

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА СОЛЕНОИДА В КОНДЕНСАТОРНОЙ СХЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗГОНА СЫПУЧЕГО ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

Эсауленко В.А., Никорюк Н.С., Хоменко В.Н.
Донецкий национальный технический университет

Was developed the mathematical model of the circuit feeding the RL receiver. This model permit to estimate the shape of pulse of the operating current and the levels of voltages and currents in all elements. Was analyzed the influence of current pulse duration on the main characteristics of circuit elements.

Электромагнитные устройства с металельным соленоидом используются в металлургии, машиностроении, литейном производстве для ввода ферромагнитных дисперсных материалов в струю жидкого металла [1], для обработки литья, сварных изделий и проката ферромагнитным абразивом [2], для намагничивания, разгона и уплотнения специального формовочного материала в технологических линиях магнитной формовки [3,4], при импульсном намагничивании водной суспензии ферритов при их текстурировании [5] и в ряде других случаев.

В настоящей работе рассмотрена конденсаторная схема электропитания электромагнитных импульсных формовочных и дробеметных устройств с рекуперацией энергии магнитного поля индуктора, которая по сравнению со схемой питания соленоида непосредственно от источника постоянного тока позволяет получить более мощные кратковременные импульсы тока в металельном соленоиде и, следовательно, более высокие скорости вылета порции сыпучего ферромагнитного материала [6-9].

Конденсаторная схема электропитания рис.1 содержит диоды 1-6 трехфазного выпрямительного моста, силовые тиристоры 7 и 8 включения и тиристор 10 отключения металельного 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.

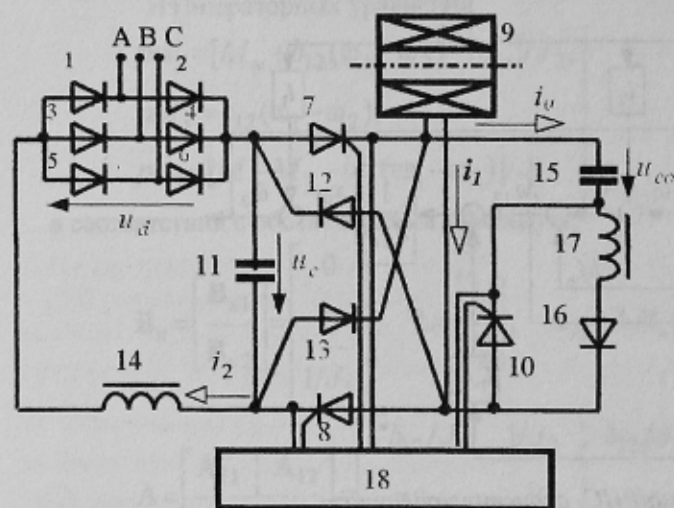


Рисунок 1 – Конденсаторная схема электропитания соленоида от батареи импульсных конденсаторов.

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 $u_{c0}(0) = u_{c03}$, где u_{c03} – остаточное напряжение на коммутирующем конденсаторе после предыдущего цикла формирования импульса тока (рис.2). При формировании импульса тока $i_1(t)$ в цепи металельного соленоида а также напряжений и токов в остальных элементах схемы различают 6 этапов.

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 металельного 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 металельного 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»

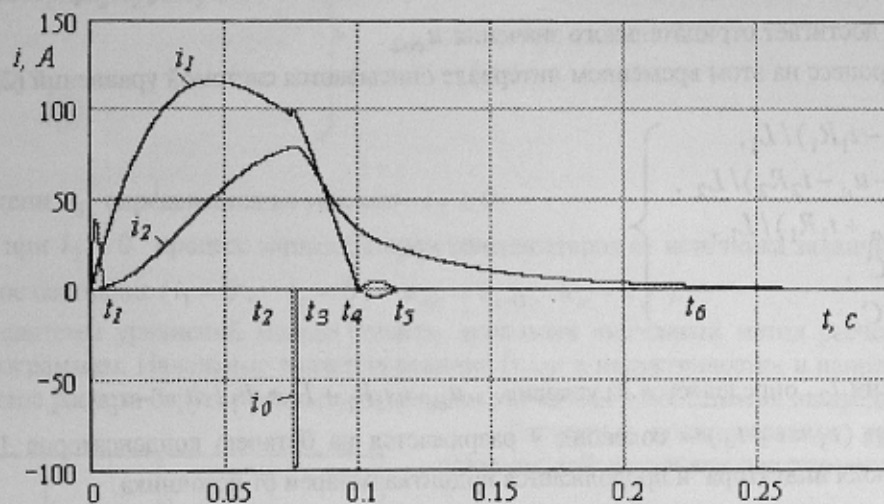
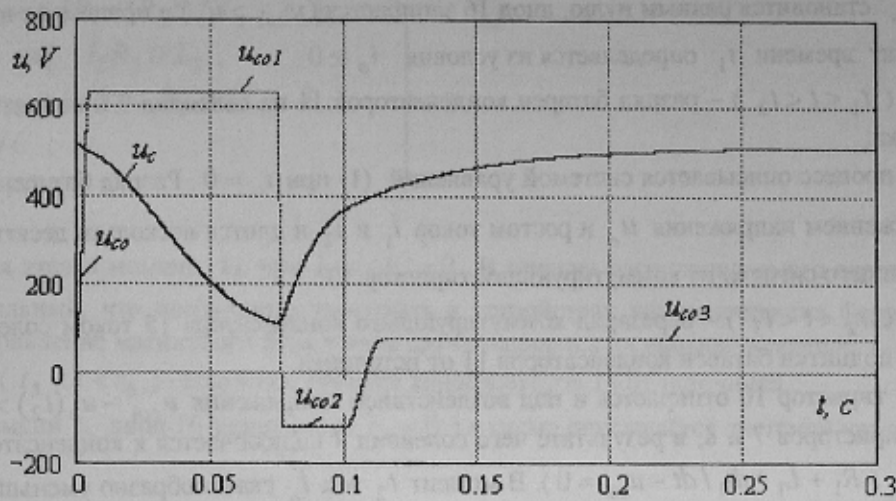


Рисунок 2 – Осциллограмма напряжений и токов конденсаторной схемы электропитания.

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:

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

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 (4-5мс.) и в момент t_1 , когда напряжение u_{co} достигает своего максимального зна-

чения 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 запуск силовых тиристоров 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 (2):

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

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 (3):

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

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):

$$\left. \begin{aligned} di_1/dt &= (u_{co} - i_1(R_1 + R_o))/(L_1 + L_o), \\ di_2/dt &= (u_d - u_c - i_2R_2)/L_2, \\ di_o/dt &= (-u_{co} + i_1(R_1 + R_o))/(L_1 + L_o), \\ du_c/dt &= i_2/C, \\ du_{co}/dt &= i_o/C_o. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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.

В момент времени t_5 диод 16 запирается ($i_o = 0$) и схема описывается системой уравнений (5):

$$\left. \begin{aligned} di_1/dt &= 0, \\ di_2/dt &= (u_d - u_c - i_2R_2)/L_2, \\ di_o/dt &= 0, \\ du_c/dt &= i_2/C, \\ du_{co}/dt &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

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 емкостях) на каждом новом этапе расчета берутся равными конечным значениям этих величин на предыдущем этапе.

Расчетные осциллограммы рис.2 получены для лабораторной установки электромагнитного импульсно-

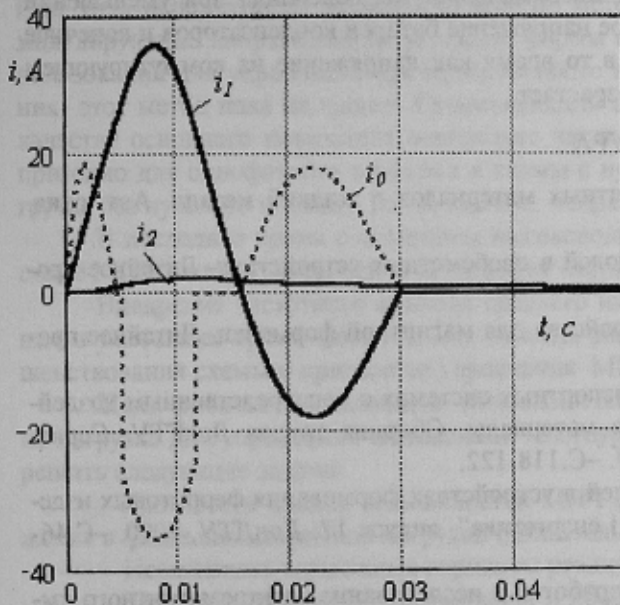


Рисунок 3 – Осциллограмма токов конденсаторной схемы электропитания при минимальной длительности импульса.

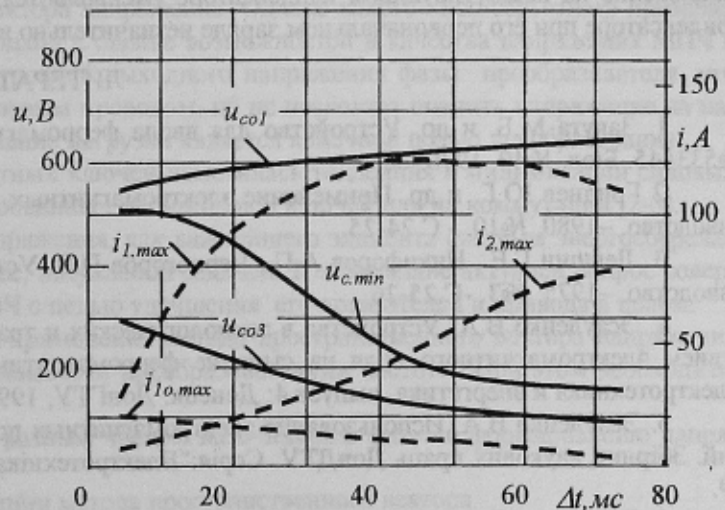


Рисунок 4 – Экстремальные напряжения и токи при изменении длительности импульса тока соленоида.

го формовочного устройства с конденсаторной схемой электропитания, имеющей следующие параметры: $u_d = 513$ В (напряжение трехфазного источника – 380 В), $R_1 = 2$ Ом, $L_1 = 0.09$ Гн, $R_2 = 5$ Ом, $L_2 = 0.02$ Гн, $R_o = 5$ Ом, $L_o = 0.01$ Гн, $C = 10000$ мкФ, $C_o = 200$ 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 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 $i_{10,max}$ (рис.3 и 4). Значительно изменяются также и другие величины, характеризующие работу схемы электропитания: минимальное напряжение на батарее конденсаторов $u_{c,min}$, напряжения на коммутирующем конденсаторе u_{c01} и u_{c03} и максимальный ток в цепи подпитки батареи конденсаторов от источника $i_{2,max}$ (рис4).

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_{c03} уменьшаются, в то время как напряжение на коммутирующем конденсаторе при его первоначальном заряде u_{c01} незначительно возрастает.

Разработанная усовершенствованная математическая модель конденсаторной схемы электропитания метательного соленоида позволяет рассчитать как форму импульса тока в соленоиде, так и уровень напряжений и токов в остальных элементах схемы, что очень важно при выборе их рабочих характеристик.

ВЫВОДЫ

1. Конденсаторная схема электропитания метательного соленоида электромагнитных формовочных и дробеметных устройств по сравнению со схемой питания соленоида непосредственно от источника постоянно 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.

При увеличении длительности импульса увеличивается максимальный ток соленоида при уменьшении величины его обратного отрицательного значения, 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закута М.Б. и др. Устройство для ввода ферромагнитных материалов в жидкий металл. Авт. свид. №533445. Бюл. №40, 1976.-6с.
2. Гриднев Ю.Г. и др. Применение электромагнитных полей в дробеметных устройствах. Литейное производство. –1980, №10. - С.24-25.
3. Левшин Г.Е., Никифоров А.П., Черногоров П.В. Устройства для магнитной формовки. Литейное производство. –1975, №3. -С.25-26.
4. Эсауленко В.А. Устройства в технологических и транспортных системах с непосредственным воздействием электромагнитного поля на сыпучие ферромагнитные материалы. Сборник трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, 1999. –С.118-122.
5. Эсауленко В.А. Использование электромагнитных полей в устройствах формования ферритовых изделий. Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 17: ДонДТУ, 2000. –С.46-49.
6. Эсауленко В.А., Черников В.Ю., Корощенко А.В. Разработка и исследование электромагнитного импульсного формовочного устройства с магнитотвердым формовочным материалом. Сборник трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, 1999. -С.249-252.
7. Эсауленко В.А., Черников В.Ю. Принципы построения и управления электромагнитных дробеметных устройств соленоидного типа с ускоряющимся силовым полем. Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 21: Донецьк: ДонДТУ, 2000. –С.61-65.
8. Эсауленко В.А., Черников В.Ю., Мерзлякин Э.С., Никорюк Н.С. Электромагнитные аппараты с непосредственным воздействием электромагнитных полей на ферромагнитные материалы в технологических и транспортных системах. Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 21: Донецьк: ДонДТУ, 2000. –С.116-119.
9. Эсауленко В.А. Математическая модель конденсаторной схемы электропитания метательного соленоида электромагнитного устройства намагничивания и разгона сыпучего ферромагнитного материала. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. №4 (50) 2002. – С.46-50.