

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДРОБЕМЕТНЫХ УСТРОЙСТВ СОЛЕНОИДНОГО ТИПА С УСКОРЯЮЩИМСЯ СИЛОВЫМ ПОЛЕМ

Эсауленко В. А., Черников В.Ю.

Донецкий государственный технический университет

*The article is dedicated electromagnetic shotcasting to the device with two steps of boost of free-flowing ferromagnetic abrasive. The selection of power supply diagrams of solenoids of the propellant head of the device is made.*

Наряду с работами по совершенствованию существующих механических пескоструйных и дробеметных устройств в настоящее время ведутся обширные исследования по созданию новых перспективных устройств по обработке поверхности изделий, в основу которых положены новые физические явления и процессы. Одним из таких направлений по совершенствованию дробеметных устройств является направление, использующее силовое воздействие электромагнитного поля на абразивный ферромагнитный материал. Электромагнитные дробеметные устройства обладают рядом важных преимуществ и могут быть использованы для очистки и улучшения качества поверхности литья, сварных изделий и проката, для очистки котельного оборудования энергетических установок от накипи, для ввода ферромагнитных дисперсных материалов в струю жидкого металла при непрерывной разливке стали и в ряде других технологических процессах [ 1, 2, 3 ].

При обработке поверхностей изделий сыпучим абразивным материалом важной характеристикой дробеметного устройства является скорость частиц материала в точке соприкосновения частицы с обрабатываемой поверхностью. Кинетическая энергия частицы, зависящая от скорости, является определяющим параметром процесса обработки. Поэтому актуальной является задача анализа скоростных характеристик электромагнитных дробеметных устройств при различных индукторах и схемах их электропитания.

Волновые силовые поля постоянной скорости, возникающие в системе соосно расположенных соленоидов, позволяют разгонять порции ферромагнитного абразива по периодическому закону и требуют большого превышения максимума магнитной силы волны над собственным весом порции [4]. В силовом поле одиночного соленоида разгон абразивного материала можно осуществить по аperiodическому закону, однако скорость вылета абразива в ряде случаев оказывается недостаточной [5].

Ускоряющее силовое поле электромагнитного индуктора дробеметного устройства можно получить двумя способами: за счет увеличения длины каждого последующего в направлении разгона соленоида или за счет уменьшения длительности импульсов питающего тока последующих эквидистантно расположенных соленоидов. В настоящем исследовании выбран второй путь, позволяющий изменять условия движения порции в более широком диапазоне при меньших энергозатратах.

На рис.1 представлены электромагнитное дробеметное устройство с ускоряющим силовым полем на две ступени разгона и осциллограмма питающих его токов. Устройство содержит загрузочный бункер 1, трубопровод 2 из неферромагнитного непроводящего материала с вертикальным, наклонным или горизонтальным положением его оси, электромагнитный дозатор 3 сыпучего ферромагнитного абразивного материала, электромагнитный фиксатор 4 начального положения порции абразива, первый 5 и второй 6 метательные соленоиды и схему электропитания 9 соленоидов метательной головки устройства, которая состоит из элементов 2-6.

Сыпучий абразивный материал (сечка стальной проволоки, чугунная дробь и др.) поступает по трубопроводу из бункера в электромагнитный дозатор и удерживается его магнитным полем с момента времени  $t_1$  до  $t_4$  (рис.1). Затем, в течение времени от  $t_4$  до  $t_5$ , электромагнитное поле фиксатора перемещает порцию материала из дозатора в центр соленоида фиксатора для последующего её разгона метательными соленоидами. В течение периода  $T$  дозатор и фиксатор формируют одну порцию материала на входе первого метательного соленоида.

В момент времени  $t_1$  включается первый метательный соленоид и его сильное магнитное поле начинает разгон порции абразива до момента  $t_2$ , когда порция оказывается в окрестностях центра этого соленоида. В этот момент отключается первый и включается второй метательные соленоиды и порция сначала оказывается под воздействием ускоряющего поля обоих соленоидов, а затем – только поля второго соленоида. В момент  $t_3$ , когда порция приближается к центру второго соленоида, этот соленоид отключается и порция с максимальной скоростью  $V$  вылетает из метательной головки устройства.

Величина максимальной скорости вылета абразива зависит от множества факторов, главными из которых являются: геометрические размеры соленоидов, магнитная проницаемость абразива и характер импульсов питающих соленоиды токов. При этом требуется регулирование моментов включения и отключения тока в соленоидах.

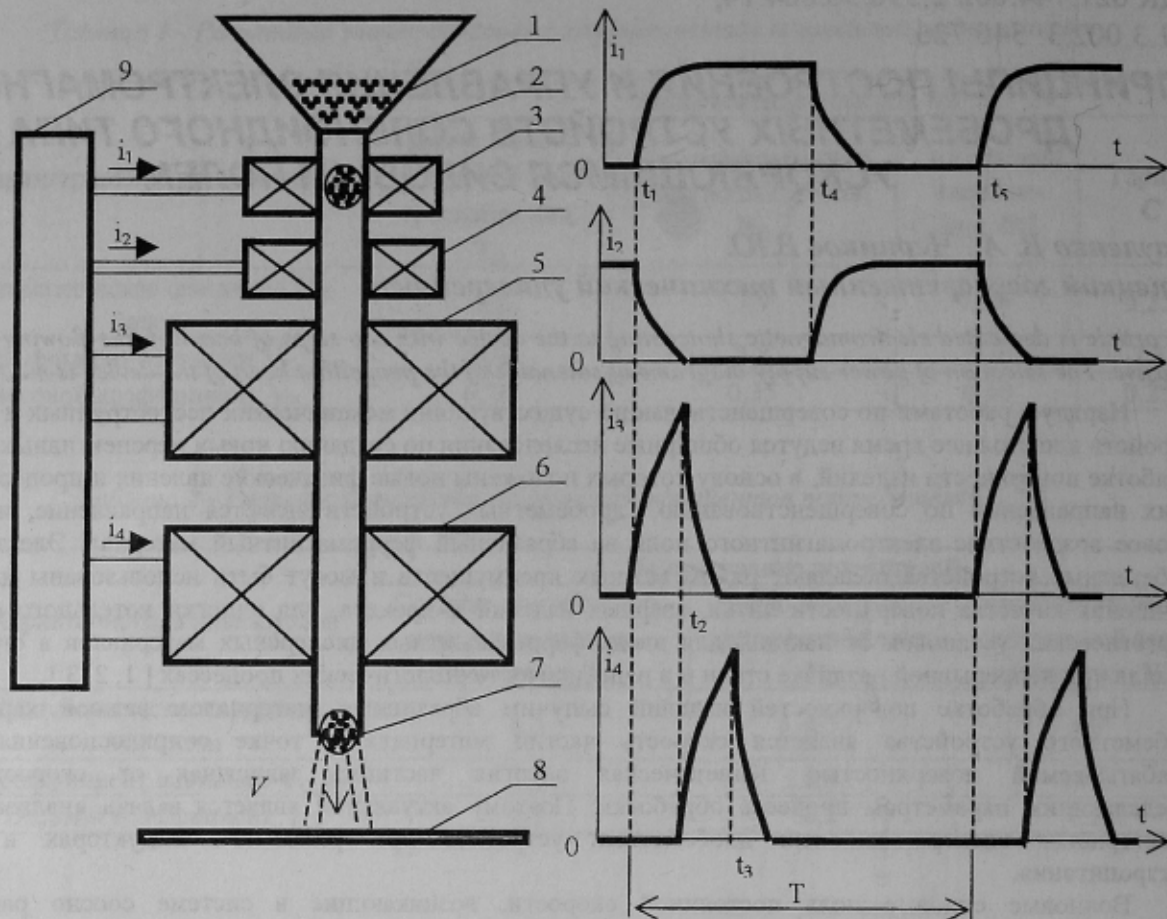


Рисунок 1 - Схематическое изображение электромагнитного дробеметного устройства с двумя ступенями разгона и осциллограмма питающих его токов.

- 1- загрузочный бункер, 2 – трубопровод, 3 – дозатор ферромагнитного абразивного материала,
- 4 – фиксатор порции абразива, 5 и 6 – первый и второй магнетельные соленоиды,
- 7 – порция абразивного материала, 8 – обрабатываемая абразивом поверхность изделия,
- 9 – схема электропитания устройства.

Для питания соленоидов магнетельной головки были разработаны две схемы: схема электропитания соленоида от промежуточного звена постоянного тока с принудительной коммутацией силового тиристора и использованием переходного процесса в цепи с резистором и индуктивностью (рис.2) и схема питания соленоида от батареи импульсных конденсаторов с рекуперацией энергии магнитного поля индуктора и использованием переходного процесса в цепи с резистором, индуктивностью и ёмкостью (рис.3).

Схема рис.2 работает следующим образом. Выпрямитель, содержащий диоды 1-6, позволяет получить постоянное напряжение  $U_d$  для питания соленоида 13 и его коммутирующих цепей. При подаче управляющего импульса от схемы управления 14 на силовой тиристор 7 происходит отпирание тиристора и ток  $i$  соленоида замыкается по цепи: «плюс» источника - тиристор 7 – первичная обмотка трансформатора 10 – соленоид 13 – «минус» источника. Одновременно с увеличением тока  $i$  под воздействием ЭДС вторичной обмотки трансформатора 10 происходит заряд коммутирующего конденсатора 9 до напряжения  $U_c$  указанной на рис.2 полярности.

После появления управляющего импульса на коммутирующем тиристоре 8 происходит запираание силового тиристора 7 напряжением  $U_c$  коммутирующего конденсатора 9. В дальнейшем напряжение  $U_c$  под воздействием напряжения  $U_d$  меняет полярность и тиристор 8 запирается.

Ток  $i$  соленоида 13 после отключения тиристора 7 продолжает протекать в том же направлении, замыкаясь через диод 12.

Таким образом, ток  $i$  соленоида при включении и отключении силового тиристора изменяется по экспоненциальному закону

$$i_{\text{вкл}} = \frac{U_d}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

$$i_{\text{откл}} = i_{\text{вкл}}(t_1) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $U_d$  - напряжение источника,  $R$  - сопротивление соленоида,  $\tau = \frac{L}{R}$  - постоянная времени цепи,  
 $L$  - индуктивность соленоида,  $t_1$  - момент отключения соленоида.

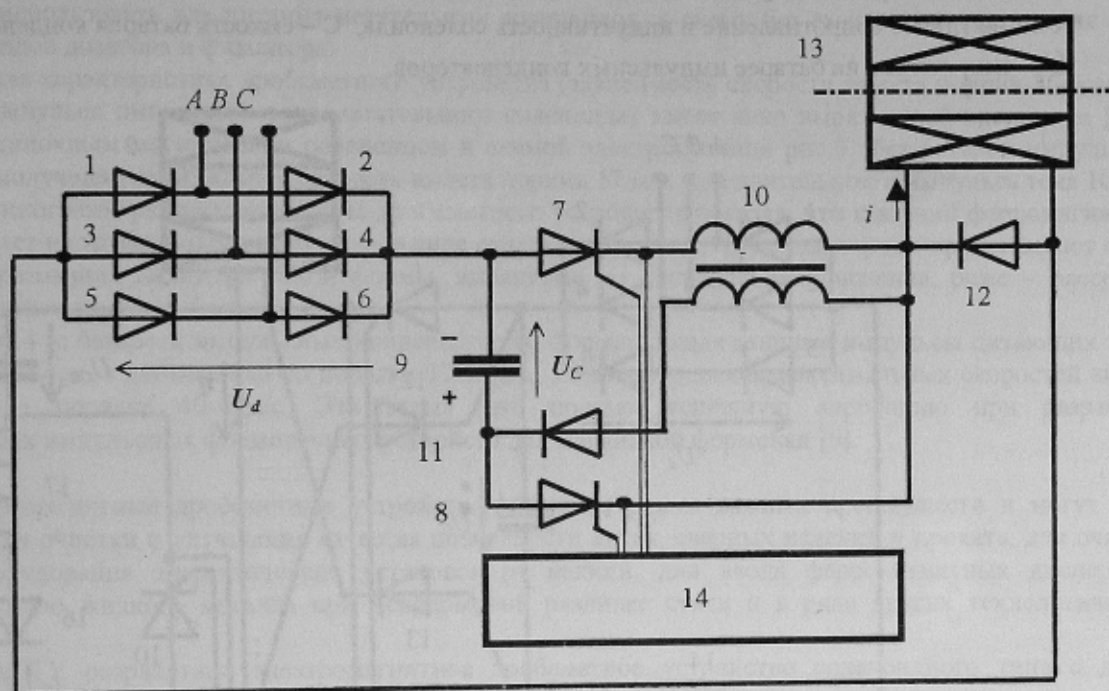


Рисунок 2 - Схема электропитания соленоида от промежуточного звена постоянного тока с принудительной коммутацией силового тиристора и использованием переходного процесса в цепи с резистором и индуктивностью.

1-6 - диоды выпрямительного моста, 7 - силовой тиристор, 8 - коммутирующий тиристор, 9 - коммутирующий конденсатор, 10 - трансформатор заряда коммутирующей емкости, 11 - диод цепи заряда емкости, 12 - диод предотвращения перенапряжений на соленоиде 13, 14 - схема управления.

Относительно большие значения постоянных времени цепи метательных соленоидов не позволяют получить импульсы питающих токов с достаточно крутыми фронтами нарастания и спада и с большими значениями тока в импульсе (для метательных соленоидов величина  $\tau$  составляет порядка 0,03-0,04 с.) Постоянную времени цепи при отключении соленоида можно уменьшить за счет включения добавочного резистора в цепь диода 12, однако это приведет к увеличению напряжения на коммутирующем конденсаторе 9 и соленоиде 13.

Рассмотренную схему целесообразно использовать для питания дозатора и фиксатора, в которых интервал времени, когда ток практически равен своему установившемуся значению, значительно превосходит время нарастания и спада тока.

Одним из способов решения задачи получения мощных кратковременных импульсов питающего тока с крутыми фронтами его нарастания и спада является применение схем электропитания соленоидов с емкостным накопителем энергии (рис. 3). В схемах подобного типа импульсы тока возникают при подключении соленоида индуктора к предварительно заряженной батарее конденсаторов. При этом параметры индуктора ( активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  ) и величина емкости батареи конденсаторов  $C$  должны соотноситься таким образом, чтобы процесс разряда конденсатора носил колебательный характер, то есть, должно

выполняться условие  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ . В схеме рис.3 в качестве накопителя электрической энергии используется

батарея конденсаторов 11. В процессе работы схемы осуществляется подзаряд этой батареи от выпрямителя с диодами 1-6 через ограничивающий дроссель 14.

При подаче управляющих импульсов на силовые тиристоры 7 и 8 происходит их открывание и соленоид 9 подключается к батарее конденсаторов 11. Ток соленоида изменяется во времени по закону затухающей синусоидальной функции

$$i = \frac{U_c}{\omega_0 L} \cdot e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t,$$

(3)

где  $\alpha = \frac{R}{2L}$  - коэффициент затухания свободных колебаний,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \frac{2\pi}{T_0} - \text{угловая частота свободных колебаний,}$$

$R$  и  $L$  - активное сопротивление и индуктивность соленоида,  $C$  - емкость батареи конденсаторов,  $U_c$  - напряжение на батарее импульсных конденсаторов.

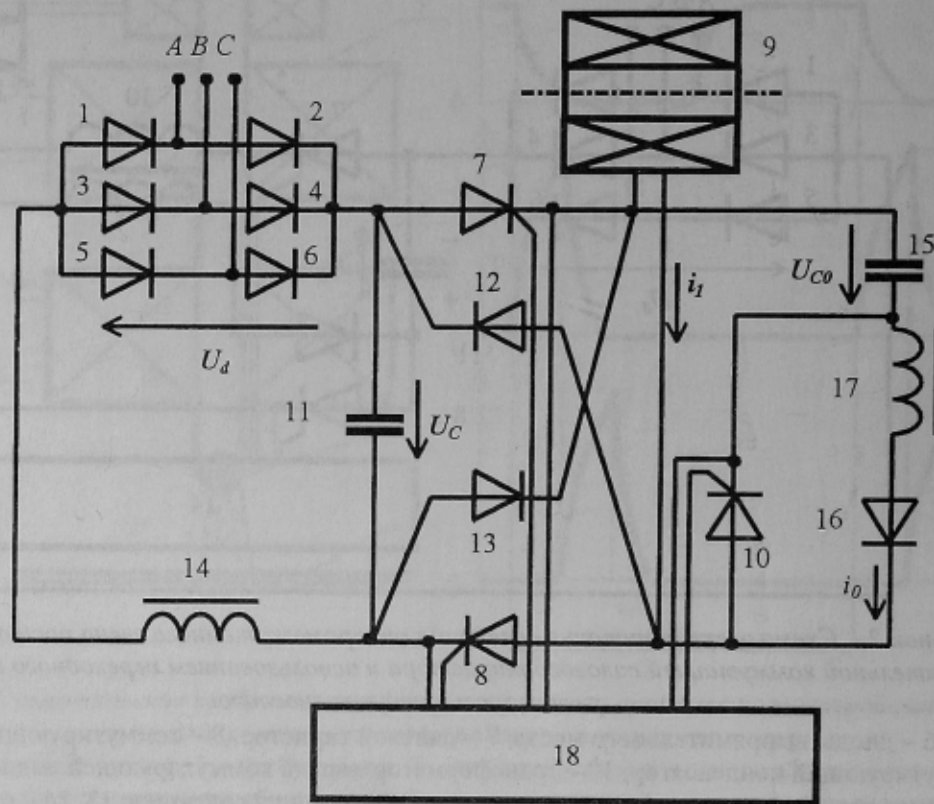


Рисунок 3 - Схема электропитания соленоида от батареи импульсных конденсаторов с рекуперацией энергии магнитного поля индуктора и использованием переходного процесса в цепи с резистором, индуктивностью и емкостью.

1-6 - диоды выпрямительного моста, 7 и 8 - силовые тиристоры включения соленоида 9, 10 - коммутирующий тиристор, 11 - батарея импульсных конденсаторов, 12 и 13 - диоды рекуперации энергии магнитного поля соленоида, 14 - ограничительный дроссель в цепи батареи конденсаторов, 15 - коммутирующий конденсатор, 16 и 17 - диод и индуктивность в цепи коммутирующего конденсатора, 18 - схема управления.

Примерно через четверть периода свободных колебаний этот ток достигает своего максимального значения

$$i_{\max} \cong \frac{U_c}{\omega_0 L} e^{-\frac{\alpha T_0}{4}} \quad (4)$$

Длительность импульса питающего тока не может превышать половины периода затухающих колебаний, то есть,  $t_n < T_0 / 2$ , так как по истечению этого времени тиристоры 7 и 8 самопроизвольно запираются из-за изменения полярности тока.

После открывания силовых тиристоров происходит также колебательный заряд коммутирующего конденсатора 15, причем  $U_{co} > U_c$ .

При подаче управляющего импульса на коммутирующий тиристор 10 происходит запираение силовых тиристоров 7 и 8 напряжением  $(U_{co} - U_c)$ , а ток  $i_1$  соленоида продолжает протекать по цепи диодов 12, 13 и батареи конденсаторов 11. При этом энергия, накопленная в магнитном поле соленоида, возвращается в электрическое поле батареи конденсаторов. Одновременно с этим осуществляется подпитка батареи от источника трехфазного тока. В момент запираения силовых тиристоров 7 и 8 происходит также быстрый перезаряд конденсатора 15 и напряжение  $U_{co}$  меняет полярность.

После уменьшения тока  $i_1$  до нулевого значения диоды 12 и 13 запираются и напряжение  $U_{co}$  противоположной полярности по цепи элементов 15-17-16-9-15 создает в соленоиде ток  $i_1$  противоположного

знака, однако максимальное значение отрицательного тока составляет 7-10% от максимального положительного тока.

Таким образом, за счет использования колебательного переходного процесса в цепи R-L-C крутизна фронта нарастания и спада в импульсе тока соленоида увеличивается в 3-5 раза по сравнению со схемой рис.2 без ёмкостного накопителя энергии. Поэтому схему электропитания с батареей импульсных конденсаторов целесообразно использовать для питания метательных соленоидов, а схему без ёмкостного накопителя – для питания соленоидов дозатора и фиксатора.

Скоростная характеристика дробебетного устройства (зависимость скорости вылета порции абразива от длительности импульса питающего тока метательного соленоида) имеет явно выраженный экстремум [5]. В устройстве с одиночным метательным соленоидом и схемой электропитания рис.3 без батареи импульсных конденсаторов получена максимальная скорость вылета порции 17 м/с. при длительности импульса тока 105 мс.

Анализ кинограмм разгрузочного узла дробебетного устройства показал, что сыпучий ферромагнитный материал вылетает из трубопровода индуктора в виде отдельных порций. Чаще эти порции представляют собой компактные образования цилиндрической формы, вытянутые по направлению движения, реже – рассеянные образования эллипсоидальной формы.

Схема рис.4 с батареей импульсных конденсаторов, формирующая мощные импульсы питающих токов метательных соленоидов длительностью порядка 30-50 мс., позволит достичь максимальных скоростей вылета порций абразива порядка 40-45 м/с. Эта схема уже прошла успешную апробацию при разработке электромагнитных импульсных формовочных устройств для магнитной формовки [6].

#### Выводы.

1. Электромагнитные дробебетные устройства обладают рядом важных преимуществ и могут быть использованы для очистки и улучшения качества поверхности литья, сварных изделий и проката, для очистки котельного оборудования энергетических установок от накипи, для ввода ферромагнитных дисперсных материалов в струю жидкого металла при непрерывной разливке стали и в ряде других технологических процессах.

2. В ДонГТУ разработано электромагнитное дробебетное устройство соленоидного типа с двумя ступенями разгона. Для соленоидов дозатора и фиксатора метательной головки устройства предложена схема электропитания без ёмкостного накопителя энергии, использующая переходный процесс в цепи с резистором и индуктивностью, а для метательных соленоидов – схема с батареей импульсных конденсаторов и переходным процессом в цепи с резистором, индуктивностью и ёмкостью.

3. В схеме электропитания индуктора дробебетного устройства предусмотрены регулирование скважности импульсов тока каждого соленоида и возможность их взаимного смещения во времени. Длительность импульсов токов метательных соленоидов может достигать 10-15 мс. с шагом регулирования 1-2 мс.

4. Максимальная скорость абразивного материала в электромагнитном дробебетном устройстве с одной ступенью разгона и схемой электропитания без ёмкостного накопителя энергии составляет 17 м/с., а в устройстве с применением батареи импульсных конденсаторов она может достигнуть 40-45 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гривнев Ю.Г. и др. Применение электромагнитных полей в дробебетных устройствах. Литейное производство. –1980, №10. - с.24-25.
2. Панасюк Л.С. и др. Устройство для ввода ферромагнитных дисперсных материалов в струю жидкого металла. Авт. свид. №499039. М. кл. В22Д. Бюл. инф. №2, 1976. – 5с.
3. 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.
4. Эсауленко В.А. Исследование движения ферромагнитных сыпучих материалов в электромагнитных устройствах соленоидного типа под воздействием волновых силовых полей постоянной скорости. Тезисы докладов всесоюзного симпозиума по МГД – электроприводу. Таллин. 1981. – с. 95-97.
5. Эсауленко В.А., Черников В.Ю., Курносов В.Н. Экспериментальные исследования скоростных характеристик электромагнитного дробебетного устройства с одиночным соленоидом. Донецкий политехнический институт. Донецк. 1985. Деп. в УКРНИИТИ, Ук-85, №2363.-7с.
6. Эсауленко В.А., Черников В.Ю., Корощенко В.А. Разработка и исследования электромагнитного импульсного формовочного устройства с магнитотвердым формовочным материалом. Сборник трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, 1999. – с.249-252.