

Основные расчетные параметры электромонтажа методом накрутки

Процессы накрутки в электромонтаже различных изделий известны давно, но до настоящего времени не разработаны практические вопросы, связанные с определением даже главных технологических параметров процесса: геометрических и силовых параметров. Здесь представлены результаты инженерного решения этого процесса на основе пластического деформирования металлов.

**Сергей Ковалев
Виктор Ковалев**

Электромонтаж накруткой используют для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штырей-выводов. Он был разработан в начале 1950-х годов в США и применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам. Его достоинства:

- исключение нагрева, припоев и флюсов;
- повышение надежности соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях;
- ускорение процесса электрического монтажа аппаратуры;
- создание условий для его автоматизации.

Контактное соединение накруткой — это соединение неизолированного провода (или участка изолированного провода без изоляции) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием. Электрическое соединение возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода. Натяжение в проводе при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения. Возможно соединение накруткой при применении провода с тонкой изоляцией. Тогда изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжения в зонах контакта и среднее давление (порядка 700 МПа) обуславливают взаимную диффузию металлов. Соединение накруткой должно соответствовать следующим требованиям:

- минимальные номинальное и переходное сопротивление;
- газонепроницаемость для исключения коррозии;
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода;
- электрическая стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих материалов вывода и провода, кон-

струкцией соединения и технологическими условиями его получения. Материал вывода должен обладать достаточной пластичностью и прочностью для образования поверхностей контакта в результате его деформирования на острых кромках вывода. Необходима определенная упругость и прочность вывода для сопротивления скручиванию его в процессе навивки провода. От состояния поверхностного слоя материала зависят электрические параметры соединения. Для изготовления выводов применяют медь, латунь, плакированную сталь, никелево-серебряные сплавы, бериллиевую и фосфористую бронзы. Последние имеют наилучшие физико-механические свойства:

- высокий модуль упругости;
- низкое остаточное напряжение;
- коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения медного провода.

На выводы наносят покрытия, которые предохраняют поверхности от окисления, способствуют процессу диффузии металлов, определяют значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, покрывают гальваническим золотом с предварительным серебрением. Применяют серебрение по никелевому покрытию. Для обычной аппаратуры выводы изготавливают из меди с покрытием оловом или сплавом олово-свинец толщиной не более 35–40 мкм.

В качестве провода для накрутки используют медный одножильный провод, имеющий относительное удлинение не менее 20%. Рабочий участок провода освобождается от изоляции и облуживается. Кроме меди, используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

Для обеспечения проводимости соединения элементов необходимо равенство суммы площадей контакта провода с выводом и площади поперечного сечения провода. Это, как правило, обеспечивается

16–20 точками контактирования в зависимости от диаметра провода. Следовательно, соединение должно быть многовитковым.

Следует указать, что соединение, состоящее из 5–6 витков луженого медного провода, навитого на вывод из фосфористой бронзы с золотым или серебряным покрытием, имеет номинальное сопротивление 0,001–0,003 Ом. После электрических, механических и климатических испытаний оно увеличивается не более чем на 0,001 Ом. Переходное сопротивление контакта в накрутке составляет 0,0004–0,0008 Ом.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов, сопровождающий накрутку.

Механическое напряжение в навитом проводе снижается в процессе эксплуатации на 20–50% в зависимости от температурного воздействия. Диффузия металлов покрытия увеличивает механическую прочность и обеспечивает сохранение электрических параметров соединения во времени. Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях составляет не менее 15–20 лет.

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17–1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения усилия натяжения и использования более прочных выводов.

Вывод должен иметь минимум две острые кромки, в электрорадиомонтажных соединениях — не менее трех. В соответствии с этим условием применяют выводы с квадратной, прямоугольной, ромбовидной, двойной треугольной, U-образной и V-образной формой поперечного сечения. Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные предоставляют ряд преимуществ при автоматизации монтажа накруткой. U-образные и V-образные выводы обладают большей упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения. Их применяют в ламповых панелях и реле, а также для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120...180 °С. При такой температуре напряжение в проводе в течение 3 ч снижается вдвое, а упругость вывода позволяет сохранить электрические и механические параметры соединения.

Для обеспечения сопротивления скручиванию при накрутке площадь поперечного сечения вывода должна быть не меньше площади сечения провода. Обычно отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода составляет 0,5–0,6, а к стороне прямоугольного вывода — 0,3–0,5. Отношение сторон вывода прямоугольного сечения должно быть не более 1:3. Радиусы острых кромок выводов по покрытию — 0,05–0,08 мм, параллельность сторон — 0,05–0,06 мм на длине 10 мм, отклонение от плоскостности — не более 0,25 мм.

Длина вывода составляет 12–38 мм и определяется:

- диаметром провода;
- числом витков в соединении;
- количеством соединений на выводе.

Чтобы обеспечить оптимальное число контактных поверхностей с площадью газонепроницаемых участков, превышающей площадь поперечного сечения провода, соединение накруткой должно иметь от четырех до восьми витков для проводов диаметром 0,2–1,2 мм. При расчете числа витков следует учитывать, что вывод квадратной, прямоугольной и ромбовидной форм сечения имеет четыре точки контактирования на виток, V-образной и треугольной — три, U-образной — 2,5. Две первые и две последние точки контакта на первом и на последнем витках не дают надежного соединения. Поэтому число эффективных зон контакта с выводом определяют как сумму всех точек соприкосновения навитого провода за вычетом четырех.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог быть свободно сдвинут с вывода. Осесимметричные поперечные сечения, круглые или имеющие в поперечном сечении эллипс, не подходят с этой точки зрения. Самозапираение обеспечивается за счет упругих деформаций разгрузки контактирующих элементов по периметру соединения: периметр проводника, растягиваемый при накрутке, в процессе разгрузки уменьшается по длине и охватывает вывод, а сжимаемое при накрутке поперечное сечение вывода при разгрузке увеличивается по ширине, и при этом растет общая величина контактного напряжения в проводнике. После прекращения накрутки у одного из углов провод должен касаться его, а чтобы он не отходил от другого угла, его положение должно быть зафиксировано с целью предупреждения его отхода от стороны вывода. Провод при этом самоблокируется.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений (рис. 1):

- обычное (немодифицированное);
- модифицированное;
- бандажное.

Немодифицированное соединение получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода. Модифицированное соединение отличается от немодифицированного наличием 1–2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещении вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличивают-

ся по сравнению с обычными. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного соединения становится затруднительным.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажного провода. Провод при накручивании захватывает и обжимает вывод.

Наибольшее применение нашло модифицированное соединение, особенно в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. При малом шаге между выводами и больших сечениях монтажного провода применяют обычное соединение накруткой.

Бандажное соединение рекомендуется для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и при использовании для монтажа многожильных проводов, не пригодных к накрутке.

Выводы следует встраивать и закреплять в панели впрессовыванием, завинчиванием или пайкой так, чтобы они прочно, без повреждений сопротивлялись возникающему во время накрутки крутящему моменту, а в дальнейшем — различным механическим нагрузкам.

Надежность соединений тем больше, чем больше прочность штырей на скручивание.

Во время накручивания провода давление, возникающее на контактирующих поверхностях, достигает величины предела текучести материала проводника. Вследствие пластической деформации это давление непосредственно после накрутки провода снижается до некоторой величины и становится постоянным. Дальнейшее уменьшение напряжения продолжается за счет явлений релаксации (в данном случае — холодной текучести). Испытания на долговечность демонстрируют, что в соединениях накруткой давление не опускается ниже 50% от исходного состояния спустя годы. И такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

Если на штыре производится не одна, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10–20%. При неправильно выбранном соотношении размеров поперечного сечения вывода, диаметра и пластичности провода первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что сойдет с вывода. Но и при правильном выборе соотношения размеров первая накрутка ослабляется из-за деформации вывода второй накруткой на 20%, а третьей накруткой — на 30%. Но оставшиеся напряжения, удерживающие на выводе первую накрутку, достаточны для обеспечения прочности и надежности соединения.

Время собственно накрутки составляет около 1 с, после чего намагнивающий валик снимают с вывода. Продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на вывод, включение вращения, остановка, снятие инструмента) — около 2,5 с. Поэтому, если провода для накрутки уже подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производительность накрутки составляет 1000–1400 соединений в час. Ручная подготовка проводов даже при наличии соответствующих инструментов для снятия изоляции и на-

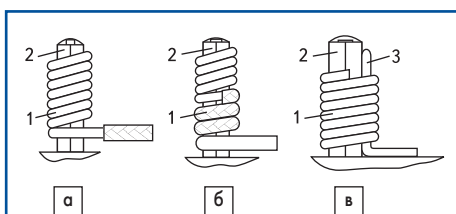


Рис. 1. Виды соединения проводов методом накрутки:

- а) немодифицированное;
 б) модифицированное;
 в) бандажное: 1 — проводник; 2 — вывод;
 3 — бандажируемый элемент

резки на нужную длину менее производительна (в 3–4 раза). Подготовка проводов на автоматах совпадает по производительности с ручной накруткой (1500 проводов в час). Считывание информации с таблиц отвлекает оператора и резко снижает производительность накрутки. Поэтому в серийном производстве адреса накруток и проводов в каске надиктовывают оператору на магнитофон. Заодно чтение адресов накладывают на музыку или радиопостановки, чтобы скрасить оператору монотонность его труда.

При полуавтоматическом монтаже используют программу, которая помогает находить вывод с помощью сигнальных ламп, числовых индикаторов или координатным позиционированием, то есть подводом инструмента к нужному выводу. В соответствии с программой управления стол и каретка движутся таким образом, что в центральное отверстие наматывающего валика точно попадает предназначенный для очередного соединения вывод. Монтажник только насаживает наматывающий валик на вывод и, приведя инструмент в действие, производит соединение. Движение каретки к очередному адресу также запрограммировано, чтобы провод прокладывался по назначенному пути. Очередной провод соответствующей длины высвечивается сигнальной лампой в каске проводов.

При автоматическом монтаже на автоматических линиях производится нарезка проводов, очистка от изоляции и накрутка на штыри по заданной программе. В современном производстве необходимость в больших объемах соединений накруткой исчезла, поэтому автоматические линии соединений накруткой постепенно выводятся с производства.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10%.

Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией впрессовывания штырей в отверстия. Тогда монтаж вообще обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

Следовательно, процесс накрутки состоит в наматывании с определенной силой на вывод из прочного материала с острыми кромками проводника из мягкого материала. При этом получают прочноплотное герметичное соединение штыря с проводником, заменяющее электромонтажную пайку, а витки провода, врезааясь в вывод, закрепляются на углах вывода. Процесс врезания провода в вывод сопровождается пластическим деформированием. При неправильно выбранных режимах, достигающих предельной величины, возможно нежелательно ухудшение проводимости соединения. (Так как пластическое деформирование токопроводящего материала сопровождается увеличением электросопротивления). Процесс накрутки выполняется не только быстрее ручной пайки и обеспечивает

более прочное соединение, но его легко механизировать и автоматизировать.

В процессах электромонтажа методом накрутки (рис. 2а) возникают следующие силовые и деформационные процессы. Провод 1 без усилия свободно вытягивается из бокового отверстия 2 наматывающего валика 3 и изгибается на его кромке с радиусом r , затем снова выпрямляется при сходе с него и изгибается под углом 90° на каждом ребре вывода 4 при вращении наматывающего валика 3 вокруг оси этого вывода, при этом в наматываемый провод врезаются острые кромки вывода 4 под действием растягивающего осевого усилия накрутки. Так как в проводе при изгибе возникают осевые растягивающие и, как их следствие, контактные напряжения между проводником и наматывающим валиком, то возникают силы трения на тороидальной поверхности наматывающего валика и проводника.

Контакт острых кромок вывода начинается с того момента, когда ось бокового отверстия наматывающего валика при накрутке смещается с линии 7 (рис. 2б), являющейся продолжением сторон вывода. Составляющая усилия натяжения провода, параллельная стороне вывода, увеличивается от нуля до максимальной величины при подходе оси бокового отверстия наматывающего валика к линии параллельной линии продолжения стороны вывода. Вторая составляющая, перпендикулярная ей, увеличивается от нуля до максимальной величины при совпадении оси бокового отверстия наматывающего валика с осью симметрии вывода, а затем уменьшается до нуля при совпадении оси бокового отверстия наматывающего ролика с линией продолжения стороны вывода. Если первая составляющая обеспечивает врезание вывода в провод, то вторая составля-

ющая прижимает проводник к выводу, а ее увеличение способствует пластическому деформированию смятием проводника в месте контакта его с выводом и увеличению поверхности контакта.

Силовые параметры процесса накрутки

При выходе прямого проводника из бокового отверстия наматывающего валика (рис. 3) провод изгибается на границе радиуса r с тороидальной поверхностью. Дальнейшее перемещение проводника по тороидальной поверхности происходит с преодолением только сил трения без изменения кривизны срединного сечения проводника в меридиональном сечении. А на границе криволинейного с прямолинейным участком наматывающего валика при спрямлении проводника возникает растягивающее меридиональное напряжение. Величину его определим приближенно на основе равенства работ [1]. Согласно этому работа изгибающего момента на угле поворота сечения должна быть равна произведению напряжения в нем на площадь сечения заготовки и пути перемещения элемента заготовки. При перемещении элемента заготовки (рис. 3) из положения 1 в положение 2 условие равенства работ может быть следующим:

$$\Delta\sigma \times d \times r_{cp} \times d\gamma = M d\gamma, \quad (1)$$

откуда

$$\Delta\sigma = M / (d \times r_{cp}), \quad (2)$$

где d — диаметр наматываемого проводника; r_{cp} — средний радиус изгиба провода, равный $r + d/2$; r — радиус рабочей кромки наматывающего ролика, выбираемый в пределах 2–4 диаметров проводника.

Величина момента M зависит от величины меридионального напряжения σ и уменьшается с увеличением последнего. Однако установлено [1], что даже при значительных σ величина изгибающего момента уменьшается незначительно по сравнению с моментом чисто пластического изгиба. Считаем, что при изгибе проводника на наматывающем валике происходит пластическое деформирование.

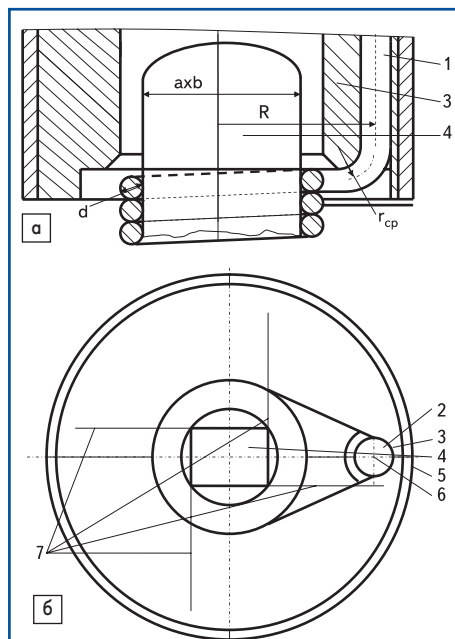


Рис. 2. Схема электромонтажа методом накрутки: а) осевой разрез; б) вид снизу (без проводника): 1 — проводник; 2 — отверстие для проводника; 3 — наматывающий валик; 4 — вывод; 5 — втулка; 6 — ось бокового отверстия наматывающего валика; 7 — линии продолжения сторон вывода

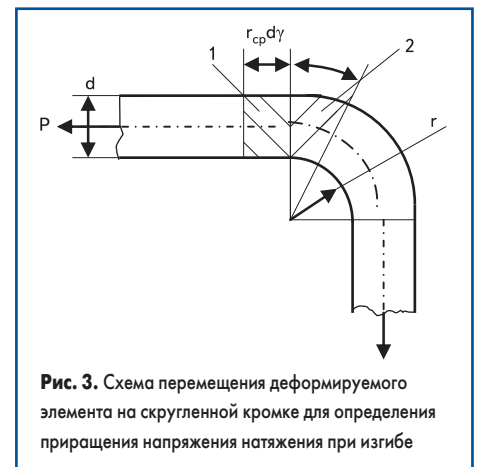


Рис. 3. Схема перемещения деформируемого элемента на скругленной кромке для определения приращения напряжения натяжения при изгибе

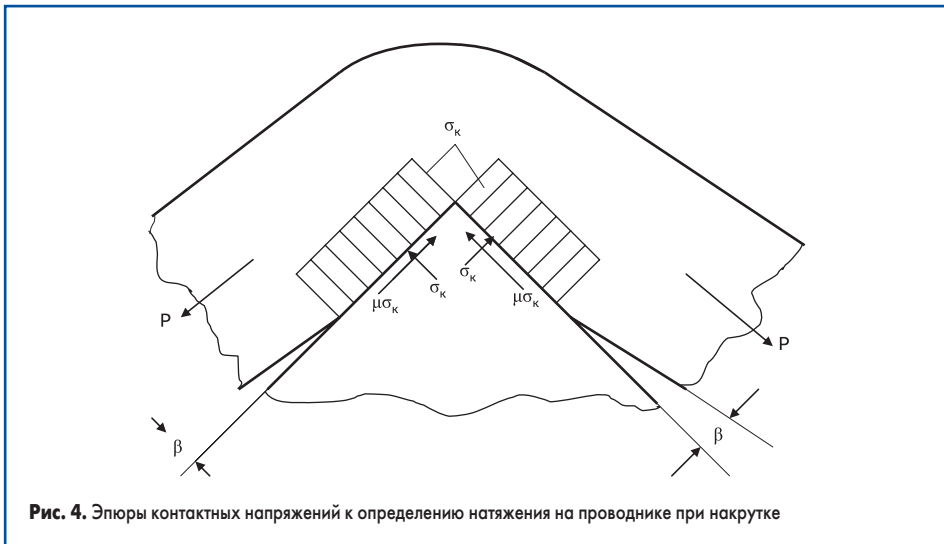


Рис. 4. Эпюры контактных напряжений к определению натяжения на проводнике при накрутке

Величина изгибающего момента чисто пластического изгиба [1] равна:

$$M = (\sigma_s \times d^2)/4. \quad (3)$$

После подстановки значения момента в формулу (2), получим:

$$\Delta\sigma = (\sigma_s \times d^2)/4r_{cp}. \quad (4)$$

Таким образом, изменение кривизны провода под действием момента в зоне сопряжения прямолинейного и криволинейного участков с постоянной кривизной приводит к возникновению меридионального напряжения на величину, определяемую выражением (4). Величина этого напряжения зависит от относительной величины радиуса r_{cp}/d .

Перемещение провода по криволинейной кромке наматывающего валика сопровождается силами трения на этой поверхности. Величина силы трения может быть учтена, как это принято при учете трения скольжения ремня по шкиву, множителем $e^{\mu\phi}$, учитывающим угол и коэффициент трения, поэтому с учетом трения напряжение в проводнике у выхода с границы тороидальной на прямолинейную часть равно:

$$\sigma_{изз,тр} = \Delta\sigma \times e^{\mu\phi}, \quad (5)$$

где μ — коэффициент трения, ϕ — угол трения, равный $\pi/2$.

Общая величина натяжения в проводнике с учетом увеличения напряжения при спрямлении его у выхода с тороидальной поверхности наматывающего ролика — напряжения между наматывающим роликом и штырем выводом, на который наматывается проводник, равна:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sigma_s d}{4r_{cp}} e^{\mu\phi} + \frac{\sigma_s d}{4r_{cp}} = \frac{\sigma_s d}{4r_{cp}} (e^{\mu\frac{\pi}{2}} + 1). \quad (6)$$

Для определения силовых параметров накрутки провода на вывод рассмотрим взаимодействие проводника с выводом при их пластическом взаимодействии. Наибольшее контактное напряжение между проводом и выводом будет

в момент, когда провод при накрутке и сторона вывода будут прилегать один к другому. Распределение нормальных (σ_k) и касательных (трения) ($\mu\sigma_k$) напряжений (рис. 4) на контактных поверхностях провода и вывода приближенно примем равномерным по всей контактной поверхности и равным напряжению текучести материала провода σ_s . Это допущение можно обосновать тем, что степень деформации в наиболее нагруженном месте — на ребре вывода — обычно меньше 10% (так показывают опытные данные). Это приводит только к незначительному упрочнению даже в наиболее нагруженном месте, в других местах оно существенно меньше из-за особенности формы проводника. Величина осевого усилия в проводе здесь равна проекции действующих на контактных поверхностях сил на направление оси провода, которая находится под углом β к направлению стороны вывода. Принимаем, что площадь контакта провода на обеих сторонах ребра вывода одинакова, тогда:

$$P = \sigma_s f_k \cos\beta + \mu \sigma_k f_k \sin\beta + \sigma_k f_k \sin\beta + \mu \sigma_k f_k \cos\beta = \sigma_s f_k (1 + \mu)(\sin\beta + \cos\beta), \quad (7)$$

где μ — коэффициент трения медного проводника по стали, β — угол наклона оси проводника к стороне вывода, σ_k — контактное напряжение, равное σ_s , f_k — величина поверхности контакта проводника с выводом, которая представляет собой проекцию поверхности кругового сегмента f_c на поверхность, расположенную под углом 45° к оси проводника (поперечное сечение вывода — прямоугольник). Поверхность сегмента f_c определим как разность поверхностей сектора $\pi\alpha/180$ и прямоугольного треугольника с одной из вершин в центре провода и углом при ней, равным α ; тогда площадь сегмента равна удвоенной величине:

$$f_{ce} = 2 \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 \times \frac{\pi\alpha}{180} - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times \sin\alpha \times \cos\alpha \right] = \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right), \quad (8)$$

где α — центральный угол контакта вывода с проводом, градусы.

Поверхность контакта правой (или левой) части ребра вывода с проводом f_k с учетом наклона контактной поверхности под углом 45° равна:

$$f_k = \frac{f_{ce}}{\cos 45} = 2 \frac{f_{ce}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right), \quad (9)$$

а общая величина поверхности контакта, то есть правой и левой части у ребра вывода с проводом, равна удвоенной величине f :

$$f = 2f_k = 2 \times \sqrt{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (10)$$

С учетом выражений (7) и (9) величина осевого усилия в проводнике при накрутке равна:

$$P = 2\sqrt{2}\sigma_s \left(\frac{d}{2} \right)^2 \times (1 + \mu) \times (\sin\beta + \cos\beta) \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right), \quad (11)$$

В этом выражении из-за незначительной величины угла β числовое значение $\sin\beta$ принимаем равным нулю, а $\cos\beta \approx 1$. Тогда осевое напряжение в проводнике при накрутке его на вывод равно:

$$\sigma_{бв} = \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{2\sqrt{2}\sigma_s}{\pi} (1 + \mu) \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (12)$$

В этом выражении неизвестен параметр α . Для его определения используем условие равенства напряжения натяжения, возникающего между натяжным валиком σ_{Σ} (6) и штырем-выводом $\sigma_{бв}$ (12), непосредственно при накрутке провода на вывод; после простых преобразований получаем:

$$\frac{d}{4r} (e^{\mu\frac{\pi}{2}} + 1) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (1 + \mu) \times \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (13)$$

В этом уравнении известны коэффициент трения провода по тороидальной поверхности наматывающего валика, для наших условий сухого трения принимаем его равным $\mu = 0,15$, угол контакта провода с тороидальной поверхностью наматывающего валика $\pi/2$, диаметр провода d ; неизвестны — радиус тороидальной поверхности наматывающего валика r , угол пластического контакта провода с выводом α . Получили неопределенное уравнение (13). Для разрешения его неопределенности используем физические соображения о возможной величине относительного радиуса тороидальной кромки валика и величине напряжения натяжения, которая всегда не должна значительно превышать предел текучести материала провода более чем на 10% σ_s . Тогда величина соотношения r/d должна быть ориентировочно в пределах 3–5. Принятие такой величины радиуса накрутки не против-

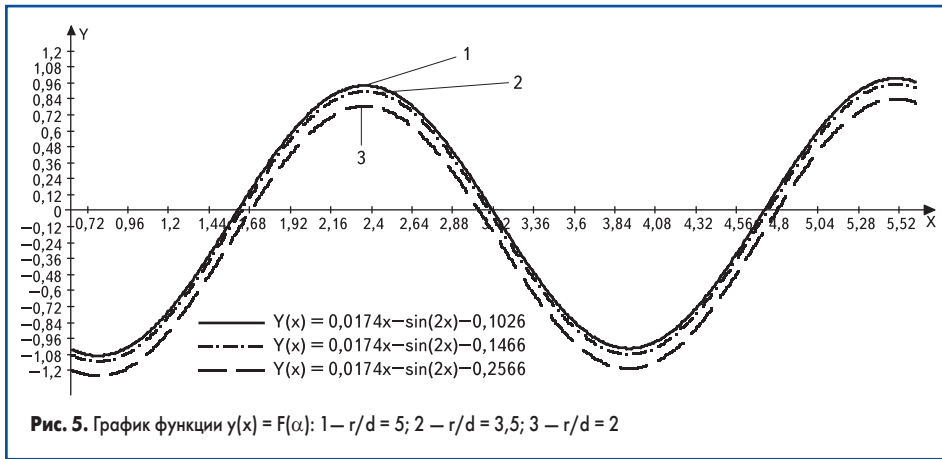


Рис. 5. График функции $y(x) = F(\alpha)$: 1 — $r/d = 5$; 2 — $r/d = 3,5$; 3 — $r/d = 2$

речит известным при выполнении намоточных работ величинам радиусов намотки.

В явном виде неизвестную величину угла α выразить невозможно. Поэтому решаем уравнение численным способом и при заданных параметрах процесса по этому выражению определяем угол α . С этой целью преобразуем полученное выражение и представим его в виде уравнений для различных величин r/d :

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,2421, \text{ при } r/d = 2;$$

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,1383, \text{ при } r/d = 3,5;$$

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,0968, \text{ при } r/d = 5.$$

Эти выражения пригодны для решения и анализа с помощью системы построения графиков Advanced Grapher. В расчетах принято (с учетом выражения (11)) $\mu = 0,15$. Результат решения показан на рис. 5. Из графика следует, что уравнение имеет множество решений. На основе физического смысла можно установить:

- Отрицательные значения можно исключить как решения, не отвечающие физическому смыслу задачи.
- Необходимое значение угла α соответствует минимальной величине функции $F(\alpha)$, то есть находится на ОХ, первое минимальное значение корня — величины угла для $r/d = 2, 3,5$ и 5 равны $\alpha = 1,68^\circ, 1,62^\circ$ и $1,59^\circ$.
- Другие дают такую же величину поверхности контакта. Выбор корня должен основываться также на физическом смысле задачи.

Исходя из этого, наиболее подходящим критерием для выбора корня будет величина внедрения ребра вывода в проводник, которая равна $h = (d/2)(1 - \cos\alpha)$. На ее основе определим необходимую степень деформации, она равна $\psi = 1 - \cos\alpha$. Принимаем во внимание, что величина контактного напряжения равна ориентировочно σ_s , получаем минимальную величину необходимой для герметичного контакта деформацию $\approx 0,002$; с учетом записанного выше выражения для степени деформации ψ угол α должен быть больше или равен соответственно указанным величинам: $\alpha = 1,68^\circ,$

$1,62^\circ$ и $1,59^\circ$. Принимаем ближайшие к ним меньшие величины корня, обеспечивающие начало пластического деформирования. Это $\sim 4,8^\circ, \sim 4,74^\circ$ и $\sim 4,70^\circ$ соответственно для $r/d = 2, 3,5$ и 5 .

Затем определяем остальные величины: усилие накрутки, уточняем число витков, работу и мощность и др. по формулам.

Поверхность контакта определяем по выражению (9) с учетом определенного из выражения (11) угла α . Величина внедрения h вывода в проводник равна $h = r_{cp}(1 - \cos\alpha)$. Число контактных точек проводника с выводом равно:

$$n_T = \frac{\pi}{\sqrt{2} \left(\frac{\pi\alpha}{180} - 0,5\sin 2\alpha \right)}, \quad (14)$$

Число витков при накрутке:

$$n = n_T / \kappa + n_{из} + n_{\kappa}, \quad (15)$$

где n_{κ} — число крайних витков с неудовлетворительной проводимостью из-за ненадежного контакта, принимаемое равным 1; $n_{из}$ — число изолированных витков, принимаемое равным 2; κ — число контактных ребер вывода, равное для квадратных и прямоугольных выводов 4, U-образных и треугольных — 3, U-образных — 2,5.

Наружный диаметр втулки наматывающего валика равен:

$$D < 2t \geq \sqrt{a^2 + b^2} + 2 \left(\frac{d}{2} + r + c + 0,2 \right), \quad (16)$$

где a и b — длина и ширина поперечного сечения вывода, c — толщина стенки втулки, $0,2$ — величина перемычки между каналом провода и наружным диаметром наматывающего валика.

Мощность электродвигателя при накрутке равна:

$$N = (P \times v) / (60 \times 75 \times 1,36), \quad (17)$$

где P — усилие натяжения провода (9), v — скорость накрутки провода, равная $v = 2\pi R n_n / 1000$, R — радиус накрутки, равный

$$R = 0,5 \sqrt{a^2 + b^2} + 1,5 \times d + r < t;$$

t — шаг расположения выводов; n_n — частота вращения наматывающего валика, обычно равная 14–300 об/мин.

Проверка решения может быть выполнена по известным данным технической литературы. Известно, что для обеспечения оптимальной проводимости при накрутке должно быть уложено ориентировочно три–восемь витков модифицированного соединения, из которых 1–2 витка изолированных и еще один виток, учитывающий ненадежность контакта двух первых и двух последних точек, то есть расчетное число витков должно быть увеличено на 3.

Для проверки полученных зависимостей определим число витков, необходимое для накрутки провода при $r/d = 2, 3,5, 5$; при расчете соответственно принятому соотношению r/d получаем следующие числа точек контакта: $n_T = 8,6; 15,1; 21,58$. Округляем эти величины до целого числа: 7, 15 и 22. При прямоугольном выводе получаем числа витков $n = \sim n_T / 4 + 3 = 6, 7, 9$. Фактические данные не противоречат этим числам.

Литература

1. Попов Е. А., Ковалев В. Г., Шубин И. Н. // Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Машиностроение, 2003.
2. Медведев А. М. Непаяные методы неразъемных соединений: накрутка // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
3. Алексеев В. Г., Гриднев В. Н., Нестеров Ю. И. и др. // Технология ЭВА, оборудование и автоматизация. М.: Высшая школа, 1984.