

Иманакунова Ж.С., Исакеева Э.Б.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО РЕЗИСТОРА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Zh.S. Imanakunova, E.B. Isakeeva

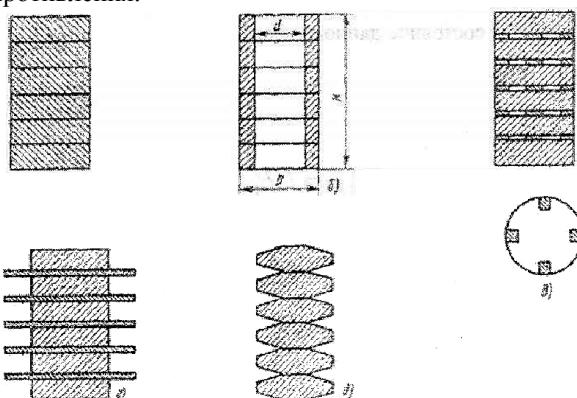
## CALCULATION OF RESISTOR PARAMUTERS OF IMPROVED CONSTRUCTION

УДК: 620.1.052.2:621.316.8

Приведен расчет сопротивления усовершенствованной конструкции силового резистора и его вольт - амперная характеристика.

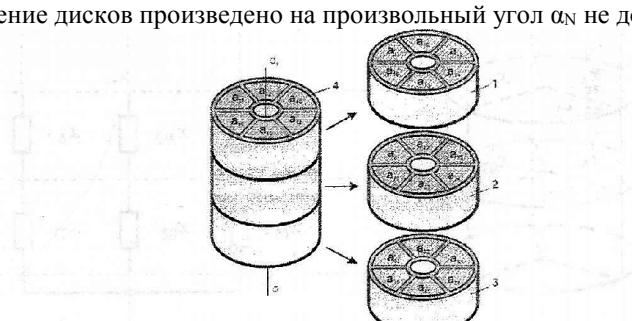
*Calkulation the resistance modernized construction of a resistor and Mustration of voltage - amper characteristic.*

Силовые резисторы находят все более широкое применение в электротехнике и электроэнергетике. Они выполняют ответственные функции защиты, управления и регулирования. Существующие силовые резисторы (СР) в силу своих конструктивных особенностей (рис. 1) [1], имеют нерегулируемые вольтамперную характеристику и величину сопротивления.



Конструкция СР (рис.2), рассмотрено в работе [2], а алгоритм управления его параметрами в работе [4], однако в этих работах не были затронуты способы их расчёта.

В данной работе предложен способ расчета вольт-амперной характеристики силового резистора (СР) и его сопротивления при определенном позиционировании (состояния) дисков каждого слоя устройства, в предположении, что вращение дисков произведено на произвольный угол  $\alpha_N$  не до полного совпадения секторов.



Конструкция устройства СР, показанная на рис.3 (а) выполнена в виде пакета из одного неподвижного диска  $Dq$  0-го слоя и  $N$  вращающихся соосных дисков  $\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$  образующих слои ;  $i = 1,2, \dots, N$

Диск  $D_i$  каждого  $i$ -го слоя, в свою очередь, разбит на  $K$  равных, изолированных друг от друга секторов (колонн), заполненных композиционными электропроводящими материалами с разными ВАХ и сопротивлениями  $R_{ij}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, \dots, K$ .

Диски, совершая позиционное вращательное движение, образуют из  $K$  своих секторов  $K$  параллельные колонны, каждая из которых состоит из

$(N+1)$  последовательно соединенных сопротивлений. Таким образом, позиционируя диски каждого  $i$  - го слоя, регулируется ВАХ и величина эквивалентного сопротивления устройства ВР, схема замещения которого показана на рис.3.6 (б), где  $X_{ij}$  - состояние ячейки СР; устройства СР, физическая сущность которого -

сопротивление. Величина  $X_{ij}$  зависит от номера положения  $n \in \{1,2,\dots, K\}$  диска  $D_i$   $i$ -го слоя, характеризующего текущее состояние данного диска.

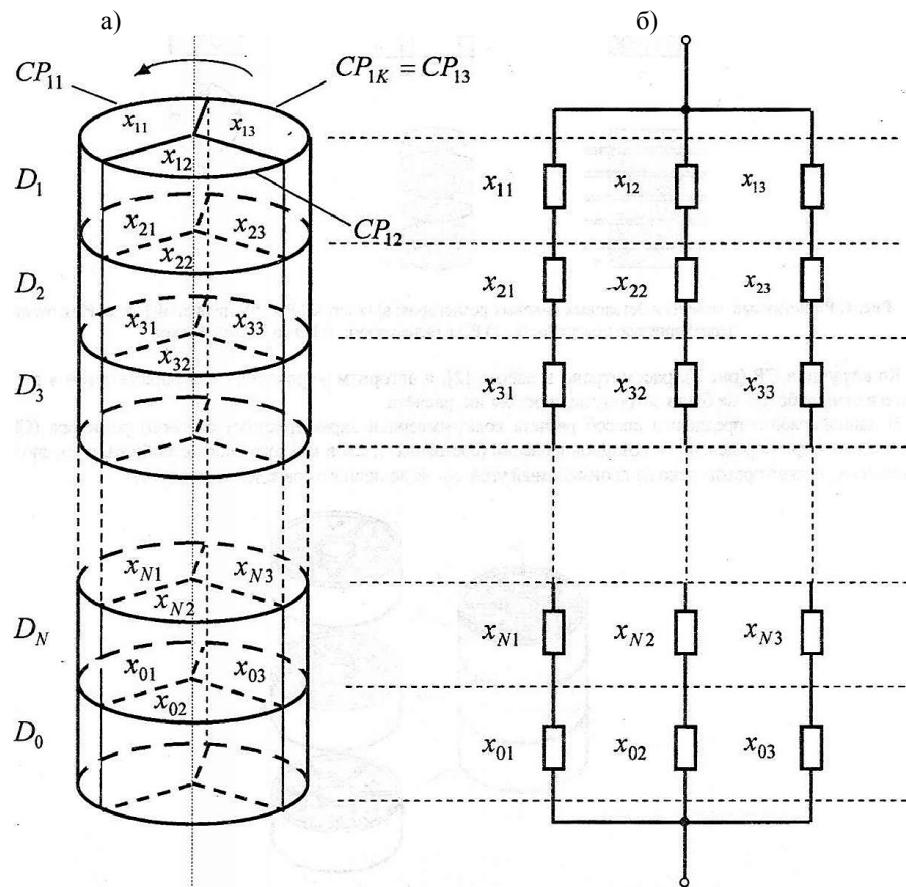
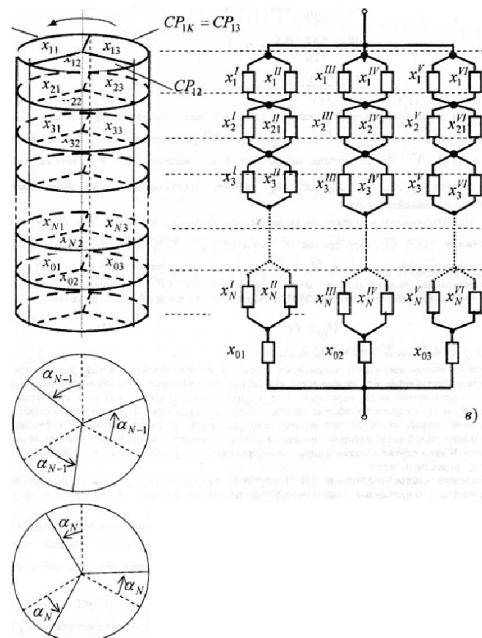


Рис. 3. Конструкция устройства ВР (а), схема замещения (б)

Рассмотрим особенности расчета  $R_s(m)$  /когда в результате управляющих воздействий диски  $D_N, D_{N-1}, \dots, D_3, D_2, D_1$  повернулись по отношению к неподвижному диску  $D_0$  соответственно на некоторые углы  $\alpha_N, \alpha_{N-1}, \dots, \alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$  (рис. 4 *а, б*) и так далее, где сектора соседних дисков не совпадают с друг другом. В этом случае схема замещения СР выглядит так, как показано на рис. 4 *в*



**Рис.4 а)** – диск  $D_n$  повернут относительно неподвижного диска  $D_0$  на угол  $D_n$ ; **б)** – диск  $D_{n-1}$  повернут относительно  $D_0$  на угол  $\alpha_{n-1}$ ; **в)** – схема замещения СР, когда диски  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  повернуты относительно неподвижного диска  $D_0$  на произвольные углы  $\{\alpha_1, \alpha^2, \dots, \alpha_n\}$

Для пояснения этой схемы замещения достаточно рассмотреть взаимное расположение дисков  $D_0$  и  $D_N$ , первый из которых неподвижен. Предположим, что после управляющего воздействия на диск  $D_N$ , он повернулся на угол  $\alpha_N < 120^\circ$ . В этом случае над секторами неподвижного диска окажутся части секторов повернутого диска  $D_N$  с величинами сопротивлений пропорционально значению угла поворота  $\alpha_N$ . Эти сопротивления соответственно равны:

$$x_N^I = \frac{x_{N1}}{120} \cdot (120 - \alpha_N); \quad x_N^{II} = \frac{x_{N2}}{120} \cdot \alpha_N;$$

$$x_N^{III} = \frac{x_{N2}}{120} \cdot (120 - \alpha_N); \quad x_N^{IV} = \frac{x_{N1}}{120} \cdot \alpha_N;$$

$$x_N^V = \frac{x_{N3}}{120} \cdot (120 - \alpha_N); \quad x_N^{VI} = \frac{x_{N2}}{120} \cdot \alpha_N;$$

При достижении углом  $\alpha_N$  значения  $120^\circ$ , как видно из вышестоящих выражений, над сектором с номером 01 неуправляемого диска  $D_0$  окажется сектор  $N3$  управляемого диска  $D_N$ , соответственно над 02 -  $N1$ , а над 03 -  $N2$ . При дальнейшем повороте диска  $D_N$  величину угла  $\alpha_N$  снова надо отсчитывать от нуля, а расчеты  $x_N^I, x_N^{II}, x_N^{III}, x_N^{IV}, x_N^V, x_N^{VI}$  надо производить по вышеприведенным формулам с учетом изменения расположения секторов.

При одновременном управлении двумя дисками, например с номерами  $N$  и  $N - 1$  по отношению к неподвижному диску  $D_0$ , надо при расчете значений  $x_{N-1}^I, x_{N-1}^{II}, x_{N-1}^{III}, x_{N-1}^{IV}, x_{N-1}^V, x_{N-1}^{VI}$  учитывать, что взаимное расположение дисков  $D_N$  и  $D_{N-1}$  определяется из разности углов  $\alpha_N - \alpha_{N-1}$ .

Определение эквивалентной ВАХ управляемого СР. Предположим, что вольтамперные характеристики нелинейных элементов (НЭ) (секторов) каждого диска СР заданы функциями

$$U_{ij} = f_i(I_j), \quad (1)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K\}$  и  $i \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$

При включении нескольких нелинейных элементов последовательно, иногда трудно (хотя и возможно) получить аналитическое или графическое выражение для напряжения на зажимах этого соединения, как функции тока и проходящего через них. В случае параллельного соединения этих элементов, определение тока как функции напряжения обычно вызывает такие же трудности. Исключение составляет соединение, содержащее только активные нелинейные сопротивления. В нашем случае НЭ каждого диска СР представляют собой чисто активные нелинейные сопротивления, соединенные по отношению друг к другу смешанно. В этом случае вольтамперную характеристику всегда можно получить графически с помощью методов, описанных ниже.

**Последовательное соединение** [3]. Построение характеристики участка цепи, который содержит последовательно соединенные нелинейные элементы, можно показать на примере двух последовательно включенных резисторов (рис. 5, а).

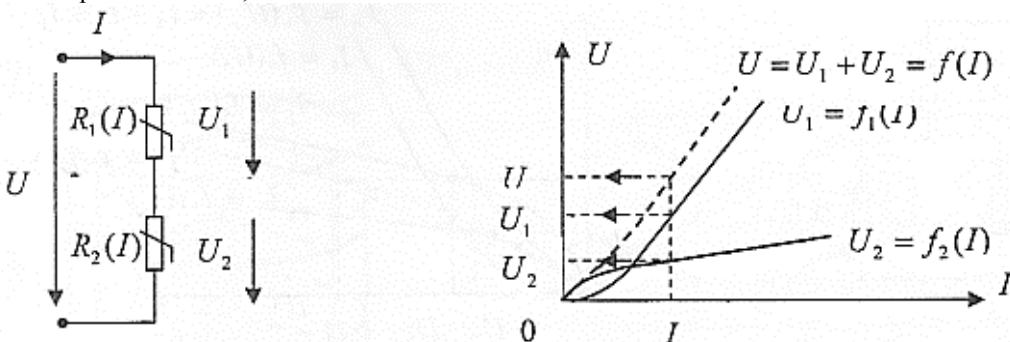
Графики вольтамперных характеристик сопротивлений этих резисторов изображены на рис. 5 б. Применяя второй закон Кирхгофа, имеем:  $U = U_1 + U_2$ ; для каждого значения тока суммируют соответствующие значения  $U_1$  и  $U_2$  каждой характеристики и получают суммарное напряжение в функции тока

$$U = U_1 + U_2 = f(I) \quad (2)$$

Таким образом, последовательное соединение двух резисторов с характеристиками  $U_1 = f_1(I_1)$  и  $U_2 = f_2(I_2)$  заменяют одним резистором с характеристикой  $U = f(I)$ . Для любого значения напряжения  $U$ , приложенного к цепи, можно определить ток  $I$  и напряжение на нелинейных элементах  $U_1$  и  $U_2$  (рис. 5 б).

Аналогично решают задачу, когда имеется несколько резисторов с нелинейными сопротивлениями, соединенными последовательно

**Параллельное соединение** [3]. Расчет цепи, состоящей из параллельно соединенных резисторов с нелинейными сопротивлениями, можно показать



а)

б)

Рис.5. Построение характеристики участка цепи последовательно соединенных нелинейных элементов

на примере параллельного соединения двух резисторов (рис. 6 а ). Их характеристики изображены на рис. 6 б .

Применяя первый закон Кирхгофа, имеем:  $I=I_1+I_2$ ; для каждого значения напряжения суммируют соответствующие значения токов  $I_1$  и  $I_2$  каждой характеристики и получают суммарное значение тока  $I$  в функции напряжения

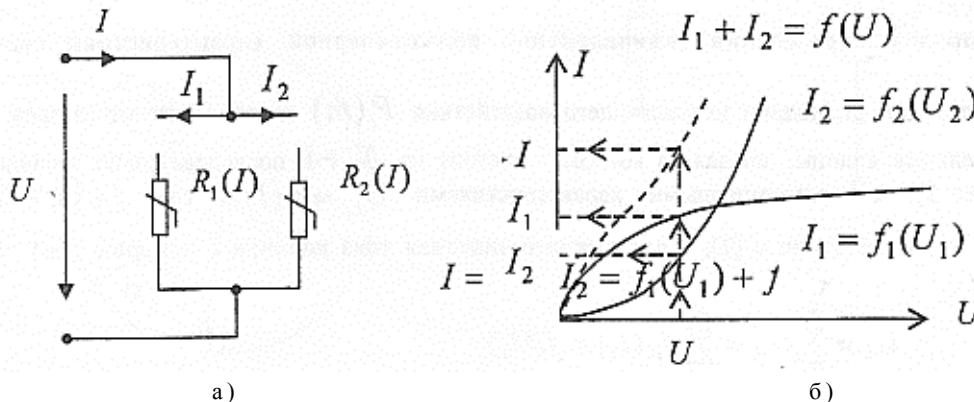


Рис.6. Построение характеристики участка цепи параллельно соединенных нелинейных элементов

т.е. параллельное соединение двух резисторов можно заменить, одним резистором, характеристика которого показана на рис. 6 б пунктирной линией. По результирующей характеристике можно для любого значения напряжения  $U$  определить искомые значения токов  $I$ ,  $I_1$  и  $I_2$ .

Аналогично может быть построена результирующая характеристика цепи и при параллельном соединении нескольких нелинейных элементов.

Смешанное соединение [3]. Смешанное соединение трех нелинейных элементов показано на рис. 7.

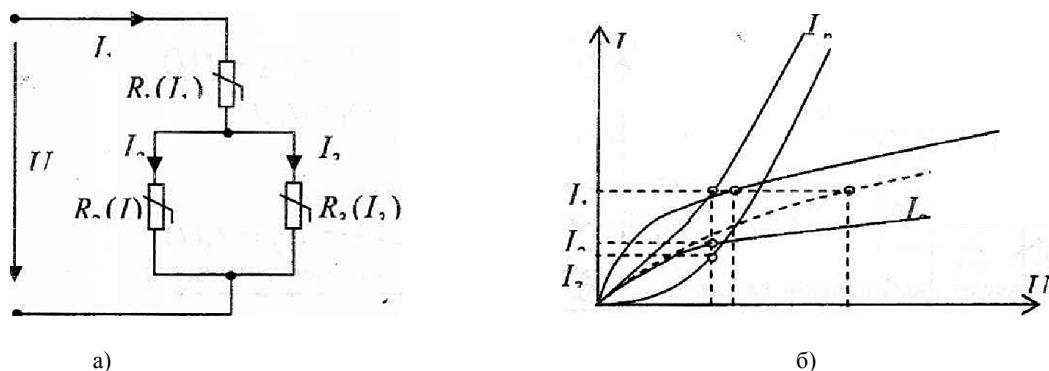


Рис.7. Построение характеристики участка цепи со смешено соединенными нелинейными элементами

о соединения резисторов. Суммируя токи  $I_2$  и  $I_3$  для определенных значений  $U_p$  получаем кривую:

$$I_p = f_p(U_p) = I_2 + I_3 = I_1$$

Затем определяем для каждого тока сумму напряжений  $U = U_p + U_1$ , и получаем кривую:  $U = f(I_1)$ , которая и представляет собой суммарную вольтамперную характеристику. На рис. 7 б показан пример графического решения смешанного соединения нелинейных элементов. По результирующей кривой и вольтамперным характеристикам отдельных элементов легко определим все неизвестные токи и напряжения. Таким образом, цепь, состоящая из смешанного соединения и может быть заменена одним эквивалентным с соответствующей ВАХ.

**Рассмотрим порядок определения эквивалентной вольтамперной характеристики силового резистора.**

В исходном состоянии до подачи управляющего воздействия  $P_i (m)$  диски образуют из трех своих секторов три параллельные колонны, каждая из которых состоит из  $N + 1$  последовательно соединенных сопротивлений (рис. 3), с вольтамперными характеристиками  $U_{ij} = f_i(I_j)$ , где  $j \in \{1, 2, 3\}$  и  $i \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$ . В соответствии с (2), для каждого значения тока колонна с номером  $j = 1$  имеет следующую ВАХ

$$U_1 = \sum_{i=0}^N U_{i1} = \sum_{i=0}^N f_{i1}(I_1) = f_1(I_1), \quad (4)$$

Соответственно, для  $j=2,3$  имеем

$$U_1 = \sum_{i=0}^N U_{i1} = \sum_{i=0}^N f_{i1}(I_1) = f_1(I_1). \quad (5)$$

$$U_3 = \sum_{i=0}^N U_{i3} = \sum_{i=0}^N f_{i3}(I_3) = f_3(I_3). \quad (6)$$

где  $I_1, I_2, I_3$  токи, протекающие в первой, второй и третьей колонне.

Так как колонны соединены между собой параллельно, то  $U_1 = U_2 = U_3 = U$  и эквивалентная ВАХ силового резистора определяется на основания (3) из следующего выражения.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = f_2^{-1}(U_1) + f_2^{-1}(U_2) + f_3^{-1}(U_3) = f(U) \quad (7)$$

Аналогично определяется ВАХ силового резистора и после подачи управляющих воздействий  $P_i$  (м), но при этом надо учитывать, что отдельные сектора меняются местами совместно с ВАХ.

В заключении отметим, что предложенный способ расчета можно использовать при управлении параметрами СР с целью оптимизации режима нейтрали распределительных сетей.

#### Литература:

1. Врублевский Л.Е., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Силовые резисторы. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 256 с.
2. Сатаркулов К.А. и др. Силовой резистор с управляемой вольтамперной характеристикой и величиной сопротивления.// Кыргызпатент. Патент №1030 от 28 февраля 2008 года.
3. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. Пер. с нем. Под ред. А.Б. Тимофеева. Изд. 2-е, перераб. И доп. М.: Энергия, 1976-496 с., с ил.
4. Иманакунова Ж.С. Труды V Международной азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем» Новосибирск 2009. 117 с.

Рецензент: к.т.н., доцент Джунуев Т.Д.