



Размыслов В.А., Бондаренко В.А.
V.A.Razmyslov, V.A.Bondarenko

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ТРЁХСТЕРЖНЕВОМ СВАРОЧНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

CALCULATION AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES TAKING PLACE IN A SINGLE-PHASE THREE-CORE ARC-WELDING TRANSFORMER



Размыслов Валерьян Александрович – профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 89141690950.

Mr. Valerian A. Razmyslov – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), tel.: + 79141690950.



Бондаренко Владимир Александрович – студент магистратуры кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 89141743529. E-mail: valdeck@td-net.ru.

Mr. Vladimir A. Bondarenko – MA student of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), tel.: +79141743529. E-mail: valdeck@td-net.ru.

Аннотация. Разработана математическая модель однофазного трёхстержневого сварочного трансформатора с расположением первичной и вторичной обмоток на разных стержнях. Приведены электромагнитная схема сварочного устройства, схема магнитной цепи трансформатора и система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в сварочном устройстве. Выполнены расчёты и проведён анализ электромагнитных процессов в предлагаемом сварочном устройстве.

Summary. Calculation and analysis of electromagnetic processes taking place in a single-phase three-core arc-welding transformer are proposed. A mathematical model is proposed for a single-phase three-core arc-welding transformer with primary and secondary coils on different cores. Presented is an electric-magnetic diagram of the welding device, its magnetic circuit diagram and a set of equations describing electromagnetic processes in the welding device. Calculations are made and analysis carried out of electromagnetic processes in the proposed welding unit.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, переходные процессы, сварочный трансформатор, электрическая дуга, регулирование сварочного тока, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

Key words: electromagnetic processes, transient processes, arc-welding transformer, electric arc, welding current control, efficiency factor, power ratio.

УДК 621.314.2

Описание сварочного трансформатора

Сварочное устройство состоит из однофазного трехстержневого трансформатора и шестиплевого однофазного выпрямителя, трансформатор с выходом на постоянном токе для ручной дуговой сварки (см. рис. 1). Первичная обмотка трансформатора расположена на среднем стержне. Вторичная обмотка состоит из двух частей – обмотка ОН относительно низкого напряжения, которая обеспечивает основную часть сварочного тока, и обмотка ОВ относительно высокого напряжения, которая предназначена для зажигания и поддержания устойчивого горения дуги. Обмотка ОВ, в свою очередь, состоит из двух частей, которые располагаются на разных крайних стержнях и соединены согласно. Благодаря размещению первичной и вторичных обмоток на разных стержнях магнитопровода, трансформатор обладает большим магнитным рассеянием, что обеспечивает крутопадающую внешнюю характеристику без применения токоограничивающего дросселя. При таких характеристиках напряжение холостого хода источника питания всегда больше напряжения дуги, что облегчает первоначальное и повторные зажигания дуги. Кроме того, при крутопадающей внешней характеристике ограничивается ток короткого замыкания. Вторичные обмотки работают параллельно через схему выпрямления, в виде однофазного шестиплевого выпрямителя. Она состоит из выпрямительных диодов ($VD1, VD2, VD3, VD4$) – неуправляемые, тиристоров схемы выпрямления ($VS5$ и $VS6$) – управляемые, что позволяет плавно регулировать сварочный ток. Число витков обмотки ОВ ($w_3 + w_4$) выбирается из условия получения напряжения холостого хода, достаточного для успешного зажигания дуги. Сечения крайних стержней одинаковы, а сечение среднего стержня равно сумме сечений крайних стержней. На холостом ходу ЭДС обмотки ОВ больше чем обмотки ОН, и она является напряжением холостого хода сварочного устройства.

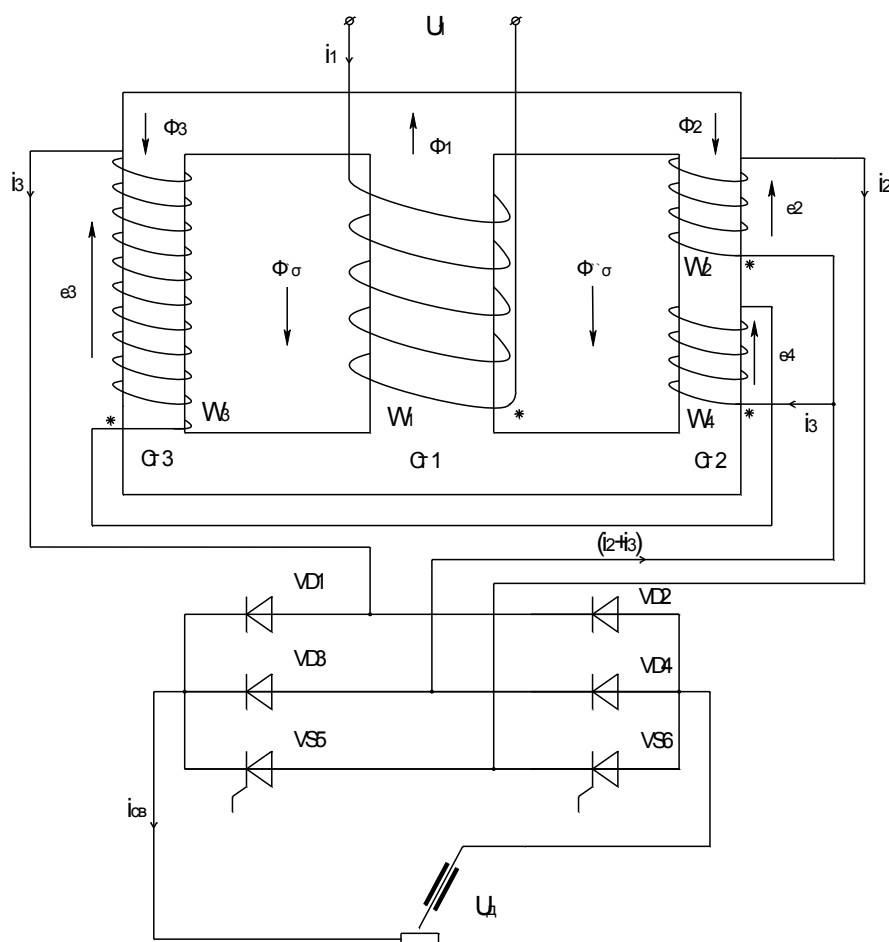


Рис. 1. Электромагнитная схема сварочного устройства

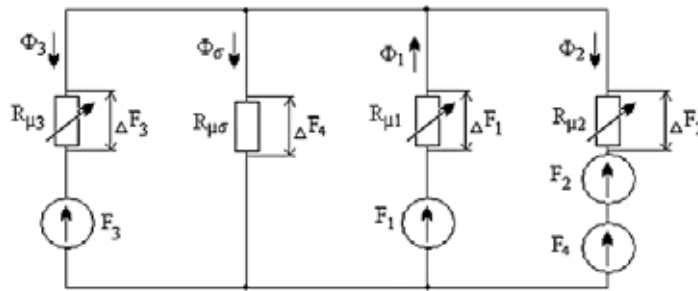


Рис. 2. Схема магнитной цепи трансформатора

Математическая модель сварочного устройства

Электромагнитные переходные процессы через мгновенные значения переменных описываются уравнениями равновесия напряжений обмоток и уравнениями магнитной цепи.

$$\left\{ \begin{aligned} u_1 &= \frac{d\Psi_1}{dt} + r_1 i_1, \\ e_2 &= r_2 i_2 + r_{d2} i_2 + r_{d4} (i_2 + i_3) + r_k (i_2 + i_3) + k_2 u_d, \\ e_3 + e_4 &= r_3 i_3 + r_{d3} i_3 + r_{d4} (i_2 + i_3) + r_k (i_2 + i_3) + k_3 u_d, \\ i_{св} &= |i_2 + i_3|, \\ U_d &= 20 + (0.04 + d_0) i_{св}, \\ \Phi_1 &= \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_{\sigma}, \\ F_1 &= \Delta F_1 + \Delta F_4, \\ F_2 + F_4 &= \Delta F_2 - \Delta F_4, \\ F_3 &= \Delta F_3 - \Delta F_4 \end{aligned} \right.$$

где $u_1 = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ – напряжение питающей сети; U_m – амплитуда напряжения; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота сети; φ_0 – начальная фаза; t – время; Ψ_1, i_1 – потокосцепление и ток первичной обмотки; i_2, i_3 – токи вторичных обмоток; $i_{св}$ – сварочный ток; r_1, r_2, r_3 – активные сопротивления первичной и полукатушек вторичных обмоток; r_{d2}, r_{d3}, r_{d4} – сопротивления вентилях VS5, VS6 и VD1, VD2, VD3, VD4; U_d – напряжение дуги; r_k – сопротивление сварочного кабеля; $e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt}$ – ЭДС катушки 2 (обмотки ОН); $e_3 = -\frac{d\Psi_3}{dt}$ – ЭДС катушки 3; $e_4 = -\frac{d\Psi_4}{dt}$ – ЭДС катушки 4; $(e_3 + e_4)$ – ЭДС обмотки ОВ; Ψ_2, Ψ_3, Ψ_4 – потокосцепления катушек 2, 3 и 4; k_2, k_3 – коэффициенты, учитывающие очередность следования полуволн токов обмоток ОН и ОВ; d_0 – коэффициент, учитывающий отличие действующего значения напряжения дуги от среднего; $F_1 = i_1 w_1, F_2 = i_2 w_2, F_3 = i_3 w_3$ – магнитодвижущие силы катушек; w_1, w_2, w_3, w_4 – числа витков катушек; Φ_1, Φ_2, Φ_3 – магнитные потоки среднего и крайних стержней; Φ_{σ} – магнитный поток рассеяния; $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$ – падения магнитного потенциала в среднем и крайних стержнях с прилегающими участками ярем; $\Delta F_4 = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Lambda}$ – падение магнитного потенциала на путях рассеяния; Λ – магнитная проводимость рассеяния.

Вторичные обмотки работают поочередно, в один полупериод – одна обмотка, в другой полупериод – вторая обмотка. Поэтому процессы в каждой из вторичных обмоток описываются одним уравнением, что соответствует модели с переменной структурой.

Падения магнитного потенциала в стержнях являются нелинейными функциями соответствующих магнитных потоков $\Delta F_1 = f(\Phi_1), \Delta F_2 = f(\Phi_2), \Delta F_3 = f(\Phi_3)$ и определяются по кривой намагничивания сердечника. Кривая намагничивания аппроксимируется линейными сплайнами.

Значение d_0 приближенно равно

$$d_0 = \frac{0.35}{80 + \sqrt{I_{свн}}},$$

где $I_{свн}$ – номинальный (максимальный) сварочный ток по действующему значению.

Потокосцепления катушек связаны с магнитными потоками соотношениями

$$\Psi_1 = \Phi_1 w_1, \quad \Psi_2 = \Phi_2 w_2, \quad \Psi_3 = \Phi_3 w_3, \quad \Psi_4 = \Phi_4 w_4.$$

Вольт-амперные характеристики вентилях в открытом состоянии аппроксимируются зависимостью $U_d = k\sqrt{i}$, где $k = const$.

На основе разработанной математической модели создана программа расчета переходных процессов и выполнены расчеты электромагнитных процессов в сварочном устройстве при разных углах открытия тиристоров.

Программа выполняет расчёт мгновенных значений токов, напряжений, ЭДС и магнитных потоков, строит графики изменения этих величин во времени, определяет максимальные и действующие значения токов и напряжений, рассчитывает КПД, коэффициент мощности, потребляемую мощность устройства, мощность сварочной дуги и коэффициент искажения, потребляемого из сети тока.

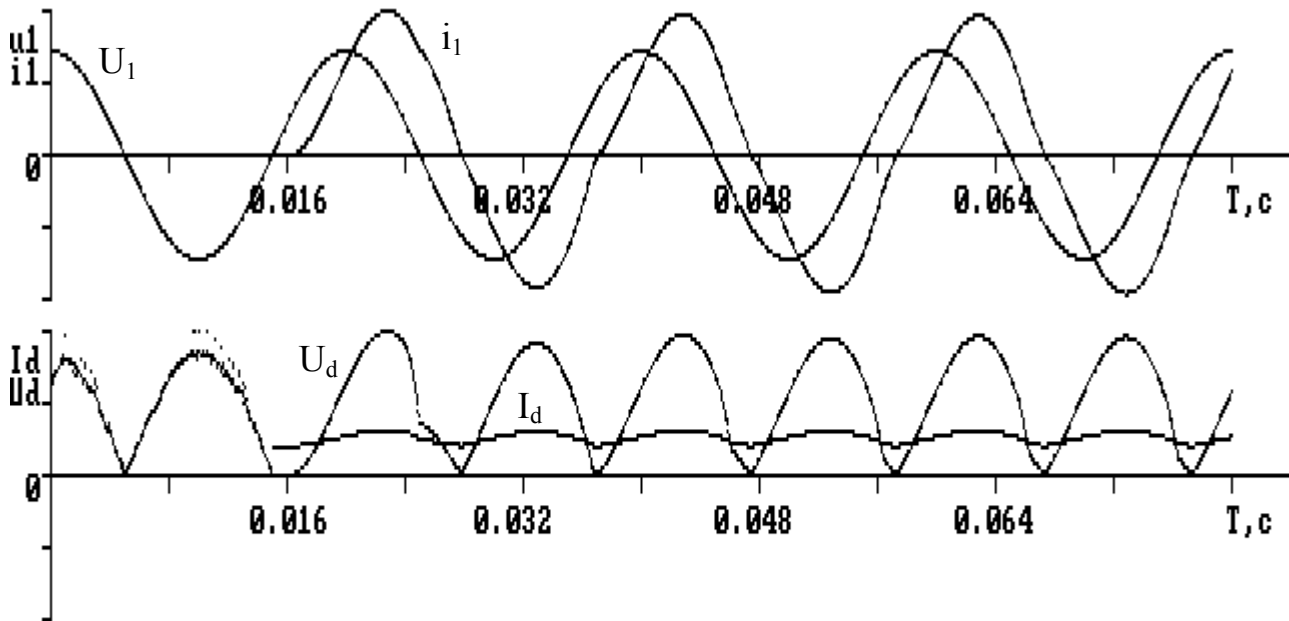
Результаты расчёта и их анализ

На рис. 3-5 приведены результаты расчёта электромагнитных процессов в сварочном устройстве с номинальным сварочным током 160 А.

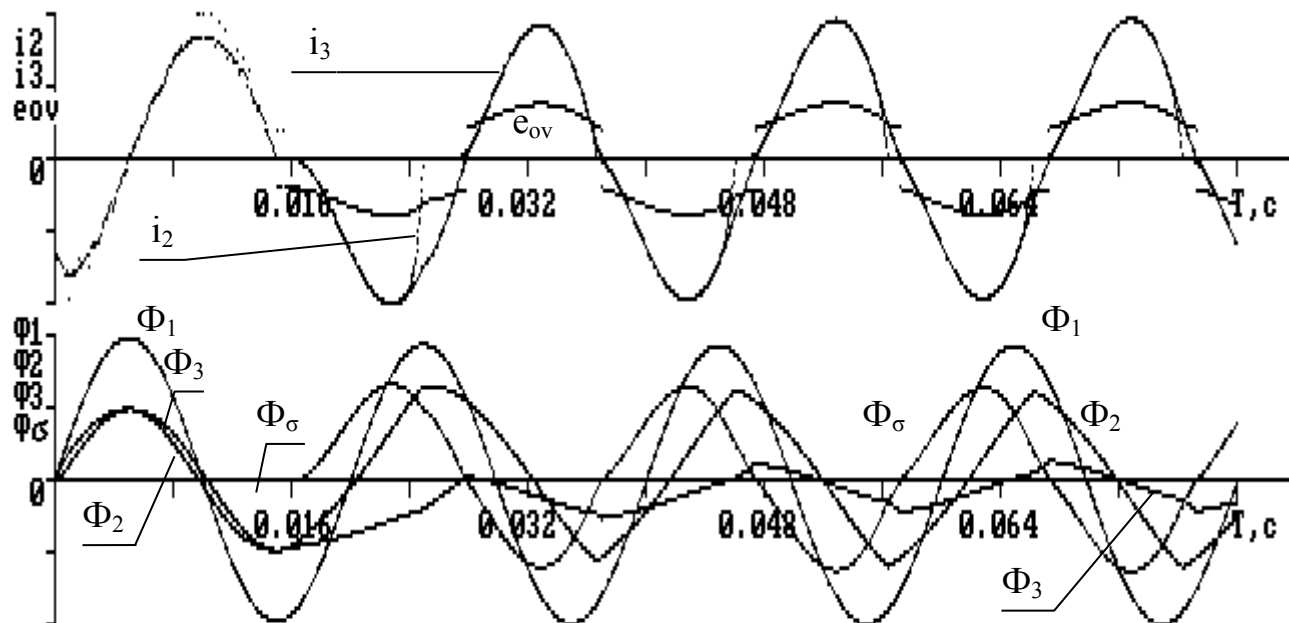
При работе в номинальном режиме ($\alpha = 0$) рабочие свойства наилучшие, КПД равен 0,817, коэффициент искажений близок 0,9974 при $I_{свн} = 160$ А. Наблюдается небольшое различие токов полуобмоток вторичной обмотки. Полная потребляемая мощность (около 7кВА). Магнитные потоки в крайних стержнях изменяются несинусоидально, практически пилообразно, что объясняется нелинейностью вольт-амперной характеристики дуги.

При изменении угла управления тиристорами (от 0° до 45°) производится регулирование сварочного тока от 160 до 57 А. При $\alpha = 30^\circ$ обеспечивается $i_{св} = 94,6$ А и уменьшение коэффициента мощности и незначительное увеличение КПД. Максимум магнитного потока наблюдается в номинальном сварочном режиме, при КЗ или изменении угла управления тиристорами происходит снижение магнитного потока, но снижение незначительное. Также наблюдаются некоторые искажения магнитных потоков, обусловленные снизившимся коэффициентом мощности. При регулировании КПД незначительно увеличивается, коэффициент мощности заметно уменьшается, что объясняется увеличением отставания по фазе тока дуги от ЭДС вторичных обмоток. С ростом угла открытия тиристоров потребляемый из сети ток искажается, но не сильно.

При коротком замыкании наблюдаются максимальные значения сварочного, первичного, вторичного токов, токов полуобмоток вторичной обмотки (токи равные), а также максимальные значения магнитного потока (незначительное увеличение по сравнению с другими режимами работы) и полной потребляемой мощности (около 11 кВА); низкий коэффициент мощности и КПД = 0. Как показал расчёт, ток короткого замыкания в 1,8 больше $I_{свн} = 160$ А.



Максимумы токов $i_{1m} = 48.4 \text{ A}$, $i_{dм} = 246.1 \text{ A}$, напряжения дуги $U_{dм} = 98.14 \text{ В}$.
 Первичный ток $i_1 = 31.6 \text{ A}$. Сварочный ток $I_d = 160.1 \text{ A}$.
 Напряжение дуги $U_d = 26.30 \text{ В}$. Мощность дуги $P_d = 3900.6 \text{ Вт}$

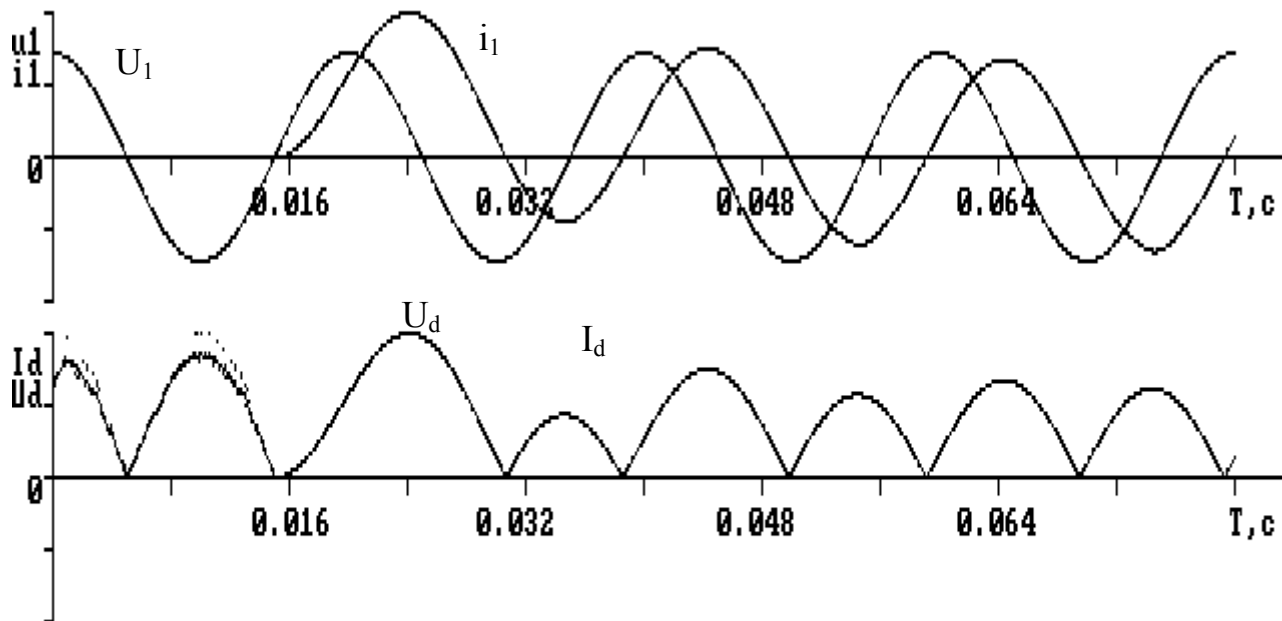


Максимум вторичного тока $i_{2м} = 122.5 \text{ A}$, магнитного потока $\Phi_m = 0.0058133 \text{ Вб}$.
 Токи $I_2 = 79.7 \text{ A}$, $I_3 = 80.6 \text{ A}$. Потребляемая мощность $S_1 = 6951.8 \text{ ВА}$.
 КПД = 0.817. Коэффициенты мощности = 0.6866, искажений = 0.9974.

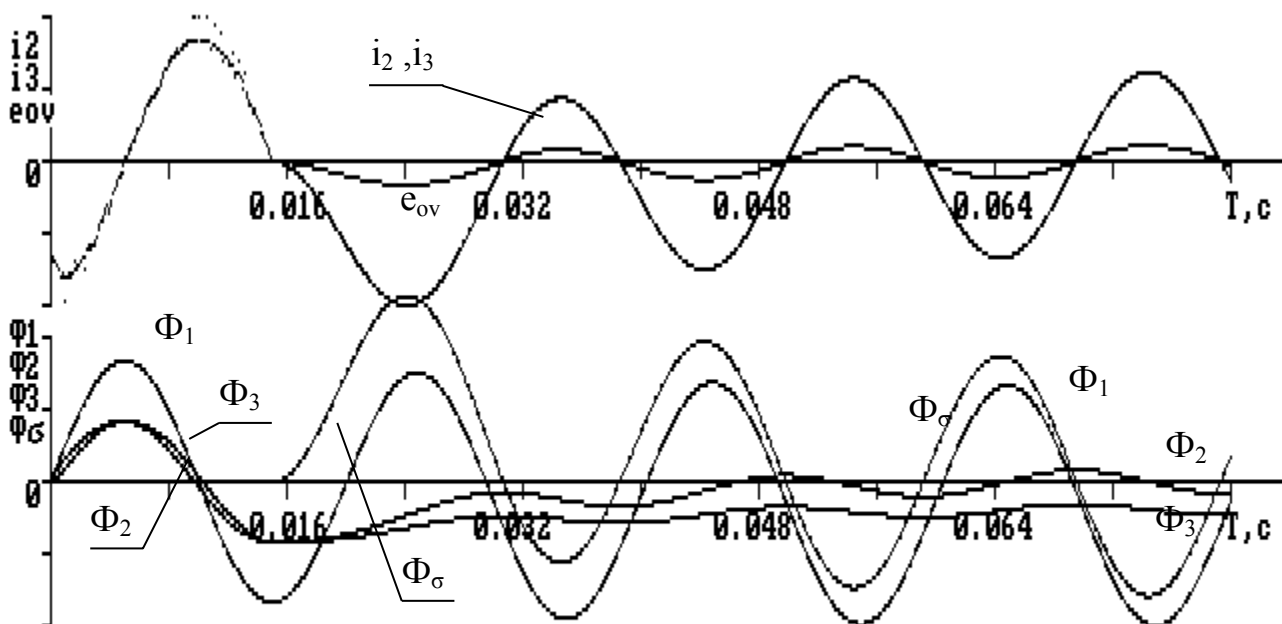
Рис. 3. Электромагнитные процессы в номинальном режиме

Размыслов В.А., Бондаренко В.А.

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ТРЁХСТЕРЖНЕВОМ СВАРОЧНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

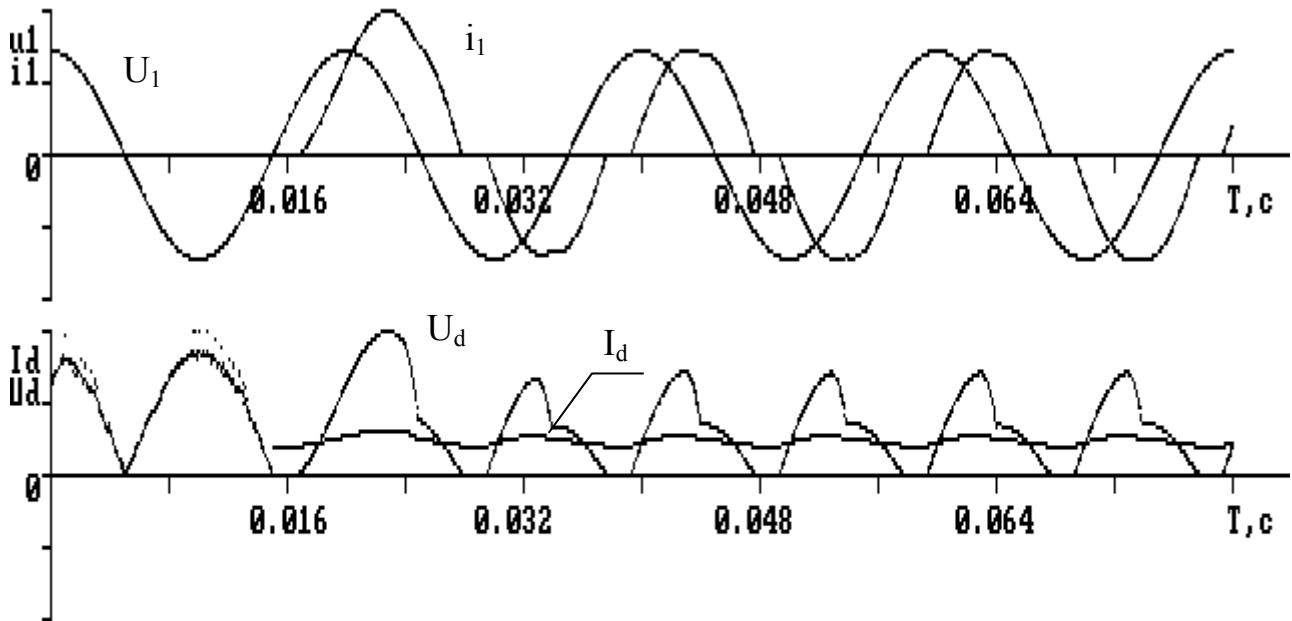


Максимумы токов $i_{1m} = 110.5$ А, $i_{dм} = 565.1$ А, напряжения дуги $U_{dм} = 98.14$ В.
 Первичный ток $i_1 = 51.3$ А, Сварочный ток $I_d = 259.0$ А.
 Напряжение дуги $U_d = 0.00$ В. Мощность дуги $P_d = 0.0$ Вт

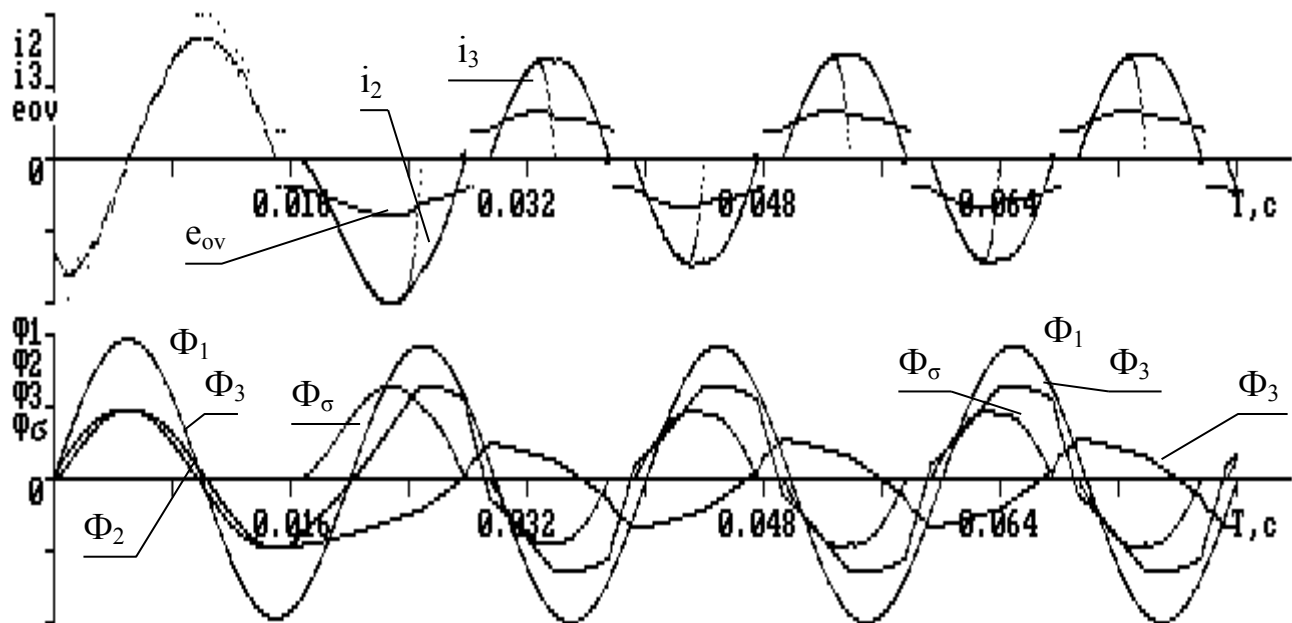


Максимум вторичного тока $i_{2м} = 282.5$ А, магнитного потока $\Phi_m = 0.0068039$ Вб.
 Токи $I_2 = 129.5$ А, $I_3 = 129.5$ А. Потребляемая мощность $S_1 = 11290.3$ ВА.
 КПД = 0.000. Коэффициенты мощности = 0.1878, искажений = 0.9985.

Рис. 4. Электромагнитные процессы при коротком замыкании



Максимумы токов $i_{1m} = 47.9$ А, $i_{dм} = 244.0$ А, напряжения дуги $U_{dм} = 98.14$ В.
 Первичный ток $i_1 = 23.6$ А. Сварочный ток $I_d = 94.6$ А.
 Напряжение дуги $U_d = 23.43$ В. Мощность дуги $P_d = 1901.1$ Вт



Максимум вторичного тока $i_{2м} = 121.4$ А, магнитного потока $\Phi_m = 0.0058724$ Вб.
 Токи $I_2 = 41.0$ А, $I_3 = 60.1$ А. Потребляемая мощность $S_1 = 5185.4$ ВА.
 КПД = 0.823. Коэффициенты мощности = 0.4454, искажений = 0.9885.

Рис. 5. Электромагнитные процессы в номинальном режиме при угле управления вентилями $\alpha = 30^\circ$

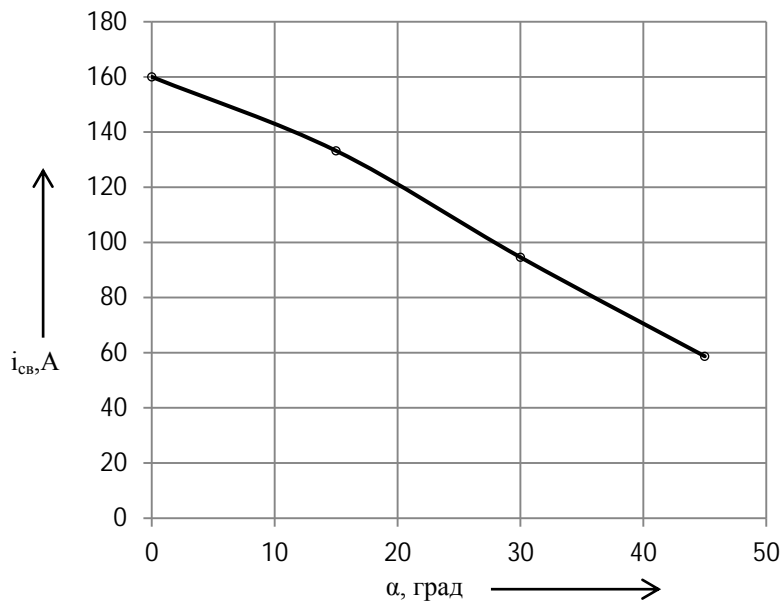


Рис. 6. Зависимость сварочного тока от угла управления тиристорами α

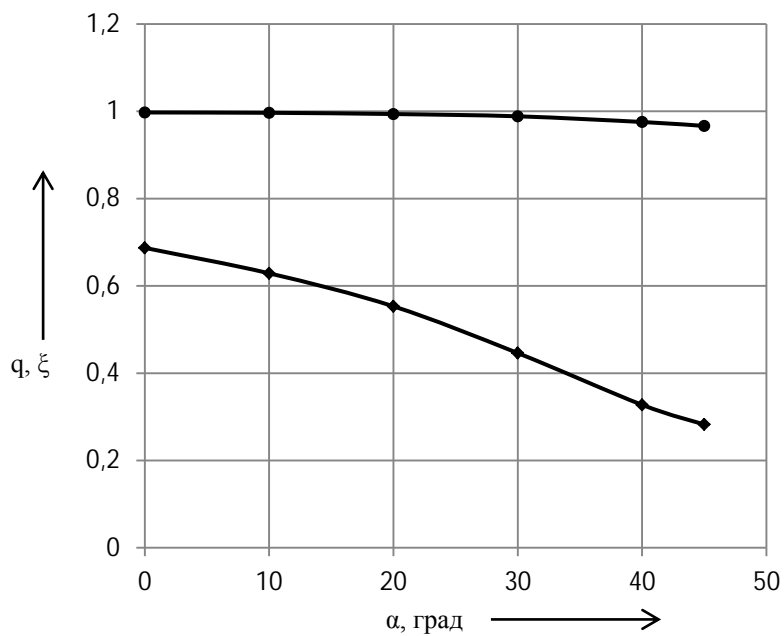


Рис. 7. Зависимость коэффициента мощности q и коэффициенты искажений ξ от угла управления тиристорами α