

СИНХРОННАЯ КОММУТАЦИЯ ГЕРКОНАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В.Н. Шоффа, д.т.н.*, Б. Медзиньский, д.т.н.**

*** 111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14**

Московский энергетический институт (Технический университет)

**** 50 – 370, Польша, Вроцлав, ул. В.Высняньского, 27**

Вроцлавская политехника

Рассмотрены принципы управляемой (синхронной) коммутации (вблизи нуля тока нагрузки) герконами электрических цепей переменного тока, реализующие их электрические схемы, а также математические выражения, определяющие параметры этих схем. Приведены результаты экспериментов, которые показали хорошее согласование с теоретическими исследованиями.

Principles of the controlled (synchronous) switching (near zero of load current) by reed switches of electric ac circuits, the electric circuits which implement these principles, as well as mathematical expressions which determine parameters of these circuits are considered. Research results which have shown a good concordance with the theoretical studies are illustrated.

1. Введение

Одной из главных проблем при совершенствовании контактных коммутационных аппаратов является повышение их электрической износостойкости и доведение ее до уровня, близкого к механической износостойкости. Из известных контактных электрических коммутационных аппаратов наиболее механически износостойкими являются аппараты на основе герконов. Однако герконы имеют низкую электрическую износостойкость в режимах коммутации предельных для них токов.

Для повышения коммутационной способности и электрической износостойкости можно применять схемы управляемой (синхронной) коммутации. Суть такой коммутации электрических цепей переменного тока заключается во включении и отключении цепи при значениях тока, близких к нулю. В этом случае сокращается износ контактов, уменьшается вероятность их сваривания. В результате ток цепи может быть увеличен в пределе до значения, допускаемого для длительного протекания через этот коммутационный элемент.

Совмещение функций коммутирующего органа и датчика управляющего магнитного поля, а также высокое быстродействие герконов позволяют значительно проще осуществлять синхронную коммутацию по сравнению с другими контактными коммутационными аппаратами, например, низковольтными контакторами и высоковольтными выключателями.

2. Схемы синхронной коммутации герконами

Известен ряд схем, реализующих синхронную коммутацию герконами цепей переменного тока [1-9]. Наиболее рациональные, на наш взгляд, схемы, изображенные на рис. 1 [3] и рис. 2 [8].

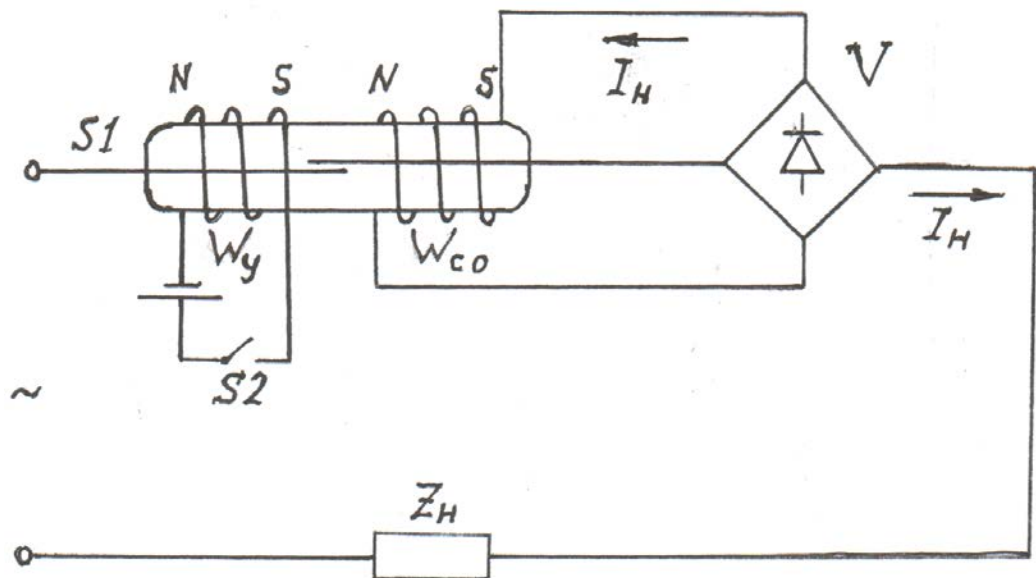


Рис. 1. Схема устройства синхронного отключения геркона

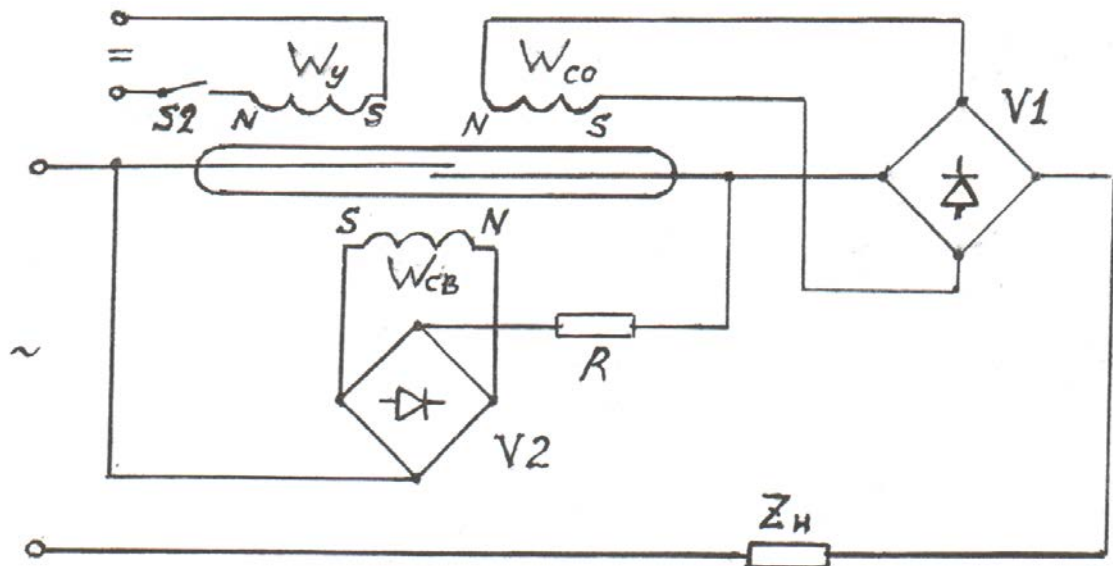


Рис. 2. Схема устройства синхронного включения и отключения геркона

Этот вывод основан на следующих соображениях: устройства на основе этих схем достаточно просты; входящие в них элементы надежны; устройства универсальны по управлению (в качестве управляющих органов могут быть использованы обмотки с током, подвижные постоянные магниты, подвижные детали из магнитомягкого материала в сочетании с неподвижными постоянными магнитами).

Первая схема (рис. 1) предназначена для **синхронного отключения цепи**. Последовательно с герконом $S1$ включено устройство синхронного отключения (СО), состоящее из выпрямителя V и обмотки W_{CO} , по которой протекает выпрямленный ток нагрузки I_H , создающий в герконе магнитный поток, согласный по направлению с потоком от обмотки управления W_y , включающей геркон. При отключении ключа $S2$ обмотка W_y обесточивается, но геркон продолжает удерживаться в замкнутом положении обмоткой W_{CO} и размыкается только при снижении мгновенного тока нагрузки i_H до значения, соответствующего МДС отпускания геркона $F_{от}$. Правильно выбирая число витков обмотки W_{CO} , можно добиться, чтобы разрыв цепи нагрузки был при небольшом значении тока, например, меньше минимального тока дугообразования I_d .

При использовании такой схемы можно снизить коэффициент запаса по МДС срабатывания K_3 геркона в обмотке управления, так как при замыкании цепи нагрузки обмотка W_{CO} обеспечивает дополнительную МДС. Применение СО совместно со снижением коэффициента запаса по МДС срабатывания уменьшает (а в ряде случаев исключает) дребезг при включении геркона.

К особенностям рассмотренной схемы относится то, что синхронное отключение осуществляется самим током нагрузки (если пренебречь гистерезисом и вихревыми токами в магнитной системе, что вполне реально для герконов при невысокой частоте тока нагрузки, после выпрямления которого реализуется питание обмотки СО). Недостатком схемы является отсутствие синхронного включения цепи.

Вторая схема (рис. 2) в отличие от первой позволяет производить как **синхронное отключение, так и синхронное включение**. Она состоит из геркона $S1$, включенного так же, как и в первой схеме, последовательно с устройством СО. Параллельно геркону $S1$ включено устройство синхронного включения (СВ), состоящее из выпрямителя $V2$, к клеммам выпрямленного тока которого подключена обмотка синхронного включения W_{CB} , создающая магнитный поток в герконе $S1$, направленный встречно потоку от обмотки W_Y .

При разомкнутом $S1$ по устройству СВ должен протекать ток, пренебрежимо малый по сравнению с током нагрузки. Для этого он ограничивается резистором R . Максимальное значение МДС F_{CBm} обмотки W_{CB} должно быть меньше МДС срабатывания геркона, иначе последний начнет коммутировать нагрузку с удвоенной частотой.

Устройство СВ предугадывает, в какой момент синусоиды тока нагрузки произойдет включение геркона, чтобы значение тока в этот момент было небольшим, например, меньше значения I_d . Для этого необходимо, чтобы токи через нагрузку при разомкнутом и замкнутом герконе практически совпадали по фазе. Из-за большой разницы между значениями этих токов очевидно, что для эффективной работы схемы число витков обмотки W_{CB} должно быть много больше числа витков обмотки W_{CO} . Поэтому и индуктивность обмотки W_{CB} много больше индуктивности обмотки W_{CO} (примерно в квадрате от соотношения числа витков этих обмоток). Указанное совпадение фаз токов также осуществляется выбором значения сопротивления R . Из-за большой разницы числа витков обмоток W_{CB} и W_{CO} магнитное поле от обмотки W_{CO} в выключенном герконе незначительно по сравнению с полем от обмотки W_{CB} .

При включении обмотки W_Y обмотка W_{CB} не позволяет геркону замкнуться, если мгновенное значение тока в цепи нагрузки i_H при этом было бы большим. Замыкание геркона становится возможным только при снижении ожидаемого тока включения до значения, меньшего, например, значения I_d . После замыкания геркона устройство СВ шунтируется и практически не оказывает на него воздействия. Отключение цепи производится так же, как и при первой схеме.

Как показали наши исследования, использование СВ дополнительно к СО дает возможность не только осуществлять синхронное включение, но и полностью исключить дребезг.

Основными недостатками второй схемы являются нахождение устройства СВ под напряжением сети и соответственно протекание небольшого тока по нагрузке Z_H при отключенном герконе. Кроме того, магнитное поле обмотки W_{CB} снижает виброудароустойчивость аппарата в отключенном состоянии. В [8] приведена схема, устраняющая указанные недостатки. Для этого в цепь устройства СВ включен дополнительный геркон, подключающий это устройство только при подаче сигнала на обмотку W_Y .

Ниже анализируется работа устройств СО и СВ при синусоидальной форме тока нагрузки.

2.1. Анализ работы устройства синхронного отключения

При отключении обмотки W_y (рис. 1 и 3) на геркон продолжает действовать МДС обмотки W_{co} , которая при синусоидальном токе нагрузки i_H равна

$$f_{co} = I_{Hm} |\sin 2\pi f t| W_{co}, \quad (1)$$

где I_{Hm} – максимальное значение тока нагрузки, f – частота тока нагрузки, W_{co} – число витков обмотки синхронного отключения.

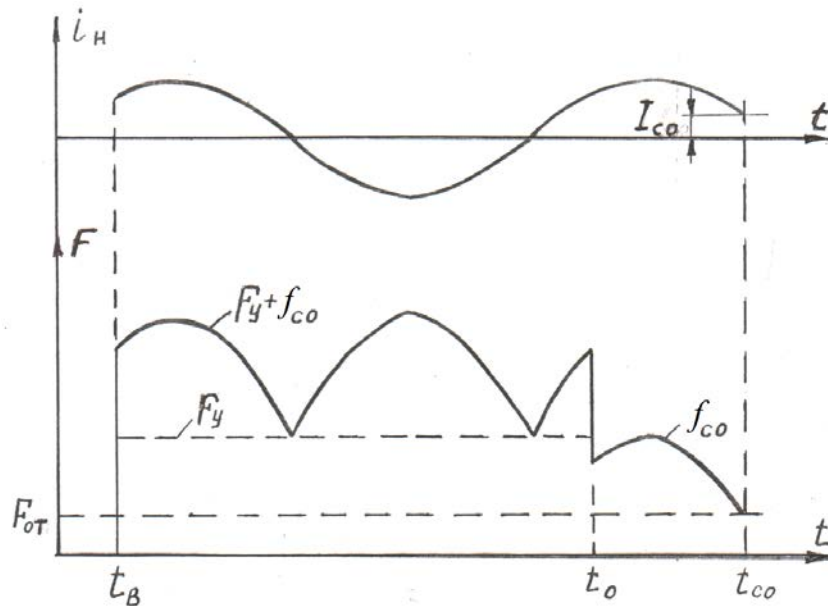


Рис. 3. Качественные зависимости изменения во времени тока нагрузки и МДС, воздействующих на геркон, при использовании синхронного отключения

Отключение геркона произойдет при достижении f_{co} значения F_{OT} . На рис. 3 показан качественный характер изменения во времени МДС обмотки управления f_y , МДС обмотки W_{co} и тока нагрузки i_H . Изменение f_y принято скачкообразным ($f_y = F_y$), т.е. постоянная времени ее изменения равна нулю. Влияние постоянной времени обмотки управления авторами проанализировано, но из-за большого объема настоящей работы будет показано в последующих публикациях.

Символами t_B , t_0 , t_{co} и I_{CO} обозначены соответственно моменты включения и отключения обмотки управления, момент синхронного отключения геркона и значение тока в обмотке W_{co} (равное току нагрузки) в этот момент.

Из рис. 3 видно, что ток I_{CO} определяется из равенства

$$I_{CO} = F_{OT}/W_{co}. \quad (2)$$

Считая, что ток при отключении геркона не должен превышать значения I_d , получим соотношение для числа витков обмотки синхронного отключения

$$W_{co} \geq F_{OT}/I_d. \quad (3)$$

Например, для геркона с родиевым покрытием ($I_d = 0,35$ А) и $F_{OT} = 60$ А при принятом допущении о скачкообразном изменении тока в обмотке управления обмотка синхронного отключения должна содержать как минимум 172 витка.

На рис. 4 показаны зоны, характерные для работы геркона с синхронным отключением.

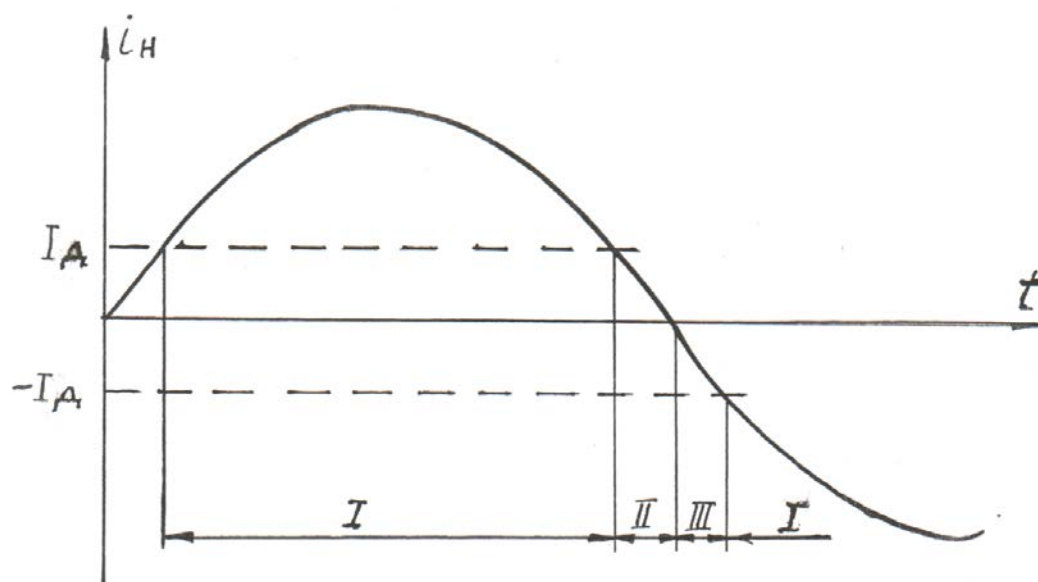


Рис. 4. Три характерные зоны работы устройства синхронного отключения

При отключении обмотки управления в моменты времени, соответствующие зоне I, размыкание геркона не происходит, так как ток i_n превышает значение I_d , а МДС f_{CO} – значение F_{OT} . В зонах II и III размыкание геркона происходит, причем в зоне II оно предпочтительнее, так как при размыкании геркона в зоне III, учитывая инерционность геркона и существование жидкометаллических мостиков (особенно в жидкометаллических герконах), момент разрыва цепи нагрузки может произойти уже в зоне I с возникновением разряда. В качестве положительного фактора можно отметить, что суммарная продолжительность зон I и II гораздо больше продолжительности зоны III. Так, для тока $I_{Hm} = 5$ А и $f = 50$ Гц продолжительность зоны I равна 9,6 мс, а зон II и III – по 0,2 мс. Так как момент разрыва цепи обмотки управления равновероятен во времени, то суммарная вероятность этого момента в зонах I и II равна 0,98, а в зоне III – 0,02.

Значительным преимуществом устройства СО является увеличение МДС при росте тока нагрузки (см. рис. 3). При отсутствии насыщения магнитной системы это вызывает увеличение силы контактного нажатия, что позволяет геркону пропускать большие токи.

На рис. 3 видно, что в момент включения t_B обмотки управления к МДС F_y прибавляется МДС f_{CO} , пропорциональная току i_n , протекающему в данный момент. Естественнo предположить, что последняя МДС, воздействующая на геркон только после его замыкания, может подавлять вибрацию контактных сердечников (КС) геркона и, соответственно, дребезг. Для проверки этого был проведен следующий эксперимент. Исследовались два российских геркона типа КЭМ-1 с МДС срабатывания $F = 62$ А и 88 А. Использовались обмотки: W_y с числом витков 3000 (диаметр провода 0,1 мм) и W_{CO} с числом витков 200 (диаметр провода 1,2 мм). Действующее значение тока нагрузки – 4 А. Измерения времени дребезга проводились при трех значениях коэффициента запаса по МДС срабатывания K_3 : 1,1; 1,5 и 2. При $K_3 = 1,1$ время дребезга равнялось 0 и 0,25 мс для герконов, имеющих F_{CP} соответственно 62 А и 88 А. При $K_3 = 1,5$ продолжительность дребезга составляла 0,25 мс и 0,5 мс, а при $K_3 = 2$ оба геркона имели одинаковое время дребезга, равное 0,5 мс. При исследовании этих герконов без устройства СО и на токах нагрузки, равных десяткам миллиампер, времена их дребезга были примерно равны и составляли: при $K_3 = 1,1$ – 0,25 мс; при $K_3 = 1,5$ – 0,5 мс и при $K_3 = 2$ – 0,7 мс.

Зависимости рис. 3 применимы для анализа работы аппарата при изменении тока в отключаемой обмотке управления W_y с малой постоянной времени (примерно 0,1-0,2 мс) по

сравнению с длительностью полупериода изменения тока нагрузки (для частоты 50 Гц – 10 мс, а для частоты 60 Гц $\approx 8,3$ мс) или в случае управления герконом очень быстро перемещающимся постоянным магнитом. Наши исследования показали, что замедление снижения управляющего магнитного поля при отключении приводит к уменьшению необходимого числа витков обмотки W_{CO} по сравнению с результатами расчета по формуле (3).

2.2. Анализ работы устройства синхронного включения

Обозначим ток, протекающий по нагрузке в схеме рис. 2 при замкнутом герконе, через i_H , а ток, протекающий по нагрузке и устройству СВ при разомкнутом герконе, через i_H' .

Как видно из рис. 5, замыкание геркона с устройством СВ в момент $t = t_{CB}$ происходит при уменьшении тока i_H' . В момент замыкания ток в нагрузке i_H становится равным значению тока синхронного включения I_{CB} .

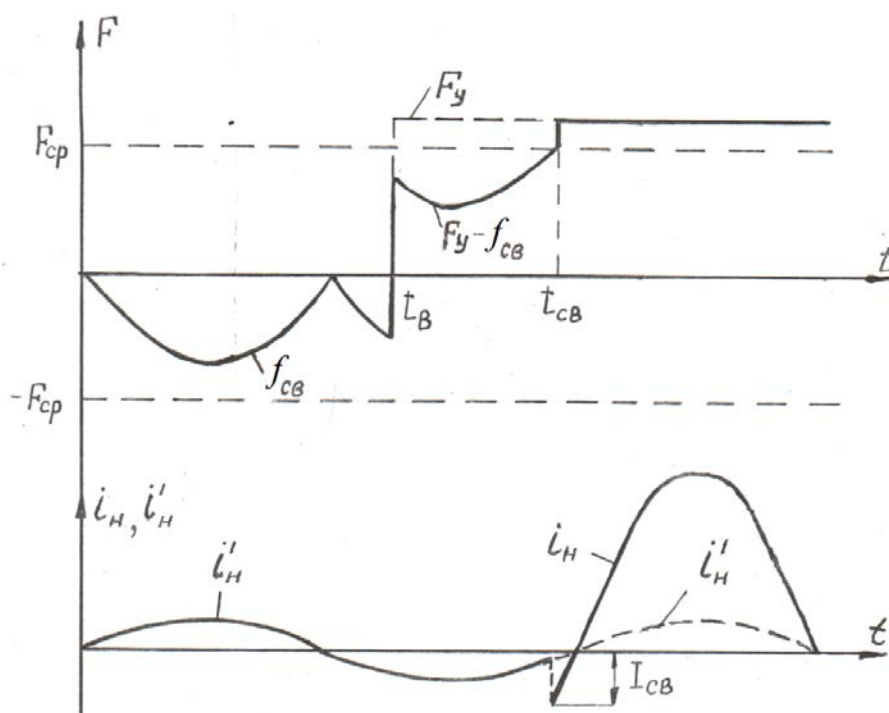


Рис. 5. Качественные зависимости изменения во времени тока нагрузки и МДС, действующих на геркон, при использовании синхронного включения

Примем допущения:

- фазы токов i_H' и i_H совпадают;
- изменение МДС управления происходит скачкообразно;
- дребезг при замыкании отсутствует;
- при достижении разностью МДС обмоток W_y и W_{CB} ($F_y - f_{CB}$) значения F_{CP} замыкание геркона происходит мгновенно.

Анализ первых двух допущений в настоящей работе не проводится. Рассмотрим третье и четвертое допущения.

На рис. 5 видно, что по сравнению с замыканием геркона при воздействии одной скачкообразно изменяющейся МДС управления (без устройства СВ) замыкание при одновременном воздействии МДС обмоток W_y и W_{CB} должно происходить с меньшей кинетической энергией из-за пологости кривой разности МДС. То есть КС плавно подходят к

зазору срабатывания между ними, определяющему их дальнейшее спонтанное перемещение. Это снижает вибрацию КС после их первого замыкания, соответственно, и дребезг. Сказанное определяет обоснованность третьего допущения. Спонтанное перемещение КС от зазора срабатывания до их первого замыкания происходит даже для больших герконов (нормального размера с длиной баллона 50 мм) за время, не превышающее несколько десятых долей миллисекунды [10]. Это много меньше времени полупериода изменения тока нагрузки при частоте 50-60 Гц, что обосновывает четвертое допущение.

Выведем выражение для определения числа витков W_{CB} при принятых допущениях. Так как в рассматриваемой схеме при разомкнутом герконе в нагрузке протекает ток i_H' , то значение этого тока надо задать. Например, если в качестве нагрузки используется реле, то ток i_H' должен быть задан из условия надежного отпускания этого аппарата.

Итак, нам заданы максимальные значения I_{Hm} и I_{Hm}' . Необходимо также соблюсти ранее упомянутое условие $F_{CBm} < F_{CP}$. Тогда с учетом

$$F_{CBm} = I_{Hm}' w_{CB} \quad (4)$$

получим, что

$$w_{CB} < F_{CP} / I_{Hm}'. \quad (5)$$

Кроме того, в момент синхронного включения ток I_{CB} в нагрузке должен быть меньше значения I_D . Допустим в предельном случае $I_{CB} = I_D$. Тогда при определенном значении времени t соблюдается равенство

$$I_{CB} = I_D = I_{Hm} |\sin 2\pi f t|. \quad (6)$$

Учитывая, что мы приняли токи i_H и i_H' совпадающими по фазе (модули их синусов равны), найдем значение тока i_H' , соответствующее условию $I_{CB} = I_D$. Обозначив это значение через I_D' , имеем

$$I_D' = I_{Hm}' |\sin 2\pi f t|$$

или

$$I_D' = I_{Hm}' I_D / I_{Hm}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что для замыкания геркона необходимо соблюдение условия $F_y(t = t_{CB}) - f_{CB}(t = t_{CB}) = F_{CP}$, то в момент замыкания (обозначим $f_{CB}(t = t_{CB}) = F_{CB}$) должно быть

$$F_{CB} = I_D' w_{CB} = F_y - F_{CP}. \quad (8)$$

Тогда с учетом (7), (8) и условия $I_{CB} < I_D$ имеем

$$W_{CB} > F_{CP} (K_3 - 1) I_{Hm} / I_{Hm}' I_D, \quad (9)$$

где $K_3 = F_y / F_{CP}$.

Отношение числа витков W_{CB} , полученных по (5), к числу витков W_{CB} , рассчитанных по (9), должно быть больше единицы, то есть

$$I_D / I_{Hm} (K_3 - 1) > 1, \quad (10)$$

так как при заданном токе I_{Hm}' нельзя увеличивать число витков W_{CB} больше полученного по (5).

Число витков W_{CB} , полученное по (9), можно сократить, уменьшая коэффициент запаса K_3 или нарушая условие $I_{CB} < I_D$. Например, для $I_H = 5$ А и $I_D = 0,35$ А получим, что условие (10) выполнимо при $K_3 \leq 1,05$. Такие значения K_3 не обеспечивают надежное замыкание герконов. В этом случае при выборе W_{CB} главным является соблюдение условия (5). Приходится увеличивать значение I_{CB} .

На рис. 6 показаны зоны (интервалы времени) Δt , в которых геркон должен срабатывать, так как в них соблюдается условие $F_y - f_{CB} \geq F_{CP}$.

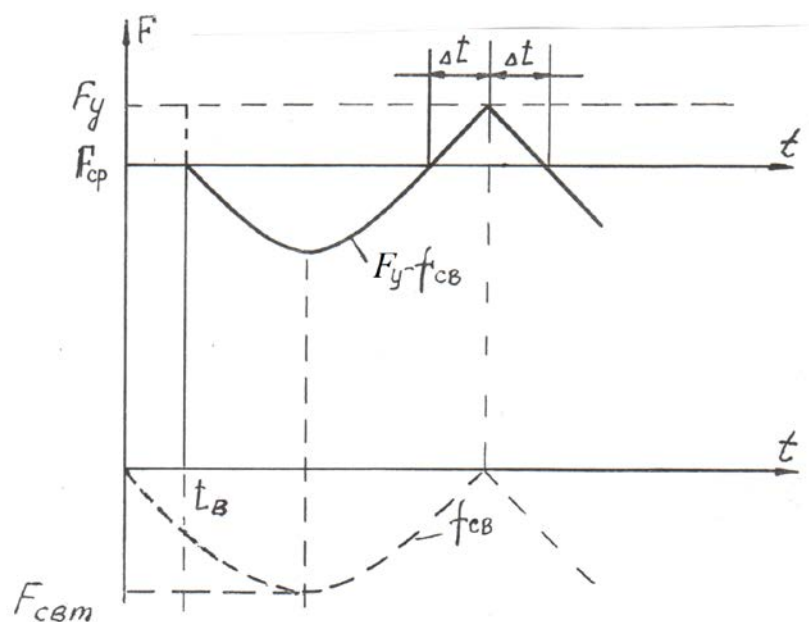


Рис. 6. Временные зоны Δt , в которых геркон должен срабатывать при использовании схемы синхронного включения

Время, за которое геркон устойчиво придет в замкнутое состояние, не должно превышать $2\Delta t$. В противном случае, он может не сработать. В принципе возможен случай, когда геркон еще не замкнулся в зоне $2\Delta t$, но зазор между его КС стал меньше зазора срабатывания. В этом случае геркон может замкнуться и при МДС, меньших значения F_{CP} . Однако на это не следует ориентироваться при проектировании устройства СВ, так как надежное срабатывание при этом не гарантировано.

Значение $2\Delta t$ зависит от K_3 и F_{CBM} . Эти зависимости иллюстрируются рис. 7 и 8. Из рис. 7 видно, что чем больше F_{CBM} (определяется увеличением тока I_H' , а также числа витков W_{CB}), тем меньше ширина зоны $2\Delta t$. При росте K_3 (рис. 8, $F_{y1} > F_{y2}$) зона $2\Delta t$ расширяется.

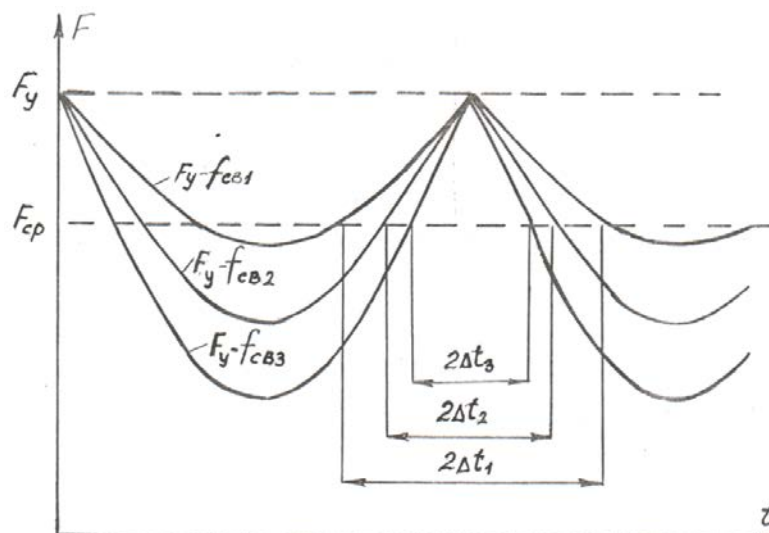


Рис. 7. Изменение временной зоны, в которой возможно замыкание геркона, при изменении амплитуды МДС обмотки синхронного включения F_{CBM} ($F_{CBM3} > F_{CBM2} > F_{CBM1}$)

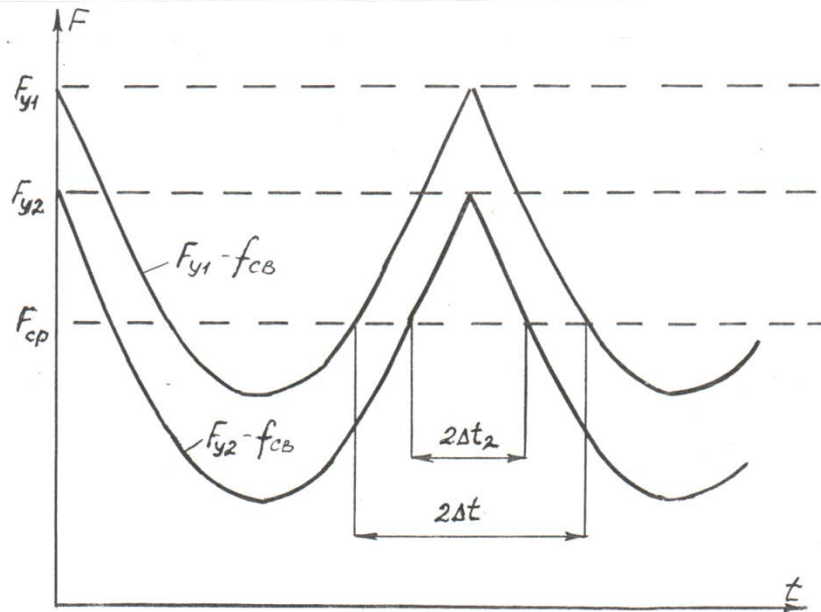


Рис. 8. Изменение временной зоны, в которой возможно замыкание геркона, при изменении коэффициента запаса по МДС срабатывания геркона в обмотке управления ($F_{y1} > F_{y2}$)

Найдем соотношение между Δt , F_{CBm} и K_3 из условия

$$F_y - F_{CP} = F_{CBm} \sin 2\pi f \Delta t. \quad (11)$$

Учитывая, что $F_y = K_3 F_{CP}$, и решая (11) относительно Δt , получим

$$\Delta t = (2\pi f)^{-1} \arcsin ((K_3 - 1) F_{CP} / F_{CBm}). \quad (12)$$

То есть сначала по (5) и заданному току I_H' рассчитывается число витков обмотки устройства СВ. Затем выбирается из условия надежности срабатывания геркона коэффициент запаса K_3 обмотки управления, и находится ширина зоны Δt по (12). Значение $2 \Delta t$ сравнивается с суммой времен $(t_1 + t_2)$. Здесь t_1 – время от момента равенства МДС ($F_y - f_{CB}$) значению F_{CP} до первого замыкания геркона, а t_d – время дребезга. Как указывалось выше, t_1 для герконов нормального размера составляет несколько десятых долей миллисекунды. Для герконов меньших размеров оно меньше. Дребезг же при СВ (особенно, если применяется еще и СО) может быть устранен.

Если $(t_1 + t_2) > 2\Delta t$, то уменьшается F_{CBm} (уменьшением либо W_{CB} , либо I_H') до тех пор, пока не будет выполняться условие $(t_1 + t_2) \leq 2\Delta t$. Рассчитав число витков W_{CB} по (9), сравниваем его с числом витков, рассчитанным по (5), с коррекцией по (12). Уменьшение числа витков, полученного по (9), до значения, рассчитанного по (5), может нарушить условие $I_{CB} < I_d$. В этом случае формула (9), разрешенная относительно тока I_d с заменой последнего на I_{CB} , позволяет оценить значение включаемого тока:

$$I_{CB} \leq F_{CP} (K_3 - 1) I_{Hm} / I_{Hm}' W_{CB}. \quad (13)$$

Это выражение показывает, что для рассчитанного по (5) и скорректированного по (12) числа витков W_{CB} значение включаемого тока нагрузки I_{CB} не будет превышать значения, полученного в правой части выражения.

3. Экспериментальные исследования синхронной коммутации

Исследования процессов синхронной коммутации проводились на российском герконе КЭМ-1 с золотым контактным покрытием. Обмотки были намотаны на один каркас в следующей последовательности: W_{CO} , W_{CB} , W_U . Обмотка управления содержала 4000 витков провода диаметром 0,1 мм. Измеренные в ней МДС срабатывания и отпускания: $F_{CP} = 80$ А, $F_{OT} = 45,5$ А. Обмотка CO содержала 120 витков провода диаметром 0,8 мм, а обмотка CB – 3600 витков провода диаметром 0,1 мм. Нагрузка – реостатная. Напряжение сети нагрузки 220 В. Частота – 50 Гц. Действующее значение тока нагрузки $I_H = 5$ А. Обмотка управления присоединялась потенциалометрически к сопротивлению, расположенному в коллекторной цепи выходного транзистора полупроводникового генератора. Импульс управления длительностью 275 мс подавался с частотой 2,1 Гц. Обмотка CB воздействовала на геркон с МДС, максимальное значение которой $F_{CBm} = 60$ А.

На рис. 9-11 показаны осциллограммы токов нагрузки и управления при включении геркона с устройством CB для разных значений K_3 .

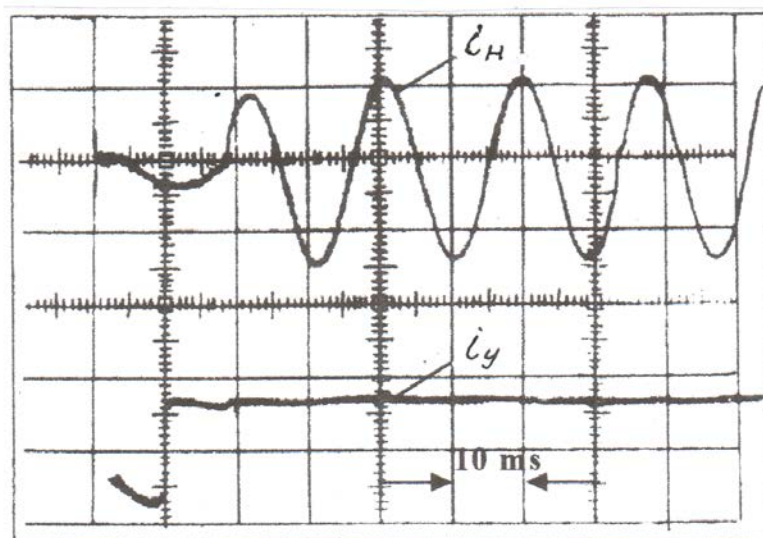


Рис. 9. Осциллограмма токов нагрузки и управления при синхронном включении геркона для $K_3 = 1,1$

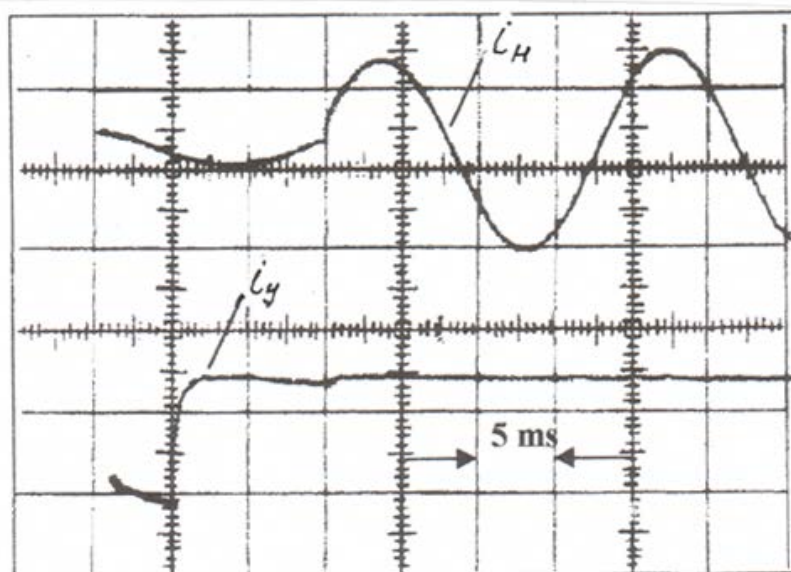


Рис. 10. Осциллограмма токов нагрузки и управления при синхронном включении геркона для $K_3 = 1,2$

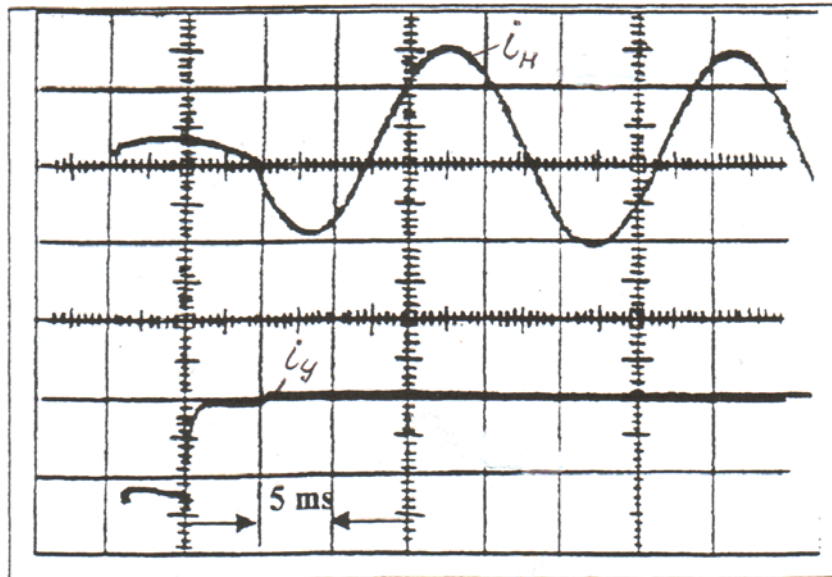


Рис. 11. Осциллограмма токов нагрузки и управления при синхронном включении геркона для $K_3 = 1,3$

Устройство СО в этом случае было отключено. Из осциллограмм видно, что замыкание цепи нагрузки происходило близко к нулю тока, причем при K_3 , равных 1,1 (рис. 9) и 1,2 (рис. 10), замыкание было на участке возрастания i_H , что объясняется малой шириной зоны Δt (см. рис. 8) при меньших K_3 . При $K_3 = 1,3$ замыкание произошло примерно в нуль тока. Ток i_U в обмотке управления нарастает до установившегося значения быстро (см. рис. 9-11), поэтому можно считать, что к моменту начала спонтанного перемещения КС МДС этой обмотки равна установившемуся значению F_U . Следует также отметить, что для всех трех значений коэффициента запаса дребезг отсутствовал.

Рассчитав значение Δt для $K_3 = 1,3$, можно примерно определить время t_1 как равное продолжительности зоны Δt , так как спонтанное движение КС геркона начинается на передней границе этой зоны, а конец его при отсутствии дребезга для данного значения коэффициента запаса приходится на нуль тока нагрузки, т.е. на конец указанной зоны. Подставляя в (11) значения $F_{CBM} = 60$ А, $F_U = 1,3 \cdot 80 = 104$ А и $F_{CP} = 80$ А, найдем, что $t_1 \approx \Delta t \approx 0,6$ мс.

При различных значениях K_3 получены осциллограммы токов нагрузки и обмотки управления при отключении геркона с устройством СО (устройство СВ при этом было отключено). Одна из этих осциллограмм при $K_3 = 1,3$ дана на рис. 12. Видно, что отключение цепи нагрузки произошло близи нуля тока. При других значениях коэффициента запаса осциллограммы были аналогичны.

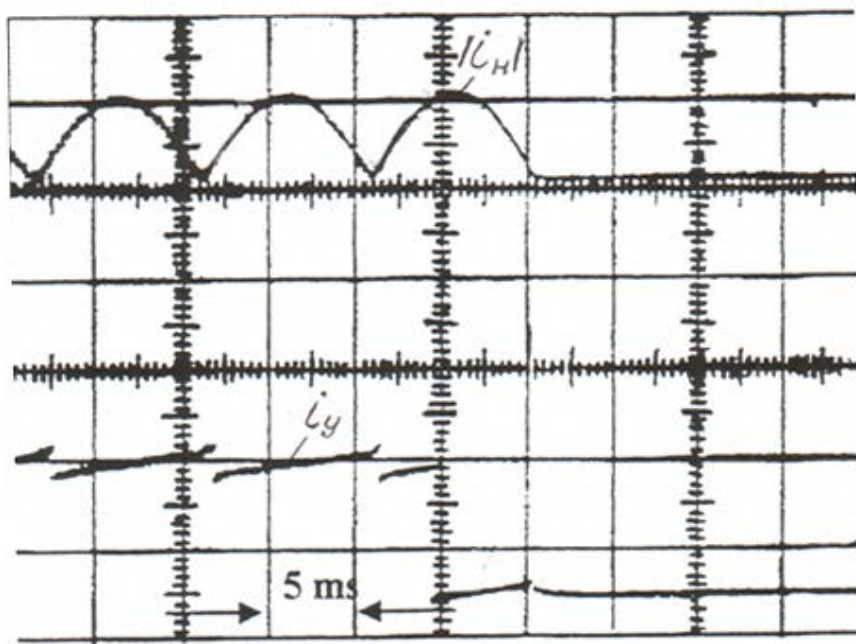


Рис. 12. Осциллограмма токов в обмотках управления и синхронного отключения при $K_3 = 1,3$ и отключенной обмотке синхронного включения

Совместная работа устройств СВ и СО проиллюстрирована осциллограммой на рис. 13, из которой следует, что коммутация как при включении, так и при отключении произошла вблизи нуля тока нагрузки.

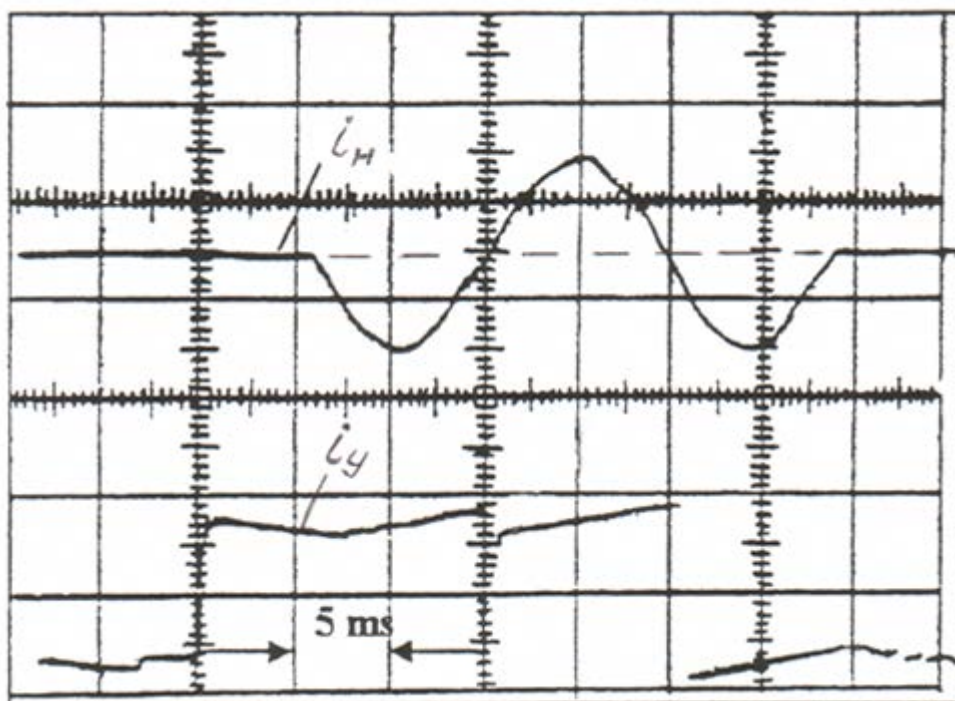


Рис. 13. Осциллограмма токов нагрузки и управления при коммутации синхронным включением и отключением геркона при $K_3 = 1,3$

На рис. 12 и 13 видны значительные (до 20 % от установившегося значения I_y) наводки в токе i_y от обмотки СО согласно закону электромагнитной индукции.

Десять герконов КЭМ-1 с золотым и родиевым контактными покрытиями были испытаны на износостойкость с синхронным управлением от устройств СВ и СО при реостатной нагрузке напряжением 127 В частотой 50 Гц и действующим значением тока $I_H = 5$ А. Частота управляющих прямоугольных импульсов от полупроводникового генератора равнялась 6 Гц.

Обмотка W_{CO} была рассчитана по наибольшему МДС отпускания для испытываемых образцов ($F_{от} = 50$ А) и току $I_d = 0,35$ А (одинаковое значение для золота и родия). Расчетное значение ($W_{CO} = 143$) было увеличено до 180 с целью снижения отключаемых токов нагрузки. Намотка W_{CO} осуществлялась проводом диаметром 1,2 мм. Обмотки W_{CB} и W_y имели по 3000 витков провода диаметром 0,1 мм. Последовательность намотки обмоток на каркас: W_{CO} , W_{CB} , W_y . Амплитуда МДС F_{CBm} устанавливалась по току i_H' несколько меньше значения F_{CP} для каждого испытываемого образца.

Герконы выдержали от 10^5 до $3 \cdot 10^6$ циклов коммутаций, причем образцы с родиевым контактным покрытием выдержали примерно в два раза больше циклов, чем с золотым покрытием. Испытания показали, что при коммутации указанной выше нагрузки без устройств СВ и СО герконы сваривались через несколько циклов.

4. Заключение

Показано, что сухие язычковые герконы могут управлять электрическими нагрузками большой мощности переменного тока частотой 50 и 60 Гц за счет применения специальных схем синхронной коммутации. При этом удастся увеличить ток нагрузки до значения, длительно пропускаемого через геркон.

Литература

1. Патент США № 3457432. Synchronous switch circuit for reed relays. / Korn R.A.
2. Патент ФРГ № 1263138. Schaltanordnung zum synchronem Abschalten von Wechselströmen. / Günther A., Burkhard E.
3. Патент ФРГ № 1263187. Magnetisch steuerbare Schalteinrichtung, insbesondere Schutzrohrankerkontakt. / Müller O.
4. Авторское свидетельство СССР № 416782. Коммутационный аппарат. / Бугаев Г.А.
5. Авторское свидетельство СССР № 670986. Устройство для синхронного отключения нагрузки. / Московский энергетический институт. Шоффа В.Н., Добряков С.А., Рыбаков С.Г.
6. Авторское свидетельство СССР № 758302. Устройство для синхронного отключения нагрузки. / Московский энергетический институт. Шоффа В.Н., Добряков С.А., Шибанов В.К., Рыбаков С.Г.
7. Авторское свидетельство СССР № 892513. Устройство для синхронного отключения нагрузки. / Московский энергетический институт. Добряков С.А., Шибанов В.К.
8. Авторское свидетельство СССР № 754508. Устройство для синхронной коммутации нагрузки. / Московский энергетический институт. Шоффа В.Н., Добряков С.А., Рыбаков С.Г.
9. Авторское свидетельство СССР № 877650. Устройство для синхронной коммутации нагрузки. / Московский энергетический институт. Шоффа В.Н., Добряков С.А., Боковиков В.К., Хромов С.В.
10. Шоффа В.Н. Определение времени срабатывания герконового реле. Труды Московского энергетического института, 1978, выпуск 381, С.52-60.