

# Расчетные параметры инструмента для электромонтажа накруткой

**В работе впервые представлены обоснованные величины силовых параметров процесса электромонтажа накруткой: сила натяжения провода, сила прижима витков одного к другому и сила, определяющая мощность электропривода устройства для накрутки. Ранее полученные результаты уточнены.**

**Виктор Ковалев,  
д. т. н., профессор**

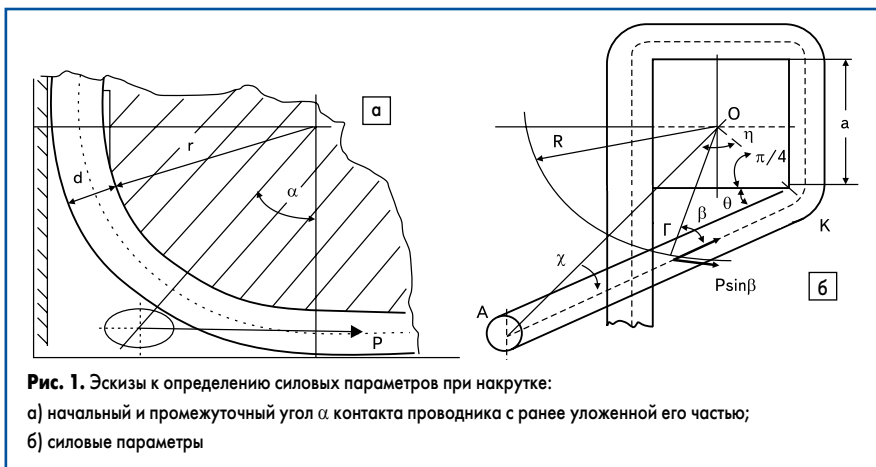
**Сергей Ковалев,  
к. т. н., профессор**

Величину силы осевого натяжения провода  $P$ , обеспечивающую врезание вывода в проводник, при накрутке с учетом реальных физических условий определим на основе ранее полученного в работе [1] выражения (6). Оно определяет натяжение провода и площади поперечного сечения проводника; сила натяжения провода при этом равна:

$$P = \frac{\pi \times \sigma_T}{r + 0,5d} \times \left(1 + \mu \times \frac{\pi}{4}\right) \times \left(\frac{d}{2}\right)^3, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  — предел упругости материала проводника;  $\mu \approx 0,15$  — коэффициент трения круглого проводника по тороидальной поверхности накручивающего валика;  $d$  — диаметр проводника;  $r$  — радиус рабочей кромки накручивающего валика. Из этого выражения следует, что с уменьшением  $r$  увеличивается осевое натяжение проводника — это главный параметр, наиболее активно влияющий на величину натяжения, с помощью которого можно управлять натяжением проводника и величиной поверхности контакта проводника с выводом.

Для определения других силовых параметров технологического процесса накрутки, необходимых для расчета инструмента-устройства для этой операции, представим основные эскизы (рис. 1) с необходимыми геометрическими параметрами и действующими силами.

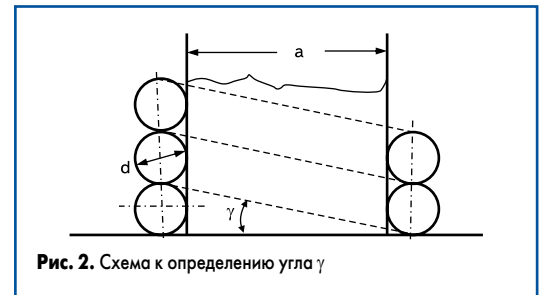


**Рис. 1.** Эскизы к определению силовых параметров при накрутке:  
а) начальный и промежуточный угол  $\alpha$  контакта проводника с ранее уложенной его частью;  
б) силовые параметры

В осевом разрезе изгиба и спрямления витка провода (рис. 1а) показаны необходимые параметры при накрутке первого витка у основания вывода: рабочий радиус у накручивающего валика —  $r$ ; диаметр проводника —  $d$  и приближенный угол контакта  $\alpha$ .

При накрутке 2-го и последующих витков у четвертой стороны вывода наибольшая величина  $\gamma$  — угла наклона витка и силы его натяжения к плоскости, перпендикулярной оси вывода, из геометрических соотношений (рис. 2) равна величине:

$$\gamma = \arctg(d/(a+d)). \quad (2)$$



**Рис. 2.** Схема к определению угла  $\gamma$

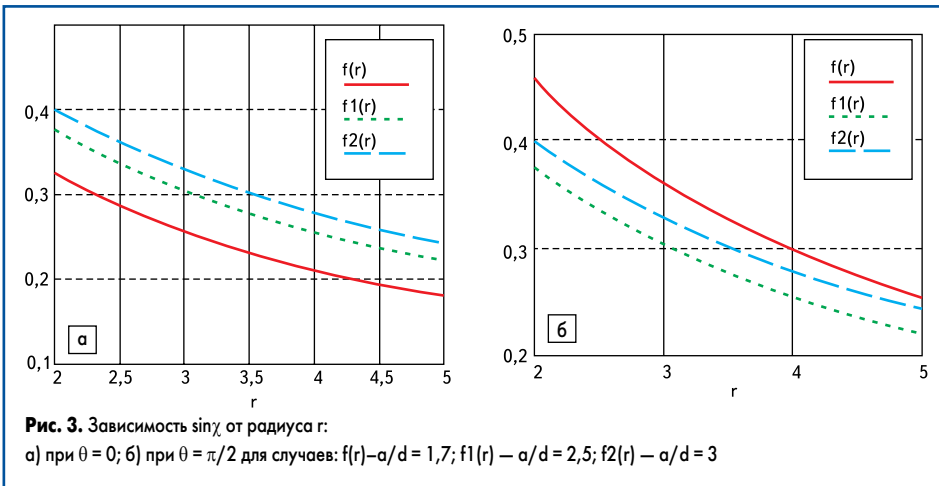
С учетом угла  $\gamma$  наибольшая величина вертикальной  $P_\theta$  и горизонтальной  $P_z$ , составляющих силы натяжения провода, равна:

$$P_\theta = P \sin \gamma, \quad P_z = P \cos \gamma. \quad (3)$$

Величина  $P_\theta$  — усилия в процессе накрутки с целью предупреждения нахлеста витков — не должна превышать осевую силу прижима витков друг к другу, создаваемую накручивающим устройством. Следовательно, усилие сжатия пружины  $P_{np}$  механизма накрутки — усилие прижима витков друг к другу — не должно превышать величину вертикальной составляющей силы накрутки  $P_\theta$ :

$$P_{np} \leq P_\theta. \quad (4)$$

Для определения окружной силы и особенностей ее действия на провод и вывод во время процесса накрутки необходимо определить вспомогательный угол  $\chi$  (рис. 1б) в косоугольном треугольнике АОК и  $\beta$  — в косоугольном треугольнике ГОК.



$$R = \sqrt{(c+0,5d)^2 + \left[ (c+r+0,5d) \frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} - r \right]^2 - 2(c+0,5d) \left[ (c+r+0,5d) \frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} - r \right] \cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (11)$$

В треугольнике АОК известны: длина сторон  $OA = c+r+0,5d$ ,  $OK = c+0,5d$  и угол  $OKG = \pi/4 + \theta$ , в треугольнике ГОК сторона  $OG$  может быть определена как разность  $GK = AK - r$ . На основе теоремы синусов для косоугольного треугольника получаем из треугольника АОК соотношение:

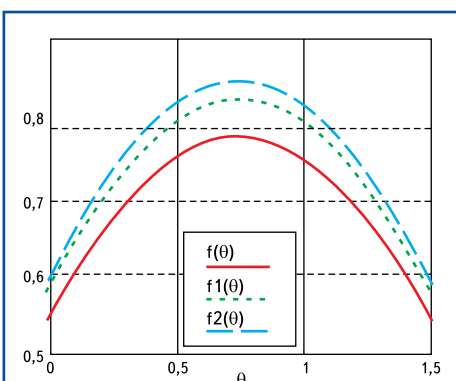
$$\sin\chi = \frac{c+0,5d}{c+0,5d+r} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right), \quad (5)$$

где  $c$  — половина диагонали квадратного поперечного сечения вывода, равная  $1,41a$ ;  $a$  — размер стороны квадратного вывода;  $\theta$  — угол наклона витка к стороне квадрата (рис. 16), периодически изменяющийся, судя по рис. 2, от  $\pi/2$  до  $0$  у каждой стороны квадрата.

На рис. 3 показано изменение величины  $\sin\chi$  от радиуса  $r$  при  $\theta = 0$  и  $\pi/2$ . А на рис. 4 — зависимость  $\sin\chi$  от  $\theta$  при радиусе  $r = 2$ , из которой следует, что  $\sin\chi$  имеет наибольшую величину при  $\theta = \pi/4$ .

Полная величина окружной составляющей силы натяжения (рис. 16) на выходе из тороидальной кромки накручивающего валика равна:

$$P_{ок} = P \sin\beta. \quad (6)$$



А горизонтальная составляющая этого усилия, определяющая крутящий момент в плоскости, перпендикулярной оси вывода, должна учитывать наклон  $P_{ок}$  к ней, то есть угол  $\gamma$  (2), и равна:

$$P_{\partial\theta} = P_{ок} \cos\gamma = P \sin\beta \cos\gamma. \quad (7)$$

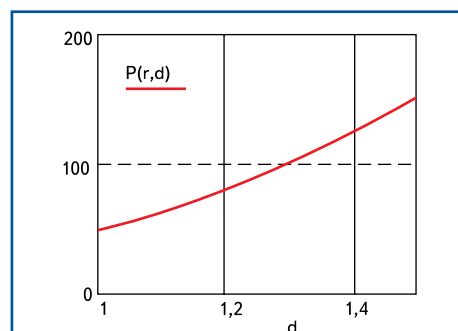
Здесь  $\sin\beta$  определяется выражением (12), другие необходимые параметры из треугольников АОК и ГОК равны с учетом теоремы синусов:

$$GK = AK - r, \quad (8)$$

$$AK = (c+0,5d+r) \frac{\sin\eta}{\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (9)$$

$$\eta = 3/4\pi - \theta - \chi \text{ и } \chi = \arcsin(\sin\chi). \quad (10)$$

Так как параметры  $a$  и  $r$  линейно зависят от диаметра проводника  $d$ , то характер зависимости  $\arcsin(\sin\chi)$  от  $a$  и  $r$  будет таким же. Это относится и к особенностям изменения окружного усилия накрутки (6). На рис. 5 показан характер зависимости максимального усилия накрутки, действующего на накручивающий валик, из которого следует, что это усилие является постоянным при выбранном диаметре вывода.

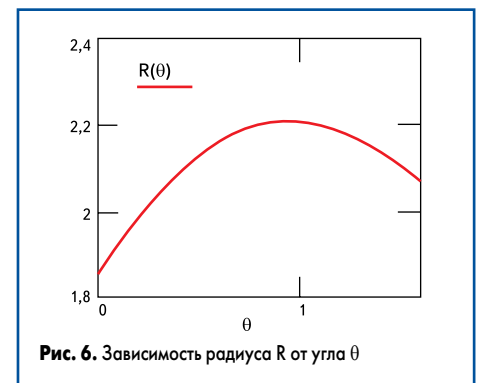


Для определения мощности привода необходимо определить крутящий момент. С этой целью вычислим плечо действия усилия накрутки — радиус действия наибольшего усилия:  $R = OG$ . Эту величину определим из треугольника ОКГ, в котором известны отрезки:  $OK = c+0,5d$ ,  $GK$ , определяемый выражением (8), и угол  $\theta + \pi/4$ . На основе теоремы косинусов получаем (11).

Параметр  $\sin\beta$  определим на основе теоремы синусов из треугольника ОКГ с учетом  $R$ :

$$\sin\beta = \frac{c+0,5d}{R} \times \sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right). \quad (12)$$

На рис. 6 показана особенность зависимости радиуса  $R$  от угла  $\theta$ , из которой можно установить, что процесс перехода накрутки от одной стороны квадрата вывода к другой сопровождается скачкообразным уменьшением этого радиуса от величины  $\sim 2,1$  при  $\theta = 0$  до  $\sim 1,85$  при  $\theta = \pi/2$ .



Расчет параметров вывода — стороны квадрата — основывается на прочности его материала. Для этого используем соответствующие процессу кручения формулы в теории расчетов на прочность, определяющие крутящий момент и угол закручивания. Предельные значения крутящего момента  $M$  и угла закручивания  $\varphi$  равны:

$$M = \alpha a^3 [\tau], \quad \varphi = Ml/\lambda a^4 G, \quad (13)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, равный  $0,208$ ;  $a$  — размер стороны квадрата;  $[\tau]$  — допустимая величина напряжения сдвига;  $l$  — расстояние от основания вывода до места приложения на нем усилия накрутки;  $\lambda$  — коэффициент, равный  $0,14$ ;  $G$  — модуль упругости при сдвиге.

Крутящий момент с учетом силы  $P_{\partial\theta}$  (7) равен:

$$M_{\partial\theta} = P_{\partial\theta} R = P \sin\beta \cos\gamma R, \quad (14)$$

где  $R$  — плечо силы, определяемое выражением (11). Из формулы (14) и рис. 7 следует, что в связи с изменением радиуса  $R$  и угла  $\beta$  величина крутящего момента при повороте накручивающего валика относительно стороны вывода на угол от  $\theta = \pi/2$  до  $\theta = 0$  пульсирующе изменяется, хотя сила накрутки остается постоянной.

Мощность электродвигателя с учетом этих данных равна в кВт:

$$N = (M_{\partial\theta} \times v) / (102 \times 60), \quad (15)$$

где  $v$  — скорость накрутки, равная  $2\pi R n_n / 1000$  (м/мин);  $n_n$  — частота вращения накручивающего валика, принимаемая обычно в пределах от 14 до 300 об/мин. Очевидным является то, что мощность привода накручивающего

устройства необходимо рассчитывать с учетом этих особенностей процесса.

Угол  $\phi$  определяется в тех случаях, когда при небольшом расстоянии между накрученными концами проводника при разгрузке вывода от крутящего момента возможно натяжение проводника. Такое натяжение обычно недопустимо, и поэтому необходимо предусматривать определенный запас провода.

Из формулы (13) с учетом (14) получим предельную минимальную величину стороны квадратного поперечного сечения вывода при выбранном материале вывода:

$$a = \sqrt[3]{\frac{M_{\partial\theta}}{\alpha[\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{P_{\partial\theta} L}{\alpha[\tau]}}. \quad (16)$$

Таким образом, получены основные соотношения, позволяющие при проектировании процессов и инструментов для электро монтажа способом накрутки определить главные параметры этого процесса: осевое усилие на-

тяжения проводника и осевое усилие прижима витков; силу, определяющую мощность привода электродвигателя, и параметры поперечного сечения вывода. Для этой цели в условиях, когда объекты производства часто меняются, может быть представлена автоматизированная система расчета всех параметров процесса накрутки.

### Литература

1. Ковалев С. В., Ковалев В. Г. Основные расчетные параметры электро монтажа методом накрутки // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 8.
2. Ковалев С. В., Ковалев В. Г. Электрический монтаж накруткой // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2008. № 9.
3. Ковалев С. В., Ковалев В. Г. Техничко-экономические вопросы производства радиоэлектронных средств // Вестник МГУПИ. Серия «Машиностроение». 2009. № 23.