

Московский Государственный Технический Университет  
им. Н. Э. Баумана  
Калужский филиал

**Н. Ф. ВРУБЛЕВСКИЙ**

**РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Методические указания*

Калуга  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2012



## ВВЕДЕНИЕ

Основная цель домашнего задания «Расчет сложных электрических цепей постоянного тока» - самостоятельное овладение студентами практическими навыками и умениями в применении фундаментальных законов электротехники – законов Ома и Кирхгофа, принципов и способов упрощения и преобразования схем, методов расчета и анализа сложных электрических цепей.

При изучении различных методов расчета электрических цепей надо иметь в виду, что правильный выбор метода решения позволяет упростить расчет, найти наиболее рациональный и наглядный для данной задачи путь решения. Отсюда следует, что необходимо знать преимущества и недостатки, возможности каждого метода и уметь оценивать примерный объем расчетов.

Опыт показывает, что только при самостоятельном решении задач можно научиться правильно применять различные методы расчета электрических цепей. Поэтому решение задач – важнейший этап овладения дисциплиной. При решении задачи нужно сначала уяснить её условия и содержание, затем выписать заданные величины и величины, подлежащие определению, начертить электрическую схему (если она не задана), выбрать метод и наметить план решения, в соответствии с выбранным методом решения сделать необходимые обозначения на схеме, составить требуемые уравнения и (или) выписать необходимые формулы, после чего решить уравнения и рассчитать по формулам требуемые по условию задачи величины. Начертить необходимые диаграммы, графики и выполнить другие заданные графические построения, наконец, проверить каким-либо путем правильность решения задачи.

Содержание курса лекций и настоящие методические материалы дают достаточную информацию для самостоятельного выполнения предусмотренного учебным планом домашнего задания.



# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Разработка, создание и эксплуатация электротехнических и энергетических установок и устройств, связаны с расчетом как простых, так и сложных электрических цепей.

К *простым электрическим цепям* обычно относят линейные цепи постоянного тока, содержащие резистивные элементы, соединенные последовательно, параллельно или смешанно с одним или несколькими источниками энергии в одной ветви.

*Сложной электрической цепью* называют цепь, содержащую две и более ветви с источниками энергии.

Общая задача анализа электрической цепи состоит в том, что в известной схеме цепи с заданными параметрами (ЭДС и сопротивлениями) необходимо рассчитать токи, мощности и напряжения на отдельных участках.

Решение задач анализа базируется на применении законов Ома и Кирхгофа. Закон Ома применяется главным образом при расчете режима отдельных участков цепи, а законы Кирхгофа — при расчете более сложных электрических цепей.

Решение задач с непосредственным применением законов Кирхгофа требует составления и решения значительного числа уравнений. В целях упрощения решения разработан целый ряд методов (например, контурных токов, узловых потенциалов и т. д.), являющихся следствием применения уравнений Кирхгофа. Кроме того, применяются методы, базирующиеся на свойствах линейных электрических цепей: методы наложения, эквивалентного генератора и другие.



## 1.1. ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА

**Закон Ома**, ток на участке цепи пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению этого участка (рис. 1а).

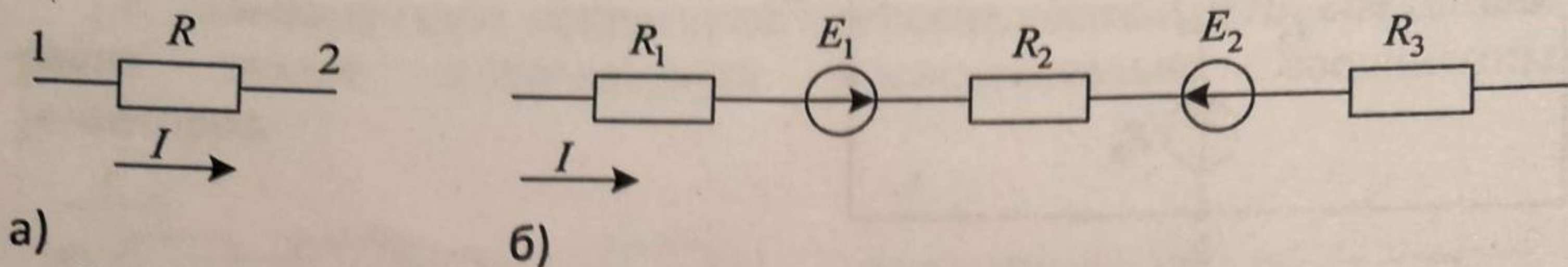


Рис. 1. Участки электрической цепи:

а – не содержащий источников энергии;

б – содержащий источники энергии

$$I = \frac{U_{12}}{R},$$

В общем случае, если участок цепи содержит источники ЭДС (рис. 1б), то для расчета применяют **обобщенный закон Ома**:

$$I = \frac{U_{12} + \sum_{n=1}^m E_n}{\sum_{k=1}^p R_k},$$

где  $E_n$  - ЭДС на рассматриваемом участке цепи;  $U_{12}$  - напряжение на участке цепи;  $R_k$  - алгебраическая сумма сопротивлений всех резисторов на участке цепи.

Применяя обобщенный закон Ома, следует руководствоваться следующим правилом знаков: если ЭДС и напряжение совпадают с условно-положительным направлением тока, то они берутся в формуле со знаком «плюс», если они противоположны с условно-положительным направлением тока, то со знаком «минус».

Законы Кирхгофа имеют особое значение в электротехнике из-за своей универсальности, так как они пригодны для решения любых электротехнических задач (для постоянного и переменного токов, переходных процессов).



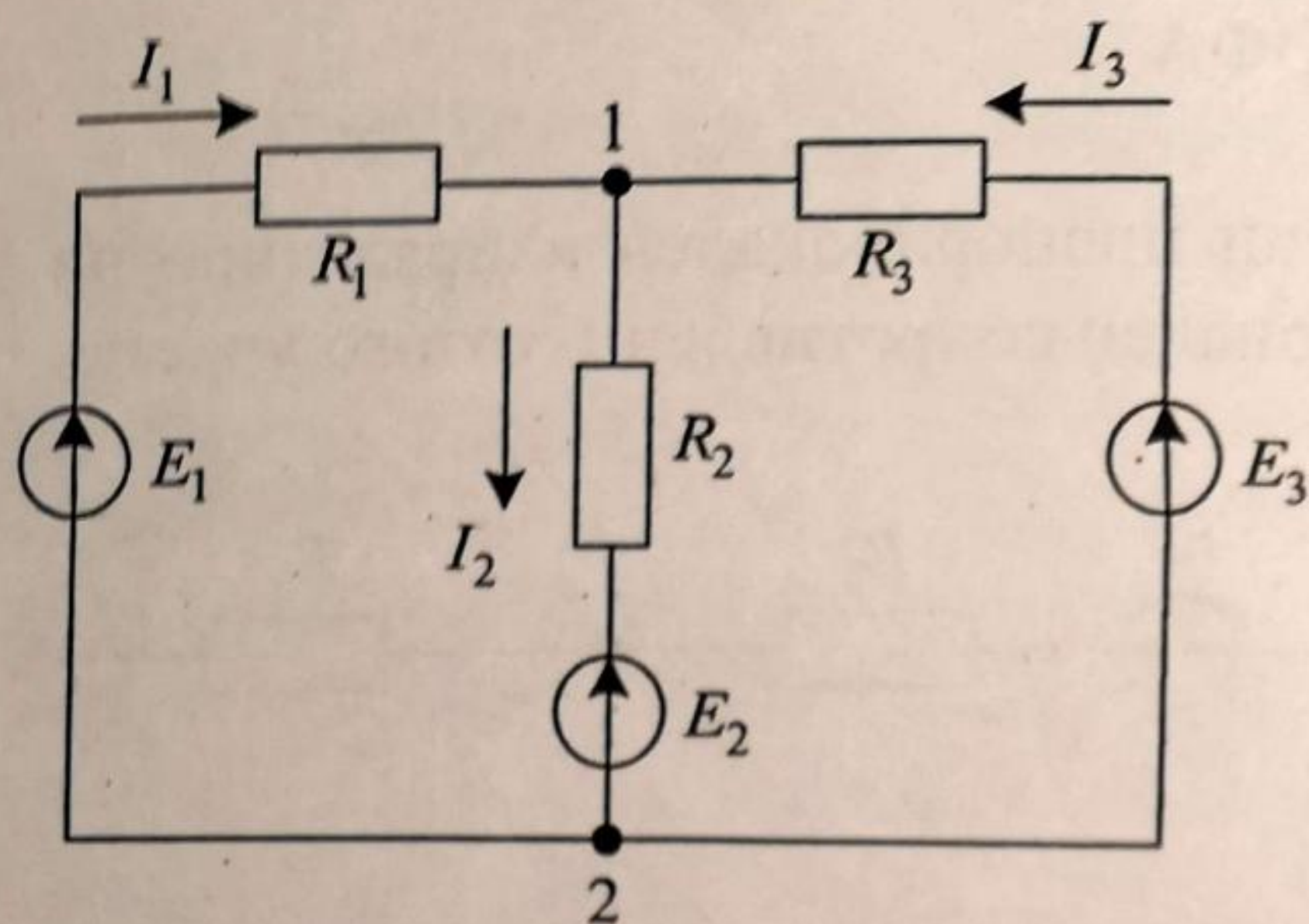


Рис. 2. Схема сложной электрической цепи

**Первый закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю (рис. 2).

Для постоянных токов:

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0.$$

Правило знаков: токи, втекающие в узел, берутся со знаком «плюс», а токи, выходящие из узла со знаком «минус».

**Второй закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах этого контура.

Для постоянных напряжений:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

Правило знаков: если направления ЭДС и токов совпадают с направлением обхода контуров, то они берутся со знаком «плюс», в противном случае со знаком «минус».

## 1.2. МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЦЕПИ

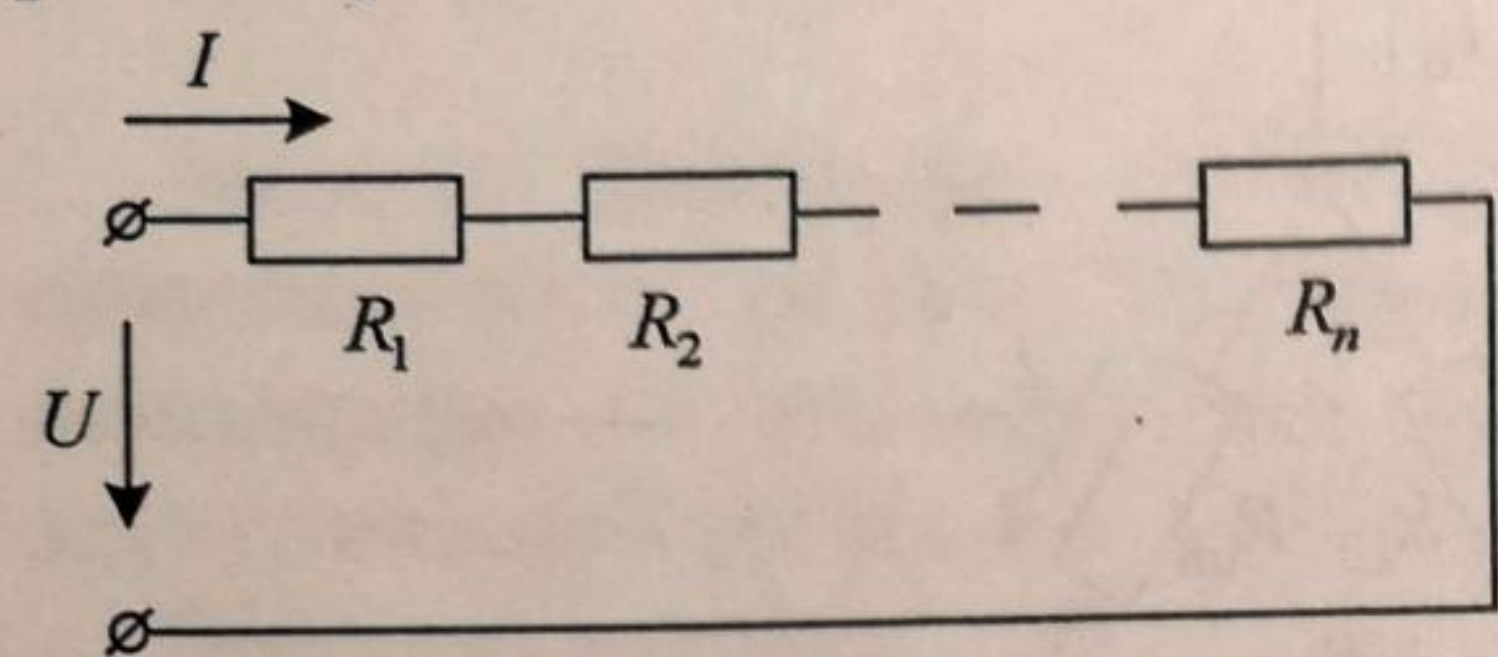
Метод состоит в том, что электрическая цепь или её участки заменяются более простыми по структуре участками цепи, при этом токи и напряжения не преобразованной части цепи не должны измениться. В результате преобразования структура цепи и её расчет упрощаются. При этом преобразуемая цепь не должна содержать источников энергии.



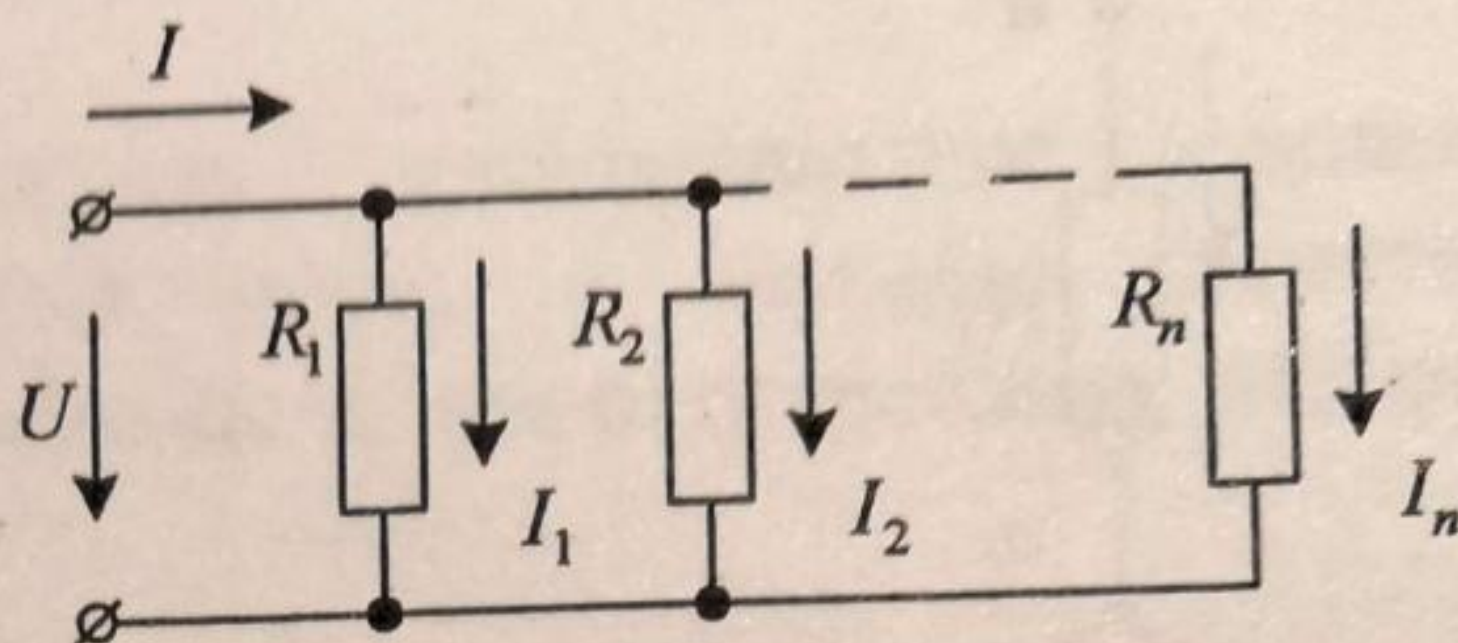
Последовательно соединенные элементы (резисторы) заменяем одним эквивалентным элементом с сопротивлением  $R_{\Sigma}$  (рис. 3, а)

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k$$

т.е. эквивалентное сопротивление последовательного соединения равно сумме сопротивлений последовательно соединенных резисторов.



а)



б)

Рис. 3. Схемы соединения резисторов:

а – последовательное соединение;

б – параллельное соединение.

Параллельно соединенные элементы также могут быть заменены одним эквивалентным элементом с сопротивлением  $R_{\Sigma}$  (рис. 3, б) при этом выполняется равенство:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

при использовании понятия проводимость

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k,$$

т. е. эквивалентная проводимость параллельно соединенных резистивных элементов равна сумме их проводимостей.

В частном случае, если параллельно соединены два резистора,

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

а эквивалентное сопротивление

$$R_{\Sigma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Смешанное соединение представляет собой комбинацию последовательного и параллельного соединений. Эквивалентное сопротивление находится путем постепенного упрощения схемы и



«свертывания» ее так, чтобы получить одно сопротивление. При расчете токов в отдельных ветвях схему «развертывают» в обратном порядке.

В сложных цепях встречаются соединения, которые нельзя отнести ни к последовательным, ни к параллельным. К таким соединениям относятся трехлучевая звезда (рис. 4, а) и треугольник сопротивлений (рис. 4, б).

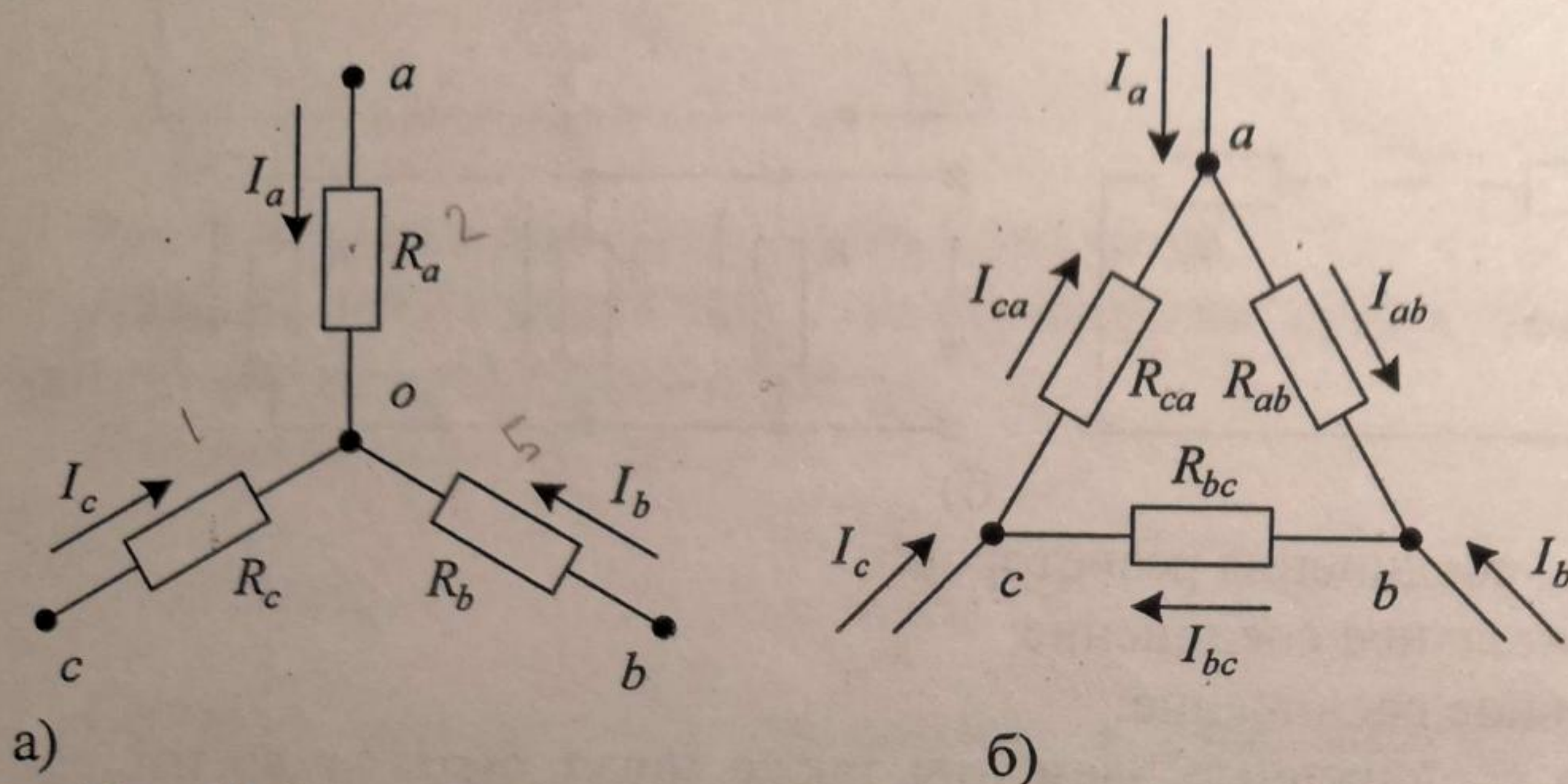


Рис. 4. Схемы соединения резисторов:

а – «звездой»;

б – «треугольником»

Их взаимное эквивалентное преобразование во многих случаях позволяет упростить схему и свести ее к схеме смешанного соединения сопротивлений.

Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду:

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}};$$

$$R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}};$$

$$R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.$$

Формулы обратного преобразования – звезды сопротивлений в треугольник:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c};$$



$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a};$$

$$R_{ca} = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}.$$

### 1.3. МЕТОД НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ КИРХГОФА

Законы Кирхгофа наиболее общие, универсальные законы, описывающие режим электрической цепи, и методы расчета, основанные на этих законах, применимы к расчету режима любой электрической цепи.

Порядок расчета.

1. Определяется число ветвей  $v$ , т. е. число неизвестных токов, и узлов  $y$ , которые обозначаются буквами или цифрами; выбираются произвольно и указываются положительные направления токов.

2. Определяется, сколько уравнений нужно составить по первому закону Кирхгофа и сколько по второму. Общее число уравнений должно быть равно числу неизвестных токов, т. е. числу ветвей  $v$ . По первому закону составляется  $y - 1$  уравнений, где  $y$  — число узлов схемы (уравнение для одного из узлов является следствием остальных, т. е. не является независимым; оно может быть получено суммированием всех остальных  $y - 1$  уравнений). Число уравнений, которые требуется составить по второму закону Кирхгофа, меньше общего числа уравнений  $v$  на число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, т. е. по второму закону Кирхгофа нужно составить  $v - (y - 1)$  независимых уравнений.

3. При составлении  $(y - 1)$  уравнений по первому закону Кирхгофа токам, направленным к узлу приписывается знак «плюс», а направленных от узла, знак «минус» (или наоборот). Уравнения по второму закону составляются для контуров так, чтобы в каждый следующий контур входила хотя бы одна ветвь, не вошедшая в другие контуры, для которых уже записаны уравнения. Выбирается направление обхода каждого контура (произвольно). При обходе контура в выбранном направлении ЭДС записывается со знаком «плюс», если ее направление совпадает с направлением обхода контура, и со знаком «минус» в противном случае. Падение



напряжения  $R \cdot I$  записывается со знаком «плюс», если направление обхода ветви совпадает с положительным направлением тока, и со знаком «минус» в противном случае.

#### 1.4. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ

В основе метода лежат законы Кирхгофа и два предположения: в каждом контуре протекают независимые друг от друга расчетные токи, называемые контурными, а ток каждой ветви равен алгебраической сумме контурных токов, замыкающихся через эту ветвь.

При этих предположениях оказывается, что для расчета схемы достаточно ограничиться составлением уравнений только по второму закону Кирхгофа, так как первый закон выполняется автоматически.

Следовательно, вместо  $b$  уравнений при непосредственном применении законов Кирхгофа достаточно составить  $b - (y - 1)$  уравнений, что значительно упрощает расчет.

Порядок расчета.

1. Выбирают независимые контуры, направления контурных токов и направления обхода контуров.

2. Для выбранных контуров составляются уравнения по второму закону Кирхгофа с учетом падения напряжения на смежных ветвях от всех контурных токов, замыкающихся через эту ветвь.

3. Определяются контурные токи и находятся токи в ветвях как алгебраическая сумма контурных.

#### 1.5. МЕТОД ДВУХ УЗЛОВ

Этот метод применяется для расчета электрических цепей с двумя узлами, между которыми включены активные и пассивные ветви. Идея метода состоит в том, что по расчетной формуле определяется напряжение между узлами, называемое узловым напряжением  $U_{ab}$ , а затем по обобщенному закону Ома рассчитываются токи в ветвях.

Порядок расчета.

1. По расчетной формуле определяются напряжения между двумя узлами



$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}.$$

Если ЭДС направлена к узлу, обозначенному первым индексом ( $a$ ), то произведение  $E_k G_k$  записывается со знаком «плюс», если от узла — со знаком «минус» независимо от положительных направлений токов. Если в ветви нет ЭДС, то произведение  $E_k G_k = 0$ .

2. По обобщенному закону Ома рассчитываются токи в ветвях (см. 1.1).

*Примечание:* все источники напряжения заменяются на источники ЭДС (рис. 5)

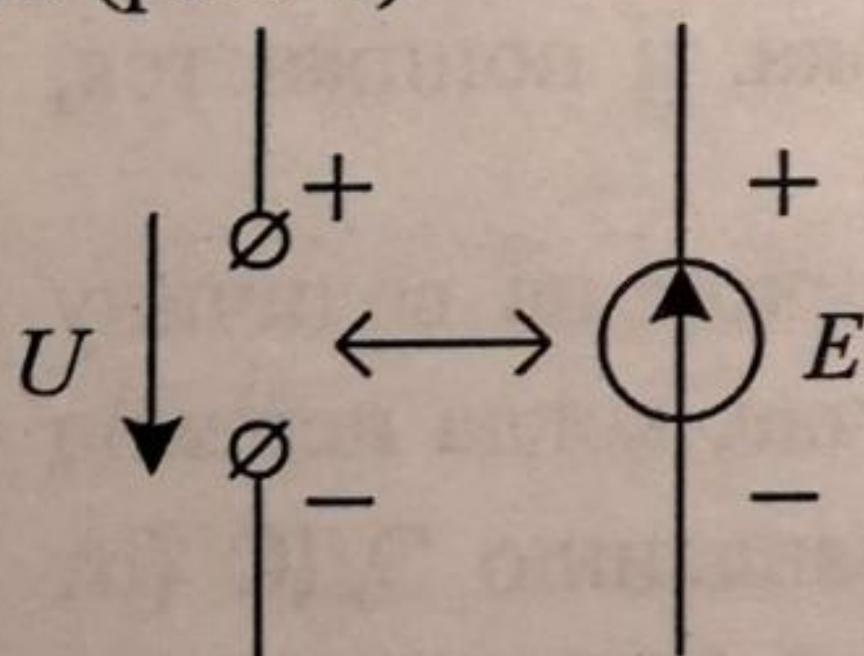


Рис. 5. Схемы взаимного перехода источников энергии

## 1.6. СОСТАВЛЕНИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ

Энергетическое состояние любой электрической цепи характеризуется балансом мощностей, который заключается в следующем: *сумма мощностей всех источников равна сумме мощностей всех приёмников и вспомогательных элементов.*

Энергетическое состояние электрической цепи с действительными направлениями токов, напряжений и э.д.с. описывается уравнением баланса мощностей:

$$\sum \vec{E} \cdot \vec{I} + \sum \vec{U} \cdot \vec{I} = \sum \vec{E} \cdot \vec{I} + \sum \vec{U} \cdot \vec{I} + \sum I^2 \cdot R$$

В левой части уравнения находятся источники энергии, в правой — её потребители (стрелками указаны совпадающие или противоположно направленные э.д.с. напряжения и токи)



## 1.7. ПОСТРОЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ

Потенциальной диаграммой называют график  $\varphi = f(R)$  изменения потенциала вдоль замкнутого контура в зависимости от сопротивления его участков. Потенциал одной из точек контура, выбираемой произвольно, принимается равным нулю.

Расчет потенциалов ведут по направлению обхода контура, которое так же выбирают произвольно. При расчете потенциалов точек контура нужно иметь в виду следующее:

1. На участке сопротивлений при переходе от одной точки к другой потенциал изменяется на величину падения напряжения на сопротивлении этого участка  $\Delta\varphi_R = \pm IR$ . Потенциал увеличивается, если обход осуществляется против направления тока, и понижается, если обход осуществляется по направлению тока.

2. На участке с ЭДС потенциал изменяется скачком на величину ЭДС  $\Delta\varphi_E = \pm E$ . Потенциал повышается в том случае, когда переход от одной точки к другой осуществляется по направлению ЭДС (от «минуса» к «плюсу»), и понижается, когда переход осуществляется против направления ЭДС.

Для построения диаграммы необходимо отложить по оси абсцисс в выбранном масштабе последовательно сопротивления отдельных участков контура по направлению обхода, начиная с исходной точки. По оси ординат в принятом масштабе откладываются значения потенциалов соответствующих точек контура. Ломанная линия  $\varphi = f(R)$ , соединяющая концы ординат, равных потенциалам соответствующих точек, представляет собой потенциальную диаграмму.



## 9. ПРИМЕР РАСЧЕТА

### Задание:

Для заданной электрической цепи постоянного тока требуется:

1. Определить токи во всех ветвях и напряжения между точками А и В.
2. Составить уравнение баланса мощностей.
3. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы.

Дано:  $R = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 120 \text{ Ом}$ ,  
 $R_5 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_7 = 150 \text{ Ом}$ ,  $R_8 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_9 = 3 \text{ Ом}$   
 $E = 45 \text{ В}$ ,  $E_1 = 170 \text{ В}$ ,  $U = 80 \text{ В}$

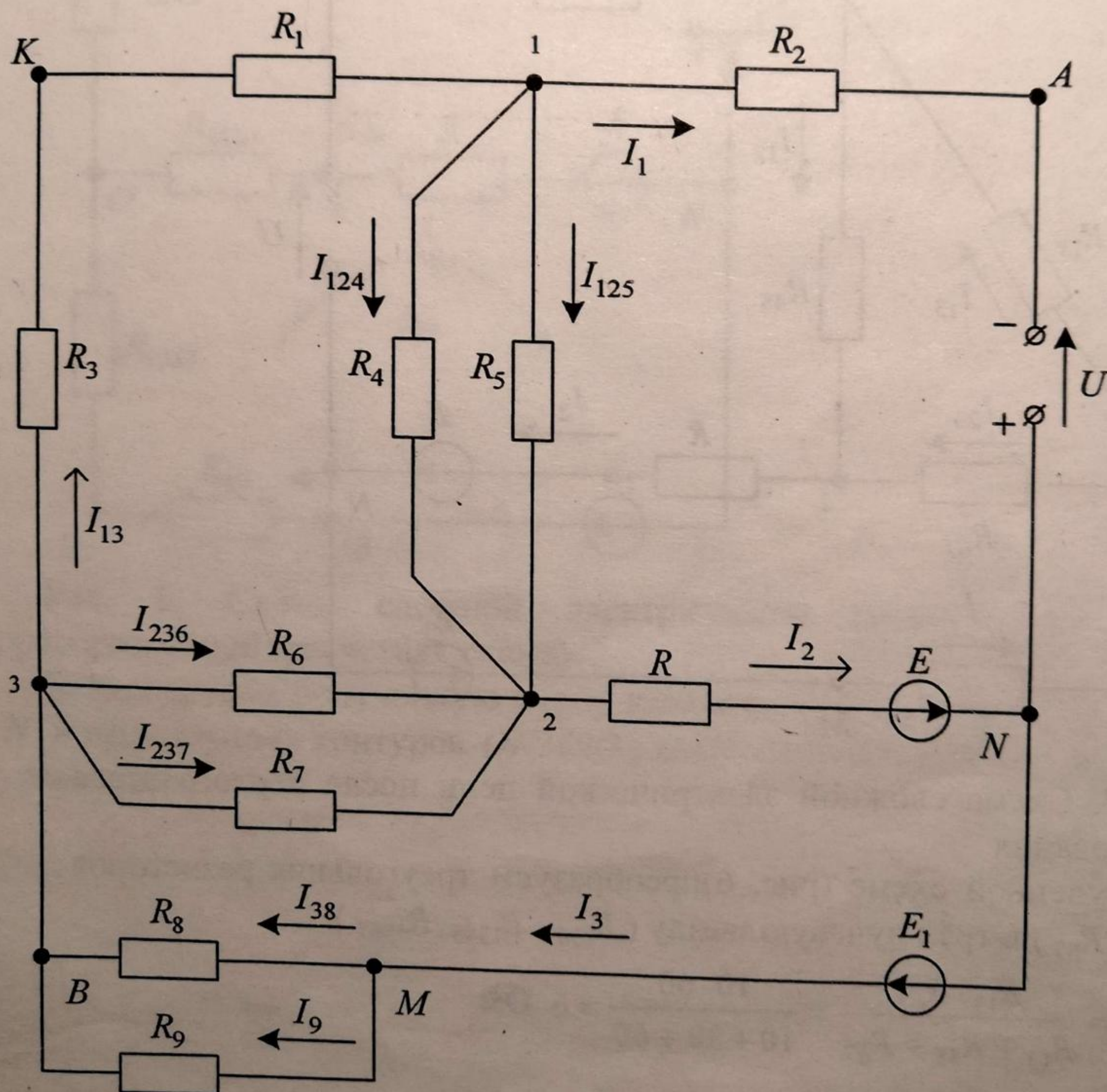


Рис. 6. Схема сложной электрической цепи



1. Преобразуем исходную электрическую цепь, заменив последовательно и параллельно соединенные резисторы на эквивалентные:

$$R_{89} = \frac{R_8 \cdot R_9}{R_8 + R_9} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = R_1 + R_3 = 6 + 4 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{120 \cdot 40}{120 + 40} = 30 \text{ Ом}$$

$$R_{67} = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} = \frac{100 \cdot 150}{100 + 150} = 60 \text{ Ом}$$

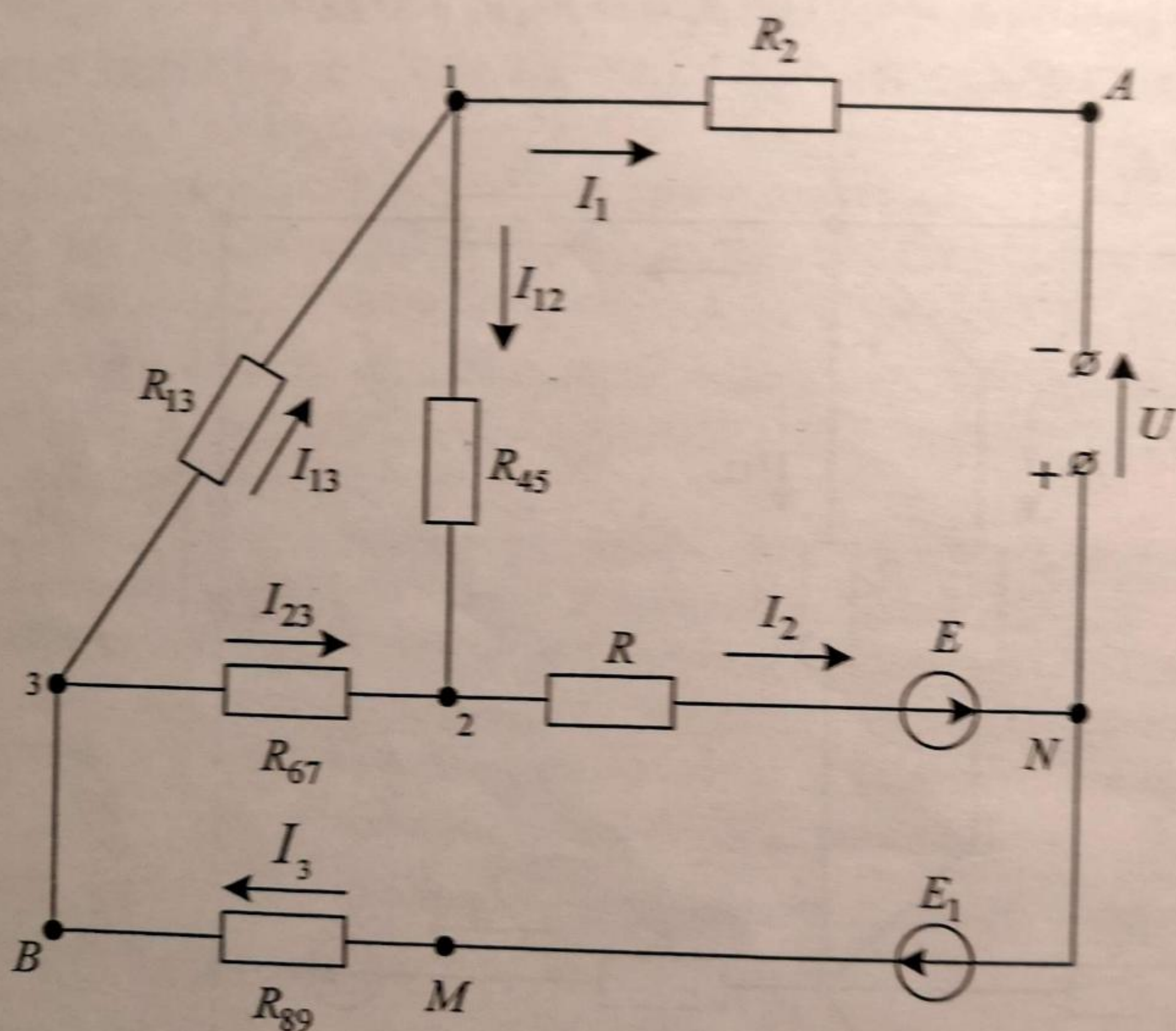


Рис. 7. Схема сложной электрической цепи после первого этапа преобразования

В полученной схеме (рис. 6) преобразуем треугольник резисторов ( $R_{13}, R_{45}, R_{67}$ ) в трёх лучевую звезду ( $R_{1367}, R_{1345}, R_{4567}$ ).

$$R_{1367} = \frac{R_{13} \cdot R_{67}}{R_{13} + R_{45} + R_{67}} = \frac{10 \cdot 60}{10 + 30 + 60} = 6 \text{ Ом}$$



$$R_{1345} = \frac{R_{13} \cdot R_{45}}{R_{13} + R_{45} + R_{67}} = \frac{10 \cdot 30}{10 + 30 + 60} = 3 \text{ Ом}$$

$$R_{4567} = \frac{R_{45} \cdot R_{67}}{R_{13} + R_{45} + R_{67}} = \frac{30 \cdot 60}{10 + 30 + 60} = 18 \text{ Ом}$$

В результате получим расчётную схему сложной электрической цепи постоянного тока (рис. 8).

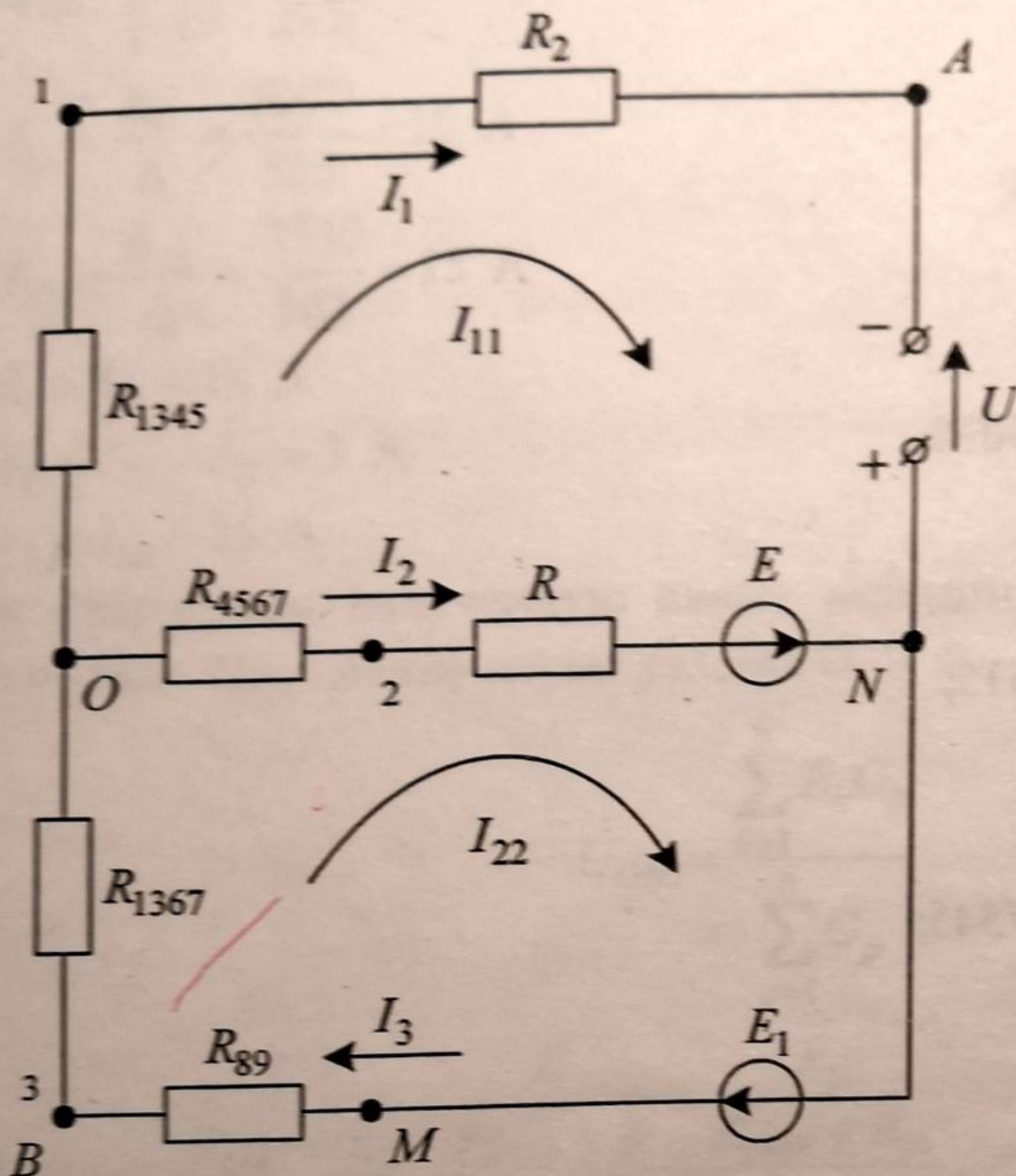


Рис. 8. Схема сложной электрической цепи после всех преобразований (расчетная схема)

2. Рассчитаем полученную схему классическим методом. Для узла  $N$  и независимых контуров  $ONMBO$ ,  $OAN$  составим систему из трех уравнений:



$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1(R_{1345} + R_2) - I_2(R_{4567} + R) - U = -E; \\ I_2(R_{4567} + R) + I_3(R_{1367} + R_{89}) = E + E_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 13I_1 - 19I_2 = 35; \\ 19I_2 + 8I_3 = 215 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 13 & -19 & 0 \\ 0 & 19 & 8 \end{vmatrix} = -503;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 35 & -19 & 0 \\ 215 & 19 & 8 \end{vmatrix} = -5030;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 13 & 35 & 0 \\ 0 & 215 & 8 \end{vmatrix} = -2515;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 13 & -19 & 35 \\ 0 & 19 & 215 \end{vmatrix} = -7545;$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-5030}{-503} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-2515}{-503} = 5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-7545}{-503} = 15 \text{ A}$$

3. Рассчитаем полученную схему методом контурных токов. Для двух контуров  $ONMBO$ ,  $OAN$  составим систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} I_{11}(R_{1345} + R_2 + R + R_{4567}) - I_{22}(R_{4567} + R) - U = -E \\ I_{22}(R_{4567} + R + R_{89} + R_{1345}) - I_{11}(R_{4567} + R) = E + E_1; \\ 32I_{11} - 19I_{22} = 35 \\ -19I_{11} + 27I_{22} = 215; \end{cases}$$



$$\Delta = \begin{vmatrix} 32 & -19 \\ -19 & 27 \end{vmatrix} = 503;$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 35 & -19 \\ 215 & 27 \end{vmatrix} = 5030;$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 32 & 35 \\ -19 & 215 \end{vmatrix} = 7545;$$

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{5030}{503} = 10 \text{ A}$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = \frac{7545}{503} = 15 \text{ A}$$

$$I_1 = I_{11} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = 5 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{22} = 15 \text{ A}$$

4. Рассчитаем полученную схему методом двух узлов. Найдем напряжение  $U_{ON}$  между двумя узлами  $O$  и  $N$ .

$$U_{ON} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k G_k}{\sum_{p=1}^n G_p}.$$

$$U_{ON} = \frac{-\frac{U}{R_{1345} + R_2} - \frac{E}{R_{4567} + R} + \frac{E_{11}}{R_{1367} + R_{89}}}{\frac{1}{R_{1345} + R_2} + \frac{1}{R_{4567} + R} + \frac{1}{R_{1367} + R_{89}}};$$

$$U_{ON} = \frac{-\frac{80}{3+10} - \frac{45}{18+1} + \frac{170}{6+2}}{\frac{1}{3+10} + \frac{1}{18+1} + \frac{1}{6+2}} = \frac{-\frac{80}{13} - \frac{45}{19} + \frac{170}{8}}{\frac{1}{13} + \frac{1}{19} + \frac{1}{8}} = 50 \text{ B}$$

Найдем токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ :

$$I_1 = \frac{U_{ON} + U}{R_{1345} + R_2} = \frac{50 + 80}{3 + 10} = \frac{130}{13} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_{ON} + E}{R_{4567} + R} = \frac{50 + 45}{18 + 1} = \frac{95}{19} = 5 \text{ A}$$



$$I_3 = \frac{E_1 - U_{ON}}{R_{1367} + R_{89}} = \frac{170 - 50}{6 + 2} = \frac{120}{8} = 15 \text{ A}$$

5. Рассмотрим контуры 0230, 0210 и 0130, замкнутые в геометрическом смысле (рис. 8) и определим напряжения  $U_{32}$ ,  $U_{12}$  и  $U_{31}$ :

$$-U_{32} + I_3 R_{1367} + I_2 R_{4567} = 0$$

$$U_{32} = I_3 R_{1367} + I_2 R_{4567} = 15 \cdot 6 + 5 \cdot 18 = 180 \text{ В}$$

$$-U_{12} + I_2 R_{4567} - I_1 R_{1345} = 0$$

$$U_{12} = I_2 R_{4567} - I_1 R_{1345} = 5 \cdot 18 - 10 \cdot 3 = 60 \text{ В}$$

$$-U_{31} + I_3 R_{1367} + I_1 R_{1345} = 0$$

$$U_{31} = I_3 R_{1367} + I_1 R_{1345} = 15 \cdot 6 + 10 \cdot 3 = 120 \text{ В}$$

6. Определим все неизвестные токи первоначальной цепи:

$$U_{32} = I_{236} R_6 = I_{237} R_7$$

$$I_{236} = \frac{U_{32}}{R_6} = \frac{180}{100} = 1,8 \text{ A}$$

$$I_{237} = \frac{U_{32}}{R_7} = \frac{180}{150} = 1,2 \text{ A}$$

$$U_{12} = I_{124} R_4 = I_{125} R_5$$

$$I_{124} = \frac{U_{12}}{R_4} = \frac{60}{120} = 0,5 \text{ A}$$

$$I_{125} = \frac{U_{12}}{R_5} = \frac{60}{40} = 1,5 \text{ A}$$

$$U_{31} = I_{13} R_{31}$$

$$I_{13} = \frac{U_{31}}{R_{31}} = \frac{120}{10} = 12 \text{ A}$$

$$U_{MB} = I_3 R_{89} = I_{38} R_8 = I_{39} R_9$$

$$I_{38} = \frac{R_{89}}{R_8} I_3 = \frac{2}{6} \cdot 15 = 5 \text{ A}$$

$$I_{39} = \frac{R_{89}}{R_9} I_3 = \frac{2}{3} \cdot 15 = 10 \text{ A}$$

7. Определим  $U_{AB}$ . Для этого запишем второй закон Кирхгофа для геометрически замкнутого контура A1K3BA:



$$U_{AB} + I_{13}(R_1 + R_3) + I_1 R_2 = 0;$$

$$U_{AB} = -I_{13}(R_1 + R_3) - I_1 R_2 = -12 \cdot 10 - 10 \cdot 10 = -220 \text{ В.}$$

8. Уравнение баланса мощностей

$$P_{\text{ИСТ}} = E_1 I_3 + E I_2 + U I_1$$

$$P_{\text{ПОТ}} = I_{13}^2(R_1 + R_3) + I_{236}^2 R_6 + I_{237}^2 R_7 + I_{124}^2 R_4 + I_{125}^2 R_5 + \\ + I_1^2 R_2 + I_2^2 R + I_{38}^2 R_8 + I_{39}^2 R_9;$$

$$P_{\text{ИСТ}} = 3575 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ПОТ}} = 3575 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ИСТ}} = P_{\text{ПОТ}} \text{ (верно)}$$

9. Построим потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы. Определим потенциалы характерных точек, приняв потенциал точки В равным нулю:

$$\varphi_B = 0 \text{ В}$$

$$\varphi_K = \varphi_B - I_{13} R_3 = 0 - 12 \cdot 4 = -48 \text{ В}$$

$$\varphi_1 = \varphi_K - I_{13} R_1 = -48 - 12 \cdot 6 = -120 \text{ В}$$

$$\varphi_A = \varphi_1 - I_1 R_2 = -120 - 10 \cdot 10 = -220 \text{ В}$$

$$\varphi_N = \varphi_A + U = -220 + 80 = -140 \text{ В}$$

$$\varphi_M = \varphi_N + E_1 = -140 + 170 = 30 \text{ В}$$

$$\varphi_B = \varphi_M - I_{39} R_9 = 30 - 10 \cdot 3 = 0 \text{ В}$$



$$U_{AB} + I_{13}(R_1 + R_3) + I_1 R_2 = 0;$$

$$U_{AB} = -I_{13}(R_1 + R_3) - I_1 R_2 = -12 \cdot 10 - 10 \cdot 10 = -220 \text{ В.}$$

8. Уравнение баланса мощностей

$$P_{\text{ИСТ}} = E_1 I_3 + E I_2 + U I_1$$

$$P_{\text{ПОТ}} = I_{13}^2(R_1 + R_3) + I_{236}^2 R_6 + I_{237}^2 R_7 + I_{124}^2 R_4 + I_{125}^2 R_5 + \\ + I_1^2 R_2 + I_2^2 R + I_{38}^2 R_8 + I_{39}^2 R_9;$$

$$P_{\text{ИСТ}} = 3575 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ПОТ}} = 3575 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ИСТ}} = P_{\text{ПОТ}} \text{ (верно)}$$

9. Построим потенциальную диаграмму для внешнего контура схемы. Определим потенциалы характерных точек, приняв потенциал точки В равным нулю:

$$\varphi_B = 0 \text{ В}$$

$$\varphi_K = \varphi_B - I_{13} R_3 = 0 - 12 \cdot 4 = -48 \text{ В}$$

$$\varphi_1 = \varphi_K - I_{13} R_1 = -48 - 12 \cdot 6 = -120 \text{ В}$$

$$\varphi_A = \varphi_1 - I_1 R_2 = -120 - 10 \cdot 10 = -220 \text{ В}$$

$$\varphi_N = \varphi_A + U = -220 + 80 = -140 \text{ В}$$

$$\varphi_M = \varphi_N + E_1 = -140 + 170 = 30 \text{ В}$$

$$\varphi_B = \varphi_M - I_{39} R_9 = 30 - 10 \cdot 3 = 0 \text{ В}$$



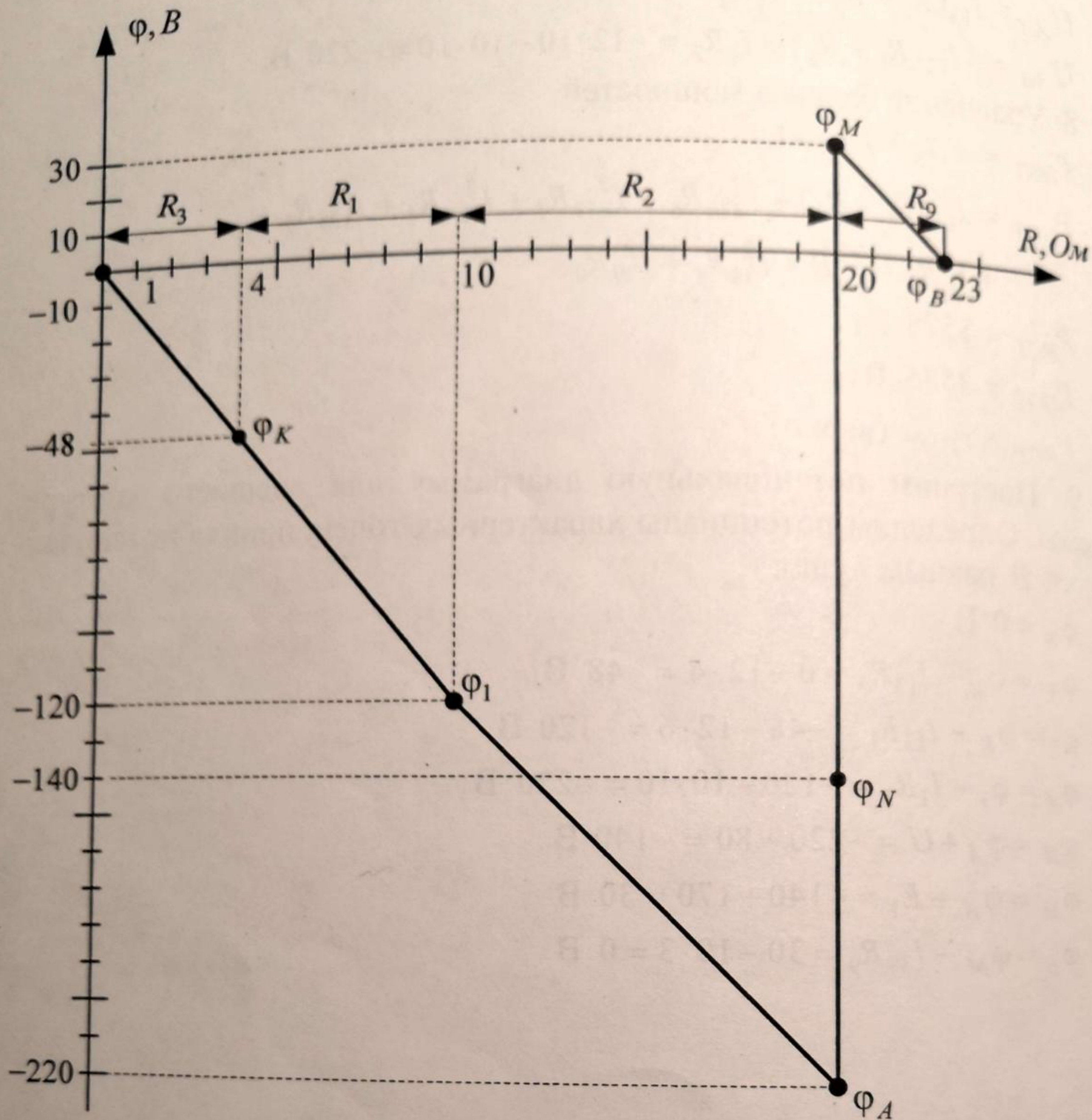


Рис. 9. Потенциальная диаграмма для внешнего контура заданной разветвлённой электрической цепи

#### Список литературы

1. Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В. Е. Шатерников Электротехника Учебное пособие для ВУЗов