

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО СПОСОБА ТРЕНИРОВКИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ

*В.И. Соловьев, к.т.н., В.А. Коротченко, д.т.н., Ж.В. Солотенкова
390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»*

Представлены результаты исследования особенностей автоколебательного режима, реализуемого при использовании катушки с двумя отдельными обмотками, формирующими противоположно направленные магнитные поля, применительно к его использованию для тренировки герконов МКА 14108 без покрытия контактов.

Research results of features of the self-oscillatory mode realized at use of the coil with two separate windings, forming opposite directed magnetic fields, with reference to its use for training reed switches МКА 14108 without contact coating are presented.

Общая характеристика проблемы

Величина контактного сопротивления является одним из важных параметров герконов. Его стабильность на уровне, не превышающем, как правило, 0,1 Ом обеспечивается нанесением на поверхности контактов соответствующих покрытий (золото, родий, их сплавы и др.). В ряде же случаев практического применения при отсутствии жестких требований к величине и стабильности сопротивления (например, в высокоомных цепях) появляется целесообразность использования герконов без покрытия контактов, что значительно упрощает технологию и снижает себестоимость изделий [1]. При отсутствии покрытия величина сопротивления и её разброс от геркона к геркону существенно увеличиваются. Однако после специальной тренировки они могут быть уменьшены до уровня, соответствующего герконам с покрытием контактов [2].

Одним из способов тренировки является включение герконов в «автоколебательный режим». Он реализуется при использовании катушки с двумя отдельными обмотками, формирующими противоположно направленные магнитные поля, причем ток в одной из обмоток коммутируется тренируемым герконом [3, 4]. В таком режиме наблюдается весьма высокая частота срабатываний геркона (до нескольких десятков килогерц), что обеспечивает существенное уменьшение и заметную стабилизацию контактного сопротивления после непродолжительной тренировки [2, 3].

Изменение состояния контактирующих поверхностей, обуславливающее эффект тренировки в процессе колебаний контактных пружин, объясняется возникновением низковольтного ($U = 10 - 20$ В) газового разряда [3], или «вакуумного пробоя» при малых (<1 мкм) значениях межэлектродного расстояния [2]. При этих объяснениях однако не учитывалось резкое увеличение напряжения на герконе при прерывании тока, обусловленное возникновением ЭДС самоиндукции на обмотке, включенной последовательно с герконом. Как показала практика, напряжение оказывается весьма значительным (до 300 – 400В), что может существенно влиять на физический механизм тренировки. В связи с этим в рамках настоящей работы проведено более детальное изучение особенностей электрического режима автоколебаний применительно к герконам МКА-14108 (без покрытия контактов).

1. Исследование особенностей автоколебательного режима

1.1. Методика исследования

Электрическая схема включения геркона в автоколебательный режим, используемая в данных исследованиях, приведена на рис. 1.

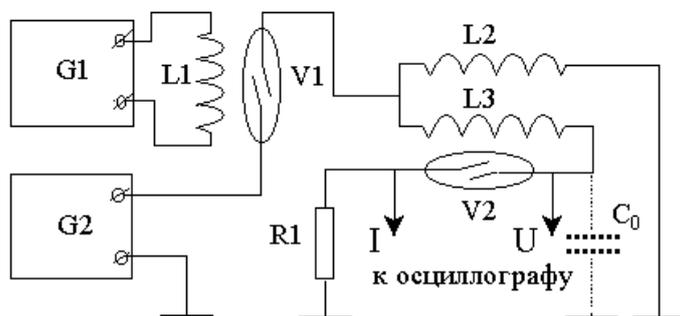


Рис. 1. Схема включения геркона: V1, L1 – коммутирующий геркон и катушка его управления; V2 – исследуемый геркон; L2 и L3 – обмотки сдвоенной катушки; G1 – генератор прямоугольных импульсов Г5-63; G2 – источник напряжения; R1 – токовый шунт; C₀ – конструктивная (паразитная) или специально подключаемая емкость

Автоколебательный режим включался на определенный промежуток времени, задаваемый длительностью одиночного импульса напряжения (от генератора Г5-63), который подавался на управляющую катушку L1 геркона V1. Импульсы напряжения и тока, возникающие в процессе автоколебаний, фиксировались цифровым двухканальным осциллографом АСК-3106 (полоса пропускания 100 МГц, минимальный временной промежуток между выборками 10 нс). Напряжение на осциллограф подавалось через делитель 1:10 ($C_{ex} = 15$ пФ, $R_{ex} = 10$ МОм). Импульсы тока снимались с шунта R1, включенного последовательно с герконом.

Параметры автоколебательного режима анализировались для трех типов катушек, отличающихся соотношением числа витков внутренней и внешней обмоток при их общем количестве 5000.

1.2. Результаты исследования

Устойчивые автоколебания в используемой здесь схеме (рис. 1) возникали только в случае, когда замыкающей являлась внешняя обмотка, а внутренняя в качестве размыкающей включалась последовательно с герконом. Это обусловлено тем, что напряженность магнитного поля, создаваемого обмотками, при их питании от одного источника напряжения практически не зависит от числа витков, а внутренняя обмотка с меньшей величиной среднего радиуса витков создает более сильное магнитное поле.

Типичные осциллограммы, иллюстрирующие изменения напряжения на герконе и протекающего через него тока в автоколебательном режиме, представлены на рис. 2.

После замыкания контактов обмоткой катушки L2 ток через геркон и последовательно включенную с ним обмотку L3 сравнительно медленно возрастает до определенной величины, при которой контакты размыкаются. В результате обрыва тока возникает явление самоиндукции, и напряжение на герконе резко увеличивается. Напряженность магнитного поля размыкающей обмотки уменьшается, и контакты снова замыкаются за счет тока в обмотке L2. Далее процесс повторяется со сравнительно высокой (до 10 – 20 кГц) частотой. Частота повторения является далеко не регулярной, поэтому можно говорить лишь о средней частоте F_{cp} .

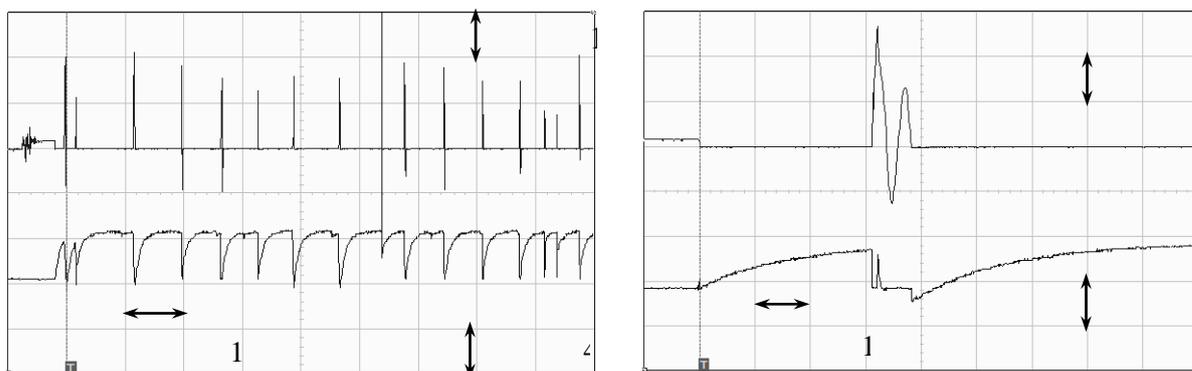


Рис. 2. Изменения напряжения на герконе и тока через него в процессе автоколебаний: напряжение источника 15 В

Частота автоколебаний $F_{\text{ср}}$ слабо зависит от напряжения источника (рис. 3, а), поскольку с его увеличением повышаются как скорость роста тока в размыкающей обмотке, так и его уровень, соответствующий размыканию.

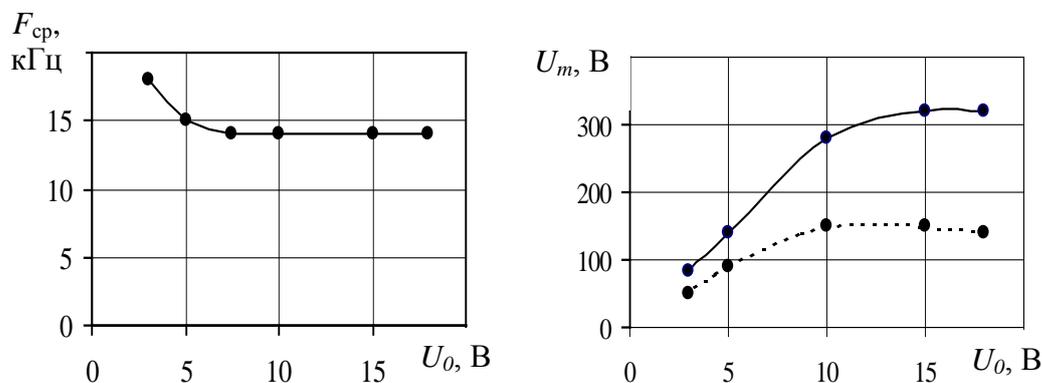


Рис. 3. Зависимости средней частоты автоколебаний $F_{\text{ср}}$ и максимальных положительных и отрицательных амплитуд напряжения U_m от напряжения источника для катушки № 1 (табл. 1)

Помимо частоты автоколебаний важным параметром процесса является величина напряжения, возникающего на герконе при размыкании контактов. После разрыва контактов ток обмотки начинает заряжать шунтирующую геркон паразитную (конструктивную) емкость, которая вместе с индуктивностью размыкающей обмотки образует колебательный контур. Ударное возбуждение контура приводит к возникновению в нем затухающих колебаний напряжения (рис. 2). При больших потерях энергии в контуре (на активных сопротивлениях индуктивно связанных обмоток, при пробоях между контактами геркона) колебания могут проявляться в виде одной полуволны.

Как видно из рис. 3, значения максимальных положительных и отрицательных амплитуд напряжения U_m более чем на порядок превышают напряжение источника питания U_0 . При увеличении U_0 от 5 В до 10 В амплитуда U_m возрастает практически линейно до 300 В (положительная полуволна) и до 160 В (отрицательная полуволна). При дальнейшем росте напряжения U_0 в связи с возникновением газового разряда амплитуда положительных импульсов практически перестает расти, ограничиваясь на уровне 300 – 400 В, амплитуда отрицательных полуволн в связи с ростом потерь уменьшается.

Параметры автоколебательного режима $F_{\text{ср}}$ и U_m зависят от типа управляющей катушки и особенно заметно от варианта соединения ее выводов (табл. 1). Когда к геркону подключается наружный вывод внутренней обмотки, к паразитной емкости добавляется

значительная по величине емкость конденсатора, образованного двумя обмотками. (Например, переключение выводов обмотки у катушки № 1 изменяло значение емкости с 65 пФ до 300 пФ. Амплитуда напряжения U_m при этом уменьшалась примерно в 2 раза, а длительность его первой полуволны увеличивалась в 2 раза).

Таблица 1

Параметры автоколебательного режима одного из герконов

Номер катушки		1	2	3
Число витков внутренней и наружной обмоток		2000 3000	3000 2000	2500 2500
Величина емкости C_0 при двух вариантах соединения выводов обмотки, пФ		65 300	45 370	42 320
Результирующая индуктивность внутренней обмотки L_2 , мГн		7,6	22	15
Частота автоколебаний F_{cp} , кГц		15(14) 14(12)	11 (10) 10(8)	14 (13) 11(9)
Амплитуда напряжения U_m , В	Положительная полярность	140 (280) 60(120)	120 (240) 40(90)	130 (260) 56(110)
	Отрицательная полярность	95(150) 45(90)	90(140) 20(45)	90 (150) 30(50)
Длительность положительной полуволны напряжения, мкс		2,4 5,2	3 10	2,7 7,7

Примечание. Величина C_0 , включающая емкость измерительной цепи (15 пФ), оценивалась по изменению периода наблюдаемого колебательного процесса T при подключении внешнего конденсатора известной емкости. Результирующая индуктивность L_2 , учитывающая наличие индуктивной и емкостной связей двух обмоток, определялась по результатам измерения T . Напряжение источника U_0 : 5 В – левые цифры; 10 В – правые в скобках. Цифры в верхних рядах соответствуют меньшей величине C_0 .

Как видно из табл. 1, F_{cp} и U_m возрастают с уменьшением числа витков и, соответственно, индуктивности и сопротивления внутренней (размыкающей) обмотки. С уменьшением индуктивности и сопротивления увеличивается скорость нарастания тока в размыкающей обмотке и соответственно уменьшается время достижения уровня, необходимого для размыкания контактов. В силу инерционности акта размыкания ток, нарастающий с большей скоростью, достигает большей величины перед непосредственным разрывом контакта. Как следствие, увеличивается напряжение самоиндукции U_m .

Влияние величины емкости, шунтирующей геркон, исследовалось путем подключения к нему внешних конденсаторов. В табл. 2 представлены результаты измерения амплитуды импульсов напряжения U_m , времени его нарастания до амплитудного значения (четверть периода колебаний T), энергии W_C , запасаемой в конденсаторе, и частоты автоколебаний F_{cp} , полученные при напряжении источника $U_0 = 5$ В для катушки № 1. (Цифры в скобках соответствуют варианту соединения выводов ее обмоток, соответствующему меньшей величине конструктивной емкости C_0).

Зависимость параметров автоколебаний от емкости конденсатора С

C , пФ	U_m , В	$T/4$, мкс	W_C , мкДж	F_{cp} , кГц
$C_0 + 0$	66 (136)	2,4 (1,1)	0,65 (0,6)	14 (14,5)
$C_0 + 130$	56 (84)	2,9 (1,9)	0,67 (0,68)	13 (13,5)
$C_0 + 560$	40 (48)	4 (3,4)	0,69 (0,7)	11 (11,5)

Представленные данные показывают, что энергия W_C практически не зависит от величины шунтирующей геркон емкости, поскольку определяется энергией W_L , запасаемой в обмотке перед разрывом контактов. При индуктивности $L_2 = 76$ мГн (табл. 1) и максимальном токе I_m , соответствующем напряжению 5 В, энергия W_L ($W_L = 0,5LI_m^2$, $I_m = U_0/R_L = 5В/256 Ом = 20 мА$) составляет около 1,5 мкДж. Энергия W_C , перекачиваемая в емкость, заметно меньше (0,6 – 0,7 мкДж). Часть W_L теряется на активных сопротивлениях индуктивно связанных обмоток, а разрыв контакта происходит при меньшей величине тока. С увеличением U_0 энергия W_L будет расти пропорционально квадрату его величины и при 15 В должна увеличиться почти на порядок, т.е. составить примерно 15 мкДж.

2. Анализ процессов в межэлектродном промежутке при автоколебаниях

Анализ осциллограмм тока и напряжения на герконе во время автоколебаний показывает следующую картину процессов, происходящих в межэлектродном промежутке.

1) Подавляющую часть периода автоколебаний геркон находится в замкнутом состоянии и пропускает нарастающий во времени ток. Причина малой (не более 10 мкс) продолжительности разомкнутого состояния обусловлена тем, что, с одной стороны, через четверть периода колебаний (порядка микросекунд) направление тока в размыкающей обмотке изменяется на противоположное (рис. 4), и магнитное поле суммируется с полем замыкающей обмотки.

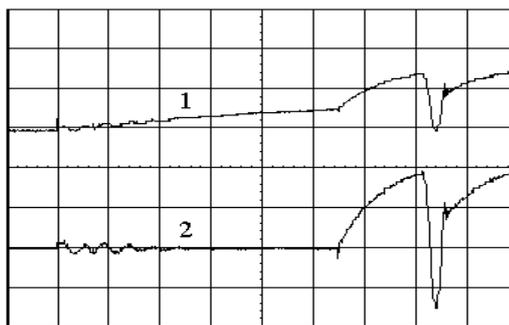


Рис. 4. Токи в замыкающей (1) и размыкающей (2) обмотках катушки №1.
Напряжение источника 15 В, цена деления: 20 мА, 20 мкс

С другой стороны, быстрый рост напряжения на размыкающихся контактах приводит к появлению значительных по величине электростатических сил, препятствующих процессу размыкания.

2) При размыкании электродов и непосредственно перед их замыканием возникают кратковременные (менее 10 нс) броски тока, обуславливающие разряд емкости, шунтирующей геркон. На рис. 5а после первых трех всплесков (первый не зафиксирован осциллографом) ток геркона остается на нулевом уровне, т.е. он продолжает находиться в

разомкнутом состоянии. Четвертый всплеск происходит непосредственно перед замыканием геркона, о чем свидетельствует последующее нарастание тока через геркон.

Амплитуда импульсов тока определяется напряжением на промежутке в момент их появления и сопротивлением шунта $R1$ (рис. 1). При $R1 = 50$ Ом максимальная регистрируемая величина тока составляла примерно 1 А, при сопротивлении 1 Ом – несколько ампер.

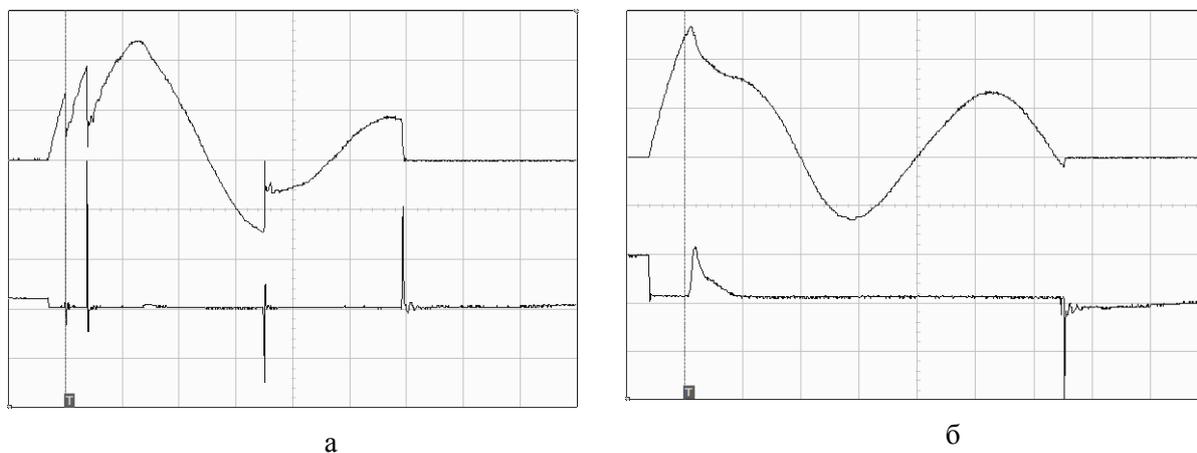


Рис. 5. Изменения напряжения на герконе (вверху) и тока через него в процессе автоколебаний. Катушка № 1, напряжение 15 В. Цена деления: напряжение –100 В; ток –200 мА (а); 40 мА (б); длительность 1 мкс

Кратковременные броски тока, скорее всего, обусловлены появлением автоэлектронной эмиссии и, возможно, стимулируемой ею разрядом типа вакуумного пробоя. При напряжении более 100 В достаточная для появления автоэлектронной эмиссии напряженность электрического поля (10^6 В/см) обеспечивается при микронных зазорах между контактами. На стадии их размыкания появление такой напряженности обусловлено превышением скорости роста напряжения по сравнению со скоростью увеличения зазора. При замыкании контактов появление автоэлектронного тока может иметь место при значительно более низких напряжениях вплоть до значений, соответствующих напряжению источника питания.

При увеличении шунтирующей геркон емкости свыше 200 пФ (за счет подключения внешнего конденсатора или при варианте включения обмоток, соответствующем подключению емкости между обмотками) и, соответственно, уменьшении скорости нарастания напряжения на герконе, пробой возникает преимущественно на стадии замыкания.

3) При напряжениях более 300 В кроме кратковременных всплесков тока наблюдаются осциллограммы, свидетельствующие о возникновении тлеющего газового разряда с характерным для него падением напряжения на промежутке около 200 – 250 В (рис. 5, б) и током порядка нескольких десятков миллиампер. Возникновение этого разряда, как уже отмечалось, ограничивает величину напряжения на герконе в процессе автоколебаний на уровне 300 – 400 В.

3. Исследование динамики автоколебательной тренировки

3.1. Методика исследования

Автоколебательная тренировка осуществлялась как с использованием источника постоянного напряжения, так и переменного напряжения частотой 50 Гц. В случае источника постоянного напряжения имелась возможность подробного изучения динамики процесса тренировки, начиная с минимальной ее продолжительности в доли миллисекунды. При использовании переменного напряжения регистрируемые временные промежутки составляли не менее одной секунды. После каждого временного промежутка тренировки измерялось контактное сопротивление. С целью оценки его стабильности измерения повторялись не менее 10 раз.

3.2. Результаты исследования

Типичные зависимости контактного сопротивления от продолжительности тренировки (рис. 6) показывают, что уже после непродолжительной (10 – 100 мс) тренировки сопротивление существенно уменьшается (до менее 0,1 Ом), однако его величина остается еще весьма нестабильной. При дальнейшем увеличении продолжительности тренировки скорость уменьшения сопротивления существенно замедляется, но одновременно возрастает его стабильность. Практически не изменяющаяся от измерения к измерению величина достигается после 2-3 минут и устанавливается на уровне 50 – 70 мОм, соответствующем герконам с покрытием контактов.

Динамика тренировки с использованием катушек № 1, 2, 3, отличающихся соотношением числа витков обмоток при одинаковом их суммарном числе (5000), примерно одинаковая. Тем не менее, несколько лучшие результаты соответствовали катушке № 2, хотя частота автоколебаний здесь наиболее низкая (примерно в полтора раза ниже, чем для катушки № 1). Параметры этой катушки, по-видимому, являются более оптимальными в отношении энергии, выделяющейся в промежутке в процессе автоколебаний.

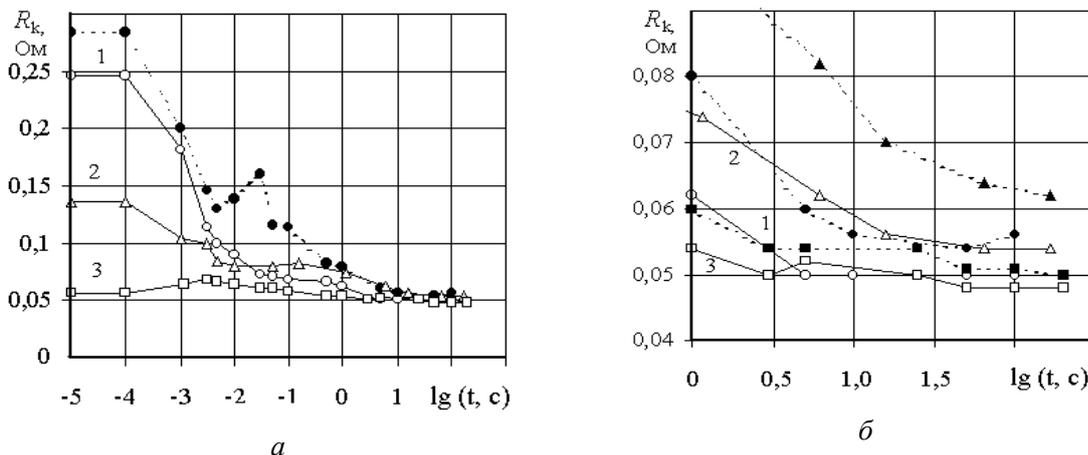


Рис. 6. Зависимости контактного сопротивления R_k от продолжительности тренировки для трех герконов, отличающихся значениями исходного сопротивления.

Рис.6 б – увеличенный фрагмент рис.6 а. Сплошные кривые - результаты первого из десяти измерения сопротивления, пунктирные – максимальное значение из десяти измерений (на рис. 6, а разброс значений R_k приведен только для геркона 1). Условия эксперимента: катушка № 1, напряжение источника 15 В, вариант соединения выводов соответствует величине $C0 = 65$ пФ.

Следует отметить, что при использовании постоянного напряжения по сравнению с переменным одинаковой величины отмечается более высокая скорость тренировки (рис. 7) и более низкий уровень сопротивления. Так, сопротивление герконов, оттренированных на

переменном напряжении до стабилизированного уровня 0,052 – 0,072 Ом, после последующей тренировки уже на постоянном напряжении снижалось до 0,044 – 0,05 Ом.

Возможное объяснение результатов эксперимента состоит в следующем. При использовании однополярного источника поверхность одного из контактов подвергается более интенсивному воздействию разрядных процессов, что обуславливает преимущественный перенос материала с одного из электродов на другой. (При числе актов размыкания и замыкания порядка 10^7 , на поверхности отрицательного электрода наблюдалось появление некоторого возвышения). Не исключено, что при этом в результате изменения профилей поверхностей электродов может увеличиваться размер площади непосредственного контактирования и, кроме того, в результате одностороннего переноса материала контактирующие участки поверхностей обоих электродов в конечном итоге становятся чисто металлическими. При переменном напряжении в результате равнонаправленного переноса материала полной очистки контактной области от компонентов исходного приповерхностного слоя не происходит.

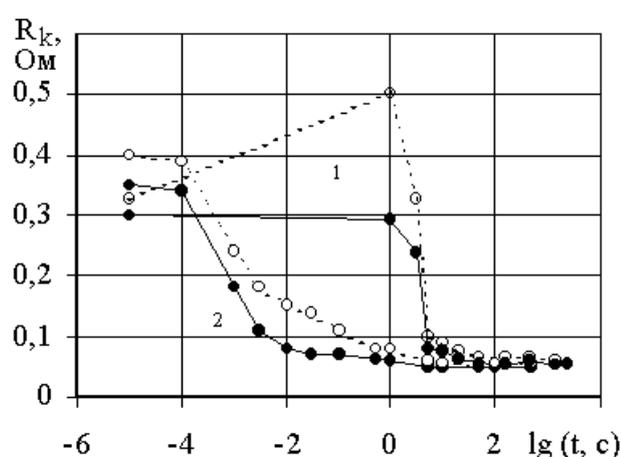


Рис. 7. Зависимости контактного сопротивления R_k от продолжительности тренировки при использовании источников переменного напряжения 13 В (кривые 1) и постоянного напряжения 15 В (кривые 2). Сплошные кривые – результаты первого измерения сопротивления, пунктирные кривые – максимальные значения из десяти измерений

4. Роль различных факторов в механизме автоколебательной тренировки

Изменение свойств поверхности в зоне контактирования, приводящее к уменьшению контактного сопротивления герконов в процессе автоколебаний, может быть обусловлено следующими факторами:

- механическим воздействием при соударениях электродов;
- изменением свойств поверхности под действием газового разряда;
- процессами, сопровождающими возникновение автоэлектронного тока при размыкании и замыкании контактов.

4.1. Оценка роли механических воздействий

Основанием для выяснения возможной роли механического фактора служит то обстоятельство, что так называемая «сухая тренировка», при которой замыкание и размыкание контактов осуществляется без пропуска тока, используется для уменьшения контактного сопротивления при производстве некоторых типов герконов.

Такая тренировка в бестоковом режиме была выполнена на нескольких герконах без контактного покрытия. Проведенные исследования не показали однозначных результатов: для некоторых герконов контактное сопротивление после тренировки уменьшалось, для других – увеличивалось (иногда катастрофически – до 100 Ом и более). Столь неоднозначные результаты «сухой тренировки», а также наблюдаемые случаи роста сопротивления с увеличением частоты замыканий позволяют с определенной уверенностью считать, что механические соударения не играют существенной роли при тренировке герконов в автоколебательном режиме. К тому же энергия, выделяющаяся при соударениях из-за очень малых (микронных) амплитуд автоколебаний электродов, значительно меньше, чем в условиях «сухой тренировки».

4.2. Оценка роли газового разряда

С целью выяснения роли газового разряда в автоколебательном механизме тренировки герконов исследовалась динамика изменения контактного сопротивления в процессе обработки электродов тлеющим разрядом. В экспериментах использовался генератор переменного напряжения с амплитудой до 400 В и частотой, регулируемой в диапазоне 20 Гц – 20 кГц. Величина ограничительного сопротивления – 15 кОм, сопротивление шунта для измерения тока – 50 Ом.

Осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда приведены на рис. 8. Их вид указывает на наличие тлеющего разряда с падением напряжения около 250 В и напряжением зажигания около 400 В. Динамика изменения контактного сопротивления в процессе обработки электродов газовым разрядом представлена на рис. 9.

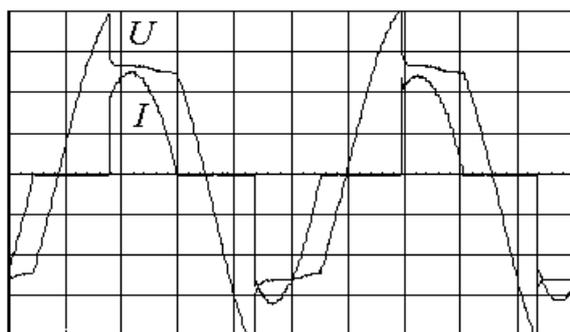


Рис. 8. Осциллограммы напряжения (U) и разрядного тока (I). Цена деления: 100 В; 4 мА; 2 мс. Ограничительное сопротивление 15 кОм

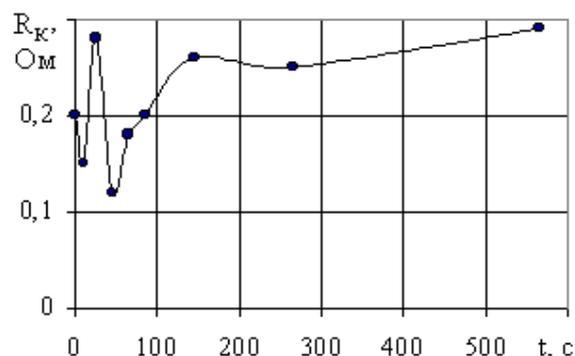


Рис. 9. Зависимость сопротивления R_k от времени обработки электродов тлеющим разрядом в условиях, соответствующих рис. 8

Как следует из представленного графика, контактное сопротивление после обработки в течение 500 секунд не уменьшилось, а возросло с 0,2 до 0,28 Ом, тогда как после тренировки в автоколебательном режиме такой же продолжительности оно уменьшилось до 0,07 Ом (рис. 6, 7). Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффект тренировки не связан с возникновением газового разряда. На это указывает также и то, что уменьшение сопротивления в процессе автоколебаний происходит и в условиях, когда амплитуда возникающего на герконе напряжения не превышает напряжение зажигания разряда.

4.3. Оценка роли процессов, обусловленных возникновением автоэлектронной эмиссии

Для выяснения этой роли размыкающая обмотка шунтировалась полупроводниковым диодом (рис. 10).

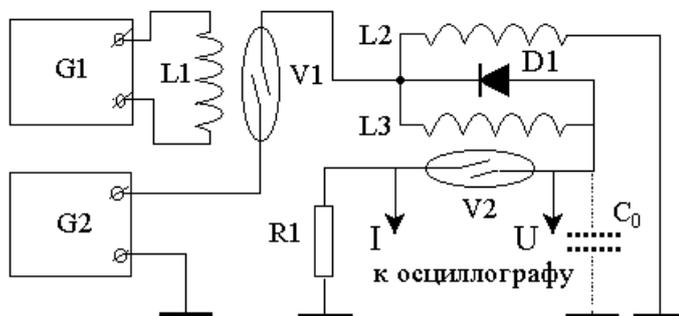


Рис. 10. Схема включения диода $D1$, шунтирующего замыкающую обмотку катушки управления. Описание остальных элементов схемы представлено на рис. 1

Диод, пропуская через себя ток обмотки после разрыва контакта, «разряжает» индуктивность без возникновения ЭДС самоиндукции. Как следует из представленных осциллограмм (рис. 11), после размыкания контактов напряжение на герконе практически не превышает напряжение источника питания. При столь значительном снижении напряжения (с 200 – 400 В до напряжения источника питания 5 – 10 В) броски тока, обусловленные автоэлектронной эмиссией, возникают лишь на стадии замыкания контактов при уменьшении межэлектродного расстояния до долей микрона (рис. 10), а выделяющаяся при этом энергия уменьшается более чем на два порядка.

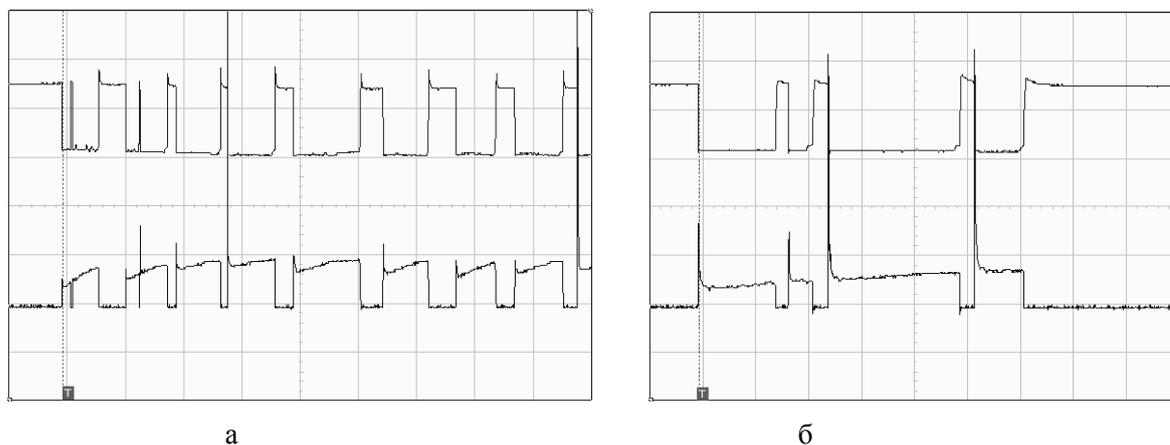


Рис. 11. Осциллограммы напряжения (вверху) и тока в процессе автоколебаний при шунтировании размыкающей обмотки катушки № 1 полупроводниковым диодом. Напряжение источника питания 15 В, полярность положительная. Цена деления: напряжение – 10 В; ток – 50 мА; развертка – 50 мкс (а); 5 мкс (б)

Динамика изменения контактного сопротивления в процессе тренировки герконов в автоколебательном режиме при наличии и отсутствии диода представлена на рис. 12, 13.

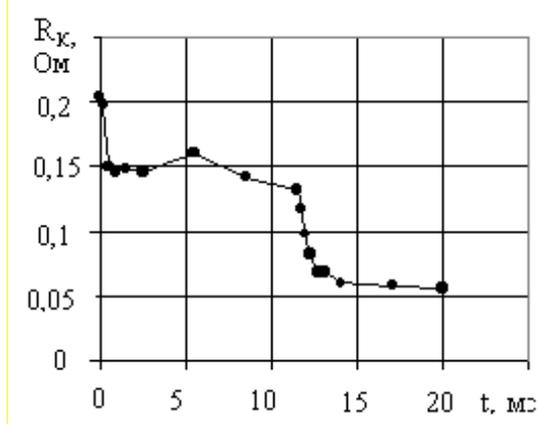


Рис. 12. Изменение контактного сопротивления R_k в процессе автоколебательной тренировки при шунтировании размыкающей обмотки диодом (до 11 мс) и после его отключения.

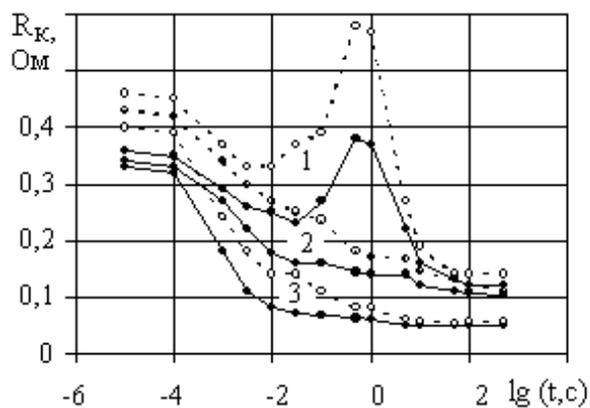


Рис. 13. Зависимости сопротивления R_k от времени тренировки: катушка № 1; напряжение источника 15 В; кривые 1, 2 – обмотка шунтирована диодом; кривые 3 – без диода. Сплошные кривые – первое измерение сопротивления, пунктирные кривые – максимальные значения из десяти измерений

Видно, что шунтирование размыкающей обмотки диодом резко снижает эффект тренировки. На рис. 12 это проявляется в виде быстрого уменьшения сопротивления после отключения диода. На рис. 13 кривые 3 (без диода) расположены значительно ниже кривых 1 и 2 в области более малых значений контактного сопротивления.

При отсутствии диода, когда размыкание контактов сопровождается появлением на герконе напряжения в несколько сотен вольт, автоэлектронные броски тока возникают не только при замыкании контактов, но и на стадии размыкания, причем в виде целой серии (рис. 5). Существенное увеличение как частоты их возникновения, так и выделяющейся при этом энергии обеспечивает соответственно значительное уменьшение времени тренировки и достигаемого в итоге уровня сопротивления. Так, если при наличии диода стабильное сопротивление (около 0,1 Ом) достигается через 100 секунд тренировки (рис. 13), то без диода это время уменьшается до долей секунды, а величина сопротивления в процессе тренировки стабилизируется на заметно меньшем уровне (до 0,05 Ом).

Эти результаты свидетельствуют о существенной роли в механизме тренировки процессов, возникающих при размыкании контактов. На это указывают и результаты исследования влияния величины емкости, шунтирующей геркон. При ее величине более 200 пФ (подключение внешнего конденсатора или емкости между обмотками при соответствующем варианте их соединения), когда броски тока на стадии размыкания практически не возникали (из-за уменьшения скорости нарастания напряжения на размыкающемся герконе), динамика тренировки с использованием практически всех катушек замедлялась. Более того, на некоторых ее этапах даже наблюдалось увеличение сопротивления, а через некоторое время, уменьшающееся с увеличением емкости (1-2 секунды при 200 пФ и напряжении источника 15 В), автоколебательная тренировка заканчивалась залипанием контактов.

5. Основные результаты

- Необходимым условием возбуждения автоколебаний в схеме, содержащей геркон и катушку с двумя обмотками, является включение внутренней обмотки в качестве размыкающей последовательно с герконом.

- Средняя частота автоколебаний слабо зависит от напряжения источника и возрастает с уменьшением числа витков внутренней размыкающей обмотки с 8–11 кГц при числе витков 3000 до 12–15 кГц при числе витков 2000.

- Размыкание контактов в процессе автоколебаний сопровождается возникновением на герконе высокого (сотни вольт) напряжения. Возникающее напряжение имеет вид быстро затухающих колебаний, амплитуда которых возрастает с увеличением напряжения источника и с уменьшением шунтирующей геркон емкости. Последняя изменяется в широких пределах (40 – 370 пФ) в зависимости от типа катушки и, особенно, от варианта подключения выводов размыкающей обмотки к геркону.

- Появление высокого напряжения приводит к возникновению серий кратковременных бросков тока (до нескольких ампер при длительности менее 10 нс), которые обеспечиваются разрядом паразитной емкости. Они возникают как на стадии размыкания контактов, так и перед их замыканием. При амплитуде импульсов напряжения более 300 – 400 В, в промежутке загорается газовый разряд с напряжением горения около 250 В.

- Тренировка герконов МКА-14108 в автоколебательном режиме обеспечивает снижение контактного сопротивления до величины менее 0,1 Ом примерно за 0,1 – 1 с. Для стабилизации сопротивления на уровне 0,05 – 0,07 Ом, соответствующего герконам с покрытием контактов, продолжительность тренировки должна составлять не менее 2-3 минут.

- Определяющую роль в механизме автоколебательной тренировки играют процессы, обусловленные возникновением автоэлектронного тока при размыкании контактов. Их исключение в результате шунтирования размыкающей обмотки полупроводниковым диодом или увеличением шунтирующей геркон емкости резко снижает эффективность и увеличивает продолжительность тренировки.

- Автоколебательная тренировка герконов МКА-14108 при использовании источника переменного (50 Гц) напряжения менее эффективна по сравнению с тренировкой при однополярном источнике.

Литература

1. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н., Саблин В.А. Модификация поверхности герметизированных магнитоуправляемых пермалловых контактов импульсными разрядами. // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. / Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции, Россия, Рязань, 1-3 октября 2008 г. – С.174-177.
2. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Саблин В.А. Исследование и разработка методов модификации поверхности герметизированных магнитоуправляемых контактов. // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. / Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции, Россия, Рязань, 1-3 октября 2008 г. – С.184-207.
3. Удалов В.Ф., Ермаков В.М., Игнатов А.И. Ускоренные испытания и тренировки герконов с помощью различных режимов автоколебаний. Герметизированные магнитоуправляемые контакты // Герконы; Межвуз. сб-к научн. трудов. – Рязань, РРТИ. 1975, вып. 4, с. 81-87.
4. Удалов В.Ф., Игнатов А.И., Ермаков В.М. Авторское свидетельство СССР № 624307, 1977.