

Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Цель лекции: ознакомиться с основными определениями и графоаналитическими методами расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.

1. Основные определения

В общем случае все электрические цепи являются нелинейными. Они могут считаться линейными в ограниченных диапазонах значений токов и напряжений. Например, при чрезмерно больших токах происходит значительный нагрев материала проводников, сопровождающийся резкими изменениями их сопротивлений.

В нелинейной электрической цепи сопротивления элементов зависят от величины или направления тока или напряжения. Нелинейные элементы имеют криволинейные вольтамперные характеристики ($ВАХ$), поэтому методы и принципы, основанные на пропорциональности напряжения току (закон Ома), неприменимы для расчёта нелинейных цепей. При этом вместо закона Ома необходимо пользоваться нелинейной зависимостью $U = U(I)$. Законы Кирхгофа применимы к нелинейным электрическим цепям.

Нелинейные элементы ($НЭ$) могут иметь симметричные или несимметричные $ВАХ$ относительно осей координат. Сопротивления $НЭ$ с симметричной характеристикой не зависят от направления тока, а с несимметричной характеристикой – зависят. Например, электролампы, термисторы имеют симметричные вольтамперные характеристики (рис.1), а полупроводниковые диоды – несимметричные (рис.2). Графическое изображение $НЭ$ на электрических схемах приведено на рис.3.

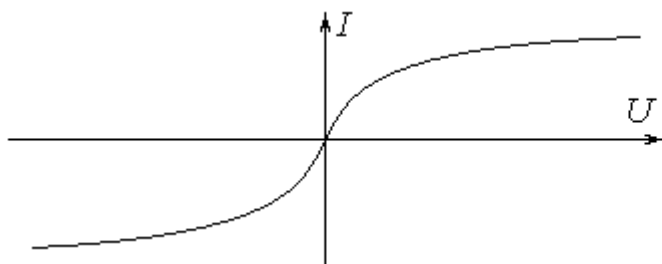


Рис.1

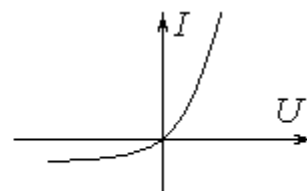


Рис.2

Статическим или интегральным сопротивлением нелинейного элемента называется отношение напряжения на элементе к величине тока. Это

сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона α между осью тока и прямой, проведенной из начала координат в точку «а» характеристики

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \frac{ac}{c0} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

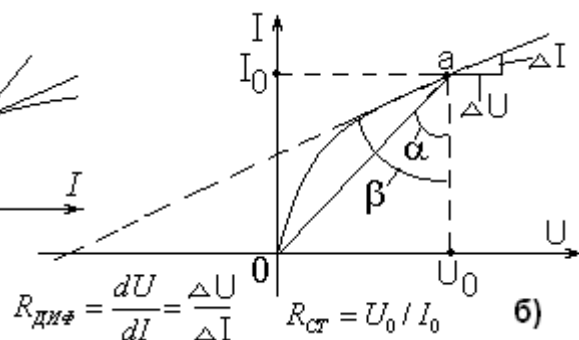
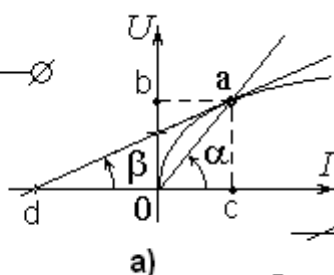
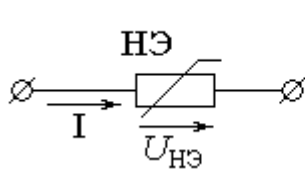


Рис.3

Рис.4

Дифференциальное или динамическое сопротивление нелинейного элемента – это величина, равная отношению бесконечно малого приращения напряжения на нелинейном сопротивлении к соответствующему приращению тока.

Это сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона β между осью тока и касательной к точке «а» характеристики (рис. 4, а))

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \frac{ac}{cd} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (2)$$

При переходе от одной точки вольтамперной характеристики к соседней статическое и динамическое сопротивления нелинейного элемента меняются.

НЭ для заданного режима в точке «а» по постоянному току можно заменить линейным резистором с величиной сопротивления, равной R_{cm} .

Эквивалентные линейные схемы замещения НЭ для заданного режима в точке «а» по переменному току, при его малых изменениях приведены на рисунке 5.5 и удовлетворяют уравнениям

$$U = E + I \cdot R_{диф}, \quad I = \frac{U}{R_{диф}} - J, \quad E = J \cdot R_{диф}. \quad (3)$$

«E» и «J» определяются точками пересечения касательной с осью напряжений и токов, соответственно (см. рис.4).

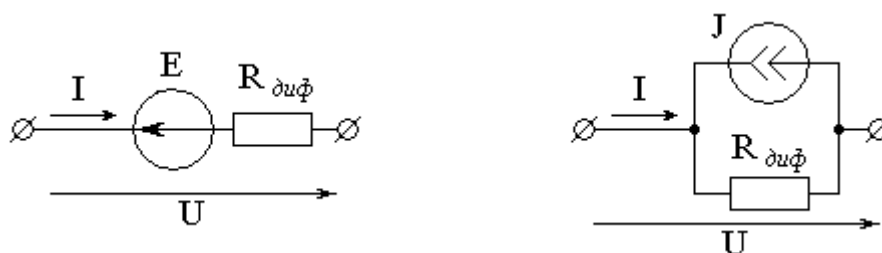


Рис.5

Статическое и динамическое сопротивления линейного элемента одинаковы и остаются постоянными, то есть не зависят от тока или напряжения.

2. Графоаналитический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока

Известные аналитические методы непригодны для расчета нелинейных электрических цепей, так как сопротивления нелинейных элементов зависят от направления и значения тока или напряжения. Применяются графоаналитические методы, основанные на применении законов Кирхгофа и использовании заданных вольтамперных характеристик ($ВАХ$) этих элементов.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух последовательно соединенных нелинейных элементов $НЭ_1$ и $НЭ_2$ (рис.6). $ВАХ$ $НЭ_1$ (кривая 1) и $ВАХ$ $НЭ_2$ (кривая 2) приведены на рис.7. К цепи подведено напряжение U , и оно равно сумме падений напряжений на $НЭ_1$ и $НЭ_2$

$$U(I) = U_{нэ1}(I) + U_{нэ2}(I). \quad (3)$$

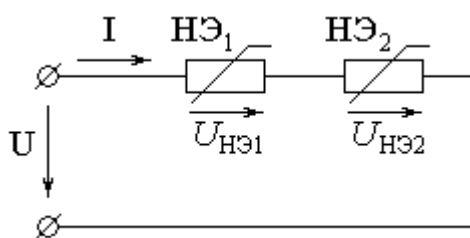


Рис.6

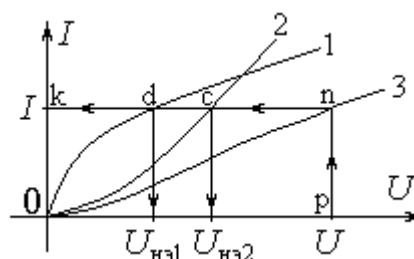


Рис.7

По всей цепи протекает одинаковый ток I , так как $НЭ_1$ и $НЭ_2$ соединены между собой последовательно. Для определения тока в электрической цепи надо построить результирующую $ВАХ$ цепи. Для построения этой характеристики следует задаться несколькими произвольными значениями тока и сум-

мировать абсциссы вольтамперных характеристик $HЭ_1$ и $HЭ_2$, соответствующие значениям напряжений на нелинейных элементах при заданных токах, согласно второму закону Кирхгофа. По полученным точкам строится $ВАХ$ всей цепи (рис. 7, кривая 3). Пользуясь результирующей $ВАХ$, можно найти искомый ток в цепи и напряжения на $HЭ_1$ и $HЭ_2$. Для этого отложим на оси абсцисс отрезок $(0p)$, соответствующий приложенному напряжению

$$0p = \frac{U}{m_u}$$

где m_u - масштаб напряжения, и проведем из точки « p » прямую, перпендикулярную оси абсцисс до пересечения с кривой 3. Получим отрезок $pr = k0$. Ток $I = k0 \cdot m_i$, где m_i - масштаб тока. Для найденного тока по кривым 1 и 2 находим напряжения на нелинейных элементах $U_{нэ1} = kd \cdot m_u$ и $U_{нэ2} = kc \cdot m_u$.

При параллельном соединении $HЭ_1$ и $HЭ_2$ (рис.8) к ним приложено одинаковое напряжение, а ток в неразветвленной части электрической цепи равен сумме токов в параллельных ветвях. Поэтому, при построении результирующей $ВАХ$ всей цепи (кривая 3), следует задаться несколькими произвольными значениями напряжения и суммировать ординаты кривых 1 и 2 (рис.9), соответствующие значениям токов в нелинейных элементах при заданном напряжении, согласно первому закону Кирхгофа. Например, для произвольного значения напряжения $U = 0p \cdot m_u$ находим ординату pn точки n результирующей $ВАХ$ (кривая 3) $pn = pd + pc$.

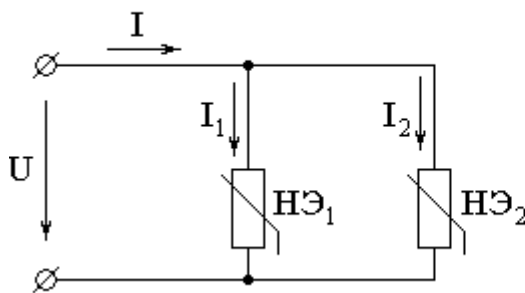


Рис.8

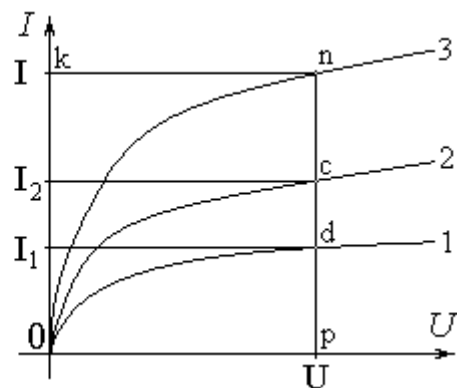


Рис.9

Пользуясь $ВАХ$, можно при любом значении приложенного напряжения U (отрезок op) найти величину общего тока I ($pn = 0k$). Это напряжение так-

же определяет значения токов I_1 и I_2 в отдельных ветвях с учетом масштаба тока m_i .

В случае смешанного соединения (рис.10) сначала заменяют два параллельно соединенных нелинейных элемента одним эквивалентным. Схема приводится к схеме с последовательно соединенными $HЭ_1$ и $HЭ_{э\text{кв}}$ (рис.11).

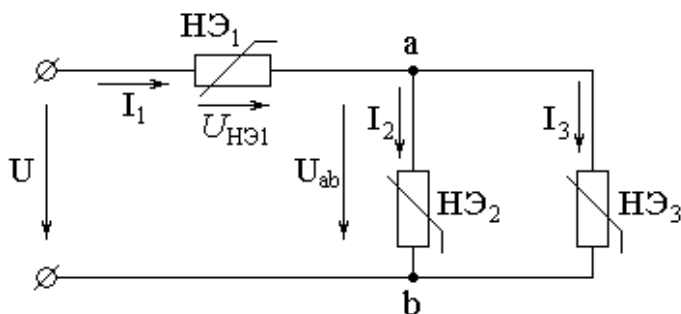


Рис.10

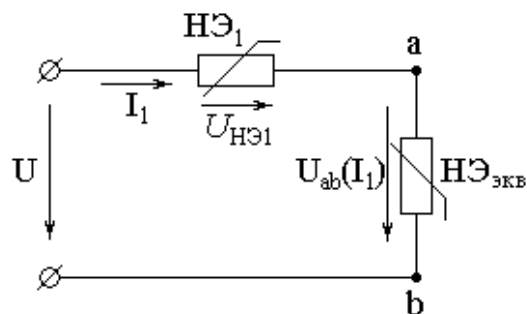


Рис.11

3. Варианты построения эквивалентной ВАХ

3.1 Рассмотрим два варианта построения эквивалентной ВАХ для участка цепи с последовательно соединенными $HЭ$ и ЭДС.

Первый вариант, когда напряжение и ток на участке цепи *совпадают по направлению*, схема и эквивалентная ВАХ приведены на рис.12. Построение эквивалентной ВАХ проводят, задаваясь произвольными значениями тока и складывая ЭДС и соответствующее току напряжение на $HЭ$ согласно уравнению, записанному по второму закону Кирхгофа $U(I) = E + U_{HЭ}(I)$. Из рисунка видно, что эквивалентная ВАХ получается смещением ВАХ $HЭ$ по оси напряжений в положительную сторону на величину ЭДС.

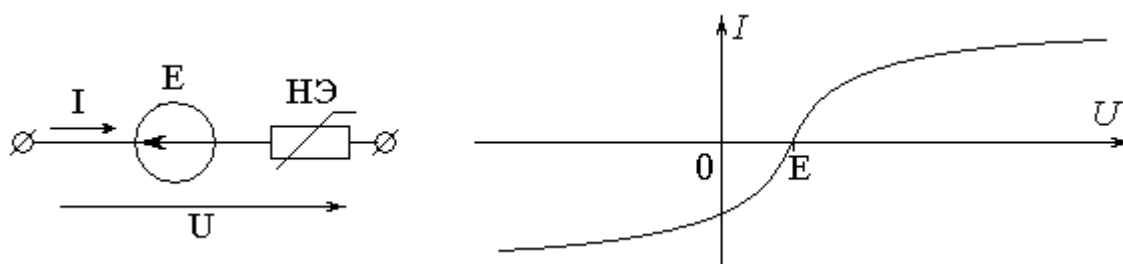


Рис.12

В случае, если ЭДС имеет противоположное направление, ВАХ НЭ смещается по оси напряжений в отрицательную сторону на величину ЭДС.

Второй вариант, когда напряжение и ток на участке цепи *не совпадают по направлению*, схема и эквивалентная ВАХ приведены на рис.13. Построение эквивалентной ВАХ проводят, задаваясь произвольными значениями тока и вычитая из ЭДС соответствующее току напряжение на НЭ согласно уравнению, записанному по второму закону Кирхгофа $U(I) = E - U_{нэ}(I)$. Из рисунка видно, что эквивалентная ВАХ получается смещением по оси напряжений в положительную сторону на величину ЭДС, зеркально отображенной относительно оси тока, ВАХ НЭ.

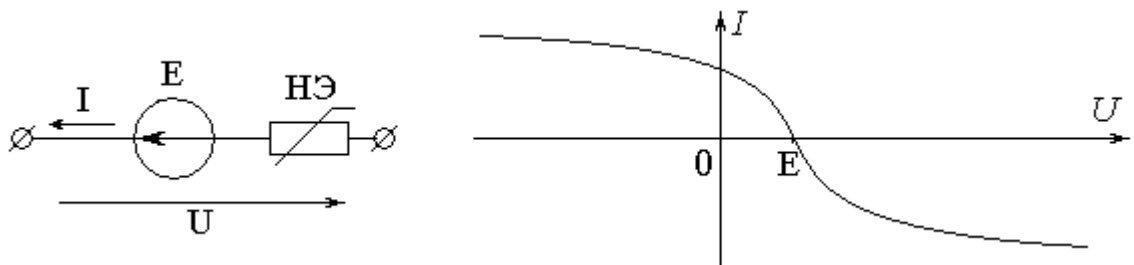


Рис.13

В случае, если ЭДС имеет противоположное направление, зеркально отображенная относительно оси тока ВАХ НЭ смещается по оси напряжений в отрицательную сторону на величину ЭДС.

3.2 Для участка цепи с параллельно соединенными НЭ и источником тока

Для участка цепи с параллельно соединенными НЭ и источником тока J , когда напряжение и ток на участке цепи *совпадают по направлению* (рис.14) эквивалентную ВАХ строят, задаваясь несколькими произвольными значениями напряжения и суммируя значения источника тока J и, соответствующие напряжению, значения тока НЭ согласно уравнению, записанному по первому закону Кирхгофа $I(U) = J + I_{нэ}(U)$.

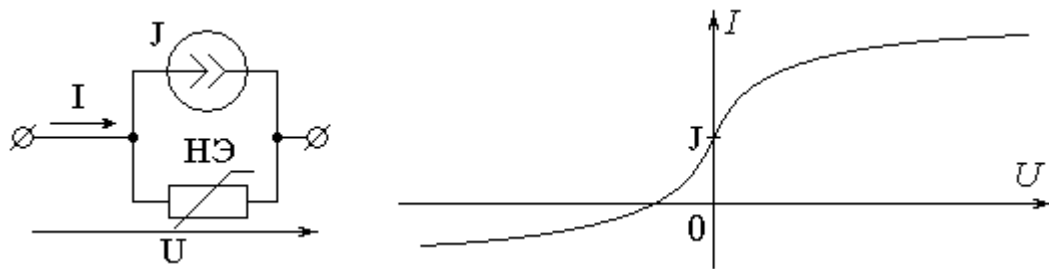


Рис.14

Для варианта, когда напряжение и ток на участке цепи *не совпадают по направлению* (рис.15), эквивалентную *ВАХ* строят, задаваясь несколькими произвольными значениями напряжения и вычитая из значения источника тока J соответствующие напряжению значения тока $HЭ$, согласно уравнению, записанному по первому закону Кирхгофа $I(U) = J - I_{HЭ}(U)$. При этом, получим зеркально отображенную относительно оси напряжений *ВАХ* $HЭ$, смещенную по оси токов в положительную сторону на величину J .

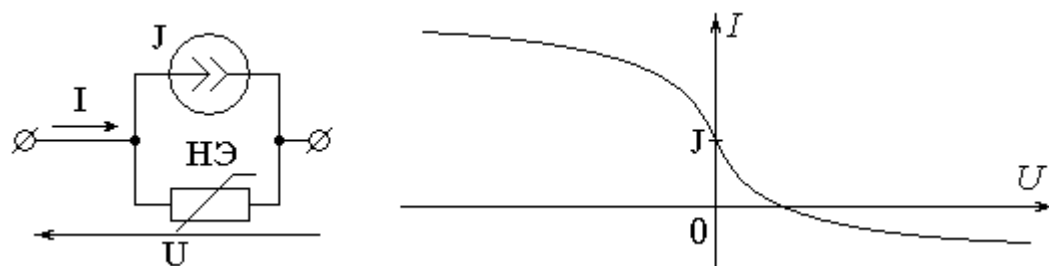


Рис. 15

4. Использование метода эквивалентного генератора

Если нелинейный резистивный элемент с известной характеристикой $I(U)$ подключен к линейному активному двухполюснику постоянного тока (рис. 16, а), то независимо от сложности линейного двухполюсника, согласно принципу эквивалентного генератора, он эквивалентен источнику с ЭДС $E_{эк} = U_{xx}$ и входным сопротивлением $R_{вх} = U_{xx}/I_{кз}$ (рис. 16,б). Между на-

пряжением U и током I нелинейного двухполюсника существует линейная зависимость: $U = E_{\text{эк}} - R_{\text{вх}} \cdot I$.

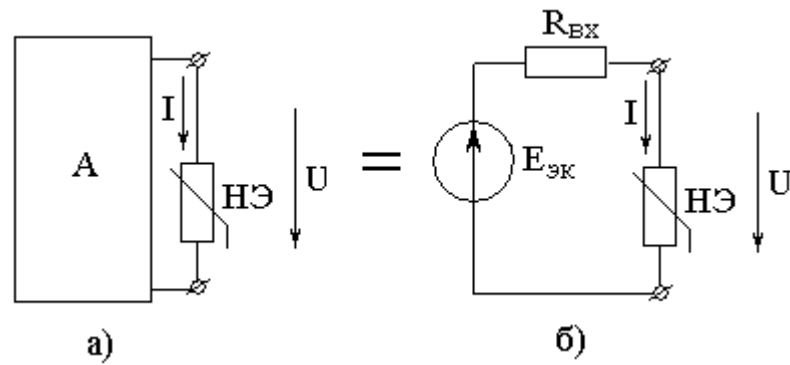


Рис. 16

Построение на одном графике характеристик линейного двухполюсника и нелинейного элемента в точке их пересечения (точка А) позволяет найти ток (I_A) и напряжение (U_A) нелинейного резистора (рис. 17).

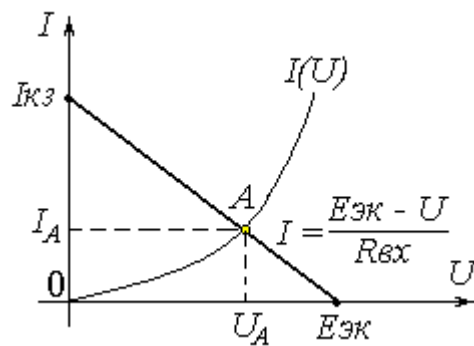


Рис. 17

5. Исследование нелинейной цепи посредством редактора Multisim v. 10.1

По конфигурации схем (рис. 18 - 21) и показаниям приборов определить какой из диодов (D1; D2) имеет более жесткую VAX ?

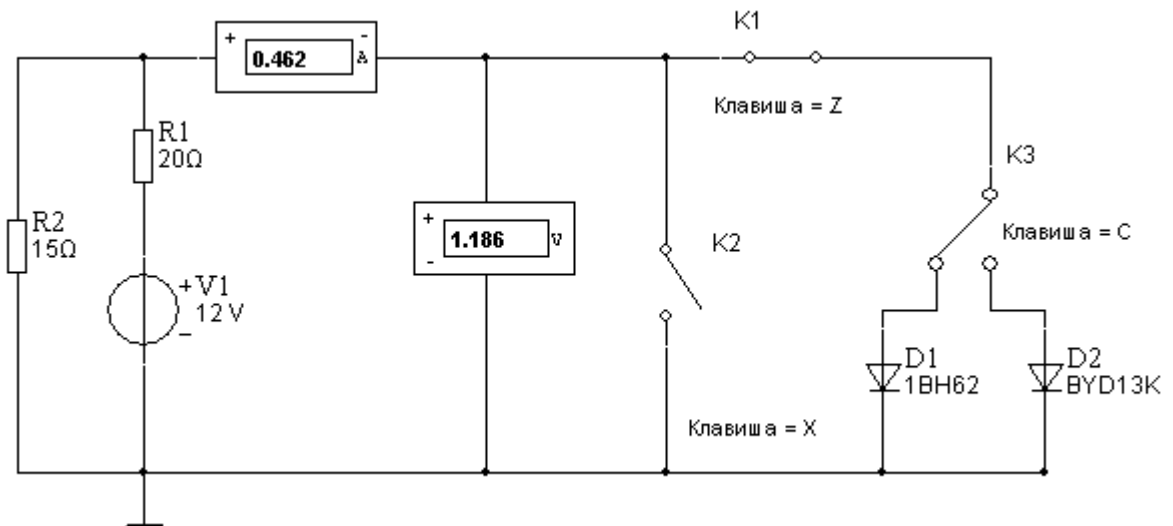


Рис. 18. Работа диода D1.

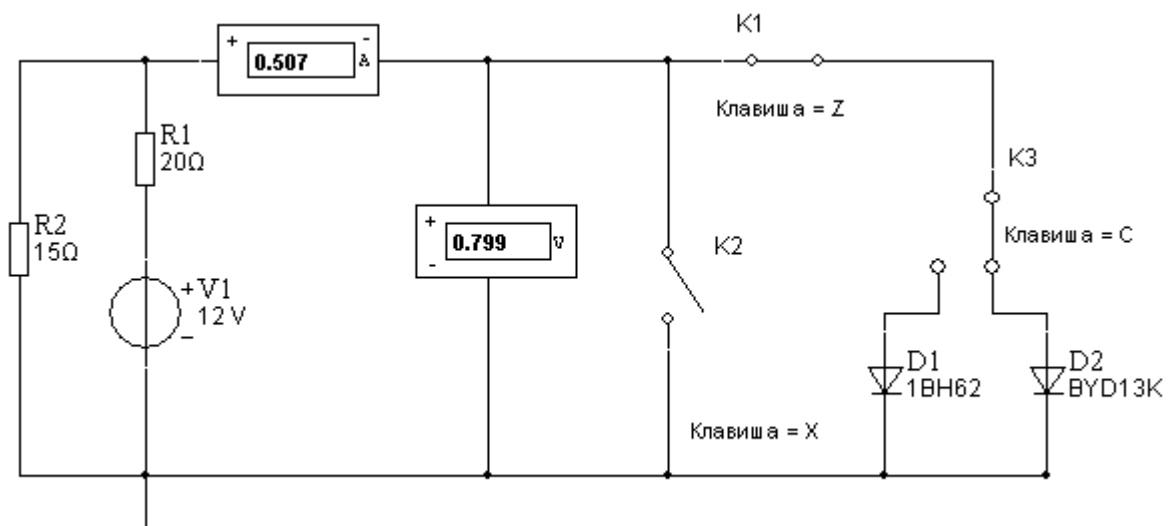


Рис. 19. Работа диода D2.

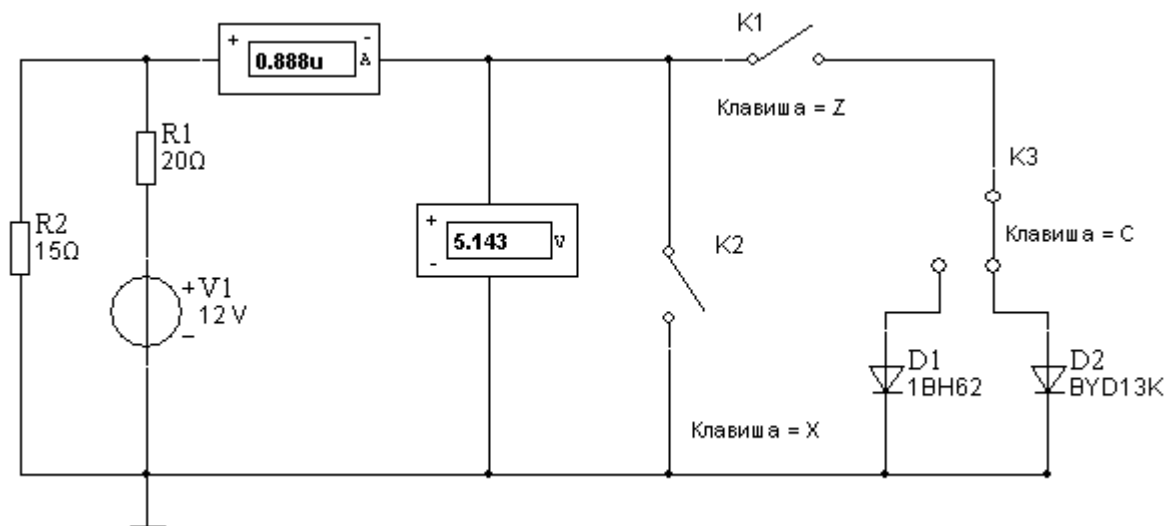


Рис. 20. Опыт холостого хода.

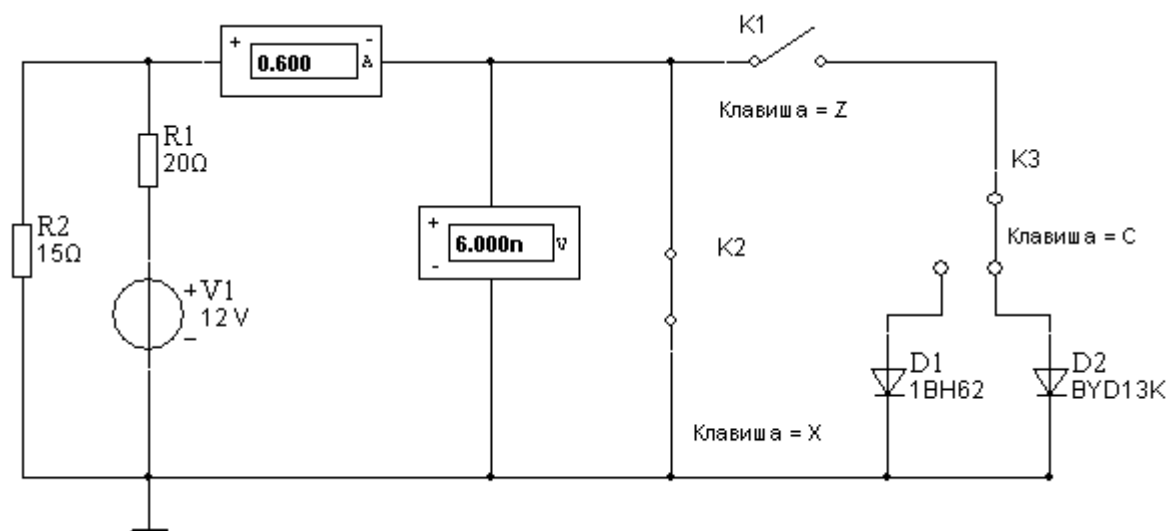


Рис. 21. Опыт короткого замыкания.