



ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ДРОССЕЛЯ СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н. И. ПОСТОЛАТИЙ, инж. (Кахов. з-д электросвароч. оборудования)

Описана методика определения необходимой индуктивности сварочной цепи постоянного тока и расчета конструкции дросселя сварочной цепи по допустимой скорости нарастания тока.

Ключевые слова: дуговая сварка, напряжение, сварочный ток, жесткая внешняя характеристика, электродинамика источника, пульсации напряжения и тока, каплеперенос расплавленного металла, закон управления, индуктивность, потокосцепление, магнитный поток, дроссель, геометрия магнитопровода

Одним из основных элементов сварочных выпрямителей является дроссель на выпрямленной стороне источника питания. От индуктивности дросселя зависят сварочные свойства источника. Практика настройки параметров сварочных выпрямителей тиристорных (плавно управляемых) и вентильных (со ступенчатым управлением) подтвердила определяющую роль электродинамики сварочной цепи на качество формирования наплавленного металла и минимизации потерь. Требования ГОСТ 25616–83, безусловно, необходимы, но явно недостаточны для оптимального выбора соотношений конструктивных параметров источника. Субъективная оценка опытными операторами-сварщиками характера процесса (вплоть до акустики) остается совершенно необходимой.

Если в управляемых выпрямителях в распоряжении разработчика, кроме выбора RL соотношений тракта сеть–трансформатор–мост–дроссель, имеется еще и закон управления [1], то в вентильных источниках определяющим является правильный выбор схемы дросселя в сочетании с индуктивностью короткого замыкания трансформатора (приведенной ко вторичной стороне). При работе двух выпрямителей на параллельную нагрузку в одном источнике (КИГ-401, КИГ-601) необходимо оптимизировать каждый параллельный тракт.

На Каховском заводе ЭСО накоплен опыт по определению требуемой индуктивности сварочной цепи постоянного тока по заданной начальной скорости нарастания тока и приближенного расчета конструктивных параметров дросселя при оптимальном их соотношении (сечение магнитопровода, количество витков, немагнитный зазор). Практика показывает, что дроссель, установленный для универсальных источников, по критериям для режима жестких внешних характеристик вполне пригоден и для падающих. Поэтому ограничимся источниками с ЖВХ.

Как следует из работы [2], наиболее неблагоприятным по формированию и потерям является режим сварки на токах 250...350 А, сопровожда-

ющийся крупнокапельными короткими замыканиями дугового промежутка (напряжение на дуге примерно 25...30 В). На осциллограмме напряжения на электроде зафиксирован ступенчатый «провал», равный $U_{св}$.

Очевидно, что эта ступень напряжения в начальный момент распределяется последовательно по участкам всего тракта пропорционально их индуктивностям. Для всего тракта в начальный момент можно записать

$$- U_{св} = L \frac{di_{\max}}{dt}, \quad (1)$$

где L — суммарная индуктивность тракта, приведенная ко вторичной (сварочной) цепи; di_{\max}/dt — максимальная (начальная) скорость нарастания тока.

Далее скорость убывает по экспоненте с постоянной времени $\tau = L/R$, где R — суммарное активное сопротивление тракта, приведенное ко вторичной (сварочной) цепи.

С одной стороны, слишком быстрое нарастание сварочного тока вследствие малой индуктивности приведет либо к разрушению капли, либо к флуктуациям ванны и плохому формированию. С другой, — чрезмерная индуктивность вызовет затянутый (вялый) каплеперенос, а следовательно, и плохое формирование.

Влияние суммарного активного сопротивления R , очевидно, состоит в том, что установившееся значение тока короткого замыкания, к которому стремится переходный процесс при малом R , настолько велико, что крутизна формы нарастания тока приведет также либо к разрушению капли, либо к флуктуациям ванны.

Противоречие заключается еще и в том, что с учетом КПД следует стремиться к возможно меньшему R . Поскольку R определяет крутизну внешней статической характеристики источника (т. е. способность к саморегулированию дуги при постоянной скорости подачи электрода), то этот параметр должен быть компромиссным.

Из выше приведенного следует, что на сварочные свойства влияет весь комплекс параметров, и отдельно взятый параметр не может эти свойства характеризовать. Однако главным параметром все же остается наибольшая скорость нарастания тока.

Согласно работе [2] по динамическим характеристикам источники делятся на инерционные

(10...30), средне- (30...60), мало- (70...200) и безынерционные (свыше 200 кА/с).

В соответствии с этой классификацией определим требуемую суммарную индуктивность для каждой группы с учетом формулы (1) и при $U_{св} \approx 25$ В:

$$L = U_{св} \frac{di_{max}}{dt}$$

Для инерционных источников L составляет $(2,5...1,0) \cdot 10^{-3}$; среднеинерционных — $(0,8...0,4) \cdot 10^{-3}$; малоинерционных — $(0,36...0,125) \cdot 10^{-3}$ Гн.

Согласно техническим характеристикам 13 источников [2] их КПД составляет 70...72 %, следовательно, их активное сопротивление короткого замыкания приблизительно одинаково, и ток короткого замыкания (в частности, при каплепереносе) имеет одинаковый порядок.

Индуктивность дросселей источников (кроме электромашинных) составляет 0,16...0,56 мГн, что позволяет отнести их к средне- и малоинерционным. Опыт короткого замыкания источника КИГ-401 по тракту Y/Y-мост на минимальной и максимальной ступени показывает индуктивность короткого замыкания в пределах 0,10...0,11 мГн.

Опыт короткого замыкания этого же источника по тракту Y/Δ показывает их индуктивность, равную 0,234...0,345 мГн. Проверка сварочных свойств по тракту Y/Δ-мост (без дросселя) дает хороший результат. При проверке КИГ-401 по тракту Y/Y-мост (без дросселя) установлено, что сварка невозможна.

Аналогичные результаты получены на источнике КИГ-601. Выходная цепь этих источников по дросселю имеет несимметричную схему, которая и приводит к взаимной симметрии электродинамики двух параллельных трактов.

Индуктивность дросселя КИГ-401 по тракту Y/Y-мост-дроссель составляет $0,11 + 0,45 = 0,56$ мГн; по тракту Y/Δ-мост-дроссель — $0,345 + 0,125 = 0,47$ мГн.

Следовательно, источники КИГ-401 и КИГ-601 можно отнести к среднеинерционным.

Из приведенного выше следует, что для определения требуемой индуктивности дросселя после задания допустимой скорости нарастания и определения из опыта коротких замыканий или расчета внутренней индуктивности (рассеяния) трансформатора

$$L_{др} = L_{тр} - L_{к.з}$$

где $L_{др}$ — индуктивность дросселя; $L_{тр}$ — суммарная требуемая индуктивность тракта по условию допустимой скорости нарастания тока; $L_{к.з}$ — индуктивность короткого замыкания трансформатора из опыта коротких замыканий (или расчета).

Для расчета используются следующие обозначения: δ — суммарный зазор из материала с относительной магнитной проницаемостью, близкой к вакууму; $l_{ст}$ — средняя длина магнитосилового линии по стальному магнитопроводу, м; I — ток

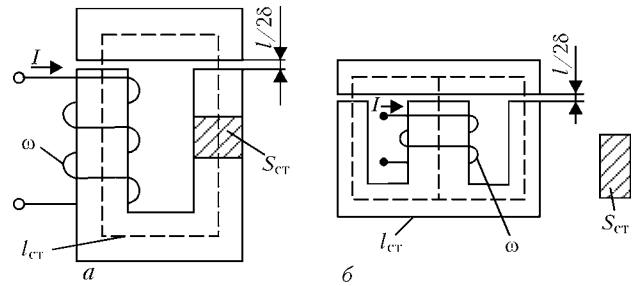


Рис. 1. Электромагнитные схемы дросселя с П-образным (а) и Ш-образным (б) магнитопроводом

в катушке, А; ω — количество витков в катушке; $S_{ст}$ — сечение магнитопровода, м²; B — индукция в магнитопроводе (и в зазоре), Тл; $H_{ст}$ — напряженность магнитного поля в стали, А/м; Φ — магнитный поток по сечению стали, Вб; $\Psi = \Phi\omega$, Ψ — потокосцепление, Вб.

На рис. 2 приведено семейство кривых намагничивания магнитопроводов, содержащих различные немагнитные зазоры δ_B вплоть до разомкнутого магнитопровода, где кривая вырождается в линейную зависимость намагничивания воздуха:

$$B_B = \mu_B H_B,$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; 1/\mu_0 = 796; \frac{\mu_B}{\mu_0} \approx 1 [3],$$

где μ_B — магнитная проницаемость в зазоре; H_B — напряженность магнитного поля в зазоре, А/мм.

Поскольку кривые 2, 3, ..., n отражают зависимость индукции B в двух средах, удобнее рассматривать их в координатах $B = f(I)$, где I — ток в обмотке дросселя.

Рассмотрим связь между кривой намагничивания дросселя $B = f(I)$ и его индуктивностью. Запишем выражение для индуктивности $L_{др}$ катушки с магнитопроводом без зазора в любой точке его кривой намагничивания

$$L_{др} = \frac{d\Psi}{dI} \quad (2)$$

В формуле (2) выполним следующие эквивалентные замены и подстановки [4]:

$$\begin{aligned} L_{др} &= \frac{d\Psi}{dI} = \frac{d}{dI} \omega\Phi = \frac{d}{dI} \omega BS_{ст} = \frac{d}{dI} \omega\mu\mu_0 HS_{ст} = \\ &= \frac{d}{dI} \omega\mu\mu_0 \frac{\omega I}{l_{ст}} S_{ст} = \frac{\mu\mu_0 \omega^2 S_{ст}}{l_{ст}} = \frac{\mu_0 \omega^2 S_{ст}}{l_{ст}/\mu}, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ — относительная динамическая магнитная проницаемость среды в ее рабочей точке. Здесь $\mu = f(B)$ и в итоге является нелинейной функцией.

Анализируя формулу (3), можно условно считать, что ферромагнитный магнитопровод длиной $l_{ст}$ заменен линейной средой длиной $l_{ст}/\mu$ с абсолютной магнитной проницаемостью μ_0 , а индуктивность $L_{др}$ записана для рабочей точки магнитопровода. Кроме того, рассматривая кривую намагничивания электротехнической стали [4], где $\mu = (dB/dH)/\mu_0 = f(B)$ имеет в начале порядок $(5,0...4,5) \cdot 10^3$, в середине (в районе перед «ко-



леном») $(2,0...1,5) \cdot 10^3$, а на участке насыщения стремится к единице; индуктивность катушки со сталью снижается по мере намагничивания вплоть до пренебрежимого минимума. Таким образом, замкнутый магнитопровод насыщается на малых токах, и на токах сварки дроссель работать не будет.

Если ввести в магнитопровод некоторый участок (зазор) δ , то в координатах $B = f(I)$ кривая намагничивания растянется вдоль оси тока, кривые 2, 3, ..., n по мере увеличения зазора будут стремиться к «кривой» намагничивания вакуума, принимая все более линейный характер.

С учетом формулы (3) для расчета индуктивности дросселя такой конструкции выражение примет вид [4]

$$L_{др} = \frac{\mu_0 \omega^2 S_{ст}}{\delta + l_{ст}/\mu} \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что в ненасыщенном дросселе индуктивность практически не зависит от длины магнитопровода из-за его относительно небольшой эквивалентной длины $l_{ст}/\mu$. Пока магнитопровод не начинает насыщаться, индуктивность зависит только от сечения стали, количества витков и размера зазора.

Следовательно, задача состоит в том, что, кроме расчета заданной индуктивности в рабочей точке ферромагнитной среды, следует в этой точке оказаться при заданном сварочном токе и оптимальном соотношении сечения стали, количестве витков и зазоре. Формула (4) однозначного решения не обеспечивает, требуются дополнительные условия.

Рабочей точкой B_p можно задаться, исходя из максимально допустимой индукции (насыщения) B_{max} .

Анализ конструктивных параметров дросселей известных источников показывает, что их рабочая точка B_p находится на уровне

$$B_p \approx 0,75B_{max},$$

что на практике достаточно для сопротивления пульсациям сварочного тока.

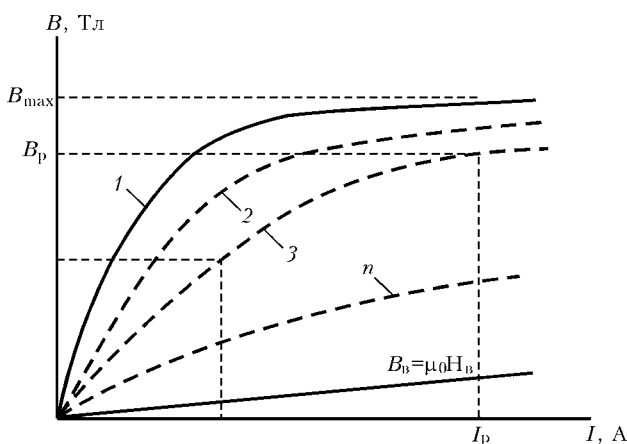


Рис. 2. Зависимость намагничивания замкнутого магнитопровода из ферромагнитного материала от тока при различных зазорах

В ненасыщенном магнитопроводе с зазором рабочая точка B_p однозначно определяется напряженностью магнитного поля H_p в зазоре

$$B_p = \mu_0 H_p.$$

Магнитодвижущая сила намагничивания $I_p \omega$ магнитной цепи по закону полного тока распределяется на зазор δ и ферромагнитный участок $l_{ст}$

$$I_p \omega = \delta H_p + l_{ст} H_{ст} \quad (5)$$

Заменим в математической модели по формуле (5) ферромагнитный участок эквивалентным ему по магнитному сопротивлению участком добавочного зазора

| δ , мм | ω | $S_{ок}, \text{мм}^2$ | $S_{ст}, \text{мм}^2$ | L , мГн |
|------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| $I_p = 150 \text{ A}$ | | | | |
| 1 | 8 | 800 | 560 | 0,0391 |
| 2 | 15 | 1500 | 1050 | 0,138 |
| 4 | 31 | 3100 | 2170 | 0,631 |
| 8 | 61 | 6100 | 4270 | 2,45 |
| 10 | 76 | 7600 | 5320 | 3,80 |
| 12 | 91 | 9100 | 6370 | 5,45 |
| $I_p = 300 \text{ A}$ | | | | |
| 1 | 5 | 100 | 700 | 0,0191 |
| 2 | 9 | 1800 | 1260 | 0,059 |
| 4 | 16 | 3200 | 2240 | 0,174 |
| 8 | 31 | 6220 | 4340 | 0,642 |
| 10 | 38 | 7600 | 5320 | 0,950 |
| 12 | 46 | 9200 | 6440 | 1,410 |
| $I_p = 500 \text{ A}$ | | | | |
| 1 | 3 | 1000 | 700 | 0,00688 |
| 2 | 5 | 1666 | 1167 | 0,017 |
| 4 | 10 | 3332 | 2332 | 0,0706 |
| 8 | 18 | 6000 | 4200 | 0,21 |
| 10 | 23 | 7667 | 5370 | 0,352 |
| 12 | 27 | 9000 | 6300 | 0,475 |
| $I_p = 600 \text{ A}$ | | | | |
| 1 | 2 | 800 | 560 | 0,0025 |
| 2 | 4 | 1600 | 1120 | 0,0105 |
| 4 | 8 | 3200 | 2240 | 0,0434 |
| 8 | 16 | 6400 | 4480 | 0,177 |
| 10 | 19 | 7600 | 5320 | 0,235 |
| 12 | 23 | 9200 | 6440 | 0,350 |
| $I_p = 1000 \text{ A}$ | | | | |
| 1 | — | — | — | — |
| 2 | 3 | 2000 | 1400 | 0,0074 |
| 4 | 5 | 3330 | 2330 | 0,017 |
| 8 | 9 | 6000 | 4200 | 0,052 |
| 10 | 12 | 8000 | 5600 | 0,099 |
| 12 | 14 | 9330 | 6530 | 0,132 |

$$l_{ст} H_{ст} = \frac{l_{ст}}{\mu} H_p$$

(как следует из кривых намагничивания электро-технических сталей [5], на рабочих участках этот параметр находится в пределах $1,5 \cdot 10^3 \leq \mu \leq 5 \cdot 10^3$).

Подставляя в формулу (5) перепад магнитного потенциала на добавочном зазоре, получаем

$$I_p \omega = \delta H_p \frac{l_{ст}}{\mu} H_p = H_p \left(\delta + \frac{l_{ст}}{\mu} \right)$$

С учетом зависимости (5) имеем

$$I_p \omega = \frac{B_p}{\mu} \left(\delta + \frac{l_{ст}}{\mu} \right)$$

откуда

$$\omega = \frac{B_p}{I_p} \frac{\delta + l_{ст}/\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

По опыту проектирования дросселей $l_{ст}/\mu$ находится в пределах 0,1...0,2 мм, что позволяет в первом приближении принимать его равным $\delta_{доп}$, т. е. примерно 0,15 мм.

Задавшись рабочей точкой $B_p = 0,75 B_{max}$, при рабочем токе I_p по формуле (6) можно определить количество витков в зависимости от зазора:

$$\omega \approx \frac{0,75 B_{max}}{I_p} \frac{\delta + 0,15}{\mu_0} \quad (7)$$

(например, для стали 3414 полагаем $B_{max} = 1,8$ Тл).

Для расчета индуктивности по формуле (3) следует определиться с размерами магнитопровода.

$$S_{ок} = \frac{I_p \omega}{\Delta K_{з.о}}, \quad (8)$$

где $S_{ок}$ — сечение окна, мм²; Δ — плотность тока в обмотке по условиям нагрева (для меди

принимаем $\Delta = 2,5$ А/мм² с учетом искусственной вентиляции); $K_{з.о}$ — коэффициент заполнения окна; $K_{з.о} = 0,6$).

По опыту проектирования магнитопроводов принимаем

$$S_{ст} \approx 0,7 S_{ок} \quad (9)$$

Расчет зависимости количества витков ω , размера окна $S_{ок}$, сечения магнитопровода $S_{ст}$, индуктивности дросселя $L_{др}$ от немагнитного зазора δ (при рабочей точке $B_p \approx 0,75 B_{max} = 1,4$ Тл) по формуле (4) сводим в таблицу.

Анализ таблицы показывает, что получить требуемую индуктивность дросселя при заданном рабочем токе путем простого наращивания количества витков невозможно из-за насыщения магнитопровода дросселя.

Поэтому следует, ориентируясь по этой таблице, сначала определиться с зазором, далее с количеством витков (7), затем с сечением магнитопровода (8), (9), потом по формуле (4) проверить индуктивность дросселя $L_{др}$. Последующие уточнения конструкции для получения заданного $L_{др}$ по условию сохранения рабочей точки возможны только за счет сечения стали.

После выбора профиля пластины следует выполнить уточненный расчет по формулам (6) и (4).

1. О сварочных свойствах тиристорных выпрямителей / Н. И. Постолатий, А. Д. Глуценко, С. В. Дух, Л. С. Гриценко // Автомат. сварка. — 2002. — № 10. — С. 42–44.
2. Потальевский А. Г. Сварка в углекислом газе. — М.: Машиностроение, 1984. — 81 с.
3. Чертов А. Г. Физические величины. — М.: Высш. шк., 1990. — 220 с.
4. Методика расчета дросселей входного и выходного фильтров сварочных инверторных источников питания при использовании стандартных магнитопроводов / И. В. Пентегов, С. Н. Мещеряк, М. В. Турты, С. В. Рымар // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 34–39.
5. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. — М.: Энергия, 1980. — 204 с.

A procedure is described for determination of the required inductance of DC welding circuit and design of welding circuit choke by the admissible rate of current increment.

Поступила в редакцию 14.06.2004