + 0.5j \text{ Ом}$; $Z_4 = 0.5 - 0.5j \text{ Ом}$. Все остальные сопротивления без изменений. При этом значения определителей поменялись местами при тех же величинах. Результаты расчета этого варианта работы схемы занесены в табл. 6, нижняя её часть.

Смена источников в соответствии с принятой методикой не требует изменения сопротивлений и это одна из особенностей структур с нечетным числом узлов – сопротивления источника и нагрузки оказались в разных структурах. Здесь определители систем уравнений одинаковы и выражены числом 784.

Таблица 6

E1 = 56 В			Rbx = 0.5 + 1.367 = 1,867 Ом		
Uk B	Umn B	Ik A	Imn A	Szv BA	Smn BA
U1=41	U16=30	I1=30	I16=15+j15	P1=450	S61=450-j450
U2=11	U65=8	I2=11-j11	I65=4+j4	S2=121+j121	S65=32-j32
U3=3	U54=2	I3=3-j3	I54=1+j	S3=9+j9	S54=2-j2
U4=1	U34=2	I4=2	I34=1-j	P4=2	S34=2+j2
U5=3	U23=8	I5=3+j3	I23=4-j4	S5=9-j9	S23=32+j32
U6=11	U12=30	I6=11+j11	I12=15-j15	S6=121-j121	S12=450+j450
Итого по мощности: 1680				712	968
E14 = 112 В			Rbx = 2 + 0.732 = 2.732		
Imn A	Ik A	Umn B	Uk B	Smn BA	Szv BA
I16=41	I1=30	U16=30	U1=15+j15	P16=3362	S1=450+j450
I65=11	I2=8	U65=11-j11	U2=4+j4	S65=121+121	S2=32+j32
I54=3	I3=2	U54=3-j3	U3=1+j	S54=9+j9	S3=2+j2
I34=1	I4=2	U34=2	U4=1-j	S34=2	S4=2-j2
I23=3	I5=8	U23=3+j3	U5=4-j4	S23=9-j9	S5=32-j32
I12=11	I6=30	U12=11+j11	U6=15-j15	S12=121-j121	S6=450-j450
Итого по мощности: 4592				3624	968

Анализ полученных результатов показывает, что при источнике в многоугольнике мост относится к мостам по току – имеются два сечения в центре структуры, в которых токи отсутствуют. Нет напряжений со значениями равными нулю. Все токи выражены целыми числами, что свидетельствует о наличии резонанса напряжений.

В табл. 7 сведены данные анализа структуры СД7_М при следующих данных: $Z_1 = 0.5 \text{ Ом}$; $Z_{45} = 2 \text{ Ом}$; все остальные сопротивления слева от вертикальной оси симметрии каждое по $1 - j \text{ Ом}$; справа – по $1 + j \text{ Ом}$.

Анализ результатов показывает, что существенных изменений по отношению к данным табл. 6 не произошло - много сходства, но есть и различия. Добавилась одна строчка в середине таблицы, произошли смещения отдельных значений и появились явно выраженные нулевые значения. Структура СД7_М является мостом и по току и по напряжению с добавлением свойств предшествующей структуры. При источнике в звезде добавляется пара нулевых напряжений U_{27} и U_{36} . При источнике в многоугольнике добавляются два сечения, где можно обнаружить равные нулю токи. Признаки наличия резонансов те же.

Использование мостовых структур

Электрические мостовые цепи применяются в разнообразных приборах и устройствах контроля и селекции сигналов; в измерительно-вычислительных комплексах контроля и защиты; в информационно измерительных системах, применяемых в различных отраслях народного хозяйства в т. ч. при научных исследованиях. Мосты имеют широкий диапазон распространения и позволяют прямо или косвенно измерять и контролировать почти все физические величины. Необозримое количество различных показателей технологических процессов, свойств сырья и готовой продукции напрямую зависит от их внедрения. Изюминкой использования мостов может явиться обеспечение совместной работы мощных источников электрической энергии с несхожими параметрами.

Таблица 7

E1 = 56 В			Rbx = 0.5 + 1.367 = 1,867 Ом		
Uk B	Umn B	Ik A	Imn A	Szv BA	Smn BA
U1=41	U45=0	I1=30	I45=0	P1=450	S45=0
U2=11	U65=2	I2=11-j11	I65=1+j	S2=121+j121	S65=450-j450
U3=3	U76=8	I3=3-j3	I76=4+j4	S3=9+j9	S76=32-j32
U4=1	U17=30	I4=1-j	I17=15+j15	S4=1+j	S17=2-j2
U5=1	U12=30	I5=1+j	I12=15-j15	S5=1-j	S12=2+j2
U6=3	U23=8	I6=3+j3	I23=4-j4	S6=9-j9	S23=32+j32
U7=11	U34=2	I7=11+j11	I34=1-j1	S7=121-j121	S12=450+j450
Итого по мощности: 1680				712	968
E14 = 112 В			Rbx = 2 + 0.732 = 2.732		
Imn A	Ik A	Umn B	Uk B	Smn BA	Szv BA
I45=41	I1=0	U45=30	U1=0	P45=3362	S1=0
I65=11	I2=2	U65=11-j11	U2=1+j	S65=121-121	S2=2+j2
I76=3	I3=8	U76=3-j3	U3=4+j4	S76=9-j9	S3=32+j32
I17=1	I4=30	U17=1-j	U4=15+j15	S17=1-j	S4=450+j50
I12=1	I5=30	U12=1+j	U5=15-j15	S12=1+j	S5=450-j450
I23=3	I6=8	U23=3+j3	U6=4-j4	S23=9+j9	S6=32-j32
I34=11	I7=2	U34=11+j11	U7=1-j1	S34=121+j121	S7=2-j2
Итого по мощности: 4592				3624	968

Выводы

1. Введенные определения: «электрический мост», «совершенный мост», «простой мост», «мост по току», «мост по напряжению», «мост по току и по напряжению» свидетельствуют о существенных изменениях в теории электрических мостов. Её становление только начинается в новом цикле развития.
2. Приведены новые свойства мостовых структур, которые дают новые пути их применения и использования, например, в качестве делителей токов и напряжений.
3. Выявлено новое свойство структуры линейной цепи. Она способна в условиях самодуальных соединений элементов «опрокидывать» значения напряжений и токов в значения токов и напряжений. Это зависит от места включения источника в структуре цепи.

Литература

1. Передельский Г. И. Мостовые цепи с импульсным питанием. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.: ил.
2. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы// Под общ. Ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова и др. – 7 – е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.: ил.
3. Фазовый контур первого порядка /Лебедев П.Ф., Пономаренко С.Н. //Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. 2007. Вып. 150 с. 88 – 93.
4. Лебедев П. Ф., Донець О. В., Пономаренко С. М. Патент України на фазообертач мостовий № 83519, зареєстровано 25.07.2008 р., бюл. №14. Заявка № а 2006 06841 від 19.06.2006 р.
5. Лебедев П.Ф. Эквивалентные структуры линейных электрических цепей //Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. 2003. Вып. 135 с. 158 – 165.
6. Лебедев П.Ф. Эквивалентные структуры в гармоническом анализе. //Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. 2004. Вып. 139 с. 107 – 112.
7. Самодуальные линейные структуры радиотехники и связи /П.Ф.Лебедев //Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сб. 2009. Вып. 140 с. 121 – 126.

У статті розглянуто питання щодо формування рівнянь електричних кіл по методу змінних стану та їх розв’язання з урахуванням властивості надмірності змінних стану, що проявляється в еквівалентних розрахункових схемах електричних мереж

Ключові слова: змінні стану, електрична мережа

В статье рассмотрены вопросы формирования уравнений электрических сетей по методу переменных состояния и их решения с учетом свойства избыточности переменных состояния, проявляющегося в эквивалентных расчетных схемах электрических сетей

Ключевые слова: переменные состояния, электрическая сеть

In the article the questions of forming of equalizations of electric networks are considered on the method of state variables and their decision taking into account property of topological surplus of state variables, showing up in the equivalent calculation charts of electric networks variables

Key words: state variables, electric networks

УДК 621.311

АНАЛИЗ РЕЖИМА ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ

В.Г. Ягуп

Доктор технических наук, профессор
Кафедра электроснабжения городов
Харьковская национальная академия городского
хозяйства
ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел: (057) 731-30-40
E-mail: yagup_walery@rambler.ru

Е.В. Ягуп

Кандидат технических наук, ассистент
Кафедра систем электрической тяги
Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта
пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050
Контактный тел.: (057) 731-30-40
E-mail: yag.kate@rambler.ru

Обзор состояния вопроса и постановка задачи

Анализ установившихся режимов электроэнергетических сетей (ЭЭС) является непременным этапом

проектирования и исследования систем электроснабжения [1]. Обычно эта задача решается на основе линеаризации системы и привлечении матричных методов с ориентацией на применение средств цифровой