

Б.В. Клименко, А.В. Ересько, И.С. Варшамова, Н.А. Лелюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСНЫХ РЕЛЕ В СИСТЕМАХ ГИБРИДНОЙ КОММУТАЦИИ ОБМОТОК БИСТАБИЛЬНЫХ АКТУАТОРОВ

Представлені результати експериментальних досліджень деренчання контактів інтерфейсних реле при виконанні операцій їх вмикання та вимикання в нормальному режимі та в режимі прискорення спрацьовування. Наводяться рекомендації щодо практичного застосування малогабаритних інтерфейсних реле в системах керування комутаційних апаратів з гібридною комутацією електричних кіл обмоток бістабільних актуаторів. Бібл. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: бістабільні актуатори, інтерфейсні реле, деренчання контактів, гібридна комутація.

Представлены результаты экспериментальных исследований дребезга контактов интерфейсных реле при выполнении операций их включения и отключения в нормальном режиме и в режиме ускорения срабатывания. Приводятся рекомендации по применению малогабаритных интерфейсных реле в системах управления коммутационных аппаратов с гибридной коммутацией электрических цепей обмоток бистабильных актуаторов. Библ. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: бистабильные актуаторы, интерфейсные реле, дребезг контактов, гибридная коммутация.

Введение. Вакуумные коммутационные аппараты для сетей средних напряжений занимают доминирующие позиции в соответствующем сегменте рынка, а в сегменте контакторов средних напряжений доля вакуумных аппаратов превышает 90 %. Изобретение высококоэрцитивных постоянных магнитов (Масато Сагава, 1982 г.), а также успехи в создании микропроцессорных устройств и мощных электролитических конденсаторов позволили создать коммутационные аппараты с высоконадежными электромагнитными приводами (например, аппараты компании ABB – выключатели VM1 и контакторы VSC), которые обеспечивают необходимые силовые характеристики и практически не потребляют энергию после выполнения операций включения и отключения. В этих аппаратах применяются бистабильные поляризованные актуаторы с двумя катушками [1], а для управления их обмотками – микропроцессорная система с полупроводниковыми коммутационными элементами – силовым транзистором и двумя тиристорами (рис. 1).

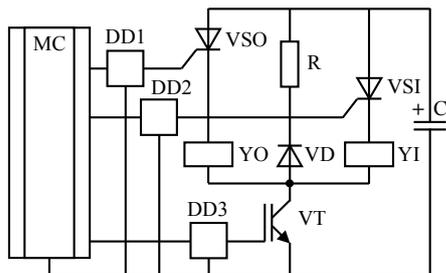


Рис. 1. Схема силовой цепи системы управления обмотками актуаторов коммутационных аппаратов ABB: YI, YO – обмотки включения и отключения; VT – силовой транзистор; VSI, VSO – тиристоры, коммутирующие цепи соответствующих обмоток; VD – диод; R – резистор; DD1 ... DD3 – драйверы; MC – микроконтроллер; C – электролитический конденсатор

При выполнении операции включения микроконтроллер MC через драйвер DD3 подает управляющий сигнал на затвор транзистора VT и через драйвер DD2 короткий импульс тока на управляющий электрод тиристора VSI, в результате чего обмотка включения YI актуатора подключается к источнику питания, роль которого выполняет накопительный электролитический конденсатор C, предварительно заряженный через преобразователь (на схеме не показан) до напряжения U_C . При этом тиристор остается

открытым и после завершения действия управляющего импульса. В некоторый момент времени якорь актуатора трогается с места и после окончания его движения по команде датчика положения контроллер прекращает подачу управляющего сигнала на транзистор, в результате чего тот запирается практически мгновенно, а тиристор остается в открытом состоянии, поскольку в этот момент открывается диод VD и ток в обмотке YI, замыкаясь через тиристор VSI, диод VD, и резистор R, начинает спадать по кривой, близкой к экспоненциальной, до момента его снижения ниже уровня тока удержания тиристора VSI. В этот момент тиристор VSI запирается, одновременно с ним запирается и диод VD, после чего устройство готово к выполнению следующей операции – операции выключения, которая выполняется аналогично операции включения, но посредством подключения к конденсатору C обмотки YO с помощью транзистора VT и тиристора VSO.

Определенным недостатком рассмотренной системы управления является необходимость выдерживать некоторую паузу между операциями, то есть между моментом запирающего одного из тиристор (VSI или VSO в зависимости от последовательности операций) и отпирающего транзистора VT при выполнении последующей операции. Факт запирающего тиристора сложно проконтролировать, поэтому алгоритм управления обмотками должен предполагать достаточно длительную паузу (несколько десятков миллисекунд) между операциями, иначе подача команд на отпирание транзистора VT и тиристора VSO при открытом тиристоре VSI не приведет к отключению коммутационного аппарата и может вызвать серьезную аварию, если требуется выполнить отключение аппарата сразу же после включения его на короткозамкнутую цепь.

Поляризованный актуатор с одной катушкой [2] и возвратной пружиной существенно проще в конструктивно-технологическом отношении, однако для выполнения операций включения и отключения катушка должна создавать противонаправленные МДС, что можно обеспечить либо за счет намотки двух обмоток и управлять ими попеременно, либо за счет использования одной обмотки, включаемой в диагональ моста, образованного четырьмя силовыми коммутационными устройствами, например транзисторами.

© Б.В. Клименко, А.В. Ересько, И.С. Варшамова, Н.А. Лелюк

В системе, изображенной на рис. 2, для выполнения операции включения (I) коммутационного аппарата микроконтроллер MC через драйверы DD1 и DD2 выдает сигналы на затворы транзисторов VT2 и VT3, а при выполнении операции отключения (O) – на затворы транзисторов VT1 и VT4.

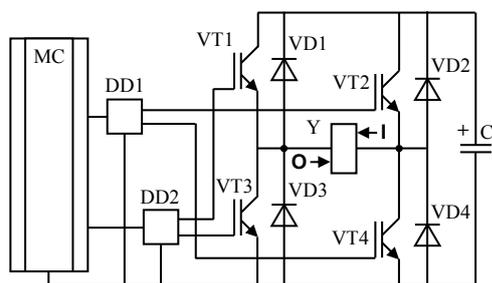


Рис. 2. Схема силовой цепи системы управления обмоткой актуатора, включенной в диагональ моста, образованного четырьмя транзисторами: Y – обмотка актуатора; VT1 ... VT4 – силовые транзисторы, управляемые через драйверы DD1 и DD2 (по одному двойному драйверу на полумост); VD1 ... VD4 – диоды, обеспечивающие рекуперацию энергии, накопленной в обмотке, в электролитический конденсатор C после запираания силовых транзисторов; MC – микроконтроллер

Силовые транзисторы и драйверы для них являются дорогостоящими элементами, поэтому представляет интерес рассмотрение возможности использования гибридной коммутации цепей обмоток актуаторов. Применительно к управлению актуатором с одной обмоткой схема силовой цепи может выглядеть, например, так, как показано на рис. 3.

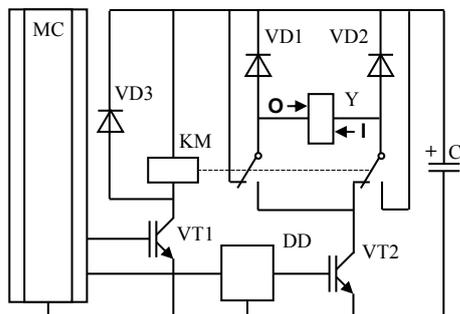


Рис. 3. Схема силовой цепи системы управления с гибридной коммутацией цепи обмотки актуатора: Y – обмотка актуатора; VT1 – маломощный транзистор, управляемый непосредственно микроконтроллером MC; VT2 – силовой транзистор, управляемый через драйвер DD; VD1 ... VD3 – диоды; C – электролитический конденсатор; KM – реле с двумя переключающими контактными группами

Гибридная коммутация электрических цепей, предполагающая наличие в коммутационных аппаратах как механических (контактных), так и полупроводниковых коммутационных элементов, является одним из перспективных направлений развития электрических аппаратов [3 – 6], соединяющих достоинства коммутации цепей с помощью механических и полупроводниковых коммутационных элементов. При этом гибридная коммутация используется, в первую очередь, для увеличения отключающей способности и электрической износостойкости аппаратов, выполняющих операции включения и отключения. В гибридных коммутаторах цепей обмоток актуаторов, в отличие от обычных коммутационных аппаратов, функции включения и отключения тока выполняет только полупроводниковый коммутационный элемент (транзистор), а механические коммутационные элементы

(контактные группы реле) выполняют функции маршрутизатора, переключая электрические цепи во время бестоковых пауз. Применение гибридных коммутаторов этого типа взамен соответствующих полупроводниковых ключей позволит существенно удешевить системы управления актуаторами, а также уменьшить их размеры. Данное направление гибридной коммутации является относительно новым, поэтому изучение особенностей процессов, возникающих при такой коммутации, имеют определенные перспективы, как в теоретическом, так и в практическом плане.

Цель работы. Алгоритм управления обмоткой реле и силовым транзистором, задаваемый микроконтроллером, должен четко координировать их работу и не допускать размыканий контактов реле при открытом транзисторе, чтобы предотвратить появление дуги на контактах реле. Любая коммутационная операция в электромагнитных реле сопровождается дребезгом контактов, что обусловлено особенностями конструкции их контактных систем. Координация работы реле и силового транзистора должна учитывать и этот фактор – транзистор должен быть открыт не раньше, чем закончится дребезг контактов, то есть не раньше, чем операция включения или отключения реле закончится полностью. Производители реле не приводят в спецификациях такую характеристику как длительность полностью завершённой операции включения и отключения с учетом дребезга контактов, сопровождающего операцию, что не позволяет применять реле в системах гибридной коммутации под гарантии производителей. Применяя то или иное реле в системе гибридной коммутации, производитель коммутационного аппарата должен опираться на достоверные результаты экспериментальных исследований, учитывающих случайные составляющие временных характеристик реле. При этом в основе эксперимента должна лежать определенная методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора при выполнении операций включения и выключения коммутационного аппарата, разработкой которой является одной из целей данной работы.

Другой целью является разработка рекомендаций относительно уменьшения длительности данных интервалов, поскольку их сокращение способствует повышению быстродействия – одной из важнейших характеристик коммутационного аппарата.

Методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора. Алгоритм управления транзисторами VT1 и VT2 в рассматриваемой системе (рис. 3) предполагает, что при любом коммутационном состоянии аппарата транзистор VT1 изначально обязательно должен быть заперт. Это означает, что после полного завершения операции включения коммутационного аппарата, если вслед за этим в течение некоторого наперед заданного промежутка времени Δt , достаточного для того, чтобы ток в обмотке после запираания транзистора VT2 уменьшился практически до нуля (это время определяется экспериментально и в реальных аппаратах не превосходит 100 мс) не приходит команда на отключение, микроконтроллер запирает транзистор VT1, в результате чего реле отключается, его контакты приходят в исходное состояние, подготавливая электрические цепи к выполнению последующей операции отключения. Микроконтроллер постоянно анализирует состояние коммутационного аппарата и, если команда на включение приходит, когда

аппарат включен, никаких действий не предпринимает, а если команда на включение приходит, когда аппарат отключен, то микроконтроллер выполняет два последовательных действия: 1) выдает сигнал на отпирание транзистора VT1, в результате чего включается реле KM, коммутационное состояние контактов реле изменяется, силовая цепь системы управления подготавливается к выполнению операции включения аппарата и 2) выдает сигнал на отпирание транзистора VT2, в результате чего актуатор срабатывает и аппарат включается. При выполнении операции включения аппарата силовой транзистор должен быть открыт не раньше, чем закончится дребезг контактов реле, поэтому длительность промежутка времени t_{b1} между моментами отпирания транзисторов VT1 и VT2 должна быть гарантированно больше интервала между моментом подачи напряжения на обмотку реле KM и моментом гарантированного завершения дребезга его замыкающего контакта.

Если внешняя команда на отключение аппарата приходит, когда аппарат перед этим находился во включенном состоянии дольше указанной выше длительности промежутка времени Δt , то сигнал на отпирание транзистора VT2 контроллер выдает немедленно. Если же команда на отключение поступает в процессе выполнения операции включения коммутационного аппарата, то контроллер должен прервать операцию включения, заперев транзистор VT2, дождаться от датчика положения контактов аппарата сигнала о том, что его главные контакты пришли в разомкнутое состояние (за это время ток в катушке актуатора уменьшится практически до нуля), вслед за этим запереть транзистор VT1, и выдать сигнал на отпирание транзистора VT2 не раньше, чем через промежуток времени t_{b0} между моментом запирающего транзистора VT1 и моментом гарантированного завершения дребезга замыкающего контакта реле KM.

Длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} зависят от характеристик реле, выбранного для работы в системе гибридной коммутации. Интерфейсные реле, предназначенные, в основном, для коммутации цепей автоматики, имеют привлекательно малые размеры и, в то же время, достаточно большие токовые номиналы (current ratings), превосходящие возможные значения токов в обмотках актуаторов вакуумных коммутационных аппаратов средних напряжений. Например, реле RT (Schrack, Австрия) или реле RM84 (ABB, Relpol, Польша) с размерами корпуса 29×12,7×15,7 мм и массой 14 г допускают проведение тока в непрерывном режиме до 8 А, и пикового тока до 15 А. Эти реле имеют достаточно высокое быстродействие – порядка 7 мс при включении и 2...3 мс при отключении. Здесь необходимо иметь в виду, что в каталогах приводятся значения времени отключения при механическом размыкании цепи обмотки реле, которое предполагает, что энергия, накопленная в обмотке, выделяется в межконтактном промежутке аппарата, коммутирующего эту цепь обмотки и/или в искрогасительной цепи, включенной параллельно контактам этого аппарата. Если же коммутационные операции выполняет транзистор, прерывающий ток практически мгновенно, то обмотку обязательно следует зашунтировать «размагничивающим» диодом, который автоматически открывается в момент запирающего транзистора, закорачивая выводы обмотки, вследствие чего ток плавно уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному, а накопленная энергия выделяется в сопротивлении обмотки. В результате, длительность полностью завершённой операции отключения реле возрастает с 2...3 мс (при механическом

отключении) до 16...20 мс. Важно также учитывать и тот факт, что существует статистический разброс длительностей промежутков времени t_{b1} и t_{b0} не только при составлении этих характеристик у реле из разных партий, но даже в одном и том же реле. Для определения значений t_{b1} и t_{b0} был проведен эксперимент, схема проведения которого приведена на рис. 4.

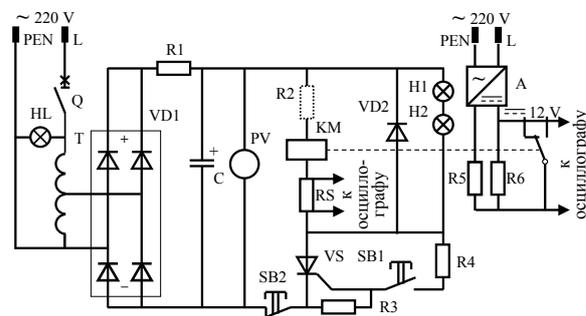


Рис. 4. Схема проведения эксперимента по определению временных интервалов Δt_{b1} и Δt_{b0} : Q – выключатель, обеспечивающий защиту от перегрузок и коротких замыканий; HL – сигнальная лампа; Т – автотрансформатор; VD1 – диодный мост; R1 – резистор, через который заряжается конденсатор С большой емкости (порядка 10000 мкФ); PV – вольтметр; KM – реле с двумя переключающими контактными группами (на схеме показана одна группа); R2 – добавочный резистор (устанавливается, если напряжение на конденсаторе превосходит номинальное напряжение катушки реле; RS – шунт для осциллографирования тока в обмотке реле; VS – тиристор; VD2 – «размагничивающий» диод; R3, R4 – резисторы цепи управления тиристора; SB1, SB2 – кнопки включения и отключения реле; H1, H2 – лампы накаливания (нагрузка тиристора); А – преобразователь; R5, R6 – делитель (регистратор дребезга контактов реле).

Методика экспериментального определения временных интервалов t_{b1} и t_{b0} предполагает указанную ниже последовательность действий.

1. Включаем выключатель Q.
2. С помощью автотрансформатора Т устанавливаем требуемое напряжение U_C источника питания реле (конденсатора С), контролируемое вольтметром PV.
3. Подготавливаем осциллограф к записи процесса.
4. Нажимаем на кнопку SB1 и фиксируем на осциллографе процессы изменения тока в обмотке и дребезга контактов реле при его включении.
5. С помощью автотрансформатора Т устанавливаем требуемое напряжение U_C источника питания реле.
6. Подготавливаем осциллограф к записи процесса.
7. Нажимаем на кнопку SB2 и фиксируем на осциллографе процессы изменения тока в обмотке и дребезга контактов реле при его отключении.

Типичные осциллограммы процессов включения и отключения реле при напряжении источника питания U_C , равном номинальному напряжению питания (rated supply voltage) обмотки реле U_S , в данном случае – 48 В, приведены на рис. 5а и 5б. Из осциллограмм видно, что время включения реле, не зависящее от наличия «размагничивающего» диода, приблизительно соответствует данным спецификации реле, а время отключения за счет указанного диода существенно больше значения, указанного производителем.

Уменьшение длительности интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора. Длительность промежутков времени t_{b1} и t_{b0} может быть существенно уменьшена, если обмотку реле с номинальным напряжением питания U_S подключить к источнику с номинальным напряжением U_C , превосходящим

значение U_S , через последовательный резистор, сопротивление которого подобрано так, чтобы в стационарном режиме на обмотке установилось напряжение, равное U_S . При этом постоянная времени цепи обмотки реле уменьшится и ток в обмотке в процессе включения реле будет быстрее нарастать, а в процессе выключения – быстрее убывать вплоть до момента начала движения якоря. И хотя, как показывают результаты экспериментов, скорость и время движения якоря, а также время дребезга контактов остаются приблизительно такими же, как и при работе реле в «штатном» режиме, суммарные значения длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} существенно уменьшаются по сравнению с соответствующими длительностями в «штатном» режиме. Например, если цепь, состоящую из обмотки реле RT с номинальным напряжением питания $U_S = 48$ В и

добавочного резистора R2, сопротивление которого в шесть раз больше сопротивления обмотки, подключить к источнику с напряжением $7 \times 48 = 336$ В, то в стационарном режиме на обмотке установится напряжение, равное 48 В. При этом типичные осциллограммы процессов включения и отключения реле и дребезга контактов будут выглядеть так, как это показано на рис. 5, в и 5, г. Из осциллограмм видно, что промежутки времени t_{b1} и t_{b0} существенно уменьшаются по сравнению со «штатным» режимом, причем это происходит, в первую очередь, за счет уменьшения постоянной времени цепи обмотки, а крутизна изменения тока в обмотке в момент окончания движения якоря, а также длительность дребезга контактов остаются практически такими же, какими они были в «штатном» режиме.

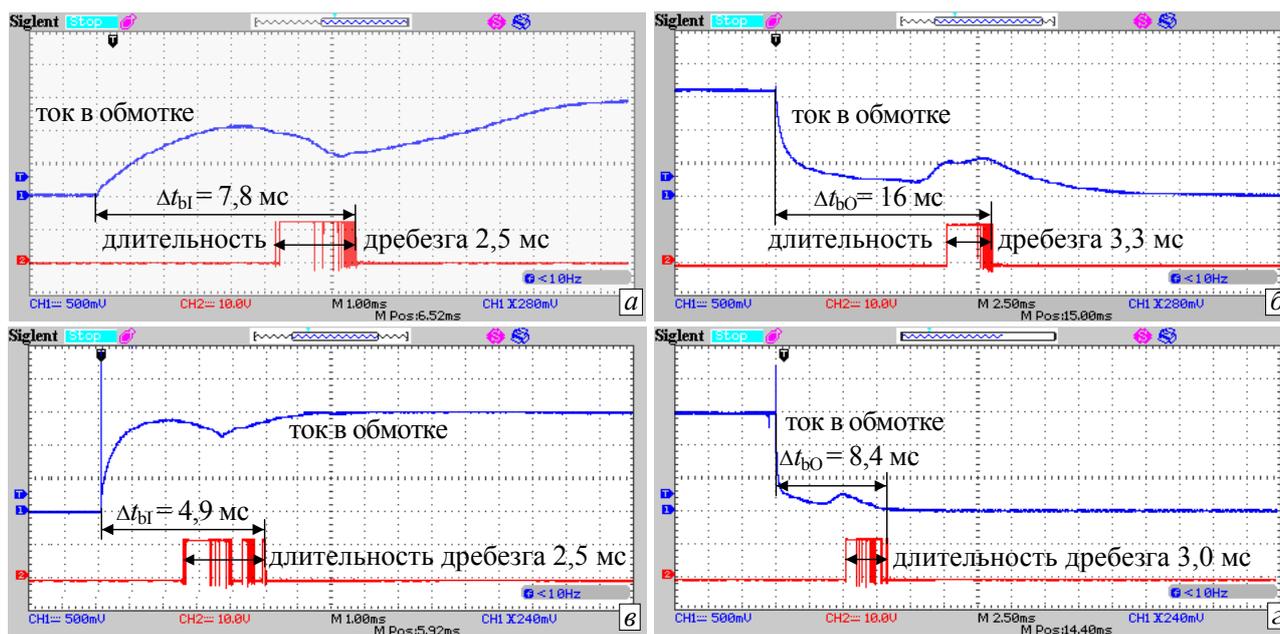


Рис. 5. Типичные осциллограммы включения и отключения реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В: а – включение реле, напряжение цепи управления (источника) $U_C = 48$ В; б – выключение реле, $U_C = 48$ В; в – включение реле, $U_C = 336$ В; г – выключение реле, $U_C = 336$ В

Временные характеристики реле одного и того же типа (даже из одной и той же партии) могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому, для того, чтобы сделать корректный вывод о необходимой длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} в системах гибридной коммутации, необходимо для выбранного типа реле выполнить измерения указанных длительностей на достаточно большом количестве реле и произвести статистическую обработку результатов эксперимента. Нами были исследованы временные характеристики

(при выполнении операций включения и отключения) реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В при двух значениях напряжения цепи управления (источника) $U_C = 48$ В и $U_C = 336$ В. В эксперименте было использовано 20 реле с двумя контактными группами каждое, итого 40 контактных групп. Результаты эксперимента показаны на рис. 6, где точками показаны кумуляты – накопленные частоты значений промежутков времени t_{b1} и t_{b0} , не превосходящих значений (в мс), указанных на оси абсцисс.

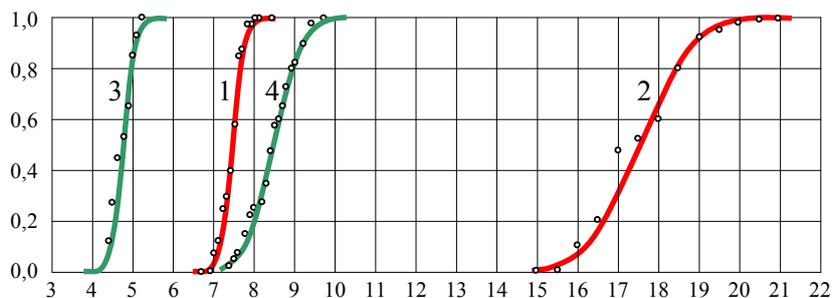


Рис. 6. Кумуляты и функции нормального распределения, построенные по результатам экспериментального определения значений промежутков времени t_{b1} и t_{b0} , соответствующих операциям включения и отключения реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В: 1 – включение реле, при напряжении цепи управления (источника) $U_C = 48$ В; 2 – выключение реле при $U_C = 48$ В; 3 – включение реле при $U_C = 336$ В; 4 – выключение реле при $U_C = 336$ В

Сплошными линиями на рис. 6 показаны функции нормального распределения $F(t)$, построенные, исходя из выражения

$$F(t) = \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - \mu}{\sigma \cdot \sqrt{2}} \right) \right],$$

где t – текущее значение промежутка времени ($t_{\text{н}}$ или $t_{\text{о}}$); μ – математическое ожидание (среднее значение выборки) случайной величины; σ – среднеквадратичное отклонение распределения; erf – функция ошибок.

Результаты вычисления средних (по данным эксперимента) значений, среднеквадратичных значений, а также вероятных предельных значений длительности промежутков времени $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{о}}$ для реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_{\text{с}} = 48$ В приведены в таблице. Кумулятивные кривые, в данном случае, весьма близки к кривым нормальных распределений. Поэтому, с высокой степенью достоверности можно утверждать, что координация работы реле RT и полупроводникового коммутатора будет обеспечена, если интервал между моментами их коммутации будет превосходить значение $\mu + 3 \cdot \sigma$, взятое из последней колонки таблицы.

Таблица

Результаты эксперимента по определению длительности промежутков времени $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{о}}$ для реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_{\text{с}} = 48$ В

Величина	$U_{\text{с}}, \text{В}$	μ	σ	$\mu + 3 \cdot \sigma$
$t_{\text{н}}$	48	7,46	0,24	8,18
$t_{\text{о}}$	48	17,3	1,06	20,5
$t_{\text{н}}$	336	4,78	0,26	5,56
$t_{\text{о}}$	336	8,51	0,56	10,2

Выводы.

1. Коммутация цепей обмоток актуаторов, в которых функции включения и отключения тока выполняются на полупроводниковый коммутационный элемент, а механические коммутационные элементы выполняют функции маршрутизаторов, переключающих электрические цепи во время бестоковых пауз, является относительно новым направлением гибридной коммутации, открывающим перспективы упрощения, уменьшения размеров и удешевления систем управления актуаторами.

2. Гибридная коммутация цепей обмоток актуаторов предполагает четкую координацию моментов коммутации полупроводниковых и механических коммутационных элементов. Разработана методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации этих элементов с учетом дребезга контактов механических элементов. Рассмотрена возможность применения интерфейсных реле в качестве механических коммутаторов и определены длительности интервалов, обеспечивающих координацию работы этих реле с полупроводниковыми коммутаторами.

3. Рассмотрен и экспериментально подтвержден способ существенного уменьшения длительности интервалов между моментами коммутации полупроводниковых и механических коммутаторов в системах управления актуаторами, обеспечивающий повышение быстродействия коммутационных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf
2. Патент РФ №2312420. Электромагнитный привод / Клименко Б.В., Выровец С.В., Форкун Я.Б. – Заявл. 27.12.05; опубл. 10.12.07, Бюл. № 14.
3. Сосков А.Г., Сабалаева Н.О. Гибридни контактори низької напруги з покращеними техніко-економічними характеристиками: монографія. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 268 с.
4. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors

- (IGCTs) // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol.21. – no.2. – pp. 646-651. doi: 10.1109/tpwr.2006.870981.
5. Häfner J., Jacobson B. Proactive hybrid HVDC breakers – a key innovation for reliable HVDC grids // Integrating supergrids and microgrids International Symposium in Bologna, Italy. – 2011.
 6. Kapoor R., Shukla A., Demetriades G. State of art of power electronics in circuit breaker technology // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2012. – pp. 615-622. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342764.

REFERENCES

1. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Available at: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf (accessed 15 October 2015).
2. Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Forkun Ya.B. *Elektromagnitnyi privod* [Electromagnetic actuator]. Patent Russian Federation, no. 2312420, 2007. (Rus).
3. Soskov A.G., Sabalaeva N.O. *Hibrydni kontaktory nyzkoi napruhy z pokrashchenymy tekhniko-ekonomichnymy kharakterystykamy: monohrafiia* [Hybrid contactors low voltage with improved technical and economic characteristics]. Kharkiv, National University of Urban Economy Publ., 2012. 268 p. (Ukr).
4. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol.21, no.2, pp. 646-651. doi: 10.1109/tpwr.2006.870981.
5. Häfner J., Jacobson B. Proactive hybrid HVDC breakers – a key innovation for reliable HVDC grids. *Integrating supergrids and microgrids International Symposium in Bologna, Italy*. – 2011.
6. Kapoor R., Shukla A., Demetriades G. State of art of power electronics in circuit breaker technology. *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 615-622. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342764.

Поступила (received) 20.10.2015

Клименко Борис Владимирович¹, д.т.н., проф.,
Ересько Александр Вячеславович¹, к.т.н., доц.,
Варшамова Ирина Сергеевна¹, ассистент,
Лелюк Николай Анатольевич¹,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Багалея, 21,
tel/phone: +38 050 6534982; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

B.V. Klymenko¹, A.V. Eres'ko¹, I.S. Varshamova¹, N.A. Lelyuk¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Bagaley Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Research of the applications possibility of interface relay in hybrid switching systems of bistable actuators windings.

Purpose. Development of methods of experimental determination of action coordination characteristics of semiconductor and mechanical switching elements in systems of hybrid commutation of bistable actuators coils taking into account contact bounce of mechanical switching elements. Consideration of the application possibility of interface relay as mechanical switches, and the definition of the duration of the intervals to ensure coordination of the relay operation with semiconductor switches. **Methodology.** Experimental determination of the time intervals between the moments of switching transistor which controls the relay coil, and power transistor when the switching on and off operations using a hybrid switching device are performed; statistical processing of experimental results. **Results.** The durations of the time intervals between the moments of switching of semiconductor and mechanical switching elements in systems of actuator coils hybrid commutation are experimentally determined. A way of a significant reduction of the duration of the indicated time intervals is considered and experimentally confirmed. **Originality.** The scheme of the power circuit of the control system with hybrid commutation of the actuator coil circuit, which differs from the known schemes that the only semiconductor switching element performs functions of the current switching on and off, and electromechanical relay contact elements act as a router interconnecting electrical circuits during dead times. **Practical value.** The use of hybrid switches instead of switches with semiconductor switches will significantly reduce the cost of the actuators control system, as well as reduce their sizes. References 6, tables 1, figures 6.

Key words: bistable actuators, interface relays, contact bounce, hybrid switching.