

Механизмы принятия решения о срабатывании ДВ

По механизму принятия решения о срабатывании ДВ все случаи реализаций ДВ можно разделить на три основных:

1. принятие решения о срабатывании ДВ на основании анализа величины входного напряжения - самый распространенный вариант ДВ. Реализации: компараторные, на логических элементах, тиристорах, оптронах, АЦП с цифровым анализом (по сути, так же компараторные)
2. принятие решения о срабатывании ДВ на основании анализа входного тока ДВ. Разновидность первой группы, только анализируемой величиной является входной ток ДВ. Современные реализации на основе подходов, используемых в защитах и счетчиках энеергии - можно брать готовые схемы, меняется только математика обработки измеряемых величин (токов). В основном шунтовые схемы.
3. принятие решения о срабатывании ДВ на основании анализа входных величин напряжения и тока. Чаще так "просто получается" - безосознательные реализации входных цепей ДВ на базе управляемых генераторов тока - распространенное у импортных компаний решение.

Исходные данные:

$V_{in} := 0..250$	диапазон входных напряжений ДВ, В	
$I_{in} := 0..30$	диапазон входных токов ДВ, мА	
$U_{por} := 160$	последнее требование ФСК по напряжению срабатывания ДВ, В	
$dU_{por} := 10$	диапазон входных напряжений ДВ, в котором нормируется величина остаточного тока, В	
	еще недавно это было: 160-170 В при величине остаточного тока 25 мА	
$I_{ost} := 20..30$	величина остаточного тока ДВ, мА	$I_{ost} := 25$
$R_{dv1} := 8000$	величина входного сопротивления ДВ для обеспечения старых требований по остаточному току ДВ в диапазоне входных напряжений 160 ... 240 В, Ом	
$I_{fsk} := 4..6$	последнее по величине остаточного тока ДВ требование ФСК, мА	$I_{fsk} := 5$
$R_{fsk} := 40000$	величина входного сопротивления ДВ для обеспечения требования ФСК по остаточному току ДВ в диапазоне входных напряжений 160 ... 240 В, Ом	
$R_{hi} := 1000000$	к сожалению, входное сопротивление ДВ у многих реализаций ДВ за пределами нормируемых входных напряжений и токов, Ом	

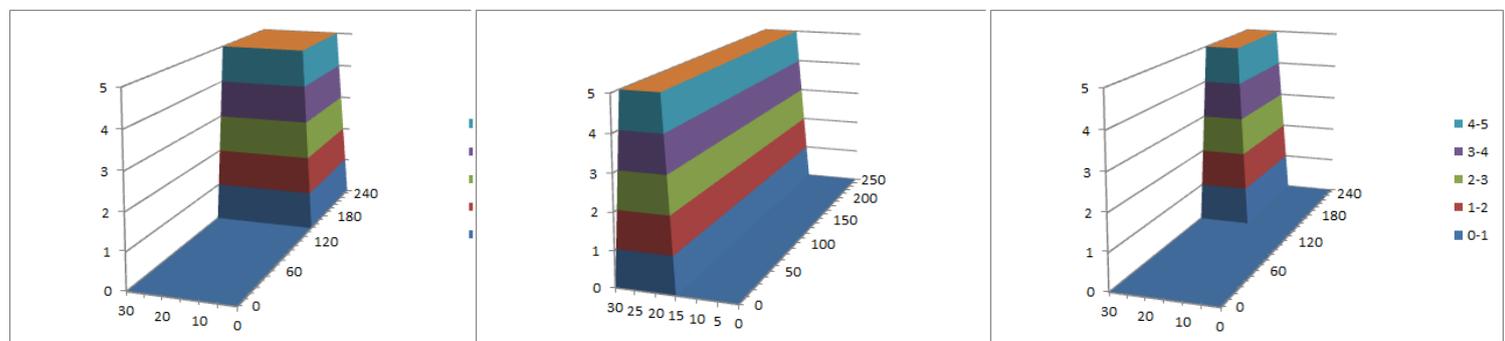
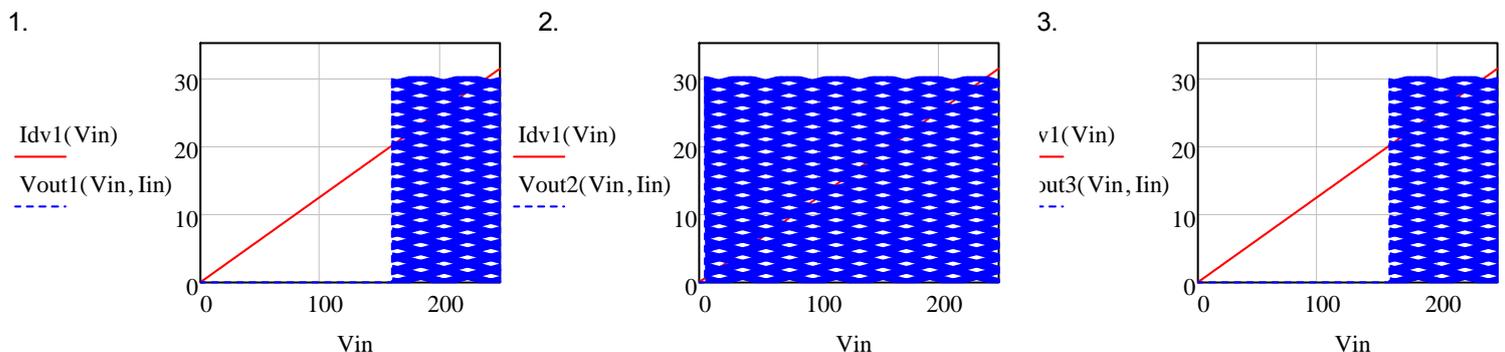
Механизмы:

Ниже приведены рабочие характеристики ДВ для каждого механизма принятия решения.

1. $V_{out1}(V_{in}, I_{in}) := \text{if}(V_{in} \geq U_{por} \wedge I_{in} \geq 5, 30, 0)$
2. $V_{out2}(V_{in}, I_{in}) := \text{if}(V_{in} \geq 5 \wedge I_{in} \geq 15, 30, 0)$
3. $V_{out3}(V_{in}, I_{in}) := \text{if}(V_{in} \geq U_{por} \wedge I_{in} \geq 15, 30, 0)$

Поскольку сейчас это совершенно неважно, будем считать входные токи одинаковыми

$$I_{dv1}(V_{in}) := \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{dv1}}$$

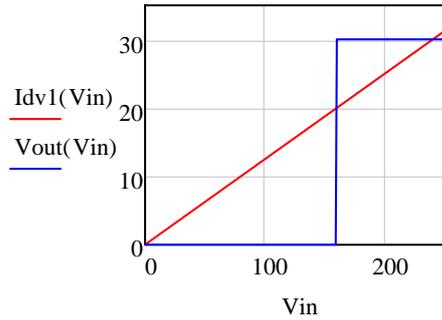


Очевидным достоинством третьей реализации ДВ является то, что для срабатывания ДВ необходимо выполнение двух условий: и входное напряжение, и входной ток должны превышать пороговые значения, за счет чего повышается устойчивость ДВ к различным мешающим и случайным сигналам, и сигналам помех. Поскольку рабочие характеристики таких ДВ нелинейны, то, например, при выполнении условия по напряжению срабатывания, условие срабатывания по току может не выполняться, и решение о срабатывании ДВ в целом не будет принято.

Рабочие характеристики ДВ

$$V_{out}(V_{in}) := \text{if}(V_{in} \geq U_{por}, 30, 0)$$

$$I_{dv1}(V_{in}) := \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{dv1}}$$



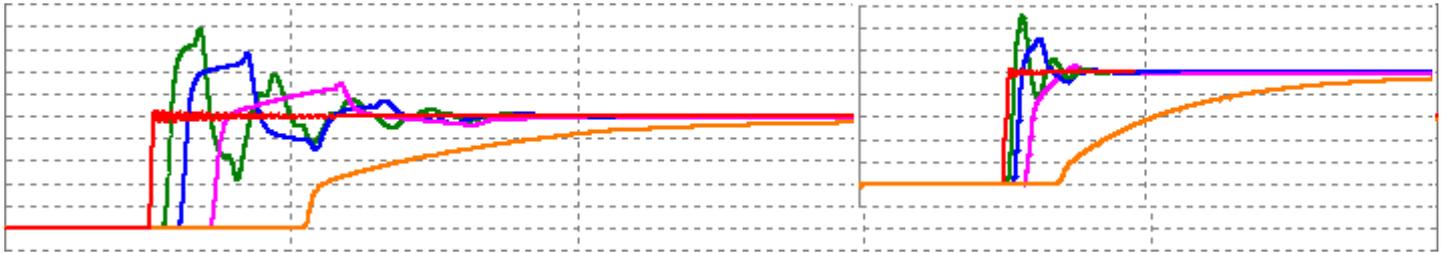
пусть во всех случаях условие по напряжению срабатывания будет одинаковым

самое распространенное у российских производителей решение - резистивный ДВ. Входной ток пропорционален входному напряжению. Решение о срабатывании ДВ принимается независимо от величины входного тока.

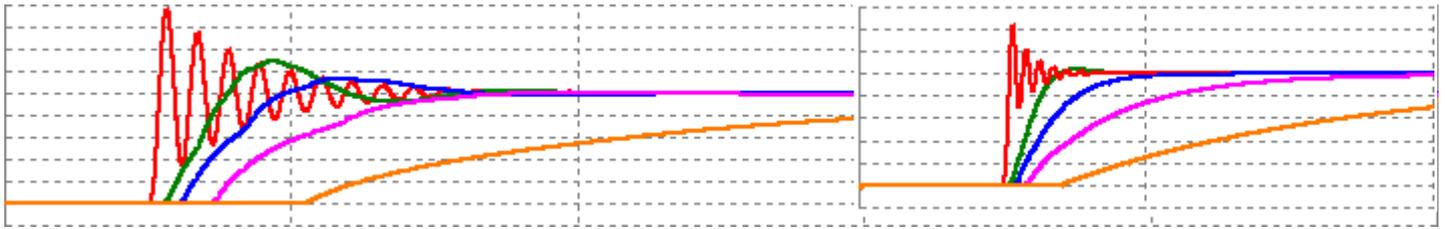
Правда обычно величина входного сопротивления ДВ составляет 10-11 кОм, что не позволяет реализовать старое требование по величине остаточного тока.

Такие характеристики имеют ДВ АКА-Кедр, УПК-Ц, АКСТ-ЦР

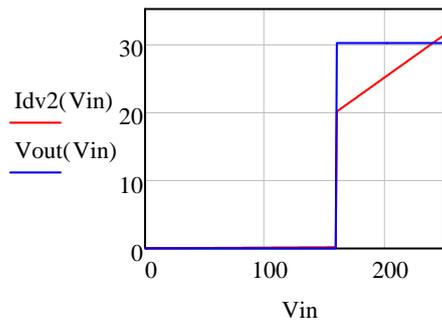
Для сравнения приведены характеристики системы при использовании ВЧ коаксиального кабеля RG58U 50 Ом



С параллельным конденсатором 10 нФ

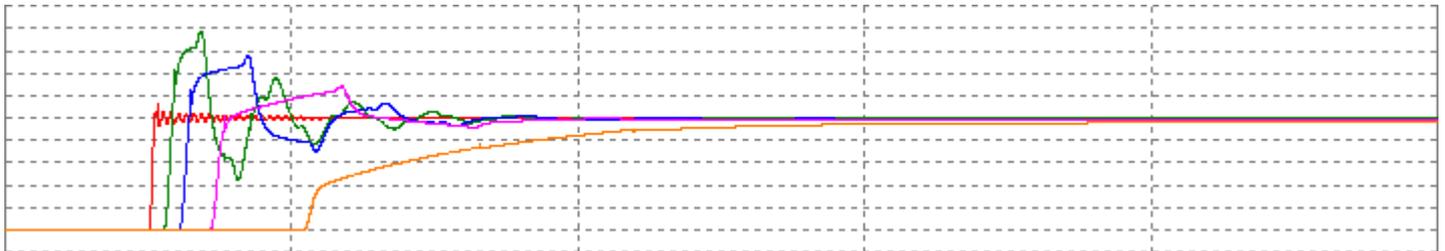


$I_{dv2}(V_{in}) := \text{if}\left(V_{in} \geq U_{por}, \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{dv1}}, \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{hi}}\right)$ В выключенном состоянии ДВ имеет большое входное сопротивление. При выполнении условия срабатывания по напряжению к входной цепи ДВ подключается нагрузочный резистор 8-10 кОм, обеспечивающий нормированные рабочие характеристики и по остаточному току (старые), и по величине входного сопротивления ДВ.

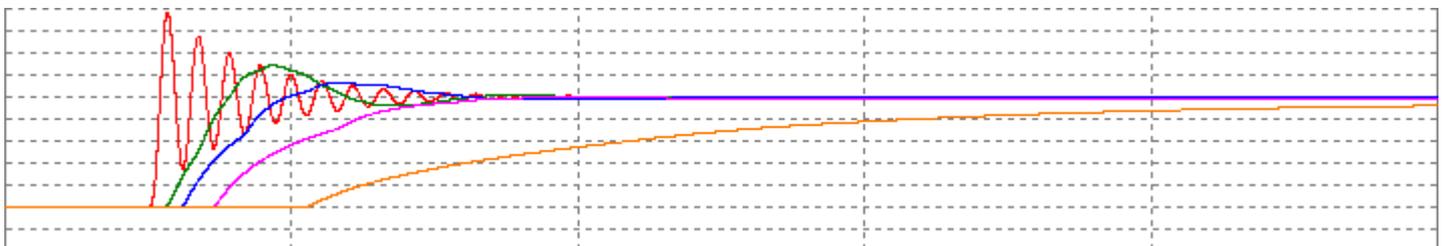


Подобных рабочих характеристик ДВ у промышленных производителей я не знаю.

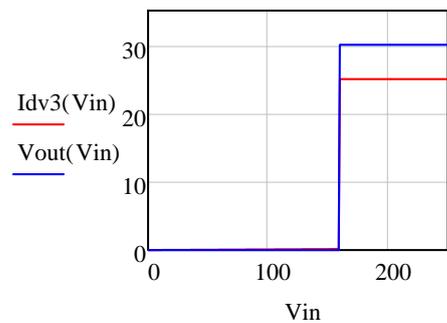
Но, вероятно, такими они должны быть у тиристорных ДВ, в частности, пропагандируемых Гуревичем.



С параллельным конденсатором 10 нФ



$$Idv3(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, I_{ost}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{hi}} \right)$$

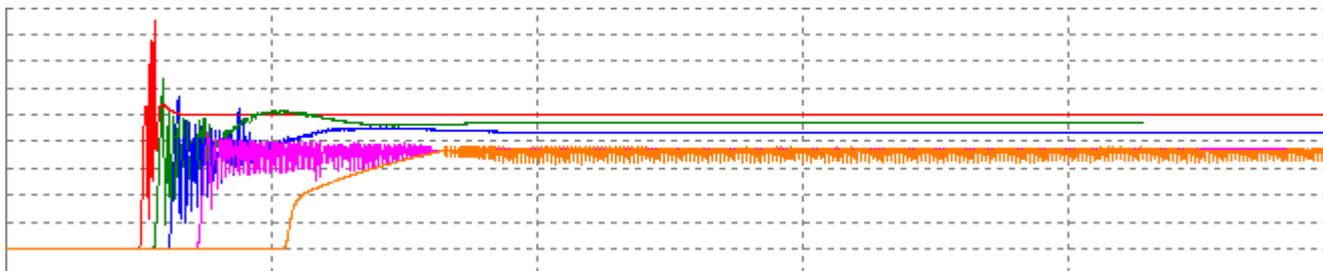


В выключенном состоянии ДВ имеет большое входное сопротивление. При выполнении условия срабатывания по напряжению во входной цепи ДВ включается генератор тока, обеспечивающий нормированные рабочие характеристики и по остаточному току, и по величине входного сопротивления ДВ.

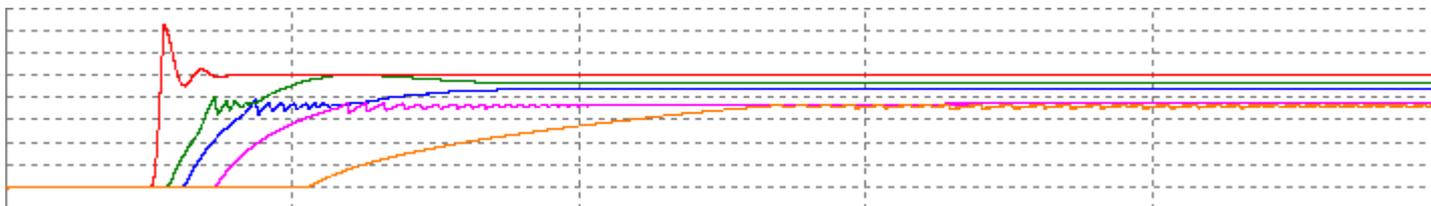
Довольно распространенное у импортных производителей решение. Однако величины входных токов ДВ в состоянии срабатывания у них различаются, и могут составлять от 2 мА до 10 мА.

Такие рабочие характеристики имеют некоторые ДВ АББ и Сименс.

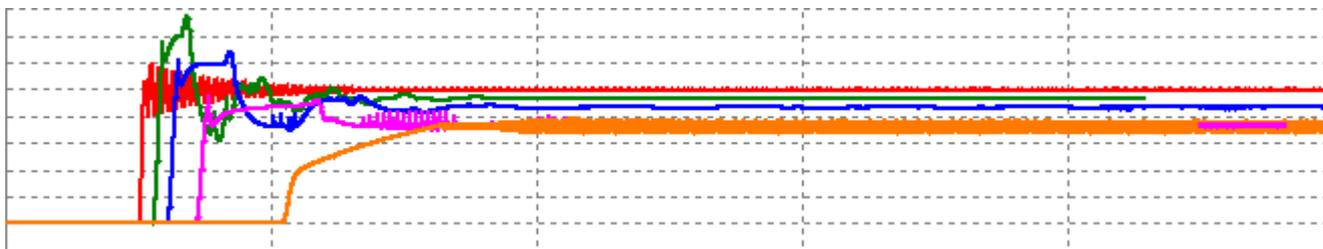
Первый тип источника тока / схемы управления, 10 мА



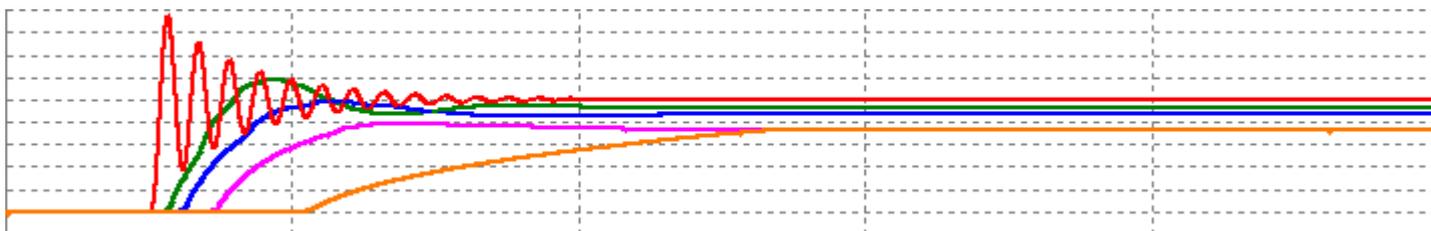
Первый тип источника тока / схемы управления, 10 мА, с параллельным конденсатором 10 нФ



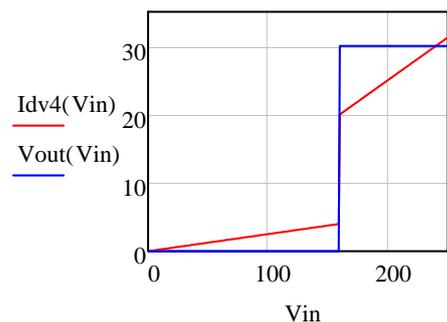
Второй тип источника тока / схемы управления, 10 мА



Второй тип источника тока / схемы управления, 10 мА, с параллельным конденсатором 10 нФ



$$Idv4(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{dv1}}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}} \right)$$

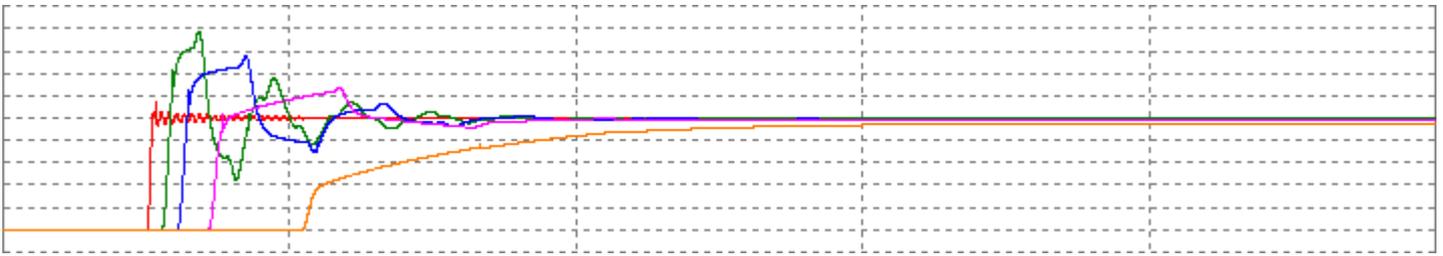


Вариант реализации второй схемы.

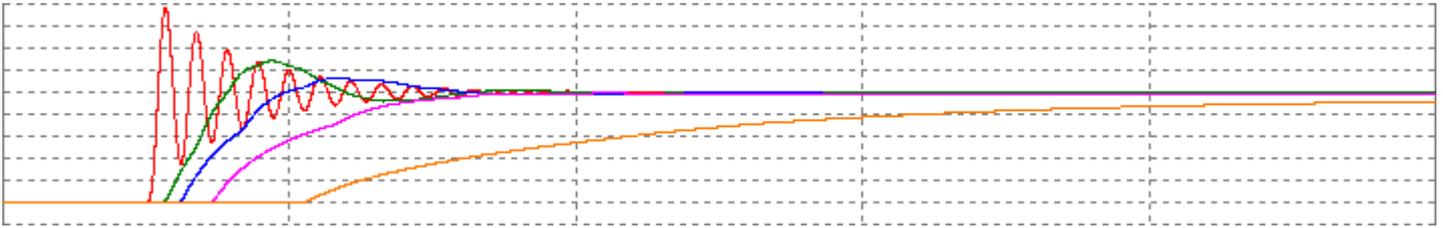
В выключенном состоянии ДВ имеет входное сопротивление в соответствии с требованиями ФСК 40 кОм. При выполнении условия срабатывания по напряжению к входной цепи ДВ подключается нагрузочный резистор, обеспечивающий нормированные рабочие характеристики и по остаточному току (старые), и по величине входного сопротивления ДВ 8-10 кОм.

Подобных рабочих характеристик ДВ у промышленных производителей я не знаю.

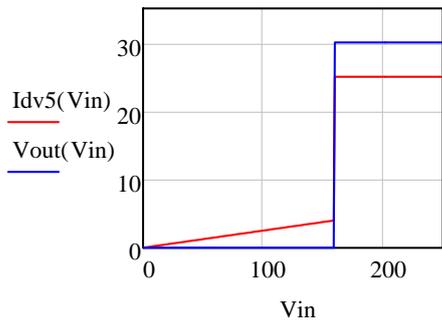
Но, вероятно, такими они должны быть у тиристорных ДВ, если их зашунтировать сопротивлением 40 кОм.



С параллельным конденсатором 10 нФ



$$Idv5(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, I_{ost}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}} \right)$$

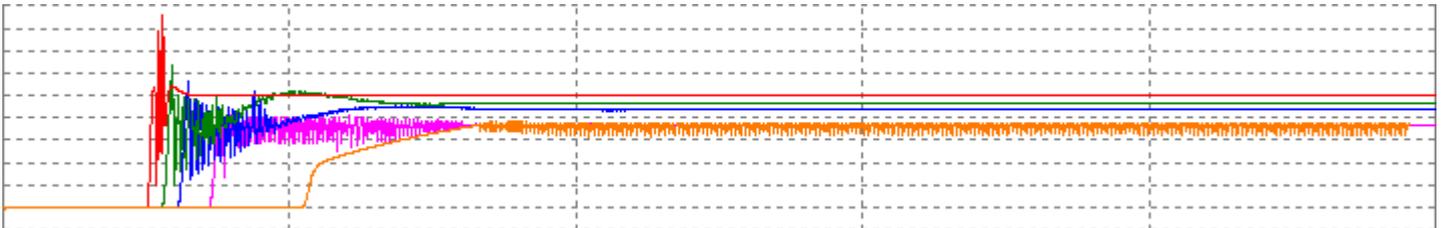


Вариант реализации третьей схемы.

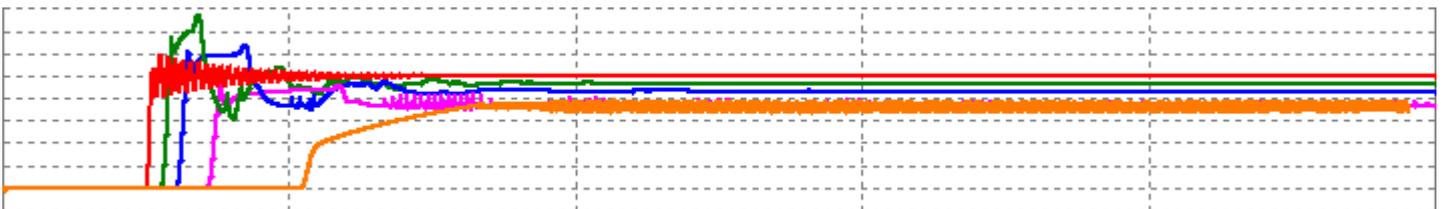
В выключенном состоянии ДВ имеет входное сопротивление 40 кОм (вход третьей схемы шунтирован соответствующим сопротивлением). При выполнении условия срабатывания по напряжению во входной цепи ДВ включается генератор тока, обеспечивающий нормированные рабочие характеристики и по остаточному току, и по величине входного сопротивления ДВ.

Довольно распространенное у импортных производителей решение в редакции ФСК - такие рабочие характеристики будут иметь некоторые ДВ АББ и Сименс, если их шунтировать (по требованию ФСК) резисторами 40 кОм. Величины входных токов ДВ в состоянии срабатывания будут составлять 6 ... 16 мА.

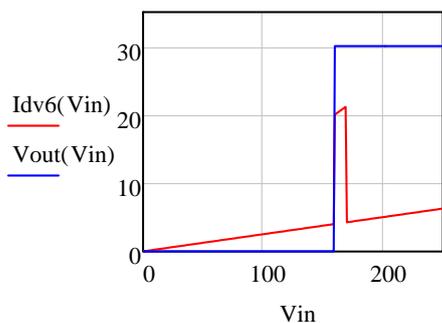
Первый тип источника тока / схемы управления, 10 мА



Второй тип источника тока / схемы управления, 10 мА



$$Idv6(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por} + dU_{por}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}}, \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{dv1}}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}} \right) \right)$$



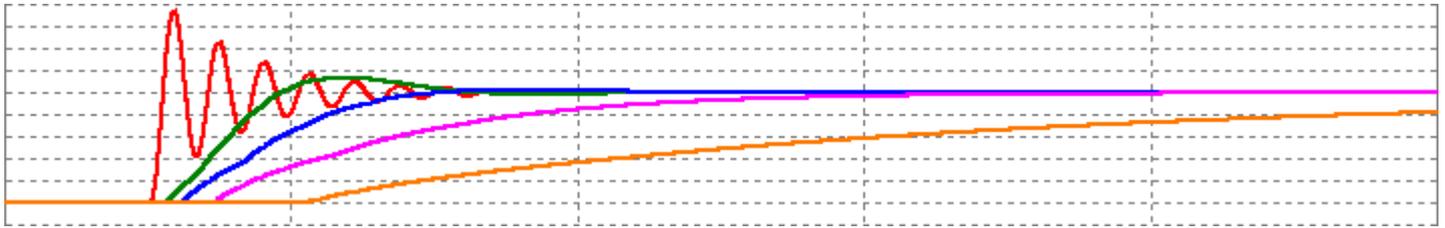
вариант реализации первой схемы - резистивный ДВ либо с параллельно установленным конденсатором, либо с формирователем в момент срабатывания "очищающего" тока.

Входной ток пропорционален входному напряжению. Решение о срабатывании ДВ принимается независимо от величины входного тока. Величина входного сопротивления ДВ может быть равна 10-11 кОм или 40 кОм.

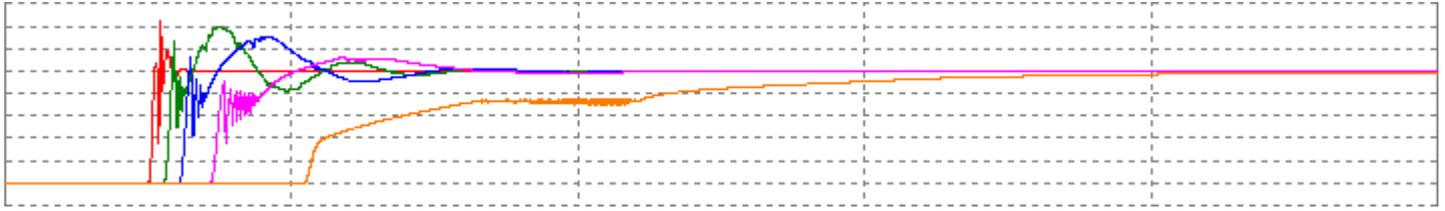
"Очищающий" импульс обычно формируется за счет крутизны (скорости нарастания) входного сигнала и тока / времени заряда шунтирующего ДВ конденсатора.

Такие характеристики имеют ДВ многих производителей.

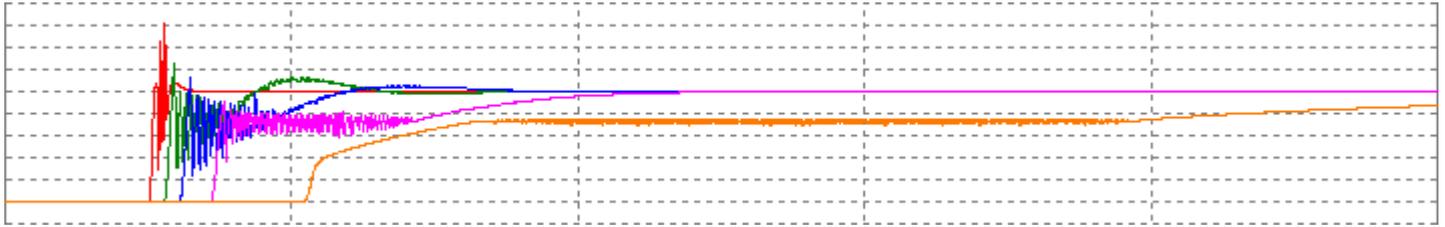
Параллельный ДВ 40 кОм конденсатор 22 нФ



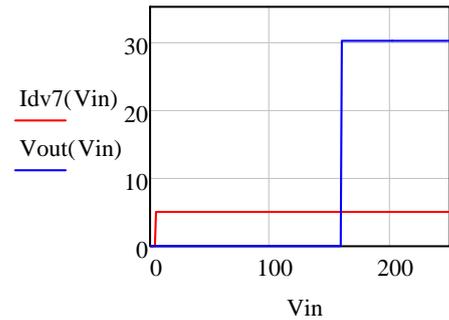
Подключаемый конденсатор 2.2 нФ



Подключаемый конденсатор 10 нФ



$$I_{dv7}(V_{in}) := \text{if} \left(V_{in} \geq 5, I_{fsk}, \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{hi}} \right)$$

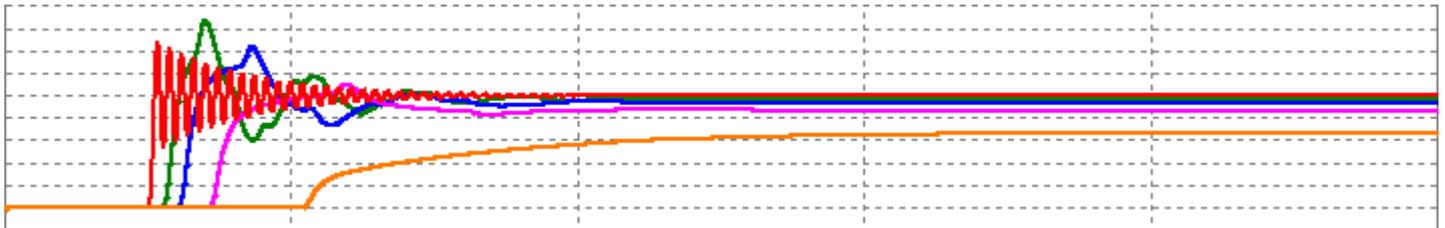


Рабочая характеристика ДВ с постоянным входным током.

Решение о с рабатывании ДВ принимается на основании анализа входного напряжения.

Отличительная особенность:

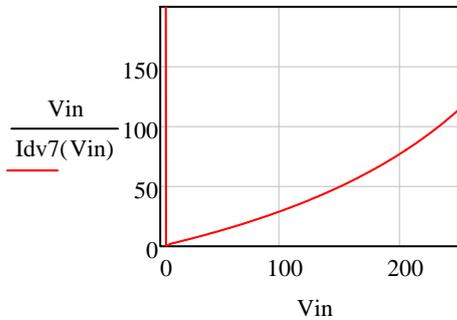
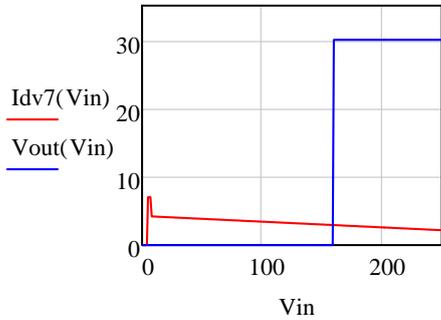
входное сопротивление ДВ не является постоянной величиной $R_{vh} = U_{in} / I_{in}$, и может изменяться в пределах 1 кОм ... 200 кОм, причем в диапазоне входных напряжений, соответствующих открытому состоянию ДВ, входное сопротивление ДВ значительно выше номированного.



Параллельный ДВ конденсатор 10 нФ



$$I_{dv7}(V_{in}) := \text{if} \left(V_{in} \geq 5, \text{if} \left(V_{in} \leq 7, 7, 4.2 - \frac{V_{in} - 7}{120} \right), \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{hi}} \right)$$



Разновидностью приведенной рабочей характеристики ДВ, является характеристика ДВ модуля ТЕБИТ аппаратуры FOX515.

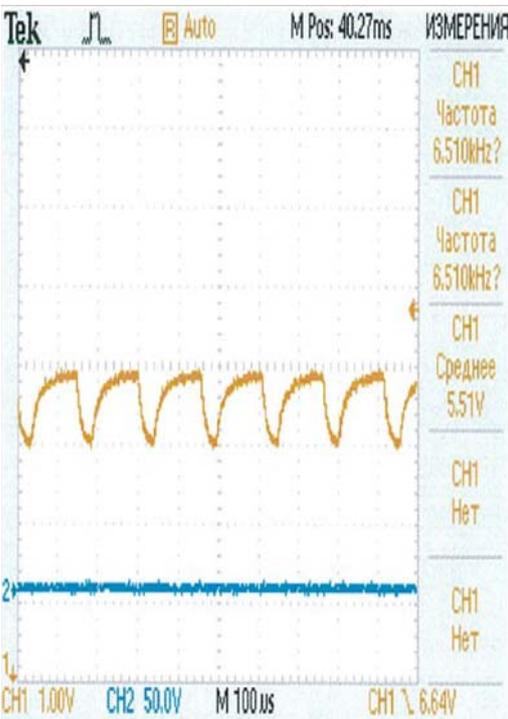
Отличительная особенность:

скачок входного тока в диапазоне входных напряжений 5-7 В в момент включения схемы ШИМ (входное напряжение преобразуется в модулированное ШИМ колебание, параметры которого впоследствии анализируются).

При очень медленном "плавающем" изменении входного напряжения в области малых напряжений 5-7 В возможно **САМОформирование** излишних сигналов о срабатывании ДВ (ложных / излишних команд).

Причем в системе они регистрируются, как входные сигналы ДВ, а значит при послеаварийном анализе **всегда "виновата" внешняя аппаратура**, к которой подключен модуль ТЕБИТ.

Напряжение срабатывания ДВ ТЕБИТ равно 126 В.

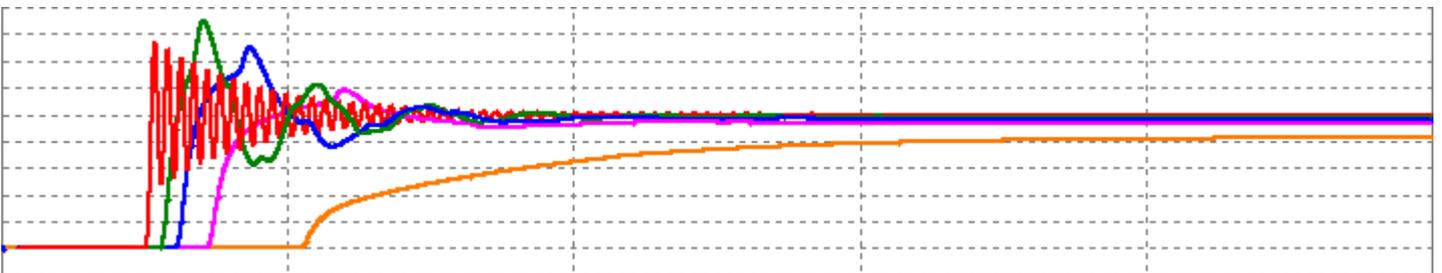


При высоком выходном сопротивлении источника входного напряжения на входных клеммах ТЕБИТ можно увидеть следующую картину (параметры модуляции меняются в зависимости от уровня входного напряжения).

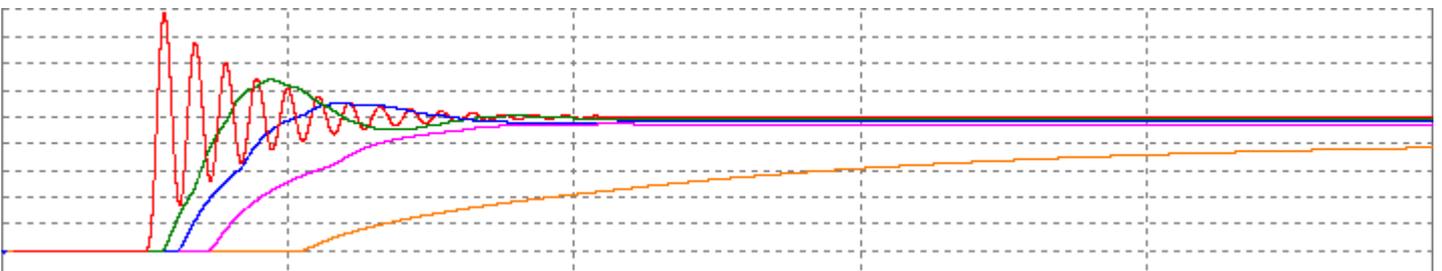
Реальная ситуация:

вход замыкается на среднюю точку батареи опертока, при перекосе 5-7% или работе системы поиска земли так же возможно ложное (излишнее) срабатывание.

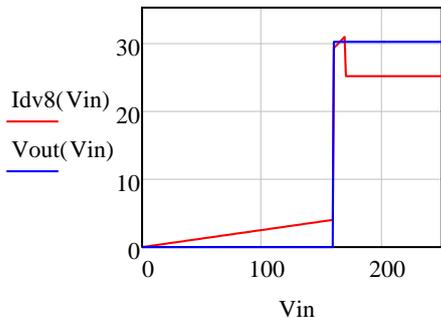
"Спасает" ТЕБИТ то, что излишнее срабатывание, как правило, происходит вне рамок аварийных ситуаций - сформированная команда не исполняется, поэтому оперативными службами либо вообще не фиксируется, либо фиксируется как "излишняя" (неопасная) команда. Чему способствует запредельная сложность доступа к регистратору ТЕБИТ для оперативных служб - чаще они о срабатывании просто не знают (если нет внешнего РАС, и желания его просмотра в неаварийных ситуациях).



Параллельный ДВ конденсатор 10 нФ



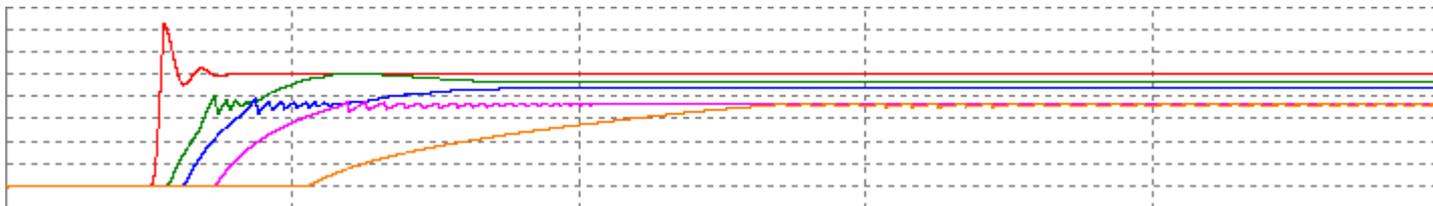
$$Idv8(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por} + dU_{por}, I_{ost}, \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, \frac{Vin \cdot 1000}{5500}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}} \right) \right)$$



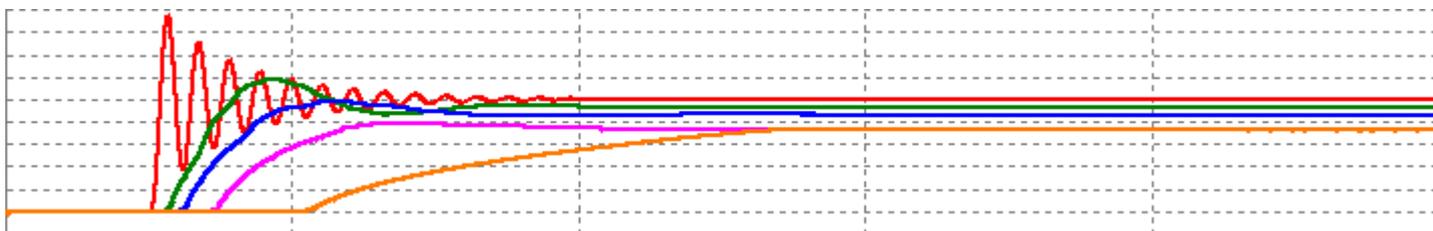
Модификация пятой схемы с параллельно установленным конденсатором, либо с формирователем "очищающего" тока в момент срабатывания.

Таковую характеристику имеют некоторые ДВ Сименс

Первый тип источника тока / схемы управления, 10 мА, с параллельным конденсатором 10 нФ



Второй тип источника тока / схемы управления, 10 мА, с параллельным конденсатором 10 нФ



Поверхностный анализ рабочих характеристик ДВ

Из беглого анализа приведенных рабочих характеристик ДВ следует:

- как и следовало ожидать, не важно каким будет активное рассогласование 8кОм или 1МОм, оно, в любом случае будет высокоомным, и порождаемые им при ступенчатом воздействии помехи (колебательные процессы) будут примерно одинаковыми, определяемыми параметрами сигнальной пары, а не свойствами ДВ
- при установленном параллельно ДВ шунтирующем конденсаторе рабочие характеристики становятся одинаковыми, не зависящими от активного сопротивления ДВ. Сам конденсатор при длинах сигнальной пары более 100 метров скорее приносит пользу. Чего нельзя сказать о длинах сигнальной пары менее 50 метров. Здесь конденсатор увеличивает величину генерируемых помех (колебательных процессов), перенося их в более низкочастотную область. Данное решение никак нельзя считать универсальным и рекомендованным, особенно при межблочных / межтерминальных связях. К тому же, подобный конденсатор на рабочее напряжение 400-500 В - не самая дешевая и маленькая вещь
- схемы ДВ с генераторами тока на входе нельзя назвать особо удачными с точки зрения уменьшения формируемых колебательных процессов (помех). За исключение схем, у которых ГТ начинает работать при самых маленьких входных напряжениях. Формируемые при этом малые входные сопротивления ДВ шунтируют самые высокочастотные составляющие генерируемых двойкой сигнальная пара-ДВ помех (колебаний)
- особое место занимают подключаемые схемы (ГТ, конденсаторов или пары ГТ-конденсатор). Здесь уже все зависит от конкретной реализации (при анализе использовались условно Первый и Второй тип, могут быть и другие). Однако, если оценивать в целом, то подавление паразитных колебаний (генерируемых помех) в таких схемах, особенно низкочастотных составляющих, наиболее эффективно. Однако хочется отметить генерацию такими схемами вторичных помех, высокочастотных и достаточно большой амплитуды (повторюсь: может быть это зависит от конкретных реализаций, но мне - по-быстрому - получить требуемый результат не удалось. Лучшее из достигнутого: восьмая рабочая характеристика, ГТ первого типа с параллельным конденсатором).

Работа ДВ с ГТ и третьим механизмом принятия решения о срабатывании ДВ

Реальные схемы с ГТ имеют конечное быстродействие и конечную передаточную характеристику включения. С учетом этого эффекта, ранее приведенная рабочая характеристика, например, №5

$$Idv5(Vin) := \text{if} \left(Vin \geq U_{por}, I_{ost}, \frac{Vin \cdot 1000}{R_{fsk}} \right)$$

будет иметь вид

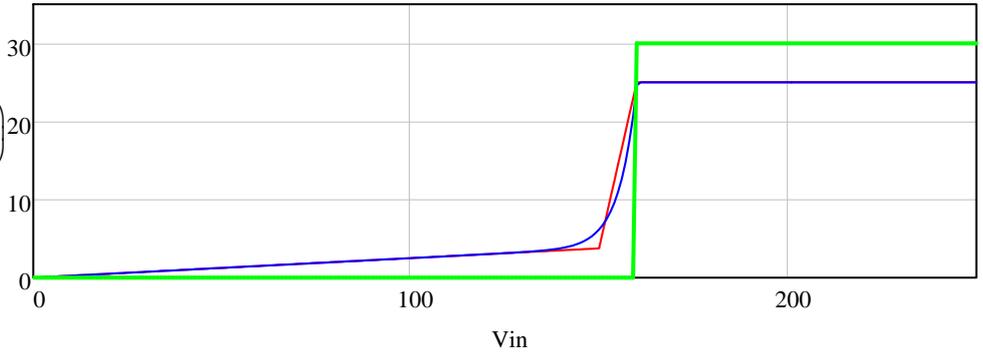
$$\underline{\text{Idv5}}(V, U_p, dU_p, IG, R) := \text{if} \left[V \geq U_p + dU_p, IG, \text{if} \left[V \geq U_p, \frac{(V - U_p) \cdot \left(IG - \frac{V \cdot 1000}{R} \right)}{dU_p} + \frac{V \cdot 1000}{R}, \frac{V \cdot 1000}{R} \right] \right]$$

На рисунке ниже приведены модифицированная рабочая характеристика №5 (красная кривая) и близкая к ней рабочая характеристика с реальной функцией включения ГТ на ПТ (синяя кривая)

$$\underline{\text{Idv5}}(V_{in}, U_{por} - dU_{por}, dU_{por}, I_{ost}, R_{fsk})$$

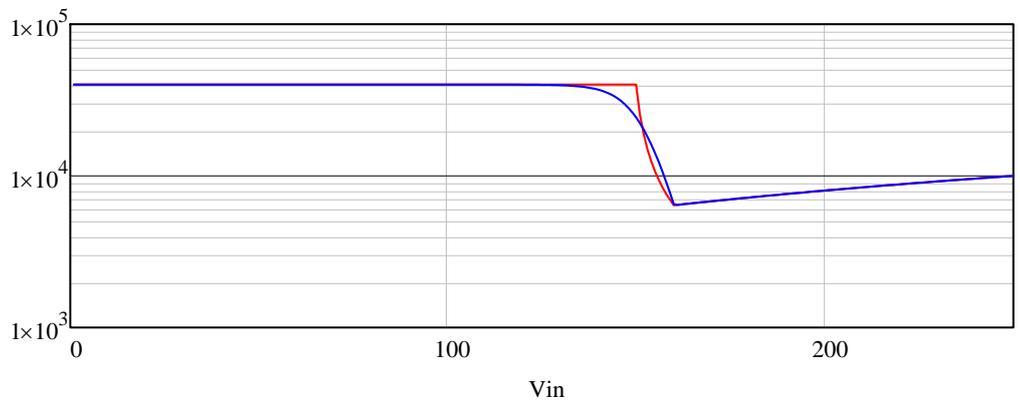
$$\min \left(10^{-14} \cdot \exp \left(\frac{V_{in}}{4.67} + 1 \right) + \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{fsk}}, I_{ost} \right)$$

$$\underline{\text{Vout}}(V_{in})$$



а здесь эквивалентные входные сопротивления такого ДВ

$$\frac{\underline{\text{Idv5}}(V_{in}, U_{por} - dU_{por}, dU_{por}, I_{ost}, R_{fsk})}{\min \left(10^{-14} \cdot \exp \left(\frac{V_{in}}{4.67} + 1 \right) + \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{fsk}}, I_{ost} \right)}$$



Именно конечная передаточная характеристика включения ГТ, или зависящий от входного напряжения входной ток резистивных ДВ позволяют реализовать третий механизм принятия решения о срабатывании ДВ.

Проще всего это отследить на рабочих характеристиках первого и четвертого типа

$$\underline{\text{Iin}}(V, R) := \frac{V \cdot 1000}{R}$$

Зададим дополнительное условие для принятия решения о срабатывании ДВ: входной ток ДВ должен быть больше

$$\underline{\text{Ip}} := 4.1$$

Тогда выходное напряжение ДВ (функция срабатывания) и входной ток примут вид:

$$\underline{\text{VouG}}(V, U_p, R, \text{Ip}) := \text{if} (V \geq U_p \wedge \underline{\text{Iin}}(V, R) \geq \text{Ip}, 30, 0)$$

$$\underline{\text{Idv4}}(V, U_p, R, R1, \text{Ip}) := \text{if} (\underline{\text{VouG}}(V, U_p, R, \text{Ip}) \geq 30, \underline{\text{Iin}}(V, R1), \underline{\text{Iin}}(V, R))$$

На рисунке ниже видно, что при наличии дополнительного условия о срабатывании (по току) функция включения ДВ смещается вправо (повышается помехоустойчивость), хотя условие срабатывания по напряжению давно выполнено.

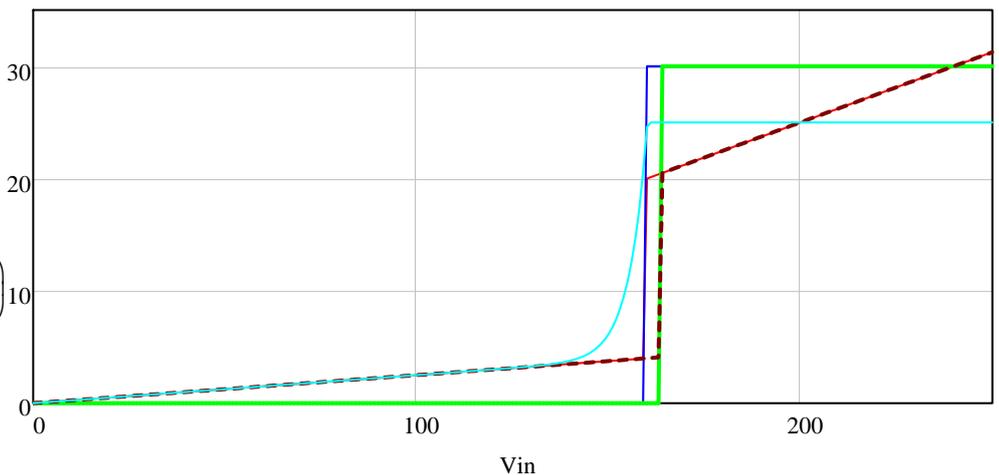
$$\underline{\text{Idv4}}(V_{in}, U_{por}, R_{fsk}, R_{dv1}, 0)$$

$$\underline{\text{VouG}}(V_{in}, U_{por}, R_{fsk}, 0)$$

$$\underline{\text{VouG}}(V_{in}, U_{por}, R_{fsk}, \text{Ip})$$

$$\underline{\text{Idv4}}(V_{in}, U_{por}, R_{fsk}, R_{dv1}, \text{Ip})$$

$$\min \left(10^{-14} \cdot \exp \left(\frac{V_{in}}{4.67} + 1 \right) + \frac{V_{in} \cdot 1000}{R_{fsk}}, I_{ost} \right)$$



Из жизни современных ДВ с ГТ

Для ДВ, использующих не подключаемые ГТ, формирования дополнительной цепи контроля входного тока не требуется. Поясню на примере из жизни, из реальной эксплуатации.

В последние полгода-год на энергообъектах РФ произошел ряд излишних срабатываний, обусловленных присутствием в цепи ДВ постоянных токов (утечки неисправных компонентов), а не напряжений.

Эти токи, попадая во входную цепь ДВ, вызывают прирост напряжения на входном сопротивлении, и достигнет оно порогового напряжения срабатывания ДВ, или нет зависит от величины сопротивления ДВ.

$I := 0, .001 .. 10$ входной "паразитный" ток (ток утечки источника), мА

Реально измеренные токи утечки и порождаемые ими напряжения на входе ДВ составили

$I1 := .128$ $I2 := .87$ измеренные входные "паразитные" токи (токи утечки источника), мА
 $U1 := 131$ $U2 := 142$ и соответствующие им наведенные напряжения, В

Измеренное пороговое значение входного тока мА, при котором происходит срабатывание ДВ, равно

$Iip := 2.1$

Измеренное значение входного тока ДВ I_{ost} , мА при входном напряжении 200 В равно

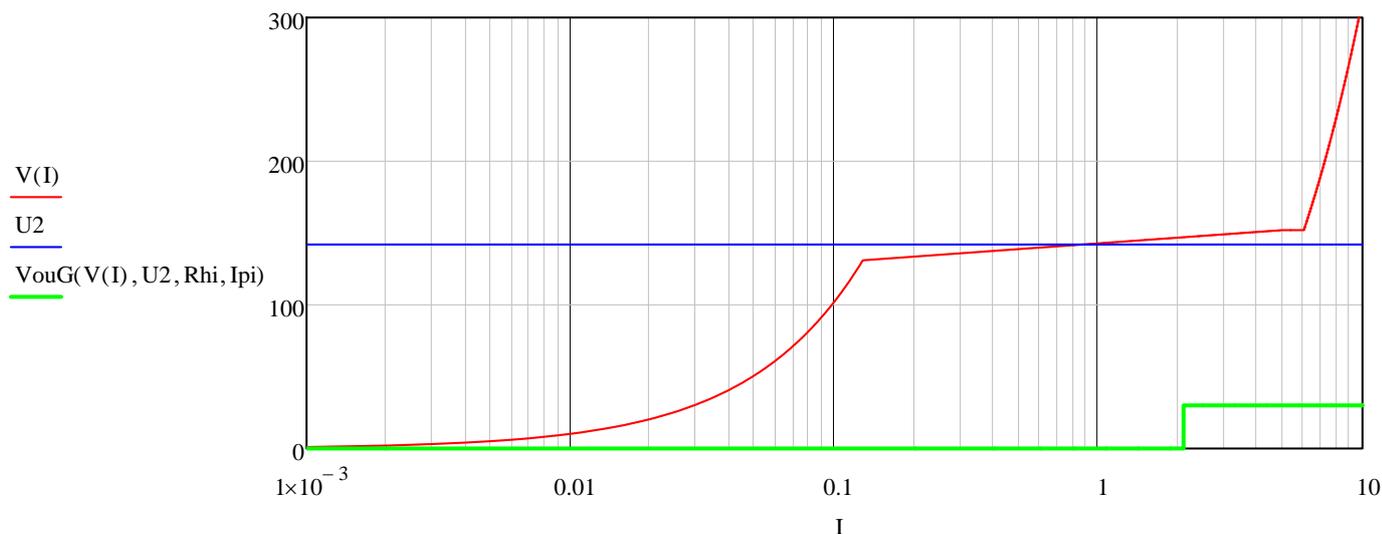
$I_{ost} := 5$ $I_{g_x} := 6$ реально изменяется от 4 мА до 6 мА при входных напряжениях 160-240 В

Этих данных достаточно для того, чтобы построить модель рабочей характеристики ДВ

$$K_i := \ln\left(\frac{I1}{I2}\right) \quad U_t := \frac{U1 - U2}{K_i} \quad I_s := I2 \cdot e^{\frac{U2 \cdot K_i}{U2 - U1} - 1}$$

$$V(I) := \text{if} \left[I \leq I_s \cdot \exp\left(\frac{U1}{U_t} + 1\right), U1 \cdot \frac{I}{I1}, \text{if} \left[I \leq I_{g_x}, U_t \cdot \left(\ln\left(\frac{\min(I, I_{ost})}{I_s}\right) - 1\right), U_t \cdot \left(\ln\left(\frac{I_{ost}}{I_s}\right) - 1\right) + (I - I_{g_x}) \cdot \frac{R_{fsk}}{1000} \right] \right]$$

$I_{pi} := \text{Idv4}(V(I_{ip}), U2, R_{hi}, R_{fsk}, 2.1)$ $K_i = -1$ $U_t = 5$ $I_s = 5$ $I_{pi} = 0$

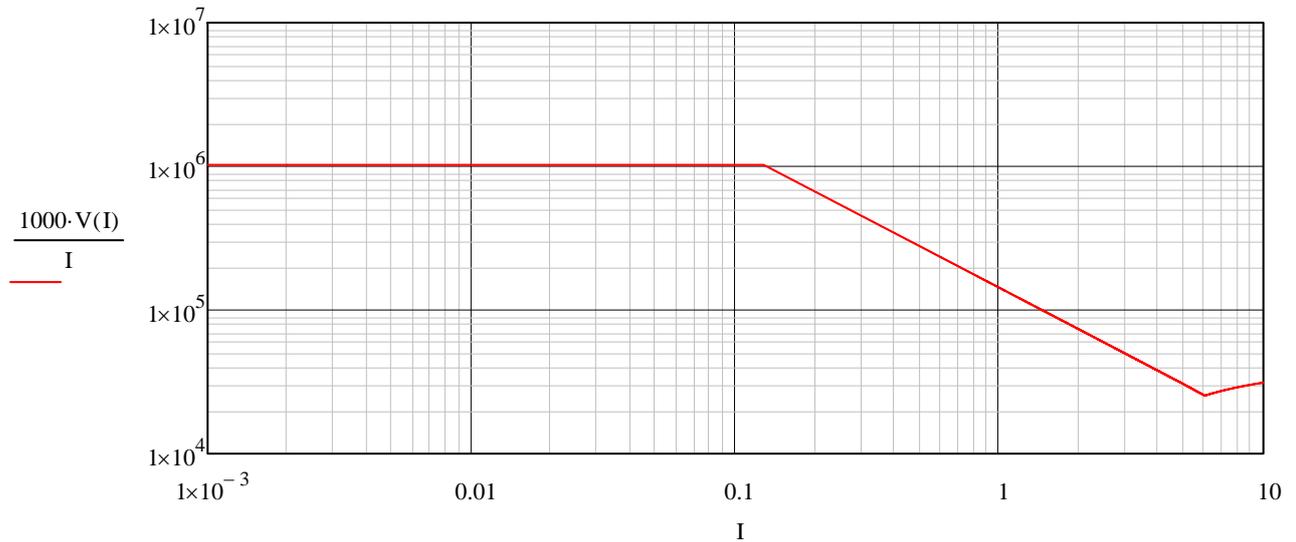


Дам некоторые пояснения:

- возрастающий входной ток порождает на входном сопротивлении ДВ увеличивающееся напряжение
- достигнув величины напряжения запуска ГТ $U1$, наведенное входное напряжение "притормаживается"
- несмотря на то, что пороговое напряжение срабатывания ДВ $U2$ (в данном случае 141-142 В) достигнуто, входного тока для срабатывания ДВ все еще недостаточно
- при достижении входным током I значения входного тока срабатывания I_{ip} ДВ срабатывает
- при достижении входным током I значений стабилизации ГТ рост наведенного входного напряжения останавливается
- при достижении входным током I предела поглощающей способности ГТ наведенное входное напряжение опять начинает расти

Таким образом сама процедура включения ГТ "растягивает" зону безопасности по входному току ДВ почти на порядок, давая время на обнаружение подобных дефектов (в экспериментах срабатывание ДВ наступало неизбежно, но на 5-7 ... 30 день в зависимости от степени дефективности управляющих ДВ цепей)

Эквивалентное входное сопротивление данного ДВ, построенное на основании предыдущего графика, выглядит так:

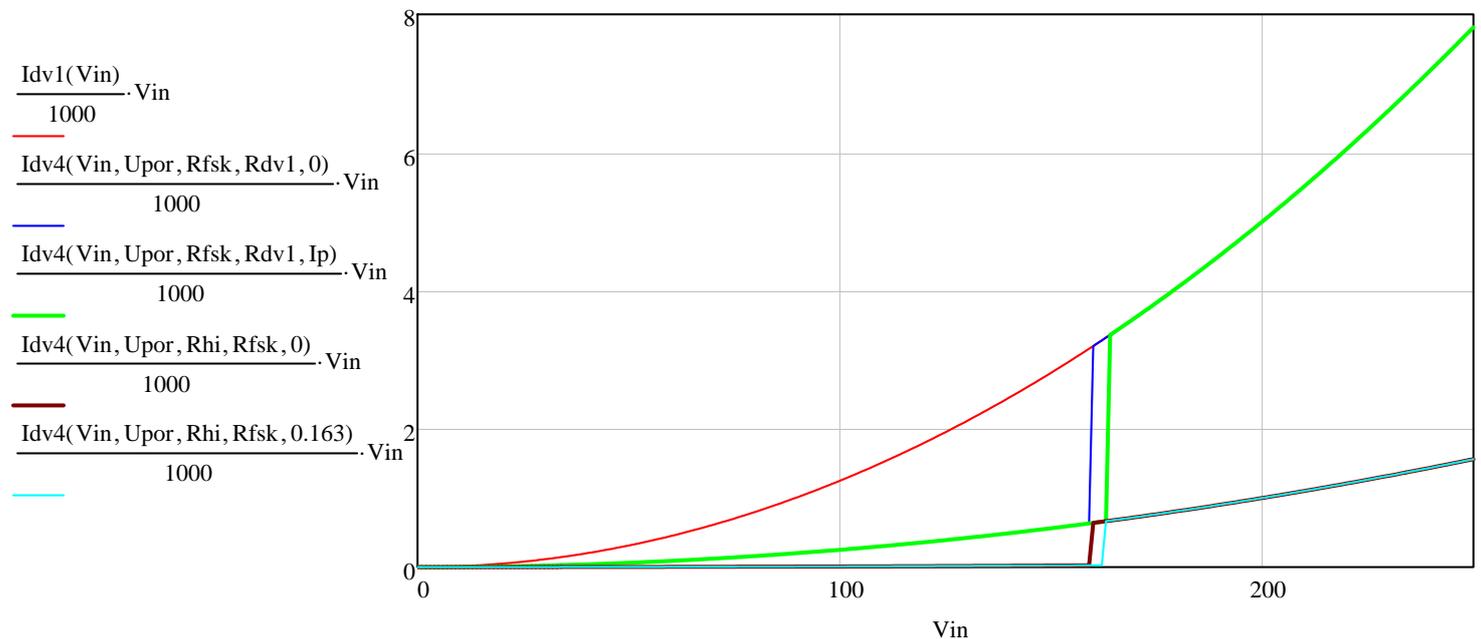


Стоит ли объяснять, что, если бы было выполнено требование ФСК об установке параллельно ДВ шунтирующего сопротивления (так, чтобы эквивалентное входное сопротивление ДВ составило 40 кОм), данный эффект не проявился бы? По-моему, это очевидно...

Поглощающая способность ДВ

На приведенном ниже графике показаны входные мощности (поглощающие способности) для

- "старых" схем с резистивными входными цепями, рассчитанными на создание входных токов 25 мА (красный)
- схем ДВ с переключением 40 кОм → 8 кОм в состояниях не срабатывания и срабатывания ДВ, без и с порогом по току срабатывания (синяя и зеленая кривые соответственно)
- современных схем ДВ с переключением 1000 кОм → 40 кОм в состояниях не срабатывания и срабатывания ДВ, без и с порогом по току срабатывания (коричневая и голубая кривые соответственно)



Современные схемы ДВ более, чем в 100 раз более чувствительны к различного вида помехам и мешающим сигналам. Отсюда проистекает обязательное требование по прокладке современных сигнальных цепей экранированными кабелями. Но что они будут делать с токами утечки, попадающими на вход ДВ?

Разумная ли это плата за удобство работы современных систем поиска земли и "инновации"?