

К. т. н. О. Н. НЕГОДЕНКО, к. т. н. Е. Б. ЛУКЬЯНЕНКО,
Д. В. ЗАРУБА

Дата поступления в редакцию
23.03 — 25.08 2004 г.

Оппонент к. т. н. В. И. КОВАЛЬКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

Россия, Таганрогский государственный радиотехнический
университет
E-mail: metbis@fep.tsure.ru

АНАЛОГИ НЕГАТРОНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МОЩНОЙ ЦЕПИ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Сформулированы требования к вольт-амперным характеристикам аналогов негатронов, рассмотрены их схемы, приведены результаты экспериментальных исследований.

Для защиты цепей от перегрузки используются плавкие предохранители, биметаллические реле, таблетки из керамики и органических материалов, сопротивление которых увеличивается при увеличении тока выше допустимого. Плавкие предохранители требуют восстановления. Биметаллические реле имеют разрывной контакт, обесточивающий цепь, они, как и таблетки, самовосстанавливающиеся. Однако быстродействие этих видов предохранителей низкое.

Высоким быстродействием и самовосстановлением обладают электронные предохранители. Последние могут быть построены на основе интегральных микросхем компараторов и операционных усилителей. Их принцип действия основан на том, что при увеличении тока возросшее напряжение на эталонном резисторе запускает компаратор, запирающий ключевой транзистор, включаемый последовательно с нагрузкой. Другой вариант электронного предохранителя основан на использовании устройства с N-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ); такой предохранитель назван дефензором [1]. Устройства с ВАХ N-типа могут быть получены за счет создания положительной обратной связи по напряжению с использованием физических эффектов (туннельный диод, N-триод) или схемотехнически.

Если первые устройства получили название негатронов, то вторые относятся к аналогам негатронов, которые могут быть реализованы как на биполярных, так и на полевых транзисторах [2, с. 27—29, 58, 165]. В [1] рассмотрен дефензор на основе негатрона, представляющего собой биполярный транзистор со встроенным в него тиристором. Предусмотрена возможность управления ВАХ негатрона, но ее недостаточно для деформирования ВАХ в нужном направлении.

Поскольку именно аналог негатрона позволяет деформировать ВАХ схемотехнически, то исследование возможности использования его в дефензорах представляется актуальной задачей. Целью работы и явилось формулирование требований к ВАХ аналогов негатронов, используемых в дефензорах, а так-

же изучение возможности экспериментального получения таких ВАХ, которые наиболее полно отвечают предъявляемым требованиям.

На рис. 1 показана N-образная ВАХ аналога негатрона и ВАХ сопротивления нагрузки R_n , а на рис. 2 — способ включения дефензора для случая, когда через нагрузку течет постоянный ток. Сопротивление R_n должно быть таким, чтобы его ВАХ пересекала ВАХ аналога негатрона в точке *a*, расположенной на участке *OA*, и в точке *б*, расположенной на

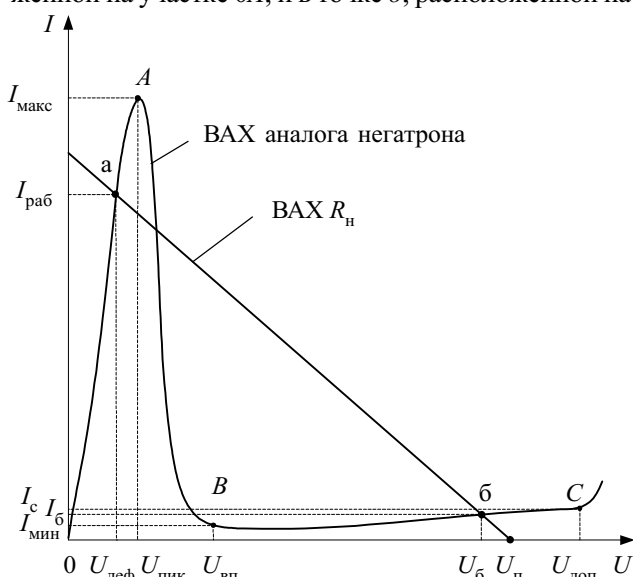


Рис. 1

участке *BC*. При закорачивании нагрузки рабочая точка перескакивает из точки *a* с большим током в точку *б* с малым током. В этом суть работы дефензора.

По конкретной ВАХ аналога негатрона можно определить диапазон изменения напряжения питания и рабочие токи, а также минимально и максимально возможные значения сопротивления нагрузки при заданном напряжении питания. До срабатывания дефензора напряжение на нем меньше $U_{пик}$, величина $U_{вп}$ ограничивает напряжение питания снизу. Чем ниже $U_{вп}$ и больше $U_{доп}$, тем больше диапазон изменения напряжения питания.

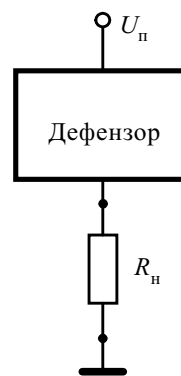


Рис. 2

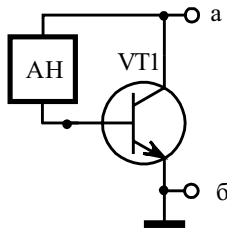


Рис. 3

К ВАХ аналога негatronа, используемого в качестве дефензора, предъявляются специфические требования:

- максимальными должны быть коэффициент уменьшения тока при закорачивании нагрузки, $K=I_{\text{раб}}/I_{\text{б}}$, напряжение $U_{\text{доп}}$;
- минимальными должны быть напряжения $U_{\text{пик}}$, $U_{\text{вп}}$, токи $I_{\text{мин}}$, $I_{\text{с}}$, время переключения дефензора $t_{\text{пер}}$.

Большинство лабораторных источников питания, не имеющих элементов защиты от последствий закорачивания нагрузки, имеют рабочие токи 0,5...2 А, напряжение питания — 5...30 В (мощность до 60 Вт), т. е. это достаточно мощные устройства. Есть потребность в дефензорах на токи до 10 А и напряжения — до 400 В.

Мощные аналоги негatronов могут быть получены следующими путями:

- использованием мощных транзисторов в известных схемах;
- включением маломощного аналога негatronа (АН) или его основного транзистора в цепь базы мощного биполярного транзистора VT1 непосредственно (рис. 3) или через токовый отражатель (рис. 4).

При использовании биполярных транзисторов в аналогах негatronов N-образная ВАХ может быть получена за счет уменьшения тока базы основного транзистора при увеличении напряжения или за счет отвлечения тока базы в дополнительную цепь. Схемы аналогов негatronов с уменьшением тока базы основного транзистора VT1 за счет запираания полевых транзисторов с ростом напряжения $U_{\text{аб}}$ показаны на рис. 5. В схеме рис. 5, а с увеличением напряжения $U_{\text{аб}}$ увеличивается падение напряжения на резисторе R1, запирается полевой транзистор VT2 и за счет этого уменьшается ток базы транзистора VT1. ВАХ можно деформировать выбором номиналов резисторов R1 и R2. В схеме рис. 5, б в цепь базы основного транзистора VT1 включен λ -диод, состоящий из двух ком-

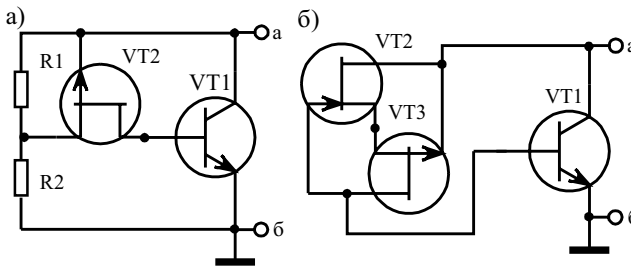


Рис. 5

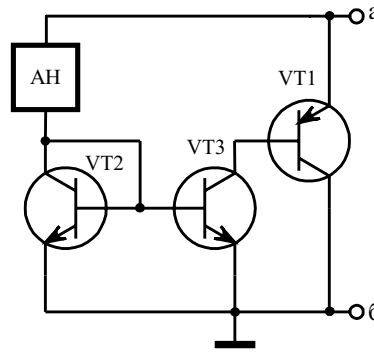


Рис. 4

плементарных транзисторов VT2 и VT3. Здесь отсутствуют элементы, позволяющие деформировать ВАХ аналога негatronа.

Схемы аналогов негatronов с ответвлением тока базы основного транзистора VT1 в дополнительную цепь показаны на рис. 6. В схеме рис. 6, а дополнительная цепь — это транзистор VT2 с соответствующими резисторами. При определенном напряжении $U_{\text{аб}}$ ток, протекающий через резистор R1 в базу транзистора VT1, начинает ответвляться в транзистор VT2. Желательно, чтобы транзистор VT2 работал в ключевом режиме, тогда будет наблюдаться резкий спад тока на участке AB ВАХ аналога негatronа. В схеме рис. 6, б используется токовый отражатель на транзисторах VT3 и VT4. Источник тока на полевом транзисторе VT2 питает цепь базы основного транзистора VT1. С ростом $U_{\text{аб}}$ при определенной его величине ток базы основного транзистора VT1 начинает уменьшаться из-за отвлечения части тока источника тока в цепь транзистора VT3. Здесь также желательно, чтобы транзисторы VT3 и VT4 работали в ключевом режиме.

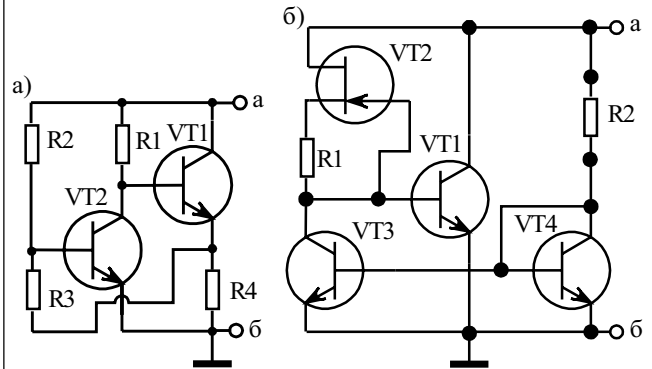


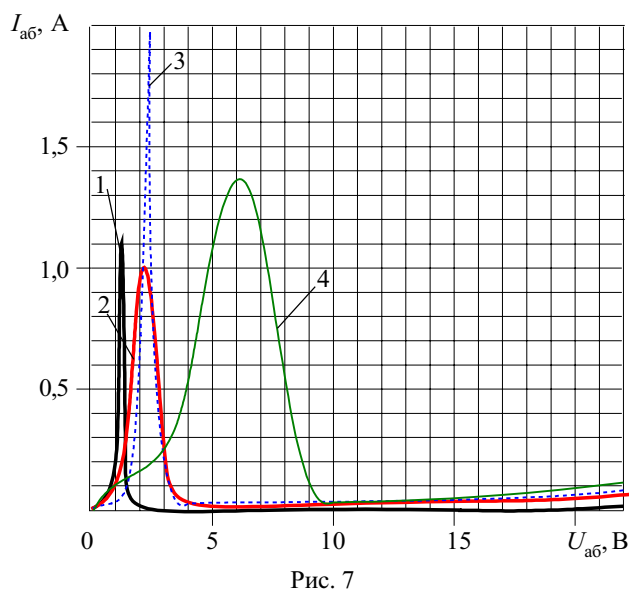
Рис. 6

Свойства приведенных на рис. 5 и 6 аналогов негatronов и формулы для эквивалентного отрицательного дифференциального сопротивления при работе упомянутых выше транзисторов VT2 (рис. 6, а) и VT3, VT4 (рис. 6, б) в линейном режиме приведены в [3, с. 53, 57, 62, 162]. При работе этих транзисторов в ключевом режиме отрицательное сопротивление на участке AB получается меньшим, чем рассчитанное.

Ниже приводятся результаты натурных экспериментов с использованием маломощных и мощных транзисторов. Приводятся такие ВАХ аналогов негatronов, которые в определенной мере удовлетворяют сформулированным требованиям.

На рис. 7 (кривая 1) приведена ВАХ мощного аналога негatronа, реализованного по схеме рис. 6, б с использованием в качестве основного транзистора VT1 — КТ829, VT3, VT4 — КТ315, R1=8,2 кОм, R2=2 кОм, полевой транзистор VT2 отсутствует, на резистор R1 подано управляющее напряжение $U_{\text{у}}=3$ В. Здесь $U_{\text{пик}}=1$ В, мала величина $I_{\text{мин}}$ (единицы мА).

Если в схеме рис. 6, б все биполярные транзисторы — КТ3102, полевой транзистор — КП303В, R1=10 кОм, R2=39 кОм, то после включения этого аналога негatronа в цепь базы мощного транзистора КТ802 (рис. 3) получим ВАХ, показанную кривой 2 рис. 7, а после включения его по схеме рис. 4

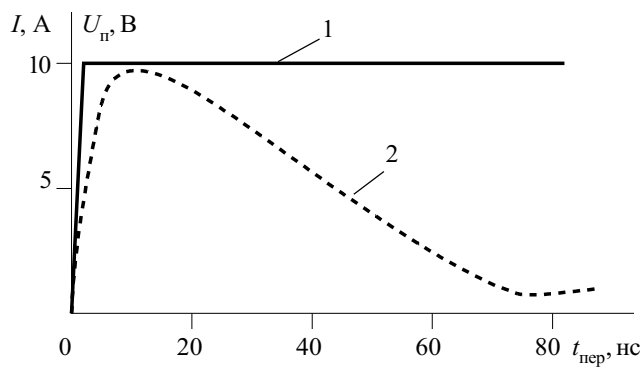


с использованием мощного транзистора КТ818Г получим ВАХ, показанную кривой 3 рис. 7. Как видно, в этом случае $I_{мин}$ большой (40 мА).

При включении маломощного аналога негatronа рис. 5, а (VT1 — КТ315, VT2 — КП103, R1=4,3 кОм, R2=5,1 кОм) по схеме рис. 3 и использовании мощного транзистора КТ819 получим ВАХ, показанную кривой 4 рис. 7. Как видно, здесь $U_{вп}$ высокое (10 В), велико также и $U_{пик}$ (6 В).

Включение λ -диода на транзисторах КП103В и КП303М в цепь базы мощного биполярного транзистора КТ829 (схема рис. 3) позволяет получить ВАХ аналога негatronа с $I_{макс}=3$ А, $U_{пик}=4$ В, $U_{вп}=5$ В, $I_{мин}=0$. Включение λ -диода по схеме рис. 4 (VT2, VT3 — КТ315, VT1 — КТ818) позволяет получить ВАХ с $I_{макс}=0,2$ А, $U_{пик}=2,5$ В, $U_{вп}=7$ В, $I_{мин}=0$.

Использование программы PSPICE позволяет определить время переключения дефензора. На рис. 8 кривая 1 — это осциллограмма скачка напряжения питания, а кривая 2 — это осциллограмма тока через мощный аналог негatronа (использовалась схема рис. 6, а при R4=100 Ом, R1=R3=10 кОм, R2=50 кОм, включенная по схеме рис. 3 с применением мощного транзистора КТ819, Rн=1 Ом). Видно, что время переключения дефензора $t_{пер}=80$ нс. При увеличении сопротивления нагрузки Rн до 100 Ом время переключения увеличивается до 500 нс. Для других схем вре-



мя переключения имеет близкие величины (не превышает 1 мкс), что подтверждает достаточно высокое быстродействие дефензоров на аналогах негatronов.

Если нагрузка питается переменным током (например двигатель), то дефензор включается по схеме, приведенной на рис. 9. Диоды искажают синусоиду незначительно. Емкость C1 должна быть такой, чтобы ее сопротивление на заданной частоте хотя бы на порядок было больше сопротивления нагрузки. Когда нагрузка не закорочена, основной ток течет через дефензор. При закорачивании нагрузки основной ток течет через конденсатор C1.

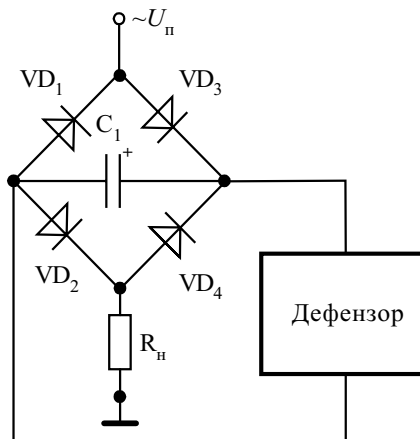


Рис. 9

В эксперименте была использована схема рис. 6, б (R1=220 Ом, R2=2 кОм, VT1 — КТ828, VT2 — КП303В, VT3, VT4 — КТ315). ВАХ аналога негatronа имела вид, показанный на рис. 7 (кривая 3), но с меньшим $I_{мин}$ (при U=6 В $I_{мин}=5$ мА, при U=70 В $I_{мин}=45$ мА). Использовались диоды Д242, емкость C1=10 мкФ, Rн=20 Ом. При переменном напряжении $Uп=47$ В через дефензор протекает постоянный ток 1 А, при закорачивании нагрузки ток через дефензор уменьшается до 35 мА.

Недостатком описанных устройств является то, что после срабатывания дефензора нужно уменьшать напряжение питания до нуля и после устранения закорачивания вновь его устанавливать.

Таким образом, сформулированы требования к ВАХ аналогов негatronов, используемых в дефензорах, показаны пути получения мощных аналогов негatronов с N-образной ВАХ, исследованы возможности деформирования их ВАХ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Смолянский Р. Е., Смолянский В. А. Кремниевые биполярные тетроды — дефензоры // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 2000—2001.— Вып. 1(154)—1(155).— С. 7—15.
2. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негatronика.— Новосибирск: Наука, 1995.
3. Негоденко О. Н., Румянцев К. Е., Зинченко Л. А., Липко С. И. Схемотехника, моделирование и применение транзисторных устройств с отрицательным сопротивлением.— Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002.