
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Поступила в редакцию 28.12.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_74

УДК 621.314

А.И. Серов, Е.Ю. Титов, Д.Ю. Титов, Д.А. Усачев

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предлагается схемное решение регулируемого высоковольтного преобразователя для плазмохимического реактора. Описаны условия проведения процесса. Разработана и реализована схема высоковольтного преобразователя напряжения, обеспечивающего плазмохимический процесс. Предложен и исследован простой и надежный релейный алгоритм управления силовым ключом регулятора напряжения. Оценено влияние частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения на время нарастания высоковольтного напряжения на выходе умножителя напряжения.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь, плазмохимия, электрические разряды.

1. Введение

В современной мировой нефтепереработке существует комплекс актуальных проблем, которые невозможно решить традиционными способами. Например, существующие методы переработки углеводородного сырья требуют высоких температур, давлений, применения дорогостоящих катализаторов [1, 2]. Этим обусловлено создание установок, характеризующихся исключительной металлоемкостью, громоздкостью. Поэтому требуется поиск новых более эффективных и компактных способов обработки нефтяного сырья, основанных на новых принципах воздействия на перерабатываемые вещества. В качестве инновационных решений могут выступать методы экстремального воздействия на нефтяное сырье.

Одним из экстремальных методов инициирования химических реакций является электрический разряд в жидкости [3]. Воздействие электрического разряда, которое протекает самостоятельно, индуцирует протекание сопряженной реакции трансформации субстрата, которое не осуществляется без развития первого процесса – электрического разряда. Таким образом, электрические разряды выступают в качестве индуктора – актора, инициализирующего превращение субстрата [4].

Активирование органических веществ происходит за счет воздействия импульсными электрическими разрядами на субстрат. Можно задать расстояние между электродами внутри реактора, которое обеспечит электрический пробой при определенном напряжении. Во время процесса происходит накопление продуктов в реакционном объеме, которые вызывают изменение электрической прочности реакционной смеси, что приводит к изменению напряжения пробоя. Снижение напряжения пробоя приводит к зажиганию электрической дуги. Электрическая дуга является концентрированным источником тепла, что приводит к росту температуры внутри реактора, а дальнейшее превращения субстрата связано с воздействием на него температуры. При искровом разряде возникают быстро исчезающие нитевидные искровые каналы, заполненные плазмой. Время существования разряда малое, нагрева всего реакционного объема не происходит, что позволяет предсказать и стабилизировать воздействие плазмы на характер превращений. При проведении исследований направлений превращений субстрата требуется оценить влияние напряжения на интенсивность превращений химических веществ, поэтому одним из требований к преобразователю является возможность регулирования выходного напряжения.

Плазмохимия в основном развивается в направлении совершенствования и повышения эффективности методов генерирования неравновесной плазмы с использованием высоковольтных источников [5]. В работе представлены схема и алгоритм управления регулируемого высоковольтного преобразователя, которые обеспечивают максимально возможную производительность лабораторной установки.

II. Структура преобразователя

Структурная схема регулируемого высоковольтного преобразователя представлена на рис. 1. Показаны: ПЧ – преобразователь частоты; В – выпрямитель; Ф – фильтр в звене постоянного тока; РН – регулятор напряжения; АИН – автономный инвертор напряжения; УМ – умножитель напряжения; Р – реактор; К – полупроводниковый ключ. Наличие ключа К обеспечивает требуемый характер воздействия на субстрат. Коммутация ключа К происходит при заданных значениях напряжения, что приводит к возникновению искрового разряда внутри реактора.

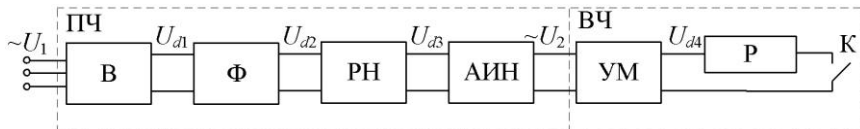


Рис. 1. Структурная схема регулируемого высоковольтного преобразователя

В приведенной схеме можно выделить два основных компонента: преобразователь частоты (ПЧ) и высоковольтная часть (ВЧ). Элементы схемы преобразователя частоты последовательно преобразуют исходное переменное напряжение U_1 в постоянное U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} соответствующего уровня и формы и, наконец, в переменное напряжение U_2 , необходимое для работы емкостного умножителя напряжения. Последний обеспечивает необходимый для образования искры уровень напряжения U_{d4} .

Блок регулятора напряжения РН позволяет регулировать напряжение в диапазоне от 0 до U_{d3} согласно:

$$U_{d3} = k_{\text{РН}} \cdot U_{d2} = k_{\Phi} \cdot k_{\text{РН}} \cdot U_{d1} = k_{\text{П}} \cdot k_{\text{РН}} \cdot U_1, \quad (1)$$

где U_{d3} – напряжение на выходе регулятора напряжения; $k_{\text{РН}}$ – коэффициент преобразования; k_{Φ} – коэффициент фильтрации; U_1 – действующее значение сетевого напряжения. Выражение (1) показывает, какие параметры влияют на величину выходного напряжения.

Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты показана на рис. 2. Неуправляемый выпрямитель может быть как однофазным, так и трехфазным. Преимущество использования трехфазного выпрямителя заключается в том, что в звене постоянного тока напряжение достигает 530 В, что увеличивает максимальное напряжение на выходе умножителя напряжения в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с однофазной схемой выпрямления. РН регулирует напряжение на конденсаторе Cf_2 в диапазоне от 0 до 530 В. Алгоритм работы РН релейный: с помощью датчика напряжения ДН измеряется напряжение на Cf_2 , которое сравнивается с заданным напряжением. Если напряжение на Cf_2 меньше заданного, то открывается ключ VT_1 , если больше – ключ закрыт. Зарядный резистор Rz ограничивает ток заряда конденсатора Cf_2 .

Принципиальная электрическая схема высоковольтной части показана на рис. 3. Напряжение на выходе умножителя можно определить согласно [6]:

$$U_{d4} = (2n - 1) \cdot U_{d3}. \quad (2)$$

В (2) отсутствует падение напряжения, вызванное протеканием тока искровой нагрузкой. Напряжение U_{d4} нарастает до момента коммутации ключами VT_1 - VT_m в заданные моменты времени, которые необходимо определить для организации плазмохимического процесса.

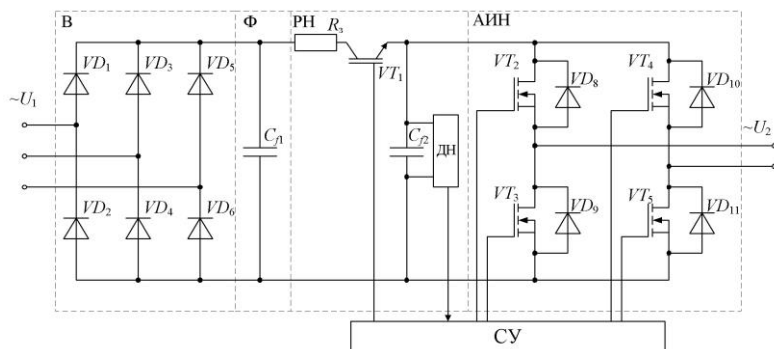


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты

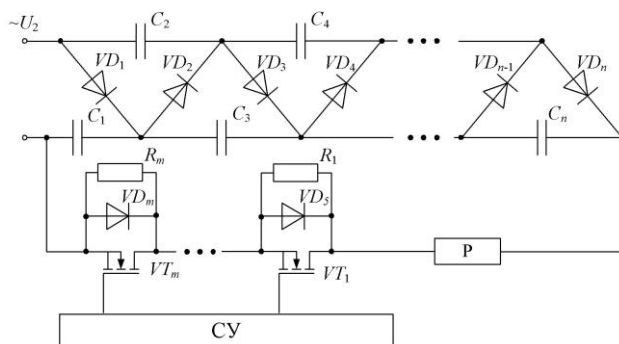


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема высоковольтной части

III. Моделирование

Модель регулируемого преобразователя, разработанная в Matlab Simulink, показана на рис. 4.

Производительность плазмохимического реактора связана с количеством разрядов в единицу времени, которое может обеспечить высоковольтный преобразователь. Результаты моделирования показывают, что наибольший вклад во время заряда конденсаторов умножителя вносит частота коммутации ключей автономного инвертора напряжения. На рис. 5 показаны графики изменения выходного напряжения умножителя в зави-

симости от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения. Хотя производительность пропорциональна частоте искрообразования, период между последовательно образуемыми искрами должен быть достаточным для релаксации активированных реагентов. Наряду с этим, отводятся продукты реакции и снижается температура в зоне реакции.

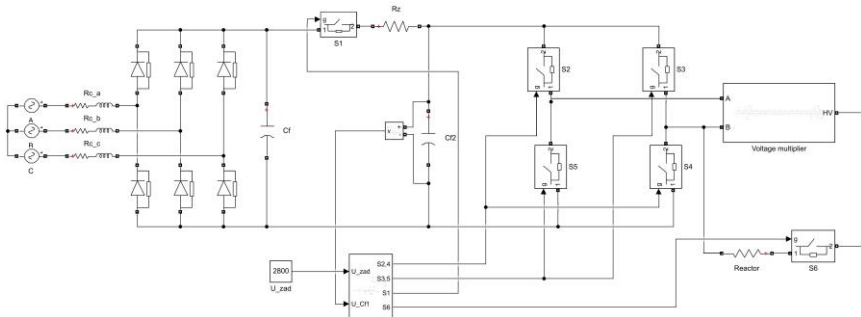


Рис. 4. Модель регулируемого высоковольтного преобразователя

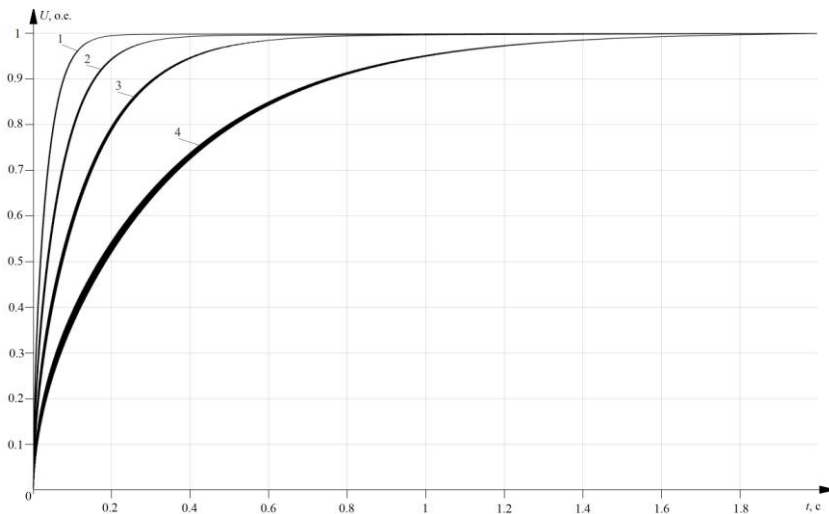


Рис. 5. Изменение выходного напряжения (о.е.) умножителя напряжения в зависимости от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения:

1 – частота коммутации 10 кГц; 2 – 5 кГц; 3 – 2,5 кГц; 4 – 1 кГц

По кривым, показанным на рис. 5, определен параметр переходного процесса – время нарастания напряжения $U_{дн}$. Зависимость времени нарастания

тания выходного напряжения от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения показана на рис. 6. Эта характеристика слабо зависит от изменения емкости конденсаторов в умножителе. Так при изменении емкости конденсаторов в умножителе напряжения в 100 раз время нарастания практически не изменилось.

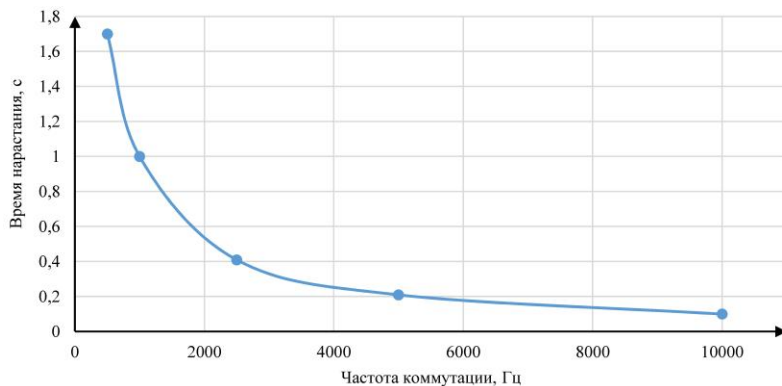


Рис. 6. Зависимость времени нарастания выходного напряжения от частоты коммутации ключей автономного инвертора напряжения

Разработан лабораторный макет высоковольтного преобразователя (рис. 7), который позволяет регулировать напряжение до 9 кВ при потребляемой мощности до 50 Вт.

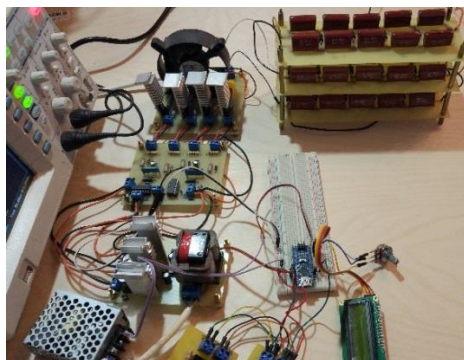


Рис. 7. Лабораторный макет регулируемого высоковольтного преобразователя

IV. Заключение

Предложен подход к параметризации регулируемого высоковольтного преобразователя. На основе компьютерной модели регулируемого высоковольтного преобразователя определены параметры алгоритма формирования сигналов управления автономного инвертора напряжения, обеспечивающего посредством регулирования частоты выходного напряжения возможность настройки нужного времени плазмохимической реакции, зависящего от исходных веществ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента № МК-16.2020.8.

© Серов А.И., 2020
© Титов Д.Ю., 2020
© Титов Е.Ю., 2020
© Усачев Д.А., 2020

Библиографический список

- [1] Sahu R., Song B.J., Im J.S., Jeon Y.P., Lee C.W. A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. Vol. 27. С. 12-24. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
- [2] Lappas A.A., Iatridis D.K., Papapetrou M.C., Kopalidou E.P., Vasalos I.A. Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors // Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 278. С. 140-149. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.092.
- [3] Бугаенко Л.Т. Способы передачи энергии в химии экстремальных воздействий // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35. № 5. С. 532-533.
- [4] Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая Школа, 1984. – 463 с.
- [5] Гольдорт В.Г., Ищенко В.Н., Рубцова Н.Н. Мощные высоковольтные источники постоянного тока с высокочастотным преобразованием // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 33-38. DOI: 10.1134/S0032816219020101.
- [6] Рогинский В.Ю. Электропитание радиоустройств. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 363.

A.I. Serov, E.Yu. Titov, D.Yu. Titov, D.A. Usachev

ADJUSTABLE HIGH VOLTAGE CONVERTER FOR PLASMA CHEMICAL REACTOR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article proposes a schematic solution of an adjustable high-voltage (HV) converter for a plasma-chemical reactor. The conditions of the process are described. A circuit of a HV voltage converter providing a plasma-chemical process has been developed and implemented. A simple and reliable relay algorithm for controlling the power switch of the voltage regulator is proposed and investigated. The influence of the switching frequency of the switches of an autonomous voltage inverter on the rise time of the HV voltage at the output of the voltage multiplier is estimated.

Keywords: electrical discharges, high-voltage converter, plasma chemistry.

References

- [1] R. Sahu, B.J. Song, J.S. Im, Y.P. Jeon and C.W. Lee, “A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 27, pp. 12-24, July 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
- [2] A.A. Lappas, D.K. Iatridis, M.C. Papapetrou, E.P. Kopalidou and I.A. Vasalos, “Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 278, pp. 140-149, Oct. 2015. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.092.
- [3] L.T. Bugaenko, “Sposoby peredachi energii v khimii ekstremal'nykh vozdeystviy” [Methods of energy transfer in the chemistry of extreme effects], *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva* [Journal of the All-Union Chemical Society named after I. D.I. Mendeleev], vol. 35, no 5, pp. 532-533, 1990 (in Russian).
- [4] N.M. Emanuel and D.G. Knorre, *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Chemical kinetics course]. Moscow: Higher School, 1984 (in Russian).
- [5] V.G. Goldort, V.N. Ishchenko and N.N. Rubtsova, “Powerful high-voltage DC power sources with high-frequency conversion”, *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 62, no 2, pp. 169-174, 2019. DOI: 10.1134/S0032816219020101.
- [6] V.Yu. Roginsky, *Elektropitaniye radioustroystv* [Power supply for radio devices]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963 (in Russian).