

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБЖИМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АППАРАТУРЫ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.Я. Геча, О.Н. Лаврухин, И.А. Мещихин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлены материалы по сравнительному анализу методов контроля качества обжима клемм проводников. Особое внимание уделено численному моделированию обжима клеммы и сравнению полученных результатов с экспериментальными данными. В результате серии расчётов были получены значения предельного усилия обжима и усилия на отрыв для проводников различных сечений.

Ключевые слова: методы контроля, имитационное моделирование, электрооборудование, численные методы.

Электрооборудование системы управления и защиты (СУЗ) выполнено на базе средств вычислительной техники разработки ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» на современной конструктивной и элементной базе в сочетании с «жесткой» логикой. Конструктивно электрооборудование СУЗ выполнено в блочно-модульном исполнении [1] в виде стационарных шкафов с габаритными размерами $600 \times 800 \times 2000$ мм. В состав комплекса СУЗ может входить более 100 шкафов (18 типопредставителей).

Внутри шкафов установлены блоки и модули, которые электрически соединены жгутами. Жгуты являются достаточно сложными изделиями с большим количеством контактов. Каждый контакт должен подсоединяться к блокам и модулям определённым образом. В настоящее время широко распространён механический вид подсоединения: с помощью винта, подпружиненной клеммы и т. д. Для реализации такого соединения каждый конец жгута необходимо обработать, т. е. обжать гильзой или клеммой. Такая технологическая операция называется «обжим».

Большое количество контактов электрооборудования СУЗ в сочетании с высокими требованиями по надёжности работы формируют высокие требования к качеству обжима.

В данной статье проведено сравнение трёх методов контроля качества обжима: электрический, механический и визуальный. На основе анализа данных имитационного моделирования и экспериментальных исследований проанализированы процессы, сопровождающие операцию обжима, определены основные параметры обжима (коэффициент заполнения, уровни пластических деформаций, усилия на отрыв). Сочетание расчётных и опытных исследований позволило определить эффективное сочетание методов контроля качества обжимного соединения в условиях производственного процесса.

Электрический метод контроля. Электрический метод контроля [2] подразумевает измерение сопротивления в месте обжима между проводником и

втулкой клеммы. Поскольку во время опрессовывания происходит взаимная диффузия металлов и площадь поперечного сечения обжимного соединения больше или равна поперечному сечению провода, это сопротивление мало, порядка 10^{-4} Ом. В настоящее время существуют приборы для измерения низких сопротивлений, погрешность которых достигает 2% при измерении сопротивлений от 0,000001 до 25 Ом. В основу принципа действия таких приборов заложено измерение по схеме двойного моста – моста Кельвина (рис. 1), что позволяет расширить диапазон измеряемых сопротивлений. Измерение производится путём настройки некоторых резисторов, составляющих мост. Баланс достигается, когда

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} + R \frac{R_3 R_4' - R_3' R_4}{R_4 (R + R_3' - R_4')}$$

Сопротивление R должно быть как можно меньшим (намного меньше, чем измеряемое сопротивление), и по этой причине обычно используется короткая толстая проволока из меди.

Если условие $R_3 R_4' = R_3' R_4$ выполняется (и сопротивление R достаточно мало), вторым слагаемым в формуле выше можно пренебречь, и тогда измеряемое сопротивление можно посчитать по

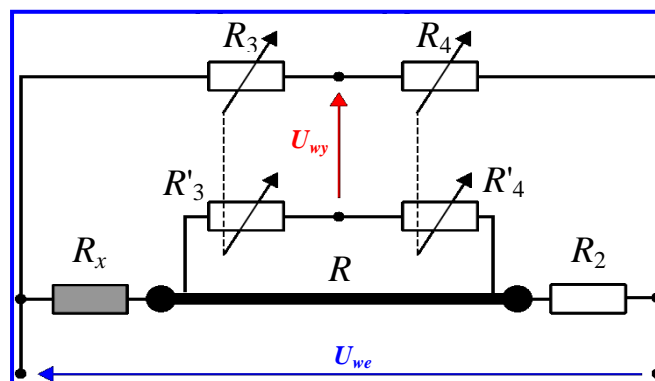


Рис. 1. Электрическая схема измерения по схеме двойного моста



Рис. 2. Щупы для измерения низких сопротивлений



Рис. 3. Приспособления для измерения усилия отрыва клеммы от провода

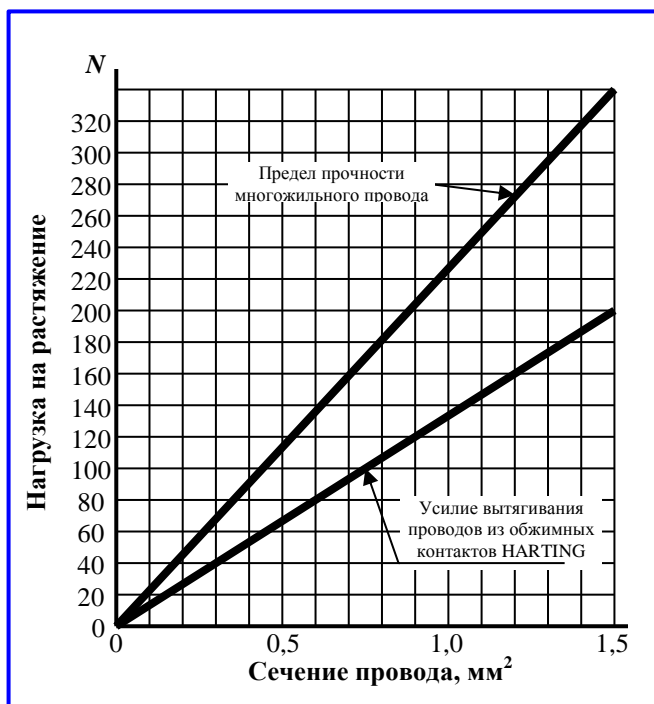


Рис. 4. Зависимости предела прочности от площади поперечного сечения провода

приближённой формуле:

$$R_x \approx R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

Приборы просты в использовании, но проблема заключается в подсоединении щупов прибора (рис. 2) к измеряемому проводнику. Все измерительные зажимы и пробники имеют в основе четырёхпроводную схему подключения. Электрод на каждой из двух ветвей изолирован относительно противоположного электрода. Один контакт для подачи тока, другой – потенциальный выход. Схема устроена таким образом, что любое удельное сопротивление проводников или контактов напряжения не имеет влияния на результат измерений. Однако при нескольких замерах одного и того же образца прибор будет показывать разные значения. Дело в том, что в месте соприкосновения щупов прибора к измеряемому проводнику каждый раз будет разное поперечное сечение контакта, мало того, щупы будут прижиматься каждый раз с разным усилием. Это существенно влияет на измерение сопротивления порядка 10^{-4} Ом. Такое измерение даёт точные результаты только в лабораторных условиях, где можно строго проконтролировать подсоединение щупов прибора к измеряемому проводнику (т. е. задать постоянную силу прижима и обеспечить необходимое и постоянное поперечное сечение). Анализ показал, что для производственных условий такой метод измерения не подходит.

Механический метод контроля

Механический метод контроля подразумевает измерение усилия отрыва провода от клеммы. Чем больше сечение провода, тем больше площадь соприкосновения провода и втулки клеммы, следовательно требуется большее усилие отрыва. Фирмы-производители клемм поставляют устройства, позволяющие измерить усилие отрыва провода от клеммы и предоставляют номинальные значения для разных сечений. Устройства представляют из себя настольные компактные приспособления (рис. 3), простые в эксплуатации. Для того, чтобы произвести замер усилия отрыва, необходимо сделать технологический обжим проводника, вставить провод с клеммой в приспособление и, приложив некоторое усилие, выдернуть провод из клеммы. Данный способ достаточно прост для производственных условий и при многократном повторении даёт результаты измерений с небольшим разбросом. В табл. 1 приводятся данные усилий отрыва, рекомендованные одной из фирм-изготовителей клемм PHOENIX CONTACT [3].

Фирма HARTING, изготовитель обжимных контактов,

приводит график зависимости предела прочности от площади поперечного сечения провода (рис. 4). На графике представлена связь между прочностью на разрыв для проводов и усилием, необходимым для разрушения обжимного соединения. Как изложено в стандарте DIN EN 60352-2, усилие вытягивания провода должно составлять, по крайней мере, 60% (при $0,75 \text{ мм}^2$) разрывного усилия самого провода. Представленная зависимость позволяет в первом приближении дать оценку несущей способности провода в зависимости от его сечения. Тем не менее данная зависимость не позволяет ответить на вопрос о требуемом усилии обжима провода.

Визуальный метод контроля

Визуальный метод контроля подразумевает проверку аккуратности выполненного обжима и остаточной деформации клеммы после обжима. Не должно быть перекоса провода относительно клеммы. Обжим должен быть выполнен в соответствии с рекомендациями фирмы-изготовителя. Все проволоки провода должны быть обжаты, разломачивания и обрыва отдельных проволок не допускается.

Визуальный метод контроля прост в исполнении, для его реализации нужен мерительный инструмент и несложные оптические приборы. Но проведение такого измерения имеет смысл только в том случае, когда есть рекомендации фирм-производителей по размерам полученного соединения. При отсутствии таких рекомендаций визуального метода контроля для проверки качества выполненного неразъёмного соединения методом обжима недостаточно.

Наличие стандартов производителя обжимных контактов не может в полной мере гарантировать качество обжима в условиях технологического процесса. Так, например, остаётся открытым вопрос об усилии обжима для различных сечений проводника. Для установления данных зависимостей необходимо провести комплекс работ, связанный как с эмпирическими исследованиями, так и имитационным моделированием. Также представляет интерес вопрос об определении сопротивления соединения и его зависимости от усилия обжима для различных типоразмеров проводника. В том числе, и его оценки по косвенным параметрам, таким как усилие на отрыв, остаточные деформации и пр.

Математическое моделирование обжима клеммы проводника. Особенность решаемой задачи заключается в необходимости учёта трёх видов нелинейности – контактной (моделирования трения отдельных волокон проводника и втулки), пластических деформаций и больших перемещений.

Целью математического моделирования является определение зависимости коэффициента заполнения,

максимальных напряжений, уровня пластических деформаций от усилия зажима [4]. В качестве иллюстрации предлагаемого подхода смоделируем процесс обжима трёх разных проводников, характеристики которых представлены в табл. 2. Общий вид расположения проводника, клеммы и пресс-клещей представлен на рис. 5.

Втулка клеммы и провода выполнены из меди, свойства которой приведены в табл. 3.

При этом, как видно из табл. 2, количество контактных пар существенно, и процедура моделирования их взаимодействия в рамках существующих средств расчёта затруднительна. Для того чтобы осуществить расчёт, необходимо сделать ряд следующих допущений:

- характер напряженно-деформированного состояния близок к плоско-деформированному;
- поведение множества проводников возможно представить как поведение сплошной изотропной среды, характеристики которой определяются как эквивалентные к упругопластическому поведению малой группы проводников.

Также в ходе моделирования не учитывались следующие факторы:

Таблица 1

Зависимость усилия на отрыв от сечения проводника

Сечение, мм^2	Усилие, N
0,2	10
–	20
0,5	20
0,75	30
1,0	35
1,5	40
2,5	50
4,0	60
6,0	80
10	90
16	100
25	135
–	156
35	190
–	236
50	236
70	285
95	351
–	427
120	427
150	427
185	503
–	503
240	578
300	578

Таблица 2

Типоразмеры проводника

Типоразмер	Диаметр провода, мм ²	Сечение проводника, мм ²	Количество проводников	Внешний диаметр втулки, мм	Внутренний диаметр втулки, мм	Длина втулки, мм	Тип матрицы
№ 1	0,2	1	32	3,5	1,7	5	Ромб
№ 2	0,25	2,5	50	4,2	2,5	5	Шестигранник
№ 3	0,3	6	84	6	3,8	6	Шестигранник

Таблица 3

Свойства материала

$\sigma_{вр}$, кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	ψ , %
41,25	37,54	8,4	51,5



Рис. 5. Общий вид пресс-клещей

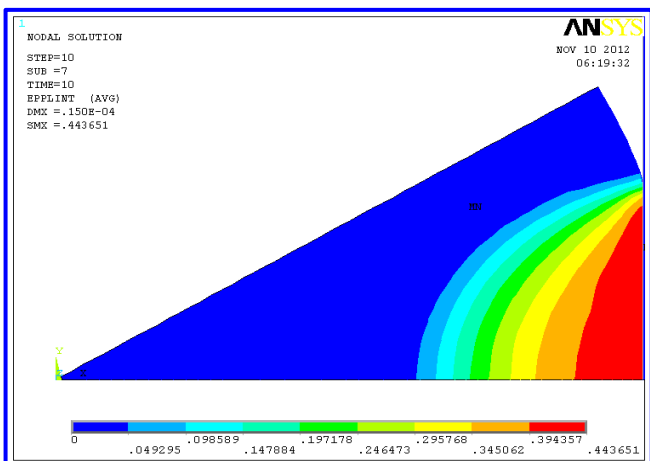


Рис. 6. Распределение деформаций в сегменте проводника (при переходе от окружности к сегменту использовались условия симметрии)

- силы трения хвостовика;
- силы трения от фасок внутри втулки.

Расчёт был осуществлён в нелинейной постановке с учётом:

- упругопластического поведения материала;
- контактного взаимодействия;

– больших перемещений.

Таким образом, поставленная задача сводится к определению характеристик упругопластического эквивалента и расчёту процедуры обжима провода в целом.

Для определения характеристик упругопластического эквивалентного материала была разработана модель (рис. 6.), на основе которой были определены кривая деформирования, приведённый модуль Юнга и угол упрочнения.

Так как каждый отдельный проводник взаимодействует с шестью соседними, при условии близости к равномерному обжиму для каждого проводника имеются шесть осей симметрии, разбивающих сечение на двенадцать равных сегментов.

Жёсткость каждого из них может быть определена путём приложения возрастающей нагрузки к сегменту сечения проводника. Граничные условия, заданные в перемещениях, заключаются в задании условий симметрии по граням сегмента и оси контакта. Так как обжим клеммы происходит один раз, учёт влияния истории нагружения не производился.

Для каждого уровня приложенной нагрузки производился расчёт перемещений в области контакта и коэффициента заполнения (который определяется как отношение площади, занятой материалом, к общей площади сечения). Для введения в расчёт пользовательских критериев состояния (коэффициента заполнения) был разработан макрос в рамках языка APDL.

Модель материала – билинейная. Реальные значения напряжений, коэффициента заполнения и перемещений восстанавливаются по значениям деформаций приведённой модели.

На эпюре (см. рис. 6) показано распределение пластических деформаций.

После вывода значений перемещений центральной точки контакта в зависимости от приложенной нагрузки осуществлён переход к относительным величинам – от перемещений к деформациям и от силы к напряжениям. Далее по методу наименьших квадратов определяются наилучшие приближения коэффициентов модуля Юнга и угла упрочнения билинейной модели материала. Результат построения приведён на рис. 7.

Таким образом, из рис. 7 видно, что билинейная модель приведённого материала хорошо согласуется с данными численных экспериментов.

Разработанная модель для расчёта провода представлена на рис. 8. С её помощью возможен учёт формы матрицы обжима, максимального усилия и пр.

На рис. 8, б наблюдаются пластические деформации между всеми проводниками провода. В местах соприкосновения проволок с внутренней стороны втулки клеммы тоже пластические деформации, втулка деформируется и принимает форму деформированных проволок провода.

Из рис. 8 видно, что одним из критериев качественного обжима является наличие пластических деформаций на всей площади поперечного сечения.

Для определения максимальных и остаточных деформаций, коэффициента заполнения и силы трения для каждой точки уровня максимальной силы обжима задавалась зависимость силы обжима от времени.

На рис. 9, 10 представлены характерные графики изменения по углу (от 0 до 90°), по внутреннему радиусу клемм напряжений, действующих в момент обжима, и остаточных прогибов соответственно.

После обобщения полученного множества значений данные расчётов были построены графики, которые позволяют определить уровень сил трения и другие характеристики проводника в зависимости от максимального усилия обжима (рис. 11 – 13).

Графики зависимостей коэффициента заполнения, усилия на отрыв и максимальных пластических деформаций от усилия обжима имеют

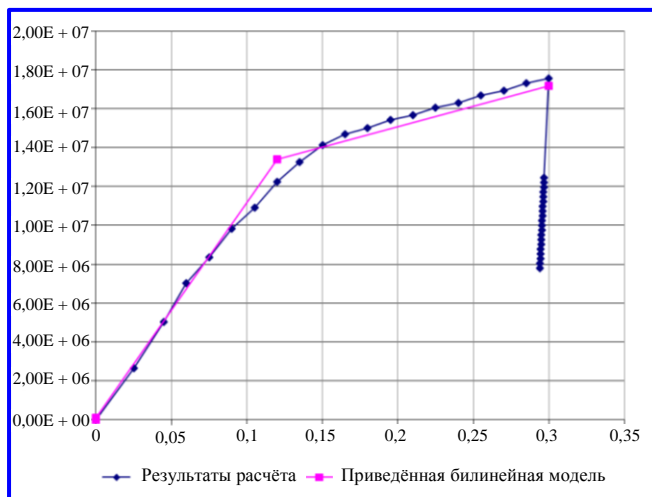


Рис. 7. Формирование диаграммы деформирования упругопластического эквивалента. Ось Y – напряжения, Па. Ось X – деформации



Рис. 9. Интенсивности напряжений по внутреннему радиусу клеммы. Ось Y – напряжения, Па. Ось X – угол, град

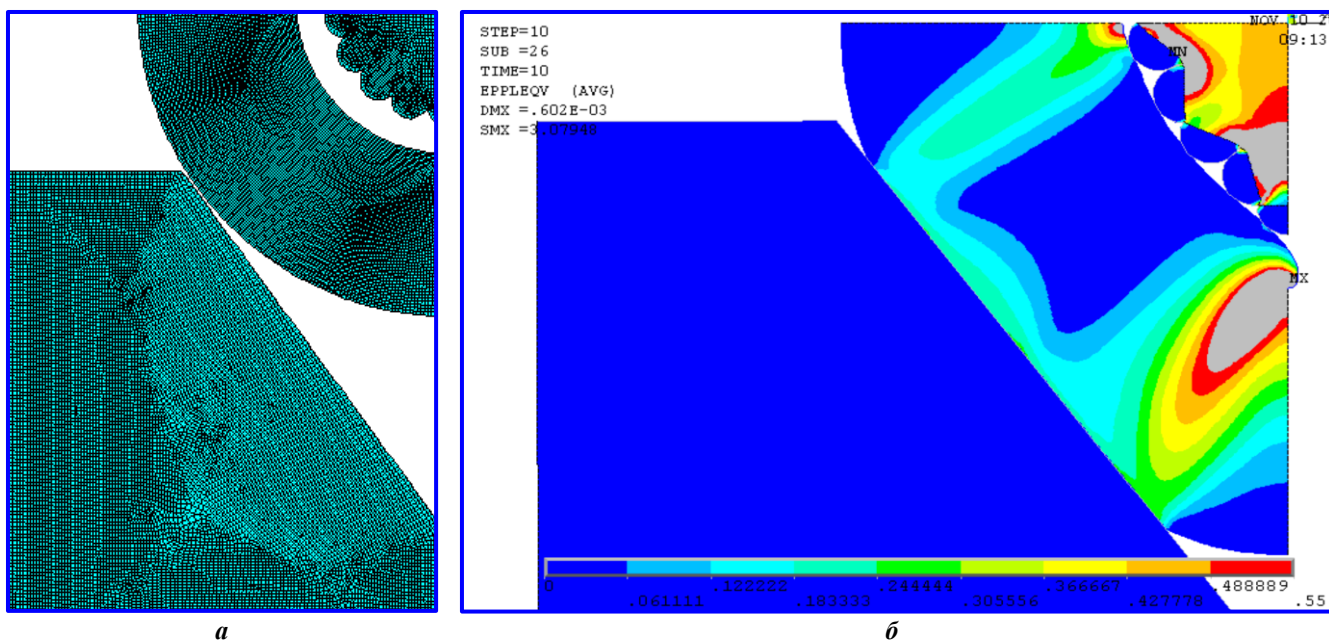


Рис. 8. Модель обжима кабеля. Сечение проводника – 1 мм². Форма матрицы – ромб: а – сетка конечных элементов полной задачи; б – эпюра распределений пластических деформаций при нагрузке 12 кН



Рис. 10. Изменения остаточных перемещений по внутреннему радиусу клеммы. Ось Y – остаточные перемещения, м. Ось X – угол, град

характерный ступенчатый вид.

При небольших уровнях приложенной нагрузки клемма, деформируясь, выбирает зазор до контакта с проводниками. При дальнейшем росте нагрузки

клемма контактирует с проводниками точно, происходит резкий рост пластических деформаций в клемме. В то же время, так как жёсткость проводников меньше жёсткости клеммы, до определённого момента большая часть площади поперечного сечения провода испытывает упругие деформации, в то время как в клемме активно развиваются области с пластическими (необратимыми) деформациями. При снятии нагрузки проводник стремится принять первоначальную форму, формируя с изменёнными остаточными деформациями клеммой контактные зоны. При дальнейшем росте нагрузки в проводе развиваются области пластических деформаций, и площадь контакта растёт быстрее нагрузки. Рост уровня максимальных пластических деформаций замедляется. Несмотря на рост площади контакта, изменения формы проводников необратимы и при

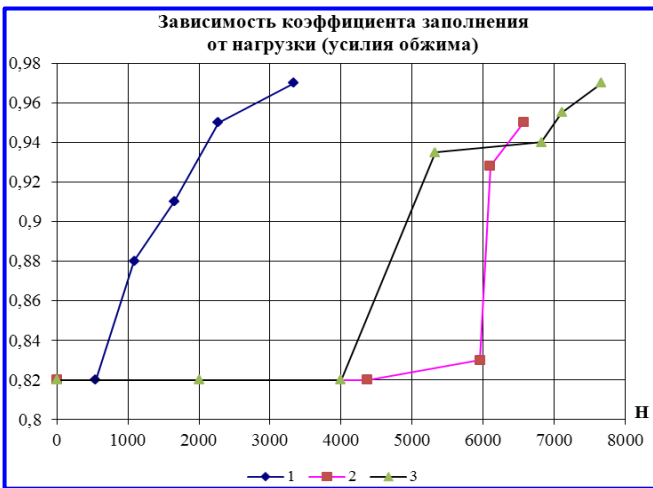


Рис. 11. Зависимость коэффициента заполнения от приложенной силы. Ось Y – коэффициент заполнения. Ось X – сила, Н

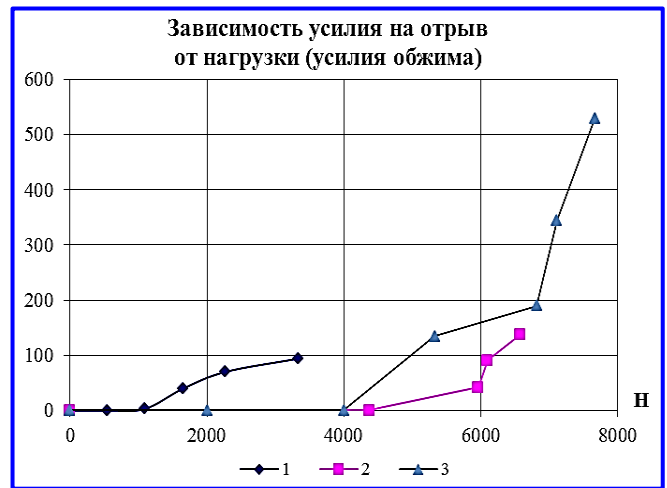


Рис. 12. Зависимость усилия на отрыв от приложенной нагрузки. Ось Y – усилие на отрыв, Н. Ось X – сила, Н

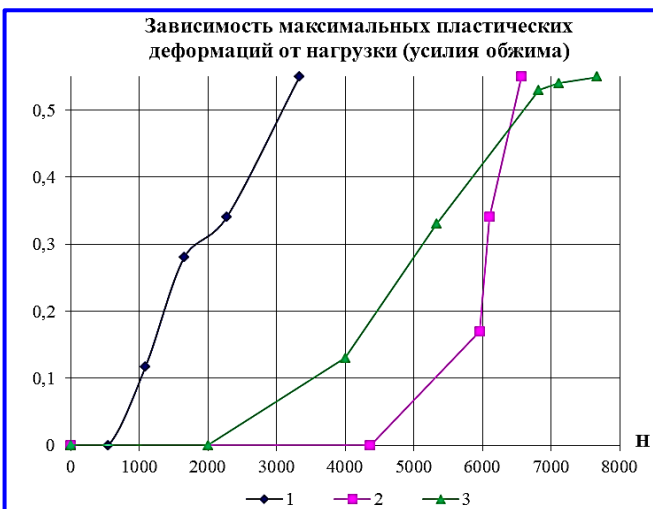


Рис. 13. Зависимость максимальных пластических деформаций от приложенной силы. Ось Y – деформации. Ось X – сила, Н

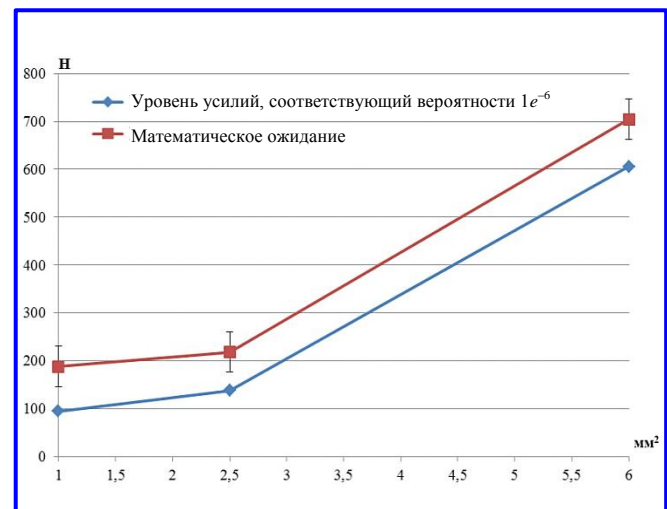


Рис. 14. Зависимость усилия отрыва от сечения проводника. Ось Y – усилие на отрыв, Н. Ось X – сечение проводника, мм². Клемма с фиксаторами

Таблица 4

Минимальное усилие на отрыв

Сечение проводника, мм ²	С фиксаторами		Без фиксаторов	
	Среднеквадратичное отклонение, Н	Математическое ожидание, Н	Среднеквадратичное отклонение, Н	Математическое ожидание, Н
1,00	16,05	188,00	19,68	146,00
2,50	22,51	235,00	16,85	177,00
6,00	35,47	928,00	20,69	662,00

снятии нагрузки восстановление формы, а значит и значения контактного давления в проводе, не существенно. По схожим причинам рост коэффициента заполнения замедляется: периметр фигур, образованных касанием проводников в сечении растёт быстрее, чем уменьшается её площадь.

Также было проведено экспериментальное определение усилия отрыва для проводников трёх различных диаметров.

Определение минимального усилия отрыва на основе представленных статистических данных сводится к следующей задаче.

Необходимо вычислить такой уровень исследуемой величины, что вероятность её реализации в интервале $[0, F_{\min}]$ лежит ниже $1e^{-6}$, что соответствует требованиям по надёжности, предъявляемым к элементам СУЗ.

Так как для каждого сечения было определено лишь 25 значений, полноценное определение закона распределения случайной величины затруднительно. Примем закон распределения нормальным.

В результате проведённых экспериментов располагаем лишь выборкой из генеральной совокупности случайной величины, поэтому необходимо определить доверительные интервалы для математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Определим их по формулам [5]:

– математическое ожидание

$$\left(\bar{X} - t_{\gamma} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{\gamma} \frac{S}{\sqrt{n}} \right),$$

где \bar{X} – выборочное математическое ожидание; S – выборочная дисперсия; t_{γ} – квантиль распределения Стьюдента для уровня значимости 0,05 и $n - 1 = 24$ степеней свободы; n – количество экспериментов;

– среднеквадратичное отклонение

$$\left(\frac{\sqrt{n}S}{\chi_2}, \frac{\sqrt{n}S}{\chi_1} \right),$$

где S – выборочная дисперсия; $\chi_2 = \chi_{1+\gamma}, \chi_1 = \chi_{1-\gamma}$, – квантили χ_2 распределения.

Таблица 5

Минимальный уровень усилия отрыва, соответствующий вероятности $1e^{-6}$ разрыва соединения

Сечение проводника, мм ²	С фиксаторами, Н	Без фиксаторов, Н
1,00	146,78	94,41
2,50	180,55	138,01
6,00	822,44	605,94

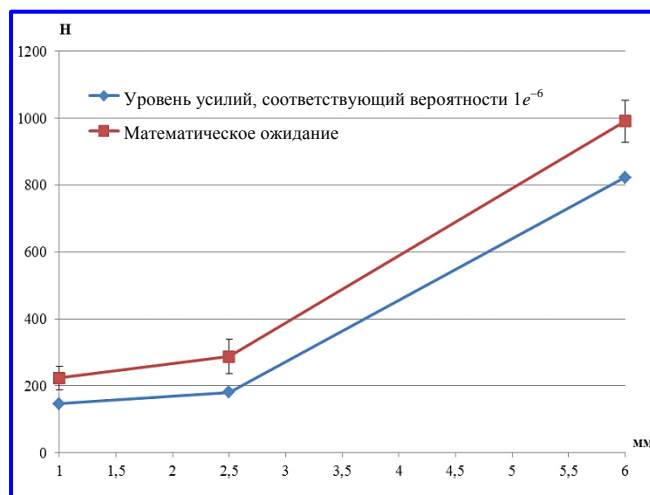


Рис. 15. Зависимость усилия отрыва от сечения проводника. Ось Y – усилие на отрыв, Н. Ось X – сечение проводника, мм². Клемма без фиксаторов

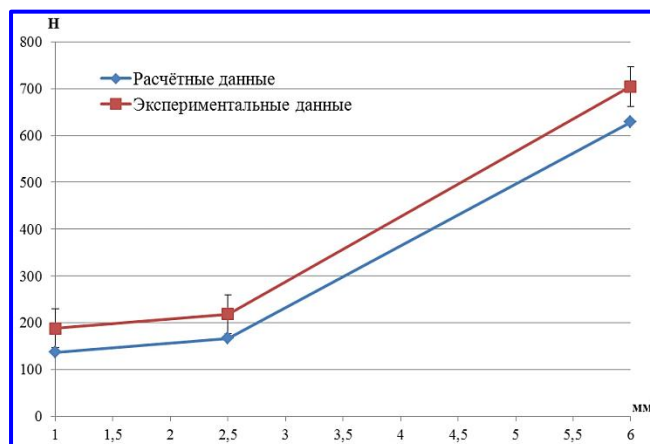


Рис. 16. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных. Ось Y – усилие на отрыв, Н. Ось X – сечение проводника, мм²

Результаты расчёта представлены в табл. 4.

Определим гарантированный минимальный уровень усилия отрыва, соответствующий вероятности $1e^{-6}$ % разрыва соединения. Данные величины вычислены относительно крайних значений доверительных диапазонов для математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Полученные значения представлены в табл. 5.

Полученные результаты обладают незначительными отличиями от выборочных математических ожиданий. Графики зависимости усилия отрыва от площади сечения представлены на рис. 14, 15 для клемм с фиксаторами и без фиксаторов соответственно.

На рис. 16 приведено сопоставление расчётных и экспериментальных данных. Из графика видно что для сечений 1 и 2,5 мм² результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментальными и влияние хвостовика с усилием отрыва незначительное.

Разработанная математическая модель, при принятых исходных данных, более точно описывает процесс обжима проводов типоразмеров № 2, 3 (погрешность порядка 5%) по сравнению с проводом типоразмера № 3 (12%). Рост погрешности связан с увеличением количества проводников и, как следствие, увеличением количества контактных пар в сечении провода. Учитывая нелинейный характер поведения проводников при обжиме сходимость с результатами эксперимента в пределах 5 – 12 % можно считать удовлетворительной.

Выводы

1. Применительно к проблеме выбора метода контроля качества обжимного соединения разработанная математическая модель, которая позволяет учитывать следующие факторы:

- форму матрицы обжима и геометрические характеристики обжимного соединения;
- пластические деформации в клемме и в сечении провода;
- контактный характер взаимодействия проводников и клеммы.

2. Анализ работы обжимного соединения проведен для трёх типов проводов. Получены зависимости от усилия обжима таких параметров как:

- коэффициент обжатия;
- максимальные пластические деформации;
- усилие отрыва.

3. Согласно проведённым исследованиям, была

сформулирована последовательность применения всех трёх методов проверки качества соединения:

- в производственных условиях визуальный контроль каждого соединения в совокупности с выборочным механическим контролем по усилию на отрыв в условиях производственного процесса;
- в лабораторных условиях контроль электрического сопротивления соединения.

Применение данной последовательности позволяет исключить возможность брака.

4. Полученные результаты были использованы для определения максимального усилия отрыва и обоснованию возможности с его помощью контролировать качество обжимного соединения.

Расчётное установление зависимости усилия отрыва клеммы от усилия обжима позволяет определять значения контактного давления внутри проводника, величина которого во многом определяет значения электрического сопротивления.

Учитывая сложность непосредственного измерения электрического сопротивления соединения, возможность его оценки по косвенным параметрам, в том числе и по усилию на отрыв, позволит эффективно и оперативно осуществлять контроль качества обжимных соединений.

5. Изложенный подход может быть использован для формирования единой методики комплексной оценки качества обжимного соединения по усилию на отрыв. Формирование подобных комплексных критериев позволяет контролировать как механические, так и электрические характеристики по одному легко измеряемому параметру обжимного соединения, что позволит существенно повысить качество контроля и уровень надёжности как электрических соединений в частности, так и всего оборудования как системы в целом.

Литература

1. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2007. – 256 с.
2. Попов В. С. Электротехнические измерения : учебник для техникумов / В. С. Попов. – М. : Энергия, 1968. – 320 с.
3. Электротехнические клеммы. Принадлежности для монтажа и маркировки CLIPLINE. – PHOENIX CONTACT. – 2007.
4. Межецкий Г. Д., Загребин Г. Г., Решеткин Н. Н. Сопротивление материалов: учебник / Г. Д. Межецкий, Г. Г. Загребин, Н. Н. Решеткин. – М. : Дашков и К, 2011. – 432 с.
5. Письменный Д. А. Теория вероятности, математическая статистика и случайные процессы: конспект лекций / Д. А. Письменный. – М. : Айрис-пресс, 1993.

Поступила в редакцию 13.08.2013

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, зам. генерального директора, e-mail: volikgecha@gmail.com, т. (495) 365-26-69.

Олег Николаевич Лаврухин, заместитель начальника цеха, т. 8 (916) 652-41-03.

Илья Александрович Мещихин, млад. научн. сотрудник, т. 8 (964) 550-54-57.

E-mail: mefict@mail.ru.