

рение выбегающих СД, а следовательно, и скольжение намного меньше допустимой величины. Алгоритм работы БАВР для таких СД может быть такой же, как и для асинхронных электродвигателей.

Для СД большой мощности при определении допустимого угла включения опережающего АВР по условию ограничения тока включения необходимо произвести специальный расчет, подобный приведенному выше, учитывая, что при  $\delta = \delta_{кр}$  числитель в (7) представляет собой геометрическую сумму векторов ЭДС  $E$  двигателя и напряжения сети  $U$ , т. е.

$$\sum U = \sqrt{U^2 + E^2 - 2UE \cos \delta},$$

и ток включения определяется с учетом реального сопротивления питающей системы  $x_c \neq 0$ .

При реализации БАВР в качестве основного параметра срабатывания пускового и блокирующего органа должна быть принята величина углового ускорения, которая численно равна второй производной угла расхождения векторов напряжения сети и ЭДС двигателя, измеренного в начале процесса выбега СД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 2471 (РБ). Способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные электродвигатели / В. В. Курганов // Бюл. изобр. – 1999. – № 4.
2. Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Представлена кафедрой  
электрообеспечения

Поступила 14.02.2000

УДК 621

### ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИБОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Канд. техн. наук КАРВАТ Ч., докт. физ. наук, проф. ЖУКОВСКИ П.,  
асп. МЕКОННЕН В. МЕГЕРСА

*Люблинский технический университет (Польша)*

В [1, 2] представлены результаты исследований электрических и механических свойств меди, имплантированной ионами азота, которые показали увеличение микротвердости, износоустойчивости и небольшой рост удельного сопротивления имплантированных слоев. Это означает, что такие слои могут быть использованы в качестве покрытий контактных пар выключателей для приборов.

Для исследований выбраны выключатели польского производства, которые используются в электрических установках общего применения переменного тока. Номинальные параметры выключателя: напряжение  $U_n = 250$  В; ток  $I_n = 10$  (4) А. Выключатель в соответствии с нормами [3] должен выдержать 10000 циклов переключений. Стандарт предусматривает для этого типа выключателей: ток включения  $I_{вкл} = 24$  А при  $\cos \varphi = 0,6$ ; время включения — 50...100 мс; ток отключения  $I_{выкл} = 10$  А при  $\cos \varphi = 0,95$ . Стандарт не указывает время отключения и нахождения выключателя в разомкнутом состоянии.

Установка для исследования устойчивости выключателей состоит из электрической системы нагрузки, измерительной и механической систем включения и отключения выключателя. Система нагрузки поддерживает предусмотренные нормами [3] параметры токов. Механическая система обеспечивает время включения в диапазоне 50...100 мс, а время отключения — около 3 с и состояние с разомкнутыми контактами — около 0,5 с. Измерительная система состоит из цифрового вольтметра V563 фирмы Мератроника, который через измерительную карту PCL-848 фирмы Адвантэх соединен с персональным компьютером. Режим работы выключателей во время испытаний более жесткий, чем режим нормальной работы в устройствах, в которых они обычно используются: во-первых, происходят более частые переключения; во-вторых, механические переключения на испытательной установке происходят всегда с одинаковой силой нажима на клавиш, чего невозможно достичь при ручном переключении; в-третьих, при проведении эксперимента величины токов включения и отключения достигают максимальных значений, заявленных производителем.

Для проведения испытаний были приготовлены следующие группы выключателей:

- 1) с посеребренными медными контактными парами;
- 2) с медными контактными парами;
- 3) с медными контактными парами, химически полированными в растворе, состоящем из 55 мл концентрированной серной кислоты  $H_2SO_4$ , 54 мл концентрированной азотной кислоты  $HNO_3$ , 15 г каменной соли  $NaCl$ ;
- 4) с медными контактными парами, имплантированными ионами молекулярного азота  $N_2^+$  с энергией 200 кэВ, дозой  $2,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>2</sup>.

Исследованиям были подвергнуты шесть выключателей с посеребренными медными контактными парами, выбранных случайно из 30 штук. На рис. 1 представлена функция падения напряжения  $\Delta U(N)$  на контактной паре в зависимости от числа циклов переключений для одного из исследованных выключателей.

Из зависимости, представленной на рис. 1, следует, что напряжение на контакте на начальном этапе исследований имеет величину около 0,7 В и уменьшается при очередных переключениях. Переходное сопротивление, присутствующее в начальной фазе (500 циклов), уменьшается, а падение напряжения достигает величины около 20 мВ. Далее происходит снижение напряжения, которое стремится к фиксированной величине. Такое квазициклическое изменение падения напряжения повторяется через несколько тысяч циклов (3...4 тысячи циклов).

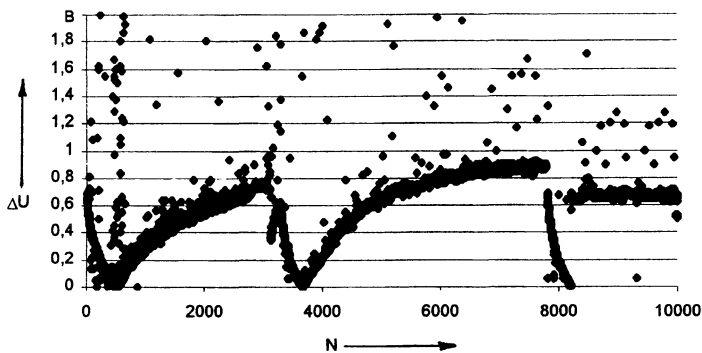


Рис. 1

Исследовалось влияние слоя серебра, наложенного на медные контактные пары, на форму функции  $\Delta U(N)$ . Для этого были проведены испытания выключателей с медными парами без слоя серебра. Из 20 выключателей с медными контактными парами выбрано пять штук. На рис. 2 представлена типичная для этих выключателей зависимость  $\Delta U(N)$  на контактной паре выключателя со штампованными медными контактами от числа циклов переключений  $N$ . Данная функция  $\Delta U(N)$  (рис. 2) оказалась похожей на полученную ранее для выключателей с посеребренными контактными парами. Для выключателей с медными контактными парами падение напряжения в начальной фазе эксперимента было несколько выше, чем для посеребренной контактной пары и изменяется в пределах 0,6...1,0 В. В большинстве экспериментов падение напряжения снижается до 20...30 мВ в течение начальных нескольких сотен циклов переключений.

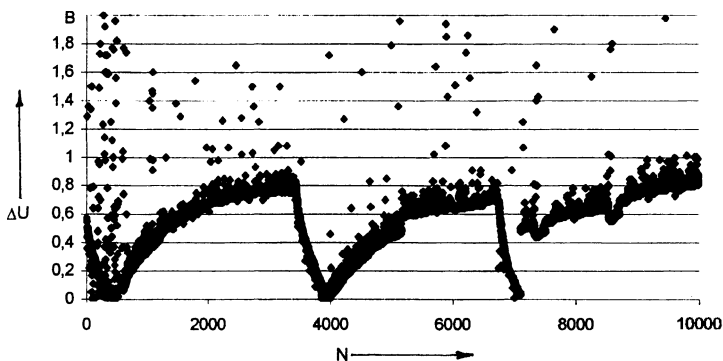


Рис. 2

В зависимостях  $\Delta U(N)$  для медных контактных пар можно выделить участки, похожие на полученные ранее для выключателей с посеребренными контактными парами, а именно:

а) начальное снижение падения напряжения от 0,2...0,7 В для посеребренных и 0,6...1,0 В для медных контактных пар до величины 20 мВ в течение 300...800 начальных циклов;

б) медленный рост падения напряжения со стремлением к фиксированному состоянию около 0,6...0,8 В для посеребренных и около

0,7...0,8 В для медных контактных пар. Такой рост может происходить в течение нескольких тысяч циклов;

в) относительно медленное снижение падения напряжения для двух видов контактных пар от величин, представленных в пункте б до 20 мВ в течение 250...500, а иногда и более циклов переключений.

Встречаются случаи (1 из 14) резкого уменьшения величины падения напряжения  $\Delta U$  до 20 мВ либо роста падения напряжения от 20 мВ до 0,5 В (1 из 13) во время одного либо нескольких циклов.

Для нескольких выключателей проведены нагрузочные испытания в течение 2000 циклов без регистрации функции  $\Delta U(N)$ . После этого выключатели были разобраны для осмотра их внутреннего состояния, который показал:

- а) на поверхности контактных пар появился налет черного цвета;
- б) внутренняя часть корпуса вблизи контакта частично обуглилась.

По нашему мнению, налет на контактной паре мог появиться вследствие окисления поверхности меди и осаждения на ней молекул, улетающих из корпуса во время воздействия высокой температуры электрической дуги.

Для установления связи между качеством поверхности контактных пар и величинами падения напряжения проведен следующий эксперимент. Неподвижный и подвижный элементы медной контактной пары были подвергнуты химической полировке (выключатели 3-й группы). Подобные растворы применяют в металлографии для химической полировки поверхности меди и ее сплавов [4]. Контактные пары полировались в течение 4...6 с, а затем промывались дистиллированной водой и чистым спиртом. Осмотр показал, что химическая полировка изменила состояние поверхности контактных пар, наступила их очистка и выравнивание. Таким образом обработанные контактные пары замонтированы в выключателях. Два из них исследованы на измерительной установке. Зависимость падения напряжения на контактной паре выключателя с химически полированными медными контактами от числа витков представлена на рис. 3. Как видно на рис. 3, химическая полировка привела к исчезновению области, в которой наступает снижение величины падения напряжения в начальной фазе эксперимента. Увеличилось число циклов, в которых наблюдаются максимальные величины падения напряжения около 1,0 В.

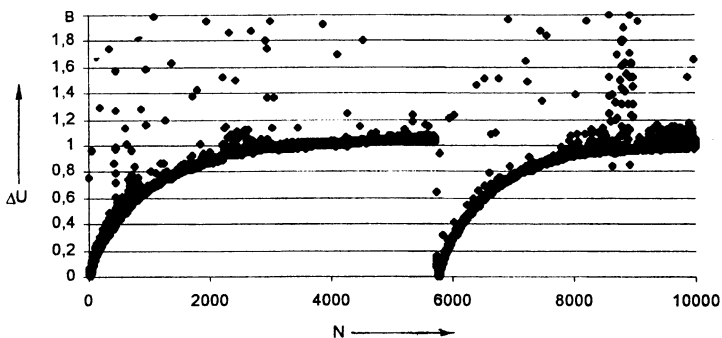


Рис. 3

В [5] обсуждается влияние ионной имплантации на изменение свойств металлов. Обращено внимание на увеличение микротвердости

верхнего слоя; повышенную износоустойчивость имплантированного слоя; рост коррозиестойчивости и стойкости на влияние окружающей среды.

Некоторые из указанных полезных свойств, возникающих под влиянием ионной имплантации, характерны также для поверхностных контактных пар во время работы выключателей. Еще одно полезное явление ионной имплантации — ионное распыление. Под его влиянием происходит ионная полировка, которая приводит к уменьшению микронеровностей поверхности. Главным в ионном распылении является то, что один атом азота выбивает из поверхности меди в среднем 1,4 атома [6]. Это означает, что имплантация дозой  $5 \cdot 10^{17}$  ат/см<sup>2</sup> приводит к удалению  $7 \cdot 10^{17}$  атомов меди с поверхности 1 см<sup>2</sup>. В случае обработки идеально плоской поверхности меди распыление приводит к удалению слоя толщиной около 80 нм, так как 1 см<sup>3</sup> содержит  $8,45 \cdot 10^{22}$  атомов [7]. Число атомов, выбитых ионами из поверхности, резко увеличивается с ростом угла отклонения пучка ионов от направления, перпендикулярного имплантированной поверхности. Это приводит к тому, что микронеровности распыляются значительно быстрее, чем плоские поверхности, т. е. имплантация большими дозами ведет к удалению загрязнений с поверхности и ее выглаживанию.

В наших экспериментах модификация поверхности контактных пар была проведена ионами  $N_2^+$  с энергией 200 кэВ при температуре мишени около 100 °С (4-я группа выключателей).

Выключатели с имплантированными контактными парами были исследованы на испытательной установке. На рис. 4 представлена зависимость падения напряжения выключателя с медными контактными парами, имплантированными ионами молекулярного азота с энергией 200 кэВ дозой  $2,5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при 100 °С от числа переключений.

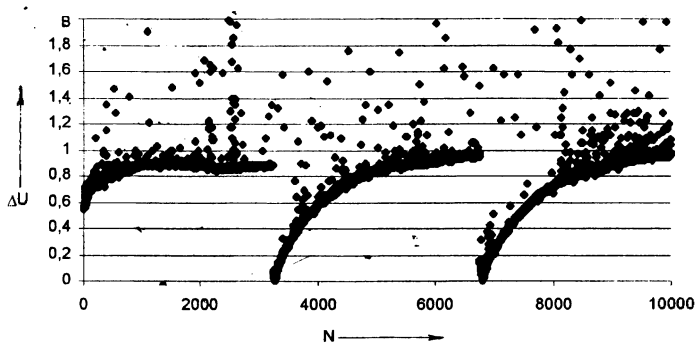


Рис. 4

Для этих выключателей не наступает период начального снижения падения напряжения, который был характерен для выключателей с посеребренными и медными контактными парами. На рис. 4 наблюдаются периоды медленного роста зависимости  $\Delta U(N)$ , вход в фиксированное состояние и области резкого (в течение нескольких циклов) снижения величины падения напряжения  $\Delta U$  от 0,9 В до 20 мВ.

Сравнение результатов измерения падения напряжения и его изменений в зависимости от циклов для выключателей с контактными парами из меди и химически полированной меди (рис. 2 и 3) показывает,

что начальное состояние контактных пар и область начального периода работы определяются гладкостью контактных поверхностей.

При больших величинах падения напряжения (выше 0,2 В) в начальном периоде испытаний выключателя (до нескольких сот циклов) характерным является снижение  $\Delta U$  до 20 мВ. Затем наступает период медленного роста  $\Delta U$  вплоть до величины 0,7...0,8 В, который часто оканчивается фиксированным состоянием. Приведенные расчеты при условии, что поверхность контакта имеет металлические свойства, а переходное сопротивление в фиксированном состоянии — величину около 80 мОм, показали: диаметр контактной поверхности должен быть около 100 нм. При относительно высокой пластичности материала контактных пар и высоких силах прижатия, выступающих в области контакта, малая поверхность, которую можно считать игольчатой, должна деформироваться во время одиночного цикла. Однако результаты исследований показали, что уровень высокого переходного сопротивления контакта остается почти неизменным в течение нескольких тысяч переключений. Это скорее вызвано тем, что высокое переходное сопротивление обусловлено наличием на поверхностях контактов слоя налета. Считая, что этот слой имеет удельное сопротивление на уровне графита, поверхность контакта должна иметь диаметр порядка 100 мкм, т. е. в 1000 раз больше, чем в случае металла. В течение от 1000 до нескольких тысяч циклов падения напряжения имеет фиксированную величину. Затем начинается следующий период снижения величины падения напряжения, подобный начальному этапу исследований. Снижение напряжения происходит в течение нескольких сотен циклов для посеребренных и медных контактных пар и в течение нескольких циклов для медных контактных пар химически полированных либо имплантированных.

Из литературы, касающейся изменения переходного сопротивления контактных пар под влиянием эксплуатационных параметров, известны два механизма снижения переходного сопротивления [8]. Первый из них связан с переходом поверхностного слоя в жидкое состояние, второй — с переходом поверхностного слоя меди с твердого состояния в мягкое. Указанные выше механизмы могут снизить активное сопротивление контакта в случае, когда его высокое значение связано с неровностью поверхности, возникшей, например, под влиянием эрозии, т. е. существенного уменьшения поверхности контакта. В наших исследованиях установлено, что на контактных поверхностях появляется налет, который увеличивает переходное сопротивление контакта. Механизм, объясняющий характерное для всех исследованных выключателей квазициклическое снижение падения напряжения от 1,0 до 20 мВ и последующий рост до 1,0 В, должен также учитывать способы циклического исчезновения и восстановления слоя налета.

Среди механизмов, которые могут оказывать влияние на снижение переходного сопротивления контакта, следует учитывать представленный ниже механизм старения слоя налета. Главным в механизме старения является то, что под влиянием эксплуатационных параметров (повышенная температура и ионизация воздуха от электрической дуги) слой налета должен подвергаться ускоренным процессам старения. Это приводит к ухудшению его механических свойств, прежде всего к росту хрупкости и уменьшению адгезии. В связи с этим под влиянием циклически действующих сил нажима со стороны подвижной части контактной пары, имеющих характер ударов, в слое налета сначала возникают

трещины, а затем он отпадает от контактной поверхности. Это приводит к снижению сопротивления до значения, характерного для чистой поверхности контактной пары. Предложенные выше механизм старения и самоочистка поверхности от слоя налета отвечают, по нашему мнению, за снижение падения напряжения на контактной паре, что соответствует зарегистрированным пробегам  $\Delta U(N)$ .

После окончания процессов самоочистки поверхностей контактной пары снова начинается рост слоя налета, который обладает худшими, чем исходный материал, электрическими и тепловыми свойствами. Это означает, что с ростом толщины должна увеличиваться его температура, так как теплота Джоуля, выделенная на контакте, нагревает этот слой ( $\rho_{\text{налета}} \gg \rho_{\text{металла}}$ ). Кроме того, на слой влияет электрическая дуга, которая ведет к дальнейшему росту температуры. Росту температуры способствует также значительно меньшая теплопроводность слоя налета по отношению к металлу. В связи с этим наступает торможение в определенном моменте роста слоя налета и переходное сопротивление достигнет фиксированной величины. В слое начинают развиваться процессы старения, а далее под воздействием сил нажима произойдут процессы самоочистки поверхности контактных пар. Такие процессы могут повторяться квазициклично, что видно из зависимостей  $\Delta U(N)$ , представленных на рис. 1...4.

Одним из существенных выводов из проведенных исследований является также то, что слой серебра практически не влияет на характер изменений и величину падения напряжения на контакте в зависимости от числа циклов переключений.

Пробеги  $\Delta U(N)$  подобны для всех испытанных выключателей как с посеребренными контактными парами, так и с медными. Минимальная величина падения напряжения составляет около 20 мВ, а максимальная лежит в диапазоне от 0,7 до 1,1 В. Можно считать, что роль серебра состоит в охране поверхности контактных пар от неблагоприятного воздействия окружающей среды (влага, химически активные загрязнения такие, как сульфиды и др.).

Изменения падения напряжения для контактных пар химически полированных или имплантированных существенно отличаются от полученных для медных или посеребренных контактных пар. В выключателях с посеребренными или медными контактными парами резкое снижение падения напряжения  $\Delta U$  происходит очень редко. В то же время для медных контактных пар, химически полированных или имплантированных, наблюдаются только участки резкого снижения  $\Delta U(N)$  в течение одного либо нескольких циклов. Химическая полировка и ионная имплантация выглаживают поверхность контактных пар. Можно предполагать, что это снижает адгезию слоя налета, отвечающего за рост переходного сопротивления контакта. Слой этот возникает вследствие химических реакций между материалом контактных пар, молекулами, улетающими с внутренней поверхности корпуса под влиянием высокой температуры электрической дуги и кислородом. Процессы старения, происходящие в слое налета под действием повышенной температуры и ионизации, ухудшают его механические свойства (возрастает его хрупкость). Вследствие циклического воздействия силы со стороны подвижной части контактной пары в налетном слое возникают трещины, и слой отпадает, так как его адгезия к гладкой поверхности значительно уменьшилась. Таким образом, самоочистка поверхности контактных пар

от слоя налета для гладких поверхностей происходит значительно быстрее, чем для поверхностей, покрытых микронеровностями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковски П., Партыка Я., Карват Ч. Применение ионной имплантации в электротехнике // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1997. — № 9—10. — С. 32—35.
2. A new method for determining changes in hardness of implanted materials: Nukleonika / P. Żukowski, C. Karwat, M. Łozak, J. Liśkiewicz. — Vol. 44. — № 2. — 1999. — P. 289.
3. Polska Norma PN-E-10581 (1994). Łączniki do przyrządów. Postanowienia ogólne.
4. Коваленко В. С. Металлографические реактивы: Справ. — М.: Металлургия, 1981.
5. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. — М.: Металлургия, 1990.
6. P h y s. Stat. Sol. a / P. Żukowski, Cz. Karwat, F. F. Komarov, A. F. Komarov, A. Latuszyński. — 1996. — Vol. 157. — P. 373.
7. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А. Ф. Буренков, Ф. Ф. Комаров, М. А. Кумахов, М. М. Темкин. — Мн., 1980.
8. Макусымиук Ж. Aparaty elektryczne. — WNT, Warszawa, 1995.

Представлена научным семинаром  
кафедры электротехнических устройств  
и ТВН

Поступила 2.11.2000

УДК 631.83.004

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННЫХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ**

**Канд. техн. наук, доц. КОЗЫРСКИЙ В. В.,  
канд. техн. наук, проф. ЛУТ Н. Т.,  
докт. техн. наук, проф. СИНЬКОВ М. В.**

*Национальный аграрный университет (Украина)*

Использование традиционных материалов и конструкций приводных элементов расцепителей существенно ограничивает возможности совершенствования характеристик автоматических выключателей, получивших наибольшее распространение в качестве защитных аппаратов.

В данной статье представлены результаты исследований универсальных расцепителей автоматических выключателей, изготовленных на основе новых конструкционных материалов — сплавов с эффектом «памяти формы» (ЭПФ), обладающих необычными физическими свойствами [1]. Анализ экономической целесообразности замены традиционных — биметаллических приводных элементов на предлагаемые показал, что стоимостные затраты одинаковы. Однако использование сплавов с ЭПФ позволяет расширить функциональные возможности изделий.