

УДК 621.744.002.2:538.56.004.14

621.3.002.3:546.726

В.А. Эсауленко, профессор, канд. техн. наук,**Н.С. Никорюк, доцент, канд. техн. наук,****В.Н. Хоменко, ассистент***Донецкий национальный технический университет**ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83000.**E-mail: info@dgtu.donetsk.ua*

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ИМПУЛЬСОВ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В КОНДЕНСАТОРНОЙ СХЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗГОНА СЫПУЧЕГО ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрена математическая модель конденсаторной схемы электропитания резистивно-индуктивного приемника, позволяющая оценить форму импульса тока индуктора, уровня напряжений и токов во всех элементах схемы в зависимости от длительности импульсов рабочего тока.

Электромагнитные устройства с метательным соленоидом используются в металлургии, машиностроении, литейном производстве для обработки литья, сварных изделий и проката ферромагнитным абразивом, для намагничивания, разгона и уплотнения специального формовочного материала в технологических линиях магнитной формовки и в ряде других случаев [1,2].

Цель статьи – привести и анализировать расчет конденсаторной схемы электропитания электромагнитного импульсного формовочного устройства, которая по сравнению с существующими схемами позволяет получать мощные кратковременные импульсы тока в метательном соленоиде и осуществлять рекуперацию энергии магнитного поля индуктора [3].

Конденсаторная схема электропитания, изображенная на рисунке 1, содержит диоды 1...6 трехфазного выпрямительного моста, силовые тиристоры 7 и 8 включения и тиристор 10 отключения метательного соленоида 9, батарею импульсных конденсаторов 11, диоды рекуперации энергии магнитного поля 12 и 13, токоограничивающий дроссель 14 в цепи источника, коммутирующий конденсатор 15, диод 16 и дроссель 17 цепи коммутации силовых тиристоров и схему управления 18.

Схема состоит из 5 реактивных элементов и содержит множество нелинейных резистивных элементов в виде тиристоров и диодов, что затрудняет задачу получения точного математического выражения для импульса тока метательного соленоида.

При решении упрощенного варианта этой задачи положим, что все реактивные элементы схемы линейные, тиристоры и диоды идеальные, и применим метод кусочно-линейной аппроксимации с численным решением полученной системы дифференциальных уравнений и использованием стандартных программ математической системы MathCAD.

В рассмотренной схеме электропитания можно выделить 6 различных последовательных состояний, которые принимает схема при формировании импульса питающего тока метательного соленоида.

При включении трехфазного источника на выходе моста появляется выпрямленное напряжение u_d , под воздействием которого происходит заряд батареи импульсных конденсаторов 11 по цепи: «плюс» источника – батарея конденсаторов 11 – дроссель 14 – «минус» источника. После окончания переходного процесса в этой цепи напряжение на зажимах батареи конденсаторов $u_c = u_d$. Блок управления 18 вырабатывает импульсы напряжений, которые поступают в требуемые моменты времени на управляющие электроды тиристоров 7, 8, 10.

Исходное состояние схемы: токи во всех ветвях равны нулю, а емкости C и C_0 элементов 11 и 15 заряжены до напряжений $u_c(0) = u_d$ и $u_{co}(0) = u_{co3}$, где u_{co3} – остаточное напряжение на коммутирующем конденсаторе после предыдущего цикла формирования импульса тока (рисунок 2). При формировании

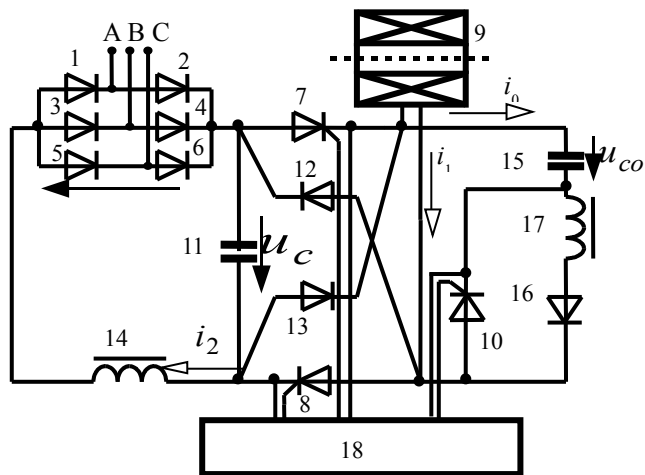


Рисунок 1 – Конденсаторная схема электропитания соленоида от батареи импульсных конденсаторов

импульса тока $i_1(t)$ в цепи метательного соленоида а также напряжений и токов в остальных элементах схемы различают 6 этапов.

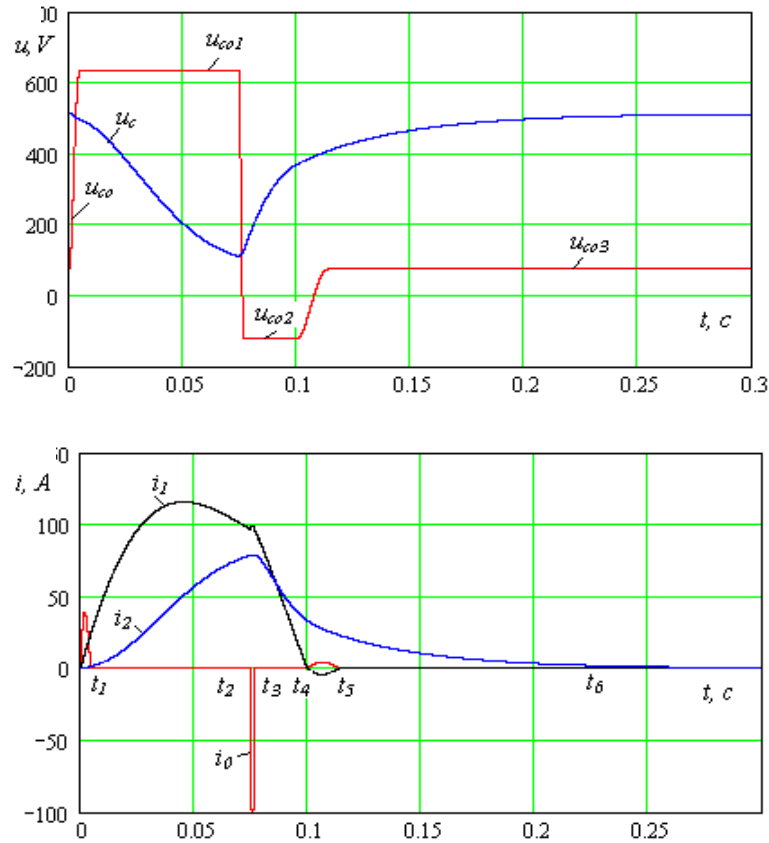


Рисунок 2 – Осциллограмма напряжений и токов конденсаторной схемы электропитания

Первый этап ($0 < t < t_1$) – разряд батареи конденсаторов 11 с ёмкостью C на соленоид 9 с активным сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 и разряд батареи на коммутирующий конденсатор 15 с ёмкостью C_o и дроссель 17 с активным сопротивлением R_o и индуктивностью L_o , а также подпитка батареи конденсаторов от источника при $u_c < u_d$ через дроссель 14 с активным сопротивлением R_2 и индуктивностью L_2 .

При подаче управляющих сигналов на тиристоры 7 и 8 в момент $t = 0$ происходит отпирание этих тиристоров и батарея конденсаторов начинает разряжаться по двум контурам: контур соленоида, состоящий из элементов 11–7–9–8–11 ($u_c = i_1 R_1 + L_1 * di_1 / dt$) и контур коммутирующего конденсатора с элементами 11–7–15–17–16–8–11 ($u_c = u_{co} + i_o R_o + L_o * di_o / dt$). Одновременно при уменьшении напряжения u_c начинается подпитка батареи конденсаторов от источника ($u_d = u_c + i_2 R_2 + L_2 * di_2 / dt$).

Переходный процесс описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} di_1 / dt &= (u_c - i_1 R_1) / L_1, \\ di_2 / dt &= (u_d - u_c - i_2 R_2) / L_2, \\ di_o / dt &= (u_c - u_{co} - i_o R_o) / L_o \text{ при } i_o \geq 0, \\ du_c / dt &= (i_2 - i_1 - i_o) / C, \\ du_{co} / dt &= i_o / C_o. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В первом контуре возникает силовой ток i_1 индуктора, а во втором – зарядный ток i_o коммутирующего конденсатора. Характер переходного процесса в обоих контурах колебательный, однако во втором контуре процесс более скоротечный (4...5 мс) и в момент t_1 , когда напряжение u_{co} достигает своего максимального значения u_{co1} , а ток i_o становится равным нулю, диод 16 запирается ($u_{co1} > u_c$) и процесс во втором контуре прекращается. Момент времени t_1 определяется из условия $i_o \geq 0$.

Второй этап ($t_1 < t < t_2$) – разряд батареи конденсаторов 11 на соленоид 9 и подпитка батареи конденсаторов от источника.

Переходный процесс описывается системой уравнений (1) при $i_o = 0$. Разряд батареи конденсаторов сопровождается понижением напряжения u_c и ростом токов i_1 и i_2 и длится несколько десятков мс до момента t_2 подачи управляющего сигнала на коммутирующий тиристор 10.

Третий этап ($t_2 < t < t_3$) – перезаряд коммутирующего конденсатора 15 током соленоида 9 и продолжающийся процесс подпитки батареи конденсаторов 11 от источника.

В момент t_2 тиристор 10 отпирается и под воздействием напряжения $u_{co1} - u_c(t_2) > 0$ происходит запираание силовых тириستоров 7 и 8, в результате чего соленоид 9 подключается к конденсатору 15 по цепи: 9–10–15–9 ($i_o = -i_1$, $i_1 R_1 + L_1 * di_1 / dt - u_{co} = 0$). В момент t_2 ток i_o скачкообразно уменьшается до величины $i_1(t_2)$. Конденсатор 15 быстро перезаряжается, отдавая часть энергии соленоиду 9. При этом напряжение u_{co} меняет полярность и достигает отрицательного значения u_{co2} .

Переходный процесс на этом временном интервале описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} di_1 / dt &= (u_{co} - i_1 R_1) / L_1, \\ di_2 / dt &= (u_d - u_c - i_2 R_2) / L_2, \\ di_o / dt &= (-u_{co} + i_1 R_1) / L_1, \\ du_c / dt &= i_2 / C, \\ du_{co} / dt &= i_o / C_o. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Момент времени t_3 определяется из условия $u_{co} = i_1 R_1 + L_1 * di_1 / dt = -u_c$.

Четвертый этап ($t_3 < t < t_4$) – соленоид 9 разряжается на батарею конденсаторов 11 с рекуперацией энергии магнитного поля индуктора и продолжается подпитка батареи от источника.

В момент времени t_3 тиристор 10 запирается ($i_o = 0$) и ток i_1 соленоида 9 переключается на новый контур, замыкаясь по цепи элементов 9–12–11–13–9 ($i_1 R_1 + L_1 * di_1 / dt + u_c = 0$). При этом энергия, запасенная в магнитном поле соленоида, возвращается батарее конденсаторов. За счет этого процесса и процесса подпитки батареи от источника ($u_d = u_c + i_2 R_2 + L_2 * di_2 / dt$) напряжение на зажимах батареи конденсаторов u_c увеличивается, а ток i_1 снижается до нулевого значения.

На данном этапе используется система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} di_1 / dt &= (-u_c - i_1 R_1) / L_1, \\ di_2 / dt &= (u_d - u_c - i_2 R_2) / L_2, \\ di_o / dt &= 0, \\ du_c / dt &= (i_1 + i_2) / C, \\ du_{co} / dt &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Момент времени t_4 определяется из условия $i_1 \geq 0$.

Пятый этап ($t_4 < t < t_5$) – повторный процесс перезаряда коммутирующего конденсатора 15 и подпитка батареи конденсаторов 11 от источника.

В момент t_4 при токе $i_1 = 0$ диоды 12 и 13 запираются и в схеме имеют место два процесса: продолжающийся процесс подпитки конденсатора 11 от источника ($u_d = u_c + i_2 R_2 + L_2 * di_2 / dt$) и перезаряд коммутирующего конденсатора 15 ($u_{co2} < 0$) по цепи элементов 15–17–16–9–15 ($i_1 = -i_o$ и $i_1(R_1 + R_o) + (L_1 + L_o)di_1 / dt - u_{co} = 0$).

Процесс описывается системой уравнений (4):

$$\left. \begin{aligned} di_1 / dt &= (u_{co} - i_1(R_1 + R_o)) / (L_1 + L_o), \\ di_2 / dt &= (u_d - u_c - i_2 R_2) / L_2, \\ di_o / dt &= (-u_{co} + i_1(R_1 + R_o)) / (L_1 + L_o), \\ du_c / dt &= i_2 / C, \\ du_{co} / dt &= i_o / C_o. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Заканчивается этап в момент t_5 при $i_1 = -i_o = 0$. В течение рассматриваемого отрезка времени ток i_1 соленоида отрицательный, что необходимо учитывать в устройствах намагничивания ферромагнитных материалов, так как направление магнитного поля в этом случае меняется на противоположное.

Шестой этап ($t_5 < t < t_6$) – подпитка батареи конденсаторов 11 от источника.

Момент времени t_6 определяется из условия $i_2 \geq 0$.

В момент t_6 при $i_2 = 0$ процесс заряда батареи конденсаторов от источника заканчивается и схема возвращается в исходное состояние ($i_1 = 0$, $i_o = 0$, $u_{co} = u_{co3}$, $u_c = u_d$).

Полученные системы уравнений можно решить, используя численный метод расчета с обращением к стандартным подпрограммам. Начальные значения величин (токи в индуктивностях и напряжения на ёмкостях) на каждом новом этапе расчета берутся равными конечным значениям этих величин на предыдущем этапе.

В момент времени t_3 диод 16 запирается ($i_0 = 0$) и схема описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} di_1 / dt &= 0, \\ di_2 / dt &= (u_d - u_c - i_2 R_2) / L_2, \\ di_o / dt &= 0, \\ du_c / dt &= i_2 / C, \\ du_{co} / dt &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Расчетные осциллограммы, изображенные на рисунке 2, получены для лабораторной установки электромагнитного импульсного формовочного устройства с конденсаторной схемой электропитания, имеющей следующие параметры: $u_d = 513 \text{ В}$ (напряжение трехфазного источника – 380 В), $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $L_1 = 0,09 \text{ Гн}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $L_2 = 0,02 \text{ Гн}$, $R_0 = 5 \text{ Ом}$, $L_0 = 0,01 \text{ Гн}$, $C = 10\,000 \text{ мкФ}$, $C_o = 200 \text{ мкФ}$. Расчет выполнен с использованием стандартной программы rkfixed и математической системы Mathcad.

Сопоставление результатов расчета и эксперимента для рассмотренной схемы свидетельствует о хорошей их сходимости.

Характер осциллограмм зависит от длительности импульса питающего тока соленоида, то есть от

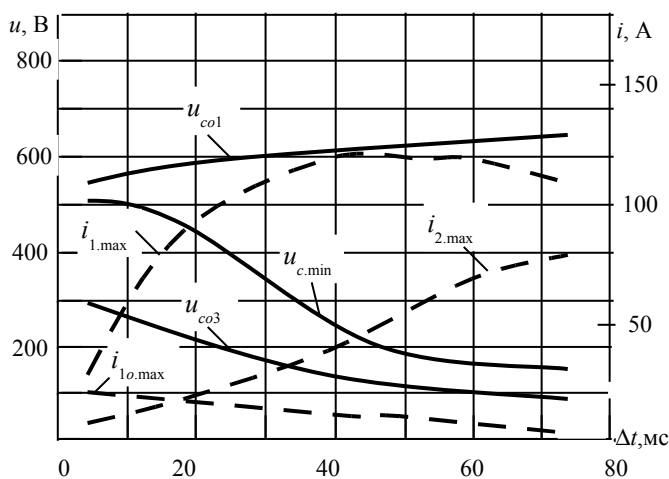


Рисунок 3 – Экстремальные напряжения и токи при изменении длительности импульса

времени $\Delta t = t_2 - t_o$, где t_o – момент включения силовых тиристоров 7 и 8, а t_2 – момент включения коммутирующего тиристора 10. При уменьшении длительности импульса уменьшается максимальное значение тока соленоида $i_{1,max}$ при увеличении его отрицательных значений $i_{1o,max}$. Значительно изменяются также и другие величины, характеризующие работу схемы электропитания: минимальное напряжение на батарее конденсаторов $u_{c,min}$, напряжения на коммутирующем конденсаторе u_{co1} и u_{co3} и максимальный ток в цепи подпитки батареи конденсаторов от источника $i_{2,max}$ (рисунок 3).

Минимальная длительность импульса равна времени переходного процесса в цепи коммутирующего конденсатора, а её максимальная величина определяется временем достижения максимума тока

соленоида или другими технологическими требованиями.

При увеличении длительности импульса минимальное напряжение батареи конденсаторов $u_{c,min}$ и конечное напряжение на коммутирующем конденсаторе u_{co3} уменьшаются, в то время как напряжение на коммутирующем конденсаторе при его первоначальном заряде u_{co1} незначительно возрастает.

При малой длительности импульса тока соленоида его положительные и отрицательные значения становятся сопоставимыми по величине.

На рисунке 4 изображены осциллограммы тока соленоида ($R_1 = 2 \text{ Ом}$, $L_1 = 0,09 \text{ Гн}$) при его непосредственном включении на тот же источник постоянного напряжения ($u_d = 513 \text{ В}$), что и в конденсаторной схеме электропитания. При длительности импульса $\Delta t = 0,028 \text{ мс}$ ток достигает величины 118,8 А, а при $\Delta t = 0,075 \text{ мс}$ составляет 208 А.

Расчет выполнен по формулам

$$i(t) = \frac{U_d}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ при } 0 < t < \Delta t, \quad i(t) = i(\Delta t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ при } t > \Delta t,$$

где $\tau = \frac{L_1}{R_1}$ – постоянная времени цепи.

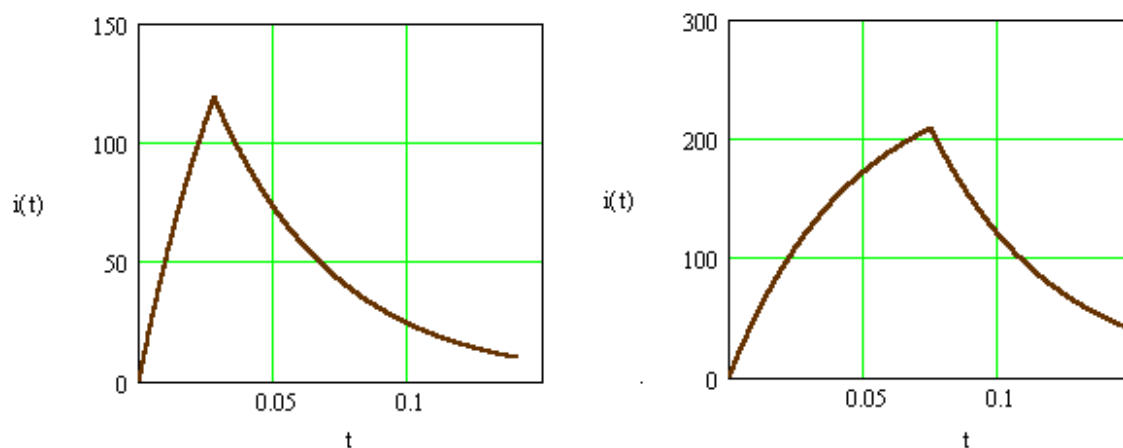


Рисунок 4 – Осциллограммы рабочего тока в соленоиде при его непосредственном подключении к источнику постоянного напряжения и различной длительности импульса тока

Сопоставление осциллограмм при различных схемах питания соленоида свидетельствует о преимуществах конденсаторной схемы, так как в этой схеме импульс тока имеет крутой фронт нарастания и спада тока и при этом осуществляется рекуперация энергии магнитного поля индуктора.

Выводы

1. Конденсаторная схема электропитания метательного соленоида электромагнитных формовочных и дробемётных устройств по сравнению со схемой питания соленоида непосредственно от источника постоянного тока формирует мощные кратковременные импульсы тока с большой крутизной его нарастания и спада и рекуперацией энергии магнитного поля индуктора.

2. Математическая модель конденсаторной схемы электропитания соленоида с 5 реактивными элементами позволяет рассчитать как форму импульса тока в соленоиде, так и уровень напряжений и токов в остальных элементах схемы.

3. Длительность импульса питающего тока соленоида, то есть время между моментами включения силовых и коммутирующего тиристоров, оказывает сильное влияние на величины напряжений и токов, характеризующих работу схемы электропитания.

Минимальная длительность импульса равна времени переходного процесса в цепи коммутирующего конденсатора, а её максимальная величина определяется временем достижения максимума тока соленоида или другими технологическими требованиями.

4. При увеличении длительности импульса увеличивается максимальный ток соленоида при уменьшении величины его обратного отрицательного значения, а минимальное напряжение батареи конденсаторов и конечное напряжение на коммутирующем конденсаторе уменьшаются, в то время как напряжение на коммутирующем конденсаторе при его первоначальном заряде незначительно возрастает.

При малой длительности импульса тока соленоида его положительные и отрицательные значения становятся сопоставимыми по величине.

Задачей дальнейших исследований может быть оптимизация математической модели соленоида.

Библиографический список

1. Гриднев Ю.Г. Применение электромагнитных полей в дробеметных устройствах / Ю.Г. Гриднев // Литейное производство. — 1980. — № 10. — С. 24–25.
2. Эсауленко В.А. Разработка и исследование электромагнитного импульсного формовочного устройства с магнитотвердым формовочным материалом / В.А. Эсауленко // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. Электротехника и энергетика. — Донецк: ДонГТУ, 1999. — Вып. 4. — С. 249–252.
3. Эсауленко В.А. Математическая модель конденсаторной схемы электропитания метательного соленоида электромагнитного устройства намагничивания и разгона сыпучего ферромагнитного материала / В.А. Эсауленко // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. — 2002. — № 4 (50). — С. 46–50.

Поступила в редакцию 4.12.2007 г.