

УДК 621.38

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СЛОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

Арутюнов М.А., Гаврилов Д.А., Мешкова А.Н., Рябцев И.А., Хитев Н.Р.
Научные руководители – к.т.н., доцент Новаш И.В., Климович П.И.

Здания, а также помещения в них имеют кубическую форму, поэтому можно заметить, что проводка, расположенная в стенах и потолке, находится в пространстве и ее можно представить, как объемную электрическую цепь.

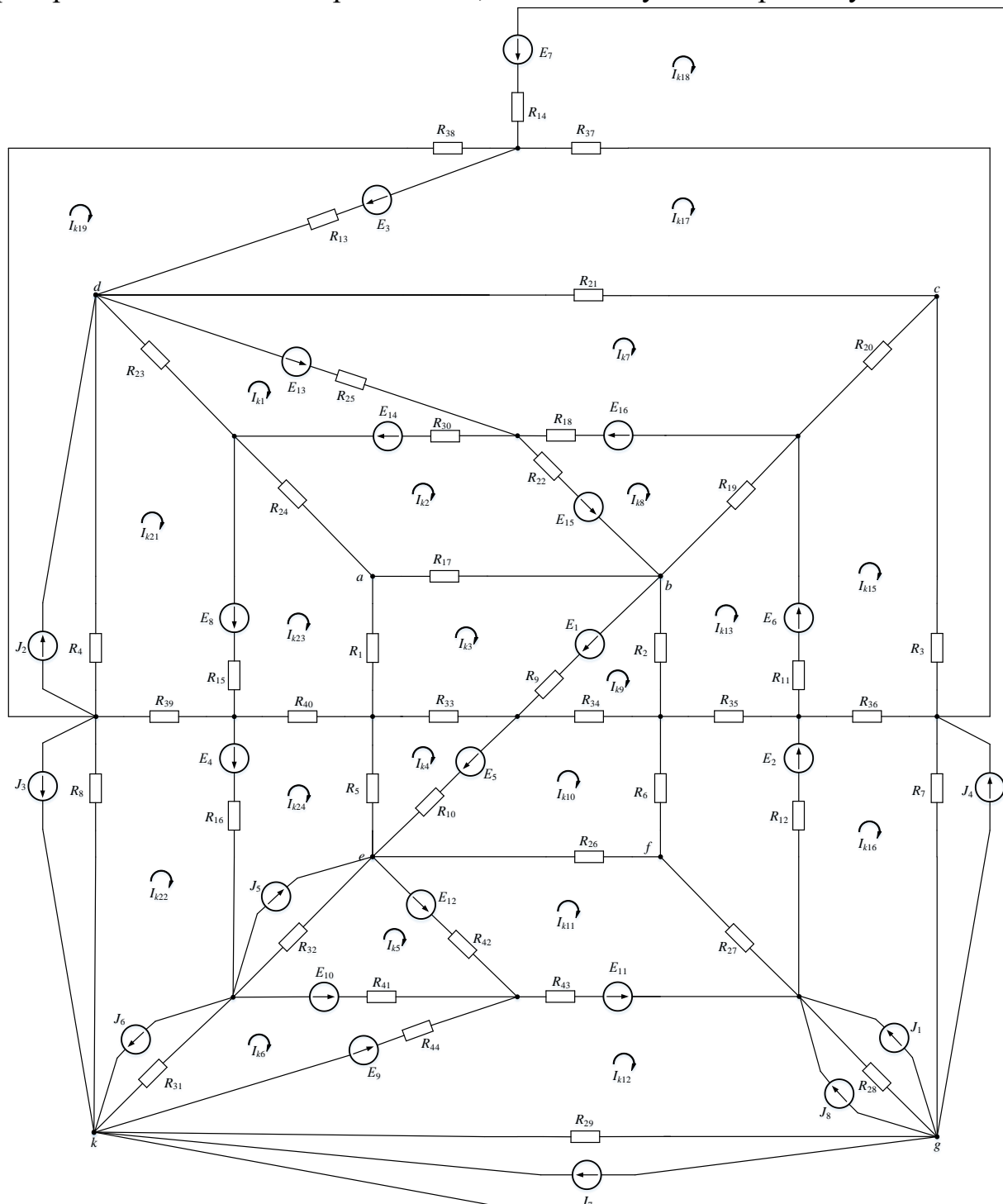


Рисунок 1 – Схема электрической цепи постоянного тока

В [1] была рассмотрена достаточно сложная электрическая цепь постоянного тока (рисунок 1), решение которой может вызвать затруднения. Но что, если посмотреть на нее под другим углом. Построим объемную 3D-модель упомянутой электрической цепи (рисунок 2).

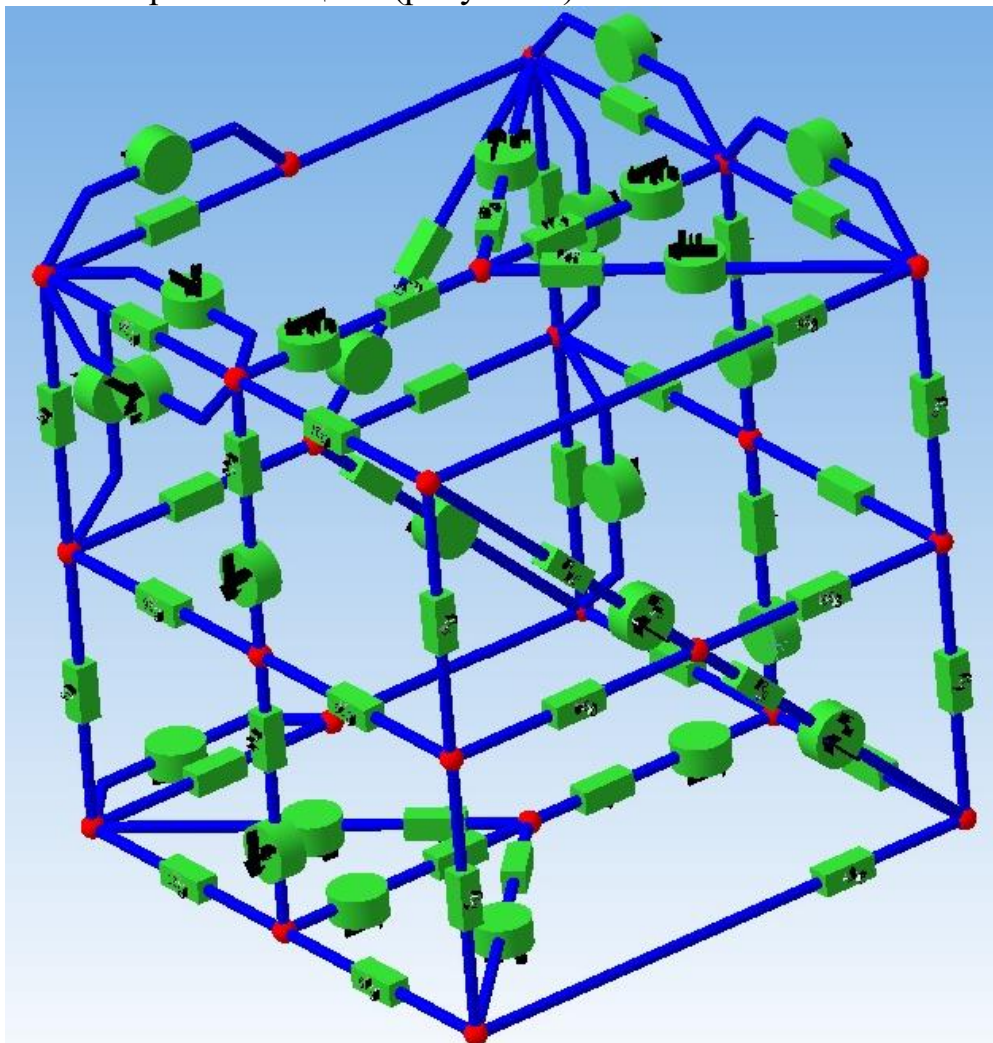


Рисунок 2 – 3D-модель схемы электрической цепи

Благодаря 3D мы имеем более полное понимание о данной электрической цепи, у нас есть возможность видеть расположение всех элементов и то, как они связаны друг с другом.

В [1] расчет рассматриваемой цепи был выполнен методом узловых потенциалов. В данной работе приведем расчет схемы методом контурных токов и проиллюстрируем преимущества объемного представления для определения независимых контуров.

В MS Visio составим «3D-скелет» исследуемого объекта (рисунок 3). Такое представление упрощает определение методом направленных графов независимых контуров, необходимых при расчете цепи. На рисунке 3 красной линией выделен подграф дерева.

Независимые контуры определяются следующим образом: необходимо поочередно добавлять незадействованные ветви схемы в подграф дерева, так чтобы образовывались замкнутые контуры. Пример применения данного метода представлен на рисунке 4.

Таким образом, 3D помогает визуализировать схему, а следовательно, оптимизирует поиск решения и расчеты цепи. В нашем случае расчет выполним методом контурных токов в среде вычислительной математики MathCAD. Система уравнений для нахождения контурных токов представлена на рисунке 5, искомые токи – на рисунке 6.

Given

$$\begin{aligned}
 &IK1 \cdot (R25 + R30 + R23) - IK7 \cdot R25 - IK2 \cdot R30 - IK21 \cdot R23 = E13 + E14 \\
 &IK2 \cdot (R22 + R17 + R24 + R30) - IK8 \cdot R22 - IK3 \cdot R17 - IK23 \cdot R24 - IK1 \cdot R30 = E15 - E14 \\
 &IK3 \cdot (R1 + R33 + R9 + R17) - IK9 \cdot R9 - IK4 \cdot R33 - IK23 \cdot R1 - IK2 \cdot R17 = E1 \\
 &IK4 \cdot (R5 + R33 + R10) - IK10 \cdot R10 - IK3 \cdot R33 - IK24 \cdot R5 = E5 \\
 &IK5 \cdot (R41 + R42 + R32) - IK11 \cdot R42 - IK6 \cdot R41 - IK24 \cdot R32 - J5 \cdot R32 = E12 - E10 \\
 &IK6 \cdot (R31 + R41 + R44) - IK5 \cdot R41 - IK12 \cdot R44 - IK22 \cdot R31 + J6 \cdot R31 = E9 + E10 \\
 &IK7 \cdot (R21 + R25 + R18 + R20) - IK1 \cdot R25 - IK8 \cdot R18 - IK17 \cdot R21 - IK15 \cdot R20 = E16 - E13 \\
 &IK8 \cdot (R22 + R18 + R19) - IK2 \cdot R22 - IK13 \cdot R19 - IK7 \cdot R18 = -E15 - E16 \\
 &IK9 \cdot (R9 + R34 + R2) - IK10 \cdot R34 - IK3 \cdot R9 - IK13 \cdot R2 = -E1 \\
 &IK10 \cdot (R10 + R26 + R6 + R34) - IK9 \cdot R34 - IK4 \cdot R10 - IK11 \cdot R26 = -E5 \\
 &IK11 \cdot (R42 + R43 + R27 + R26) - IK10 \cdot R26 - IK5 \cdot R42 - IK12 \cdot R43 = -E11 - E12 \\
 &IK12 \cdot (R44 + R43 + R29 + R28) - IK11 \cdot R43 - IK6 \cdot R44 - IK18 \cdot R29 - IK16 \cdot R28 - J7 \cdot R29 + J8 \cdot R28 + J1 \cdot R28 = E11 - E9 \\
 &IK13 \cdot (R19 + R11 + R35 + R2) - IK9 \cdot R2 - IK15 \cdot R11 - IK8 \cdot R19 = -E6 \\
 &IK15 \cdot (R20 + R3 + R36 + R11) - IK17 \cdot R3 - IK16 \cdot R36 - IK13 \cdot R11 - IK7 \cdot R20 = E6 \\
 &IK16 \cdot (R12 + R36 + R7 + R28) - IK15 \cdot R36 - IK18 \cdot R7 - IK12 \cdot R28 + J4 \cdot R7 - J8 \cdot R28 - J1 \cdot R28 = E2 \\
 &IK17 \cdot (R3 + R21 + R13 + R37) - IK15 \cdot R3 - IK18 \cdot R37 - IK19 \cdot R13 - IK7 \cdot R21 = -E3 \\
 &IK18 \cdot (R37 + R7 + R29 + R14) - IK17 \cdot R37 - IK20 \cdot R14 - IK16 \cdot R7 - IK12 \cdot R29 - J4 \cdot R7 + J7 \cdot R29 = -E7 \\
 &IK19 \cdot (R13 + R38 + R4) - IK20 \cdot R38 - IK21 \cdot R4 - IK17 \cdot R13 + J2 \cdot R4 = E3 \\
 &IK20 \cdot (R14 + R38 + R8) - IK18 \cdot R14 - IK19 \cdot R38 - IK22 \cdot R8 - J3 \cdot R8 = E7 \\
 &IK21 \cdot (R4 + R39 + R15 + R23) - IK23 \cdot R15 - IK22 \cdot R39 - IK19 \cdot R4 - IK1 \cdot R23 - J2 \cdot R4 = E8 \\
 &IK22 \cdot (R39 + R8 + R31 + R16) - IK21 \cdot R39 - IK20 \cdot R8 - IK24 \cdot R16 - IK6 \cdot R31 - J6 \cdot R31 + J3 \cdot R8 = E4 \\
 &IK23 \cdot (R24 + R1 + R40 + R15) - IK24 \cdot R40 - IK21 \cdot R15 - IK2 \cdot R24 - IK3 \cdot R1 = -E8 \\
 &IK24 \cdot (R40 + R5 + R32 + R16) - IK23 \cdot R40 - IK22 \cdot R16 - IK4 \cdot R5 - IK5 \cdot R32 + J5 \cdot R32 = -E4
 \end{aligned}$$

$$\underline{IK} := \text{Find}(IK1, IK2, IK3, IK4, IK5, IK6, IK7, IK8, IK9, IK10, IK11, IK12, IK13, IK14, IK15, IK16, IK17, IK18, IK19, IK20, IK21, IK22, IK23, IK24)$$

Рисунок 5 – Система уравнений контурных токов в MathCAD

$I1 := IK_{23} - IK_3 = -0.5924$	$I12 := (-IK)_{16} = -0.6359$	$I23 := IK_{21} - IK_1 = -2.126$	$I34 := IK_{10} - IK_9 = 4.559$
$I2 := IK_9 - IK_{13} = -0.7101$	$I13 := IK_{17} - IK_{19} = -7.888$	$I24 := IK_{23} - IK_2 = -0.5569$	$I35 := -IK_{13} = 1.953$
$I3 := IK_{15} - IK_{17} = 0.4799$	$I14 := IK_{18} - IK_{20} = -4.044$	$I25 := IK_1 - IK_7 = 9.827$	$I36 := IK_{16} - IK_{15} = 2.062$
$I4 := IK_{19} - IK_{21} + J2 = 0.5257$	$I15 := IK_{21} - IK_{23} = 0.4759$	$I26 := IK_{11} - IK_{10} = -1.867$	$I37 := IK_{18} - IK_{17} = 3.462$
$I5 := IK_{24} - IK_4 = 0.4994$	$I16 := IK_{22} - IK_{24} = 1.564$	$I27 := IK_{11} = 0.02955$	$I38 := IK_{20} - IK_{19} = -0.3819$
$I6 := IK_{10} = 1.896$	$I17 := IK_3 - IK_2 = 0.03553$	$I28 := IK_{12} - IK_{16} + J8 + J1 = 1.383$	$I39 := IK_{22} - IK_{21} = -0.7154$
$I7 := IK_{16} - IK_{18} + J4 = 0.5795$	$I18 := IK_8 - IK_7 = 0.2369$	$I29 := IK_{18} - IK_{12} + J7 = 0.6376$	$I40 := IK_{24} - IK_{23} = -1.803$
$I8 := IK_{20} - IK_{22} - J3 = -0.3408$	$I19 := IK_8 - IK_{13} = 0.1449$	$I30 := IK_2 - IK_1 = -2.045$	$I41 := IK_6 - IK_5 = 0.07935$
$I9 := IK_3 - IK_9 = 8.436$	$I20 := IK_7 - IK_{15} = -0.6192$	$I31 := IK_{22} - IK_6 - J6 = -0.2313$	$I42 := IK_5 - IK_{11} = 3.063$
$I10 := IK_4 - IK_{10} = 0.9813$	$I21 := IK_7 - IK_{17} = -0.1394$	$I32 := IK_{24} - IK_5 + J5 = 1.084$	$I43 := IK_{12} - IK_{11} = 1.289$
$I11 := IK_{13} - IK_{15} = -0.5273$	$I22 := IK_2 - IK_8 = 7.545$	$I33 := IK_4 - IK_3 = -2.895$	$I44 := IK_6 - IK_{12} = 1.853$

Рисунок 6 – Результаты вычислений MathCAD

Составить модель данной схемы и расчитать ее параметры можно и в специализированном программном обеспечении, к примеру в пакете программ Electronics Workbench, в пакете программ MultiSIM BLUE или в системе

динамического моделирования Simulink MatLab. Однако они позволяют построить схему только на плоскости, поэтому прежде всего необходимо понять, как правильно подключить провода в цепи.

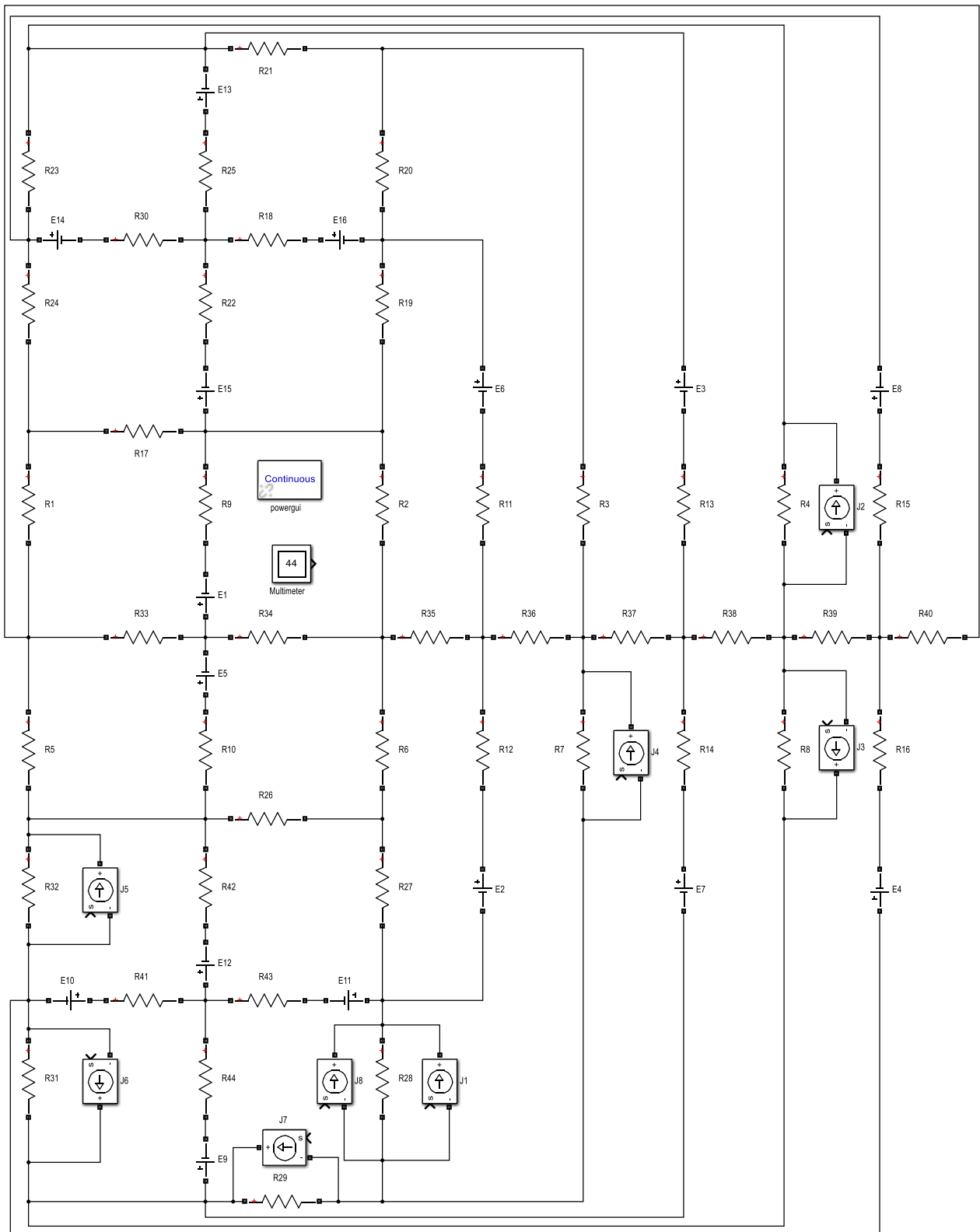


Рисунок 7 – Модель исходной схемы постоянного тока в Simulink

Приведем модель и результаты моделирования в Simulink на рисунках 7 и 8. Значения, полученные в Simulink, можно использовать как эталон

вычислений, поскольку все расчеты происходят автоматически в соответствии с собранной схемой. Несовпадения могут возникнуть исключительно в силу человеческого фактора.

Токи, полученные в среде имитационного моделирования Simulink (рисунок 8), и токи, рассчитанные в программе MathCAD (рисунок 6), совпадают. Из чего можно сделать вывод, что система уравнений составлена корректно и расчеты выполнены верно.

'Ib: R1 ' = -0.5924 A	'Ib: R23' = -2.126 A
'Ib: R2 ' = -0.7101 A	'Ib: R24' = -0.5569 A
'Ib: R3 ' = 0.4799 A	'Ib: R25' = 9.827 A
'Ib: R4 ' = 0.5257 A	'Ib: R26' = -1.867 A
'Ib: R5 ' = 0.4994 A	'Ib: R27' = 0.02955 A
'Ib: R6 ' = 1.896 A	'Ib: R28' = 1.383 A
'Ib: R7 ' = 0.5795 A	'Ib: R29' = 0.6376 A
'Ib: R8 ' = -0.3408 A	'Ib: R30' = -2.045 A
'Ib: R9 ' = 8.436 A	'Ib: R31' = -0.2313 A
'Ib: R10' = 0.9813 A	'Ib: R32' = 1.084 A
'Ib: R11' = -0.5273 A	'Ib: R33' = -2.895 A
'Ib: R12' = -0.6359 A	'Ib: R34' = 4.559 A
'Ib: R13' = -7.888 A	'Ib: R35' = 1.953 A
'Ib: R14' = -4.044 A	'Ib: R36' = 2.062 A
'Ib: R15' = 0.4759 A	'Ib: R37' = 3.462 A
'Ib: R16' = 1.564 A	'Ib: R38' = -0.3819 A
'Ib: R17' = 0.03553 A	'Ib: R39' = -0.7154 A
'Ib: R18' = 0.2369 A	'Ib: R40' = -1.803 A
'Ib: R19' = 0.1449 A	'Ib: R41' = 0.07935 A
'Ib: R20' = -0.6192 A	'Ib: R42' = 3.063 A
'Ib: R21' = -0.1394 A	'Ib: R43' = 1.289 A
'Ib: R22' = 7.545 A	'Ib: R44' = 1.853 A

Рисунок 8 – Результаты моделирования цепи постоянного тока в Simulink

Литература

1. Гаврилов, Д.А. Применение 3D-моделирования для расчета установившихся режимов электрических цепей / Д.А. Гаврилов, А.Н. Мешкова ; науч. рук. И.В. Новаш, П.И. Климович // Актуальные проблемы энергетики 2020 [Электронный ресурс] : материалы студенческой научно-технической конференции / сост. : И.Н. Прокопеня, Т.А. Петровская. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 37–42.
2. Мазуренко, А.А. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов электротехнических специальностей / А.А. Мазуренко ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электротехника и электроника». – Минск : БНТУ, 2013.
3. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978.
4. Бладыко, Ю.В. Применение MathCAD в решении задач электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов электротехнических специальностей / Ю.В. Бладыко, А.А. Мазуренко, И.В. Новаш ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электротехника и электроника». – Минск : БНТУ, 2012..