

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛ СВАРИВАНИЯ КОНТАКТОВ ПРИ ИХ ЗАМЫКАНИИ НА АВАРИЙНЫЕ СВЕРХТОКИ

У статті розглянуто теоретичний розрахунок сил зварювання контактів при включенні їх на струм короткого замикання 20 кА. Отримано значення часу вібрації і сили зварювання контактів на основі контактної і теплового розрахунків. Показана залежність сили зварювання від коефіцієнту потужності та фази включення, які обумовлюють швидкість зростання аварійного струму.

В статье рассмотрен теоретический расчет сил сваривания контактов при включении их на ток короткого замыкания 20 кА. Получено значение времени вибрации и силы сваривания контактов на основе контактного и теплового расчетов. Показана зависимость силы сваривания от коэффициента мощности и фазы включения, которые обуславливают скорость нарастания аварийного тока.

Одним из условий надежной работы автоматических выключателей (в том числе и вакуумных) является условие несвариваемости контактов при включении их на ток короткого замыкания.

Анализ литературы по данной тематике показывает недостаточную теоретическую исследованность данного вопроса. Проблема заключается в том, что для такого расчета необходимо знать как механические параметры (скорость замыкания, время удара, время разомкнутого состояния контактов, время горения дуги), так и тепловые параметры (нагрев контактной поверхности, изменение расплавленной области и т.д.). Причем, параметры вибрации должны быть определены на основании расчетов теории упругости, а тепловые параметры на основании тепловых расчетов с учетом изменения фазового состояния вещества (задача Стефана). Данный вопрос рассматривался в [1-6]. Однако введу сложности вопроса, многие аспекты данной проблемы нуждаются в дальнейшем уточнении. Как следует из [1-6], сваривание контактов при любом выборе расчетной модели зависит от ряда параметров, важнейшими из которых являются: контактное нажатие, ток, материал контактов.

Процесс сваривания контактов при включении можно описать следующим образом. При замыкании контактов с определенной скоростью происходит процесс их совместной деформации с одновременным увеличением включаемого тока. Под действием сил упругости подвижный контакт начинает движение в обратном направлении, уменьшая контактную площадку при нарастающем токе цепи. Это приводит к появлению расплавленной фазы материала, часть которой при дальнейшем расхождении контактов взрывается, образуя короткую дугу, горящую в парах материала. Время разомкнутого состояния контактов при вибрации определяет радиус расплавленной зоны, которая при последующем замыкании контактов или исчезновении тока КЗ (отключение выше- или нижестоящим выключателем) приводит к их свариванию.

Данная тематика актуальна, так как значение силы сваривания существенно влияет на надежность работы контактного узла.

Цель данной статьи – определение значения силы сваривания контактов при их включении на сквозной ток короткого замыкания с действующим значением 20 кА.

Для достижения поставленной цели необходимо:

– на основе решения контактной задачи определить силу деформации контактной системы;

- определить время соударения и время разомкнутого состояния контактов;
- на основании решения задачи Стефана определить радиус расплавленной области;
- рассчитать возможное значение силы сваривания при включении, определив требуемую силу контактного нажатия;
- сделать соответствующие выводы.

Для определения параметров вибрации контактной системы использовалась эквивалентная схема замещения, показанная на рис. 1.

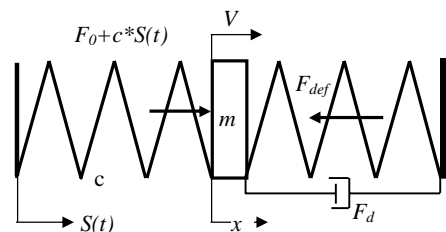


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения контактной системы, где F_0 – начальная сила контактного нажатия; m – эквивалентная масса движущегося контакта; x – деформация контактной системы; V – скорость замыкания контакта; F_{def} – эквивалентная сила деформации контактной системы; F_d – демпфирующая сила, c – жесткость пружины контактного нажатия; $S(t)$ – ход контактодержателя

Часть данных, таких как F_0 , c , m – задана изначально, а часть данных, таких как $S(t)$, V , F_{def} , F_d – определялась их расчета динамики электромагнитного привода, построенного на базе двухпозиционного магнита с магнитной защелкой. Значение эквивалентной силы деформации определялось на основании решения контактной задачи теории упругости. Причем, значение силы деформации было приведено к плоскости силы приложения контактного нажатия. Результаты расчета после обработки данных методом наименьших квадратов позволили получить для силы деформации следующее соотношение:

$$F_{def} = 2.88 \cdot 10^8 \cdot x(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – параметр движения подвижного контакта.

Сила демпфирования определялась на основании уравнения:

$$K_u = 1 - \exp(-\xi / m \cdot T), \quad (2)$$

где K_u – коэффициент удара, характеризующий потерю энергии при ударе; ξ – коэффициент демпфирования; m – масса подвижного контакта; T – период колебаний контакта, рассчитанный на основании массы

и соотношения (1).

Коэффициент удара определяется экспериментальным путем и для материала медь, приведен в [7].

Уравнение движения подвижного контакта будет следующим:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + \xi \cdot \frac{dx}{dt} + F_{def}(x) = F_0 + c \cdot S(t). \quad (3)$$

Причем

$$F_{def}(x) = \begin{cases} F_{def}(x), & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}, \xi = \begin{cases} \xi, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}.$$

Одним из важнейших параметров, определяющих работу контактной системы, является скорость замыкания контактов. На основании расчета динамики различных конструкций актуаторов, было получено максимальное значение скорости, равное 2.3 м/с.

Результаты расчетов отскока контактов, проведенные для данного значения скорости показаны на рис. 2.

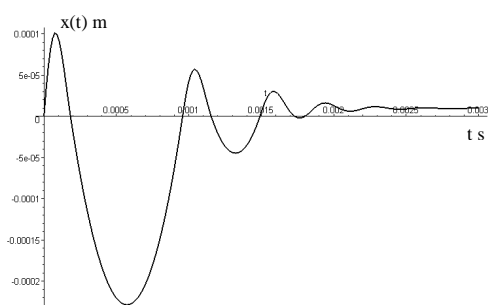


Рис. 2. Динамика вибрации подвижного контакта

На основании решения (3) и рис. 2, было определено время первого отскока контакта равное 0.72 мс, а так же суммарное время вибрации, равное 1.06 мс.

Далее, на основании данных о вибрации была получена информация о тепловых процессах, происходящих на поверхности контактов при следующих допущениях: при включении контактов на ток короткого замыкания время горения дуги в процессе отскока учитывается экспериментально полученным коэффициентом равным 0.7; во время горения короткой дуги тепловая мощность, вводимая в контакт, определяется током и эквивалентным приэлектродным падением напряжения; рассматривается анодная дуга с одним опорным пятном; тепловая мощность дуги входит в зону, имеющую температуру испарения контактного материала; внутренними объемными источниками тепла можно пренебречь, ввиду их малости по сравнению с мощностью электрической дуги.

Данные допущения являются стандартными и широко используются в [1, 4-6, 8, 9] и другой литературе.

Расчетная тепловая модель воздействия дуги на контактный материал в сферической системе координат [5] показана на рис. 3.

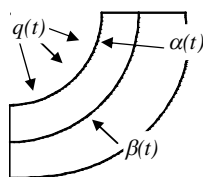


Рис. 3. Расчетная модель, где $q(t)$ – входящий тепловой поток; $\alpha(t)$ – подвижная граница фронта испарения материала; $\beta(t)$ – подвижная граница фронта плавления материала

Система дифференциальных уравнений, описывающих тепловое состояние в сферической системе координат:

$$\begin{cases} c \cdot \gamma_l \cdot \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} = \lambda_l \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta_1}{\partial r} \right), & \alpha(t) \leq r \leq \beta(t) \\ c \cdot \gamma_h \cdot \frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} = \lambda_h \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta_2}{\partial r} \right), & \beta(t) \leq r \leq \infty \end{cases}, \quad (4)$$

где c – теплоемкость материала; γ – плотность вещества в жидком и твердом состоянии; λ – теплопроводность материала в жидкой и твердой фазах.

Относительно нетрудно убедиться, что решением (4) являются функции:

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= C_1 + C_2 \cdot \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2 \cdot a_1 \cdot \sqrt{t}}\right)}{r}, \\ \vartheta_2 &= C_3 + C_4 \cdot \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{t}}\right)}{r}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $a = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \gamma}}$ – коэффициент температуропроводности для соответствующей области.

Задача (4) является задачей Стефана [10,11]. Неизвестные постоянные определяются из граничных условий:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(\alpha(t)) &= \vartheta_k, \quad \vartheta_1(\beta(t)) = \vartheta_p, \\ \vartheta_2(\beta(t)) &= \vartheta_p, \quad \vartheta_2(\infty) = \vartheta_0 \end{aligned}, \quad (6)$$

где ϑ_k – температура кипения; ϑ_p – температура плавления; ϑ_0 – температура удаленной границы.

Неизвестные значения подвижных границ областей фазовых переходов находятся на основании условий:

$$\begin{cases} \frac{U_e \cdot i(t)}{2 \cdot \pi \cdot \alpha(t)^2} + \lambda_l \cdot \frac{\partial \vartheta_1(\alpha(t))}{\partial r} - Q_i \cdot \gamma_l \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} = 0 \\ -\lambda_l \cdot \frac{\partial \vartheta_1(\beta(t))}{\partial r} + \lambda_h \cdot \frac{\partial \vartheta_2(\beta(t))}{\partial r} - Q_p \cdot \gamma_h \cdot \frac{d\beta(t)}{dt} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где U_e – эквивалентное приэлектродное падение напряжения [1, 3, 6, 8, 9]; $i(t)$ – ток; Q_i – скрытая теплота испарения; Q_p – скрытая теплота плавления.

В соответствии с рис. 2, тепловая мощность, подводимая к контактам (U_e) будет изменяться по закону, показанному на рис. 4 (начало отчета времени совпадает с началом отскока контакта).

Пример решение уравнений (7) с учетом (6) приведено на рис. 5.

Как следует из рис. 5, тепловая инерционность процесса мала. Последующий отскок контактов значительно увеличивает величину радиуса плавления. Кроме того, после замыкания контактов (время 1.31 мс) максимальное значение радиуса фронта плавления достигает максимума через 0.8 мс в момент времени равный 1.39 мс. В дальнейшем, радиусы фронтов (как видно из рис. 5) начинают уменьшаться, вплоть до полного исчезновения радиуса фронта испарения. Радиус фронта плавления будет в дальнейшем определяться нагревом от внутренних источников тепла (прохождение тока КЗ через замкнутые контакты) и в данной задаче не рассматривается.

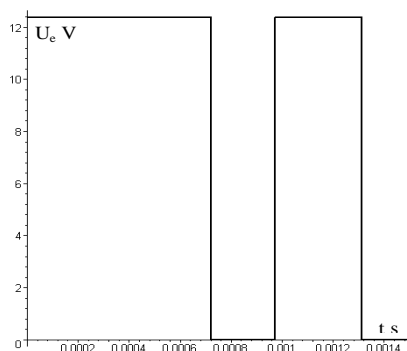


Рис. 4. Напряжение на короткой дуге в соответствии с параметрами вибрации

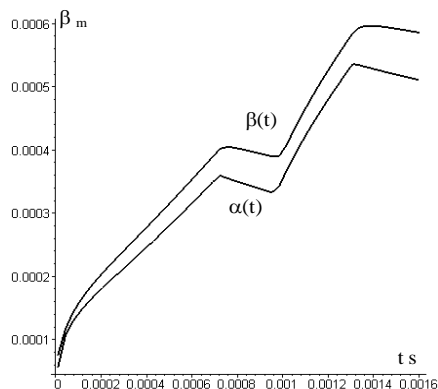


Рис. 5. Значения радиусов фронтов испарения и плавления в зависимости от времени вибрации

Определения максимального значения силы сваривания проводилось по формуле:

$$F_{\max} = \pi \cdot \beta_{\max}^2 \cdot [\sigma], \quad (8)$$

где F_{\max} – максимально возможное значение силы сваривания контактов; β_{\max} – максимальное значение радиуса плавления; $[\sigma]$ – предел прочности при растяжении материала контактов.

Как показывают расчеты, на силу сваривания влияют не только параметры вибрации и значение тока. Так как параметры вибрации определяются механикой [8], то основными факторами, определяющими силу сваривания, является скорость нарастания тока в сети, определяемая коэффициентом мощности и фазой включения. Поэтому, при меньшем значении коэффициента мощности цепи, сила сваривания будет меньше (меньше скорость нарастания тока). Так при $\cos\varphi = 0,1$, сила сваривания будет 584 Н, а при $\cos\varphi = 0,8$ – 690 Н. Кроме того, максимальное значение силы сваривания будет при такой фазе включения, которая исключает переходный процесс при активно-индуктивной нагрузке сети (максимальная скорость нарастания тока). Так при изменении фазы включения напряжения с 0 до $\pi/2$, сила сваривания увеличивается более чем в 3,5 раза. Однако данный вопрос требует дальнейшего теоретического исследования.

Так как процесс сваривания носит вероятностный характер [1,3], то можно утверждать, что при максимально возможной скорости замыкания контактов (максимально возможная скорость движения привода) выбор силы начального контактного нажатия превышает максимальное значение силы сваривания обеспечивает надежную работу контактного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев Н.В. Сваривание электрических контактов при включении больших токов. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности электрические аппараты. – Харьков, 1984.
2. Лысов Н.Е. Сваривание замкнутых одноточечных и плоскостных контактов. – Электротехника. – 1964. – № 4. – С. 25-28.
3. Брон О.Б., Гусев В.И. Явления в контактах низковольтных аппаратов при включении ими больших токов короткого замыкания. – Электросила. – 1973. – № 29. – С.124-128.
4. Мерл В. Электрический контакт. Пер. с нем. под ред. Декабрун И.Е. М.-Л.: ГЭИ, 1962. – 80 с.
5. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во: Иностран. лит., 1961. – 406 с.
6. Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах. Алма-Ата: Наука Каз.ССР, 1977. – 236 с.
7. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов (общие вопросы проектирования). Учебное пособие для вузов. М.: Энергия, 1971. – 590 с.
8. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. – 536 с.
9. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Веденников Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов. М.: Наука, 1978. – 256 с.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. – 735 с.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1966. – 599 с.

Bibliography (transliterated): 1. Korolev N.V. Svarivanie `elektricheskikh kontaktov pri vklyuchenii bol'shikh tokov. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. po special'nosti `elektricheskie apparaty. - Har'kov, 1984. 2. Lysov N.E. Svarivanie zamknytykh odnotochechnykh i ploskostnykh kontaktov. - `Elektrotehnika. - 1964. - № 4. - S. 25-28. 3. Bron O.B., Gusev V.I. Yavleniya v kontaktakh nizkovol'nykh apparatov pri vklyuchenii imi bol'shikh tokov korotkogo zamykaniya. - `Elektrosila. - 1973. - № 29. - S.124-128. 4. Merl V. `Elektricheskij kontakt. Per. s nem. pod red. Dekabrun I.E. M.-L.: G`EI, 1962. - 80 s. 5. Hol'm R. `Elektricheskie kontakty. M.: Izd-vo: Inostr. lit., 1961. - 406 s. 6. Kim E.I., Omel'chenko V.T., Harin S.N. Matematicheskie modeli teplovykh processov v `elektricheskikh kontaktah. Alma-Ata: Nauka Kaz.SSR, 1977. - 236 s. 7. Saharov P.V. Proektirovanie `elektricheskikh apparatov (obschie voprosy proektirovaniya). Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: `Energiya, 1971. - 590 s. 8. Rahovskij V.I. Fizicheskie osnovy kommutacii `elektricheskogo toka v vakuume. M.; Nauka, 1970. - 536 s. 9. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedennikov N.A., Zhavoronkov M.A. `Elektricheskaya `eroziya sil'notochnykh kontaktov i `elektrodov. M.: Nauka, 1978. - 256 s. 10. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1972. - 735 s. 11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Vyssh. shkola, 1966. - 599 s.

Поступила 24.02.2012

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические аппараты"
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21
тел. (057) 707-69-76, e-mail: baida@kpi.kharkov.ua

Bayda E.I.

Theoretical calculation of contact welding forces under short-circuit contact closure.

The article deals with theoretical calculation of contact welding forces under action of through-fault current of 20 kA. Vibration time and contacts welding force value are obtained through contact and thermal calculations. For a designed two-position actuator with permanent magnets, it is shown that at closure speeds of about 2.3 m/s, vibration time is not sufficient for contacts welding with the force which the drive mechanism could not overcome.

Key words – contact vibration, circuit speed, melting point radius, welding strength.